

西北师范大学

硕士学位论文

敦煌绿洲胡杨林土壤水盐特征研究

姓名：李慧芳

申请学位级别：硕士

专业：自然地理学

指导教师：刘普幸

2008-06

摘 要

植被和生态环境相互关系的研究一直是植物生态系统的重要内容,荒漠区植物群落和生态环境关系的研究将更好地阐明荒漠区生态环境状况和环境因子影响生态环境的变化趋势。作为荒漠区植被地下生境的关键因子,土壤水分与盐分的研究越来越多的受到学者的重视与关注。敦煌绿洲地处我国西北内陆,西与库布塔格沙漠接壤,是甘肃省内生态环境最脆弱的县市之一。近些年来,天然植被退化严重,沙尘暴频发,已经严重危害到人民生命财产的安全和社会经济的发展。植被生长环境特别是绿洲外围天然植被生长环境的研究与保护已迫在眉睫。本文以敦煌绿洲西湖国家级自然保护区胡杨林生长区域土壤为研究对象,采用定性与定量方法相结合、传统统计学与地统计学方法相结合的方式,对胡杨林下不同土层土壤水分、盐分和其它土壤特性之间以及不同胸径的胡杨林下土壤特性进行了分析研究。本文拟对敦煌绿洲自然保护区自然植被的保护与重建、绿洲水资源的合理开发与利用提供科学依据。为敦煌绿洲乃至我国西北地区生态环境恢复与建设,区域可持续发展提供参考和借鉴。论文共分为以下五部分。

第一部分首先阐述了选题背景及国内外土壤水盐的研究进展,在此基础上,论述了选题依据、研究意义及研究的理论与方法。

第二部分概述了敦煌绿洲及西湖自然保护区地理概况、生态环境状况及野外采样与室内实验方法。首先,从地貌、水资源、气候、植被、土壤和生态环境等方面简述了敦煌绿洲的自然地理环境;从行政区划、人口等方面简述了该绿洲的社会经济状况;从地理位置、规模面积等方面简述了西湖自然保护区概况。其次,详细介绍了野外采样及室内实验的具体时间、方法及采用的仪器设备。

第三部分通过室内土壤实验结果,对敦煌绿洲胡杨林下土壤水盐进行传统统计学分析。首先,对土壤水分、盐分及其它五种土壤特性的最大值、最小值、变异程度等实验数据基本特征进行统计对比,揭示其基本规律,并探讨其原因。其次,采用相关分析方法,分析各个土壤特性之间的相关关系。

第四部分对敦煌绿洲胡杨林下土壤水盐及其它土壤特性进行空间异质性分析。本章节采用目前较为流行的地统计学方法对土壤水分、盐分等土壤属性进行空间异质性分析,并对三个采样区域六个深度土层的土壤水分与盐分进行空间插值,得出空间插值拟合分布图。

第五部分总结全文,针对论文中存在的不足,提出未来有待进一步深入研究的方向。

关键词: 敦煌绿洲; 胡杨林; 土壤水分; 土壤盐分; 空间异质性

Abstract

The research on relationship between the vegetation and eco-environment is an important part of the plant ecosystem, and then the study on relationship between the desert communities and eco-environment can be better articulated the changed trends between the conditions and factors of eco-environment. Soil moisture and salinity are getting more and more attended and concerned by more scholars because they are the critical factors of underground habitats of desert vegetation. Dunhuang Oasis, located in Northwest of China, linked in Kumutage desert border with the West, is the most ecological fragile environmental city in Gansu. Recent years, the serious degradation of natural vegetation and frequencies of the dust storms have been harm to the safety of people's lives and property and social economic development. The study and the protection on the growth environment of vegetation, especially the growth in around of oasis has been imminent. This paper researched on the *Populus euphratica*'s soil in Xihu national nature reserve of Dunhuang Oasis, used qualitative and quantitative methods of combination, the traditional and geostatistics statistical methods. Those methods have been used to analyze the Water and salt, including other soil properties which are different layers and different DBH of the growth region soil of *Populus euphratica*. This paper gives us a scientific basis for protection and reconstruction of nature vegetation and the building of protected areas in Dunhuang Oasis, and also gives us references of the protection of the ecological environment of Dunhuang Oasis and northwest of China and regional sustainable development. It was divided into the following five sections.

The first part has explained the research background and the current research on the moisture and salinity home and abroad. At this theoretical

Explained the theoretical basis and rational of the present research and the research methodology.

The second part provides an geographic profile and ecological environmental of conditions of Dunhuang Oasis and the Xihu Nature Reserve, and also provides the field sampling and laboratory methods. First, outlining the natural environment of Dunhuang Oasis that included topography, water resources, climate, vegetation, soil and ecological environment and so on. This is followed by a survey of the social economic situation in the research area from such respects as administrative regionalization, population, etc. And a

survey of the Xihu Nature Reserve has been followed that about location and size and so on. Secondly, introduction to the time, equipments, methods about laboratory and field sampling.

The third part uses the methods of traditional statistics to analyze the soil moisture and salinity under the *Populus euphratica* in Dunhuang Oasis .First, Comparing the experimental data for the maximum, minimum, the extent of variation of soil moisture and salinity and other characteristics to find the basic law and explored its causes. Second, using correlation method to analyze soil characteristics.

The forth part analyzes the spatial heterogeneity of soil characteristics under the *Populus euphratica* in Dunhuang Oasis. This section is used the geostatistical methods on soil moisture, soil salinity, and other attributes, which are more popular in some studies. And also analyzed spatial interpolation for soil moisture and soil salinity of six different layers. At last we received the fitting distribution photograph of spatial interpolation

The last part has summarized the whole thesis. In accordance with the deficiency existing in this research, the thesis has pointed out the respects to be further investigated.

Keywords: Dunhuang Oasis, *Populus euphratica* , soil moisture, soil salinity, spatial heterogeneity

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包括其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得西北师范大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签名：_____ 日期：_____

关于论文使用授权的说明

本人完全了解西北师范大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：_____ 导师签名：_____ 日期：_____

1. 绪论

1.1 选题背景

世界人口的激增和科学技术的巨大进步使得人类以前所未有的规模和速度改变着生存环境。由于人类活动直接或间接造成的，出现在全球范围内的，异乎寻常的人类生态环境的变化，就是当今科学界、各国政府及公众广泛关注的全球变化。生态系统特别是陆地生态系统的变化近年来成为全球变化的重要领域。国际地圈生物圈计划(IGBP)将全球变化与陆地生态系统(GCTE)列为该组织的重点研究项目^[1]。

荒漠区是地球上可供人类生存和发展的最具扩大潜力和充满希望的陆地生态系统，其丰富的水、土、光热和矿藏资源，在世界经济发展中所占的份额将会越来越重。而干旱地区荒漠化过程的不断发展，荒漠化危害的日益加重对人类生存环境的威胁越来越大，已成为国际社会密切关注和忧虑的焦点^[2]。荒漠区天然植被作为荒漠区生态系统中的重要组成部分，是生态系统的主要生产者，是自然环境最直观反映，在抑制荒漠化过程和保护生物多样性等方面有着重要意义。植被和生态环境相互关系的研究一直是植物生态系统的重要内容，荒漠区植物群落和生态环境关系的研究将更好地阐明荒漠区生态环境状况和环境因子影响生态环境的变化趋势。作为荒漠区植被地下生境的关键因子，土壤水分与盐分的研究越来越多的受到研究者的重视。

我国西北干旱区荒漠广布，植被覆盖度低，生态系统脆弱，由于历史和自然的双重原因，今天西北地区的生态环境问题颇为突出。生态环境的支持能力或是安全状态，越来越成为国家安全系统的重要基础，直接关系着一个国家经济社会的可持续发展能力和国际竞争能力，是具有明显战略性的重大问题。

敦煌绿洲地处我国西北内陆，西与库布塔格沙漠接壤，是甘肃省生态环境最脆弱的县市之一。近些年来，天然植被退化严重，沙尘暴频发，已经严重危害到人民生命财产的安全和社会经济的发展。植被生长环境特别是绿洲外围天然植被生长环境的研究与保护已迫在眉睫。

1.2 国内外土壤水盐研究进展

随着土壤学的不断发展与进步，人们逐渐认识到土壤盐渍化与土壤次生盐渍化的形成机理及其对土壤生态系统的危害和胁迫，由此已展开一系列的土壤水分与盐分的研究。

1.2.1 国际土壤水盐研究进展

1.2.1.1 土体中水盐运动机理研究

土体中水盐运动理论研究起源于 Darcy 定律, 而固体热传导方程的问世为土壤溶质运移提供了依据。早在 1905 年, Slichter 就曾指出, 在土壤中溶质并不是以相同速率移动的。Richards 用偏微方程描述非饱和土壤水的运行, 建立了多孔介质中水流运动的基本方程, 开始了土壤水分的定量研究。由于盐分运移与土壤水分运移共同发生, 因此, 土壤溶质运移方程也随土壤水分方程而发展起来。Mactin 和 Synge 提出的色层分离理论进一步说明了不同溶质通过多孔介质时运动速率的差别。Gardner 与 Bresler 对土壤与溶质间的相互作用进行了广泛评论。他们认为在土壤溶质的运移过程中, 扩散和对流过程可以同时出现或以相同方向或相反方向发生, 并根据费克(Fick)第一定律导出了一维土壤溶质运移方程。Bresler 总结了有关盐分运动的原理和模型, 代表当时国际上在盐分运移方面的主流观点和研究动向^[3]。Kosmas 等对土壤有机钠盐的过滤和水力传导性作了研究^[4]。Annandale 等模拟了含石膏水灌溉下的土壤和土壤水的运移特征^[5]。Lange 等对挪威森林土壤水分中铝元素运移进行了研究^[6]。

1.2.1.2 田间水盐动态变化特征研究

生产实际中存在的排水、灌溉、盐碱地改良问题促使着水盐运动的研究转向田间。Bresler 等学者经研究发现: 田间模拟计算结果与实际观测结果相差甚远, 特别是对非饱和流土壤水盐运动的研究结果更是如此。Biggar 等的大量研究工作充分说明, 土壤空间变异对田间水盐动态变化的影响极大。Grove 与 Stollenwer 对地下水盐分运移化学过程变化作了系统总结^[3]。Andreu 等对水分运动和虑盐水在灌溉湿地土壤中应用 MACRO 模型进行了模拟^[7]。Annandale 通过对含石膏矿物水灌溉露天采矿土地恢复作用的研究, 探讨了农作物, 土壤水分和盐分的平衡问题^[8]。Ritchie 发现在供水系统稳定供水的情况下, 农作物对水的利用率不是没有变化的^[9]。

1.2.1.3 区域土壤水盐变化规律研究

1930 年, Tepacmog 提出了利用水盐平衡研究法预报地区水盐动态模式。经过许多人的研究, 使这种方法不断完善。1978 年 Szabics 提出了水盐平衡计算公式^[3]。Inouchi 等探讨了狭窄海岸带含水层淡水和盐水分解区域的不稳定性^[10]。Shiati 以伊朗南部盆地为例讨论了河流盆地的盐化管理方法^[11]。Mehta 等研究了美国南部德克萨斯州区域尺度盐化作用对土壤含水层的影响^[12]。Jolly 等研究了盐水灌溉排水对区域整体规划的影响^[13]。Herrero 等做了半干旱区域大水漫灌地和喷灌地的土壤调查^[14]。

1.2.1.4 植被生长区域土壤水盐研究

国外在这方面的研究主要集中在海岸、河岸等湿润区域的植被, 其中对于红树林生

态系的研究尤其突出。Paijmans 等对巴布亚新几内亚红树林区土壤盐分进行研究,发现土壤表层盐分从开阔地的 9%左右降低到河口低潮地的 1%-3%,但到地下 4m 时,明显增加到了 20%-26%^[15]。Greenwood 等连续发表文章讨论通风箱技术在研究植被蒸发对土壤次生盐渍化影响中的应用^[16]。Ritchie 研究了半干旱区防风林种植的有关问题,认为防风林的选种、种植都要充分考虑区域的土壤性质,否则会加重土壤盐渍化,破坏本来就脆弱的生态系统^[17]。Bari 等发现西澳大利亚桉树林会使原本劣质的浅层地下水更加恶劣^[18]。Thorburn 等采用蒸发测定和水中同位素测定相结合的方法进行森林地下水出流研究^[19]。Rogers 等研究了植被根部及根围区域对大气环境中 CO₂ 增加的响应^[20]。Slavich 等采用根区洪水历史加权平均指数评价洪水对盐性漫滩植被的影响^[21]。Álvarez Rogel 等研究了地中海半干旱区盐沼土壤特性和土壤离子成分对植物分布的影响^[22]。Ghalay 通过在埃及北部两年的实验研究发现天然植被(芦苇和黍)对减轻盐碱化土壤的面积相当于采用各种工程技术方法之和^[23]。Fernández-Buces 等利用光谱测定和土壤特性相结合的办法绘制土壤盐分分布图^[24]。Ladenburger 等研究了美国怀俄明州桉柳生长区土壤特性,结果表明盐分在表层最大,pH 值在表层最小^[25]。Saleh 等利用 L 波段辐射线测定了草地覆盖下的土壤表面水分^[26]。Álvarez-Rogel 等对西班牙东南的半干旱地区盐沼土壤的地下水位、微地貌和植被覆被间的关系进行了研究^[27]。

1.2.2 国内土壤水盐研究进展

1.2.2.1 土体中水盐运动机理的研究

国内对土体水盐运动的研究始于 1960 年,高明珠利用“土壤溶液法”及“土壤水浸提液”法对盐渍土中可溶盐的动态和浓度^[28]的研究标志着国内对土体水盐运动研究的开始。大量的研究则从 1980s 开始,学者们研究的问题主要集中在不同条件下(蒸散条件、灌溉条件、入渗条件等)土体中水盐运动的规律。李韵珠和刘亚平分别对非稳定蒸发与稳定蒸发条件下土壤水盐运动进行了研究^[3]。刘福汉等以全剖面轻壤土、夹粘轻壤土和表层粘土土柱进行室内模拟试验,研究在不同潜水位蒸发条件下土壤水盐运动^[29]。曹红霞通过室内土柱试验,对不同灌溉制度条件下土壤溶质迁移规律及其数值进行了模拟^[30]。史文娟针对我国西北地区土壤剖面多呈层状和春季强烈反盐季节土壤多处于裸露状态的特点,研究了蒸发条件下夹砂层土壤水盐运移规律及其迁移机制^[31]。邓友生等在室内用水平土柱吸渗法对不同含盐量、不同溶液浓度和不同土类的土壤水扩散系数进行了实验研究^[32]。

1.2.2.2 田间土壤水盐变化规律研究

国内在田间水盐运动规律方面的研究始于上世纪七十年代末八十年代初,针对不同

的灌溉制度、作物类型与发育阶段、不同土体结构与地形、不同覆盖条件等因素与土壤水盐的相互作用展开探讨。

(1)不同灌溉制度下的土壤水盐研究

由于水资源日益短缺，人们开始开发除淡水资源以外的其它水资源，所以有关咸水灌溉的研究相应发展起来。通过对咸水灌溉区域的水盐动态监测、室内实验模拟发现，适时适量的咸水灌溉不会加重土壤盐渍化程度，可以有效缓解区域水资源短缺的矛盾。但也有持反对意见的，认为长期微咸水灌溉有恶化土壤化学性状、物理性状的趋势，土壤表层聚盐、氯钠离子比例提高、土壤初始入渗率逐年降低，短期灌溉还能破坏土壤水稳性团聚体^[33]。

随着节水技术的实施，精准农业的发展，滴灌技术广泛应用于国内，相应的研究也随之而起。滴灌条件下土壤水盐运移实质上是点源水盐运移，点源水盐运移研究包括点源的水分运移和盐分运移。滴水灌溉技术是干旱区解决水资源短缺问题的一项较为先进的技术，众多的研究也表明应将其广泛推广与使用。

(2)农作物对土壤水盐的影响研究

不同植物类型、种植密度、不同土壤质地、不同潜水埋深条件下，种植作物与土壤水盐的相互影响不尽相同。种植作物通过根系生长，改善土壤物理性状、减少地表积盐量、延缓土壤次生盐渍化产生；而土壤水盐反过来又制约和影响作物生长。八十年代初刘念祖、黄友宝作了津东贯地区在土壤盐分和地下水动态与小麦保留的研究。王学峰等通过土柱模拟试验及数值模拟计算，探讨了灌溉淋洗需要量的确定方法，并初步给出了不同作物苗期及生育期的灌溉淋洗需要量。肖振华等探讨了节水灌溉与作物生长对土壤水盐动态的影响。李国振通过 1995 年、1996 年在阿克苏水平衡试验站对不同种植作物的土壤水分、盐分取样分析，研究干旱区土壤盐分特征^[34]。徐力刚等通过对作物种植条件下土壤水盐动态变化规律的研究，为土壤水盐运移模型的建立及盐渍化预测预报提供了依据^[35]。

(3)微地形与地下水对土壤水盐的影响研究

平原地区地势平坦、低洼，地表与地下径流丰富，排水不畅容易造成积水。随着水分被蒸发，盐分聚集，造成土壤盐渍化，因此局部地形及地下水位影响下的水盐运动研究也就从未停止。王应求等在山东陵县实验区作了背河洼涝盐渍土的水盐运动规律研究。夏增禄讨论了岗、坡、洼地土壤水盐的集散^[36]。裴钟源等通过盐分传感器对背河洼地土壤水盐动态实地定点、定时测定，获得土壤含盐量的季节性变化规律^[37]。高瑾等探讨了地下水埋深与土壤水盐的相关关系^[38]。

(4)不同覆盖条件下土壤水盐运移研究

抑制盐分聚集,可以采用表层覆盖方法,覆盖能减少土壤水分蒸发,减轻土壤表层的盐化程度,从而达到改良盐渍土,遏制土壤次生盐渍化产生,促进作物生长的目的。可以作为覆盖物的有秸秆、塑膜、草炭等,作物本身也是一种覆盖物。张振华等通过田间和盆栽试验,研究了江苏沿海地区覆盖对轻度盐渍土水盐运动和大麦产量的影响^[39]。邓力群等利用田间小区实验研究了山东莱州半干旱海水入侵地区不同覆盖措施对土壤水盐热运动及作物生长的影响^[40]。虎胆·吐马尔白等对秸秆覆盖条件下,土壤水盐运动进行数值模拟,分析了该条件下土壤水盐运动规律^[41]。

(5)土壤空间变异研究

土壤空间变异的研究目的是定量说明土壤组成、性质和水盐运动参数空间分布规律。土壤是不均一和变化的连续体,田间实际情况表明,即使在土壤质地相同的区域内,同一时刻土壤特性值(物理化学、生物性质等)在不同空间位置上也具有明显差异。土壤特性空间变异性的研究,即将土壤特性值的空间变异复杂性定量化,开展这项研究,不仅能改进或创新土壤分类系统,提高土壤调查、制图及田间小区试验精度,并为确定田间合理取样尺度和取样数目,为土壤过程的预测、模拟更接近农田土壤变化的实际情况提供有效途径;它能将空间作用在土壤以及土壤--作物复合系统中各因子上的不同作用更形象生动、更深入地呈现在人们眼前,使人们能够更好地理解空间作用对土壤作物关系的重要性,而这些信息的定量化正是精确农业开展、实施不可或缺的基础资料和理论依据^[3]。我国的空间变异研究起步较晚,目前研究主要集中于土壤物理特性的空间变异研究,而土壤化学特性的空间变异研究较少。

1.2.2.3 区域土壤水盐变化规律研究

我国区域水盐运动的研究在 20 世纪 80 年代之前较少且大多是对某个区域水盐状态、形成原因的定性描述。八十年代以后,区域水盐运动研究逐渐兴起,并开始由定性描述转向定量分析。各地通过建立试验区,对研究区的水盐运动进行监测、模拟。夏增禄研究了华北平原土壤的水盐动态,提出了有效控制旱、涝、盐碱灾害的措施。王保真等对疏勒河流域冻结期土壤水盐动态指标进行了观测^[42]。李新等利用塔里木河上游灌区阿克苏水平衡站的有关试验观测资料,对绿洲农田地下水、土壤中水和盐的运动及植物耐盐性进行对比分析,总结了土壤水盐运动的某些规律^[43]。周智彬等立足于几年来对绿地土壤水盐的连续观测资料,对水盐动态规律进行了总结,认为沙漠腹地长期利用高矿化度水灌溉,并不会造成土壤大面积积盐^[44]。张立新等基于冻融作用对水盐迁移驱动力和土壤结构等参数的影响,分析了冻融作用下景电灌区水盐重分布的综合特征^[45]。赵丹

等根据甘肃省河西走廊疏勒河流域灌区节水灌溉条件下的土壤水盐变化野外和室内实验成果分析,建立了相应的水盐动态模拟数学模型,得出在一定的灌溉方案下的土壤盐分分布状况以及脱盐状况^[46]。

1.2.2.4 植被生长区域的土壤水盐变化研究

各种植被覆盖条件下的土壤水盐特征在我国各地均有相关研究,主要集中在以下三个区域。

(1) 干旱区植被生长区域的土壤水盐特征分布研究

我国西北地区荒漠广布,植被种类稀少,覆盖度低,生态环境脆弱,如何保护、建设西北地区生态环境一直是国家发展建设过程中的重点问题。因此,有关西北干旱地区植被生长区域土壤水盐特征及其运移规律的研究相对较多,分别从以下三个方面展开。

植被群落的分布与土壤水分、盐分及其它物理性质都有着十分密切的关系,土壤水分、盐分是影响植被种群特征,生长的重要因素。赵万羽等对河西半荒漠驴驴蒿草原三个草地型(驴驴蒿型、驴驴蒿-红砂型、驴驴蒿-珍珠型)的土壤水盐动态及其与牧草产量的关系进行了研究,表明:土壤水分变化受雨量的影响具有阶段性,随着土壤深度的增加,土壤含水量随时间的变化而变小,土壤各层内,春季含水量相近,并呈下降趋势,夏季变化大,秋冬则随土壤深度增加而增加,趋向稳定。盐分随水分而移动,其含量基本上随土壤深度的增加而增加。牧草产量的变化与土壤水分的变化具有“一致性”,在驴驴蒿型和驴驴蒿-红砂型中,驴驴蒿的绝对生长量与0-40cm内各土层的含水量呈显著的正相关^[47]。李卫军等在北疆平原荒漠区呼图壁种牛场对不同生态环境中芦苇的形态、生长发育、生态适应性及其环境中土壤水盐特点进行了研究,结果表明决定不同生长型芦苇的主要因素是环境中的土壤水、盐条件及过度利用^[48]。张希明等对新疆策了绿洲胡杨在灌溉前后水分生理特性变化进行了研究^[49]。张林静等的研究表明土壤pH值,全盐量,Cl⁻,K⁺,Na⁺,Mg²⁺,土壤有机质,全N和速效P与物种多样性有显著相关关系^[50]。胡旭等结合油蒿生物量的空间异质性分析认为,土壤水分的空间异质性并不总能够影响植物生物量的空间异质性^[51]。

地下水水盐条件制约着植被分布、生存和演替,各种植被类型适应不同的地下水位和盐分特征。莫治新等对塔里木河中下游主要的10个植物群系下的土壤盐分、地下水理化特征与群系最大盖度进行了相关分析和回归分析^[52]。付爱红等结合塔里木河下游英苏与阿拉干两个断面距河道50m、100m与200m处胡杨茎水势的测定资料,对胡杨茎水势进行均值比较与检验分析^[53]。

不同荒漠植被类型、相同植被不同生长期的土壤水盐运移也有规律可循。肖明等通

过3年对土壤水盐动态(1m土壤含盐量、潜水埋深和矿化度)的定位定点监测,系统地划分出水盐等级指标,并结合草地调查,阐述了不同草地类型与水盐状况的关系,将新疆呼图壁草地生态试验站天然草地划分为沼泽化低地草甸、盐化低地草甸、重盐化低地草甸、盐土荒漠和重盐土荒漠五个亚类^[54]。徐荣通过研究柠条种植密度对土壤水分的影响,从水分和植被两方面作了系统的比较,确立了适宜的柠条密度,为在退化草地改良过程中,大面积营造柠条灌木提供了科学理论依据^[55]。马海艳等以额济纳地区为研究对象,通过在6-10月间,在四种荒漠植被类型:胡杨林地、人工梭梭林、苜蓿地及戈壁观测点,布置管式时域反射仪(TDR)水分测定仪进行定点、定位观测,研究了上游放水前后,同一观测点不同深度及不同土地利用条件下土壤水分的时空分布和动态变化状况^[56]。李佳陶对额济纳绿洲河岸胡杨林不同年龄、不同叶形(狭叶和阔叶)和不同水分梯度(从河岸到戈壁0-300m范围内)胡杨生物学和水分生理特性进行了研究,为保护绿洲安危、合理分配生态用水提供一定的科学依据^[57]。萨如拉等使用管状土壤水分仪,对额济纳胡杨林、沙枣林、怪柳林以及其它不同样地的土壤含水量时空变化进行了调查研究^[58]。秦嘉海等以祁连山灌木林、针叶林、阔叶林3种林地 of 研究对象,探讨不同林地类型对土壤理化性质和水源涵养功能的影响^[59]。

(2)半干旱区植被生长区域的土壤水盐变化规律研究

半干旱区的研究多集中于对黄土高原植被的土壤水盐变化规律的探寻。郭忠升等分析了土壤旱化现象与土壤干层的关系,探讨了土壤干层的划分标准。认为防止土壤旱化的主要措施就是控制林草低密度和生产力,而控制林草低密度和生产力的理论依据就是土地植被承载力^[60]。郭胜利等以小流域为单元,以典型横断面为代表,初步分析了黄土高原半干旱区中连川小流域坡顶、坡面和坡脚不同部位土壤养分分布特征及其与地形和植被的关系^[61]。李世荣等通过对1998-1999年5-10月2个生长季不同密度刺槐林的连续观测,研究林地土壤水分运动规律及年际变化特征^[62]。徐炳成等从不同植被类型、生长状况与结构,不同植物的耗水特点及影响因素等方面,概述半干旱地区不同植被对土壤水分影响的研究进展^[63]。刘晨峰等对山西黄土丘陵沟壑区的14年生人工刺槐林6种造林密度林分的土壤水分、林下光照强度等环境因子进行观测,同时,采用样方调查法,对不同密度林内的树木生长情况和林下植物的类型、数量、分布及发育状况进行了研究^[64]。王红梅对宁夏南部半干旱黄土丘陵区植被恢复过程中封育草地的土壤水分物理特性、土壤水分亏缺及土壤水分时空动态等特征进行了系统测定,并对土壤水分变化特征进行了综合评价^[65]。李朝生等通过研究放牧对黄河低阶地演化草场土壤水盐空间异质性的影响,发现黄河低阶地盐化草场表层土壤水盐的变异系数和相关性高于下层,土壤水

分的变异系数低于土壤盐分且层间的相关性较高^[66]。

(3)其它地区植被生长区域的土壤水盐变化规律研究

除干旱、半干旱地区土壤水盐的研究，其它地区也以围绕水盐与植被间相互作用展开，探讨土壤水盐信息的规律。钟哲科等对浙北涂区杨树林分的调查结果表明，除土壤盐分外，土壤容重、非毛管孔隙等土壤物理性质也明显地影响着杨树的生长；用土壤全盐量来表示杨树的耐盐力，常具有较大偏差，而用土壤水的盐分浓度表示，更符合客观性和更具有实用性，经实地测得该值为 0.45% 时，杨树的生长就受到明显的抑制^[67]。胡海波等试验研究了淤泥质海岸防护林土壤含水量的变化规律、季节动态和影响因子结果表明，土壤含水量有明显的季节变化规律并受林分影响^[68]。刘庆生等探讨土壤盐渍化与上覆植被光谱之间的关系，尝试利用上覆植被光谱信息间接推断辽河三角洲土壤盐渍化状况^[69]。李晓军等对松嫩平原的六种土壤覆被水盐时空动态进行分析，对比不同土地覆被水盐动态变化差异^[70]。杜鹃等通过大量土壤样品采集和室内水分测定，对西安地区极端降水前后不同植被下土壤水分含量及其水分恢复进行了研究^[71]。

(4)方法的研究

根据不同区域、不同植被类型、不同研究目的，学者们采用了多种方法和模型进行研究。李兴东采用典范分析法对黄河三角洲地区的 10 个植物群丛及其土壤的有关性质进行了分析，典范相关系数是 0.9 和 1。结果表明该方法对研究植物群落的分布及植被演替等内容是很有帮助的^[73]。沈禹颖等采用系统网格法调查河西走廊盐化草甸典型地段的植被和土壤环境因素，用 DCA 排序技术进行定量分析，来划分该区植物群落的分布格局，并以土壤环境指标（有机质、全盐含量、pH 值、潜水位埋深）解释其所形成的 5 个样方组，反映出内陆干旱次生盐渍化区土壤水盐分布的差别同潜水位的关系^[72]。刘庆等用主成分分析排序技术和回归模型，依据对青海湖北岸植物群落与环境因子关系的研究，发现植物群落的类型分布主要决定于环境中的土壤水分含量及土壤全盐含量^[74]。初玉等采用地统计学中的半方差分析和分形分析两种方法研究了浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间分布格局，分析了不同生境中小叶锦鸡儿灌丛的植被、土壤水分和养分间的相关性^[75]。郭晓敏等利用地统计学的半方差函数，定量研究了奉新县平衡施肥毛竹林的土壤盐分空间变异特征^[76]。杨帆等在对芦苇小区调查取样的基础上，利用 Pearson 关联分析法研究了土壤水、电导率与芦苇生长和种群分布的关系。结果表明土壤电导率空间变率明显，最大值是最小值的 2 倍^[77]。

由于胡杨生长环境的特殊性，在我国境内主要分布于新疆、内蒙古西部、河西走廊等地，但基于它对绿洲生态环境的重要保护作用，对它的研究也较为迅速的展开，主要

集中在生物、生理学特性，水资源环境变迁。

1.2.3 敦煌绿洲研究进展

中国绿洲研究始于 1930s,但是直到 20 世纪 80 年代末 90 年代初才成为一个研究热点,敦煌绿洲的研究也相应展开,大致可以分为三个阶段。

1.2.3.1 1950s-1970s

这个时期属于建国初期,国家政治、社会、经济逐渐稳定,各项事业走向正轨,除一些特殊类型绿洲以外,传统绿洲发展大都以农业为主导,所以这个时期对敦煌绿洲的研究也就集中在与绿洲农业发展相关的水土问题上。

敦煌绿洲作为疏勒河流域的一部分而被研究。疏勒河干流发源于祁连山深处的岗格尕肖合力岭,最后消失于敦煌市哈拉湖,其中昌马峡以上为上游,昌马峡至双塔水库为中游,双塔水库至哈拉湖为下游,下游分布于安西县和敦煌市的一部分地区^[78]。所以,王庭芳在对疏勒河中下游的气候进行研究时,就敦煌绿洲的气候特征及其改造进行了阐述^[79]。习耀国在对河西走廊发展棉花的问题进行探讨时对敦煌农业发展也有所提及^[80]。甘肃省农业科学院土肥所盐改组经过实地调查对疏勒河流域土壤的板结问题进行了探讨,并对土壤板结的原因、土壤板结的种类及其对作物生长的不良影响、改良利用措施进行了详细阐述^[81]。

总之,有关敦煌绿洲的各项研究在 20 世纪 70 年代都不多,直到 1980s 随着西北干旱区绿洲研究的逐渐兴起,敦煌绿洲的研究也相应增多。

1.2.3.2 1980s-1990s

水土资源研究。傅兴启等讨论了疏勒河流域水资源合理利用与绿洲建设的关系,并以敦煌绿洲为例,阐述了老绿洲的改造问题^[82]。丘明新等对疏勒河中下游地区草甸植被的分布及其生境,滩地地下水位的下降与土壤盐渍化对草甸植被的影响进行了分析,并相应的提出了三点解决途径^[83]。陈仲全在对敦煌绿洲节水系统进行个例分析基础上,提出了监控绿洲节水系统与坚持高效率开发绿洲的基本途径^[84]。陈荷生通过对疏勒河流域水资源系统的研究,分析水资源承载力及合理利用途径^[85]。刘胤汉以敦煌、武威为例研究了河西走廊绿洲土地类型及其开发利用^[86]。

绿洲农业研究。葛秉钧对河西走廊灌溉农业区农业气候适应性进行了分析,对主要农作物的气候生态特征和种植类型的气候适应性进行了阐述^[87]。敦煌县农科所通过田间试验、化验分析与调查研究,对敦煌绿洲当时土壤肥力有了初步掌握,并提出因地制宜的几个相关因素^[88]。旱农分区课题组还对敦煌绿洲主要粮食作物对水分的需要进行了研究^[89]。牛天龙根据敦煌市农业发展现状,对发展节水农业提出了几点建议^[90]。

旅游方向的研究。敦煌市因为拥有石窟艺术的瑰宝——莫高窟而成为一个享誉内外的绿洲城市，因此，有关敦煌旅游方面的研究相对较多，大多学者对敦煌旅游资源的开发利用等问题进行了探讨。汤明宝和石磊分别从全甘肃省的角度分析省内旅游资源的开发和利用以及旅游业所面临的问题^[91, 92]。陈传康在分析敦煌旅游资源种类和特征的基础上，探讨该地区重要旅游点开发建设及相应地调整为开放型经济结构的问题^[93]。

1.2.3.3 2000s 以来

近几年，随着绿洲学的不断发展，可持续发展战略思想的深入，尤其是敦煌市月牙泉泉水位不断下降，引起了人们的普遍关注，由此也引发了人们对敦煌绿洲水资源的研究。

裴建明针对党河水力资源开发利用提出了一些初步研究意见^[94]。张明泉等以位于敦煌盆地南部莫高窟区的大泉河为例，分析了极干旱环境条件下小河流的基本特征，研究了该河流的径流量和水质成分的时空变化规律，为敦煌绿洲水资源的可持续利用提出几点意见与建议^[96]。刘琴对敦煌大泉河水环境特征与水资源合理利用进行了研究^[95]。杨力扬在建立了敦煌市水资源可持续利用评价指标体系的基础上，用模糊数学方法对敦煌市的水资源可持续利用状况进行了评价，评价结果为“较弱”^[97]。方创琳等从城市发展的角度以甘肃河西走廊为例，探讨西北干旱区水资源约束下城镇体系形成与发展机制及其布局特征和空间组织形式^[98]。除此之外，杨根生等从疏勒河整个流域的角度探讨了流域水质及水资源保护等问题。

对敦煌市旅游方面的研究从 1980s 中期到现在一直方兴未艾。张小军、王计平等从甘肃省的角度对省内的旅游城市体系，旅游资源区划与保护进行了研究^[99, 100]。郭剑英等利用意愿调查价值评估法推导出敦煌旅游资源 2002 年的非使用价值为 1200×10^4 元。还利用费用支出法、旅行费用法及机会成本法对敦煌旅游资源 2001 年的国内旅游价值进行了评估，得出其国内旅游价值为 7.896×10^8 元^[101, 102]。湛永生等对敦煌旅游业的发展状况做了初步分析，深入调查研究了敦煌市区居民对旅游影响的感知以及对旅游业发展的态度表明，目前敦煌正处于旅游生命周期的“成熟巩固阶段”^[103]。敦煌旅游业可持续发展也有了初步的研究。

1.3 研究目的与意义

绿洲是干旱区重要的生态系统，也是干旱区人类赖以生存的最重要的基地。敦煌绿洲位于甘肃省最西端，处于甘肃、青海、新疆三省(区)交汇处。总土地面积 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，敦煌西湖国家级自然保护区位于敦煌市西部，保护区总面积 $66 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，是河西走廊也是甘肃省的第一道生态屏障。

干旱区植被虽然种类稀少，覆盖率低，但它在干旱区生态系统中起着极其重要的作用，天然植被的繁衍或退化，对荒漠区生态系统脆弱程度有指示作用，是绿洲外围不可缺少的生态屏障；从另一个角度来讲，干旱区植被的生长情况可以不同程度的表征绿洲是否退化及其稳定性状况。植被土壤水盐动态是盐渍化形成的核心，土壤水盐变化直接影响和制约着植被的发生。

敦煌绿洲是河西走廊最西端的绿洲，西湖自然保护区是敦煌绿洲也是走廊绿洲的第一道天然植被阻沙屏障。纵观国内外研究不难发现，对于植被生长区土壤水盐关系的研究尚处初级发展阶段，而有关敦煌绿洲植被生长的土壤水盐特性方面的研究至今尚未见到报道。

因此，本文将通过对取自敦煌市西湖国家级自然保护区内胡杨林下土样，进行各种土壤特性的分析，探讨研究干旱区胡杨生长区域土壤水盐特征，以期对该区域自然植被的保护与重建、敦煌绿洲自然保护区建设提供科学依据，为敦煌绿洲乃至我国西北地区生态环境保护，区域可持续发展提供参考和借鉴。

1.4 研究的理论与方法

1.4.1 理论基础

(1)可持续发展理论：1987年世界环境和发展委员会(WCED)在《我们共同的未来》中指出，“可持续发展是指既满足当代人需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展”。可持续发展的内涵主要包括：可持续发展的主体是人，即要以人的全面发展为其核心；可持续发展以生态、环境和资源为基础，其目的是实现人口、生态、环境、资源、经济和社会能良性循环和协调发展；可持续发展追求纵向与横向间的公平。它作为一种新的发展观，是以人类的永久生存和发展为核心的，以资源和环境的承载力为限度，以人的全面发展和社会的全面进步为目标的持续过程。

(2)系统论：系统论是研究系统的一般模式，结构和规律的学问，它研究各种系统的共同特征，用数学方法定量地描述其功能，寻求并确立适用于一切系统的原理、原则和数学模型，是具有逻辑和数学性质的一门新兴的科学。其核心思想是系统的整体观念，贝塔朗菲强调，任何系统都是一个有机的整体，它不是各个部分的机械组合或简单相加，系统的整体功能是各要素在孤立状态下所没有的性质。系统论的基本思想，就是把所研究和处理的对象，当作一个系统，分析系统的结构和功能，研究系统、要素、环境三者的相互关系和变动的规律性，并优化系统观点看问题，系统是普遍存在的。研究系统的目的在于调整系统结构，直辖各要素关系，使系统达到优化目标。

(3)生态学理论：生态学一词源于希腊文 *oi kos*，其意为“住所”或“栖息地”。生

生态学作为一个学科名词，是德国博物学家 E. Haeckel 于 1866 年在其所著《普通生物形态学》一书中首次提出来的，他认为生态学是研究生物在其生活过程中与环境的关系，尤指动物有机体与其它动、植物间的互惠或敌对关系。生态系统是当代生态学中最重要的概念之一，它是指在一定空间中共同栖息着的所有生物(即生物群落)与其环境之间由于不断地进行物质循环和能量流动过程而形成的统一整体^[1]。

(4)土壤地理学理论：土壤地理学是研究土壤与地理环境相互关系的学科，是土壤学和自然地理学之间的边缘学科。它研究土壤的形成、演变、分类和分布，为评价、改良、利用和保护土壤资源，发展农、林、牧业生产，提供科学依据。主要研究土壤的发生和演变、土壤分类、土壤分布、土壤区划和土壤资源评价几个方面。

(5)区域化变量理论：当一个变量呈空间分布时，就称之为区域化变量。马特龙将其定义为一种在空间上具有数据的实函数，该函数在每一个点取一个确定的数值，具有随机性和空间结构性两种性质。具有空间结构性，即空间点 x 和与该点相距 h 的点 $x+h$ 处的变量值 $Z(x)$ 和 $Z(x+h)$ 具有自相关性，这种相关性依赖于两点间的向量 h 和变量分布特征。例如矿产、地质、海洋、土壤、气象、水文、生态、温度、浓度等领域都具有这种空间结构性。在地统计学方法中，区域化变量的空间特征由协方差函数和变异函数来描述。这两种函数反映了空间某种属性的分布特征^[104]。

1.4.2 研究方法

(1)相关分析方法：揭示地理要素之间相互关系的密切程度，主要通过对相关系数的计算与检验来完成。

(2)地统计方法：是在法国著名统计学家 G. Matheron(1963)大量理论研究的基础上逐步形成的一门新的统计学分支。可以应用在研究空间分布数据的结构性和随机性，或空间相关性和依赖性，或空间格局与变异，并对这些数据进行最有无偏内插估计，或模拟这些数据的离散性、波动性。

本文运用 SPSS 软件与数理统计方法对敦煌绿洲胡杨林下土壤水分、盐分及其它土壤的物理特性因子进行运算处理和分析；采用地理信息系统软件 ArcGIS 9.0 中的地统计模块 Geostatistical Analyst 进行地统计分析；利用 Excel、Corel draw 等软件绘制相关图形。

2. 样品的采集与处理

2.1 敦煌绿洲概况

敦煌市位于河西走廊最西端，地处东经 $92^{\circ} 13' - 95^{\circ} 30'$ ，北纬 $39^{\circ} 40' - 41^{\circ}$

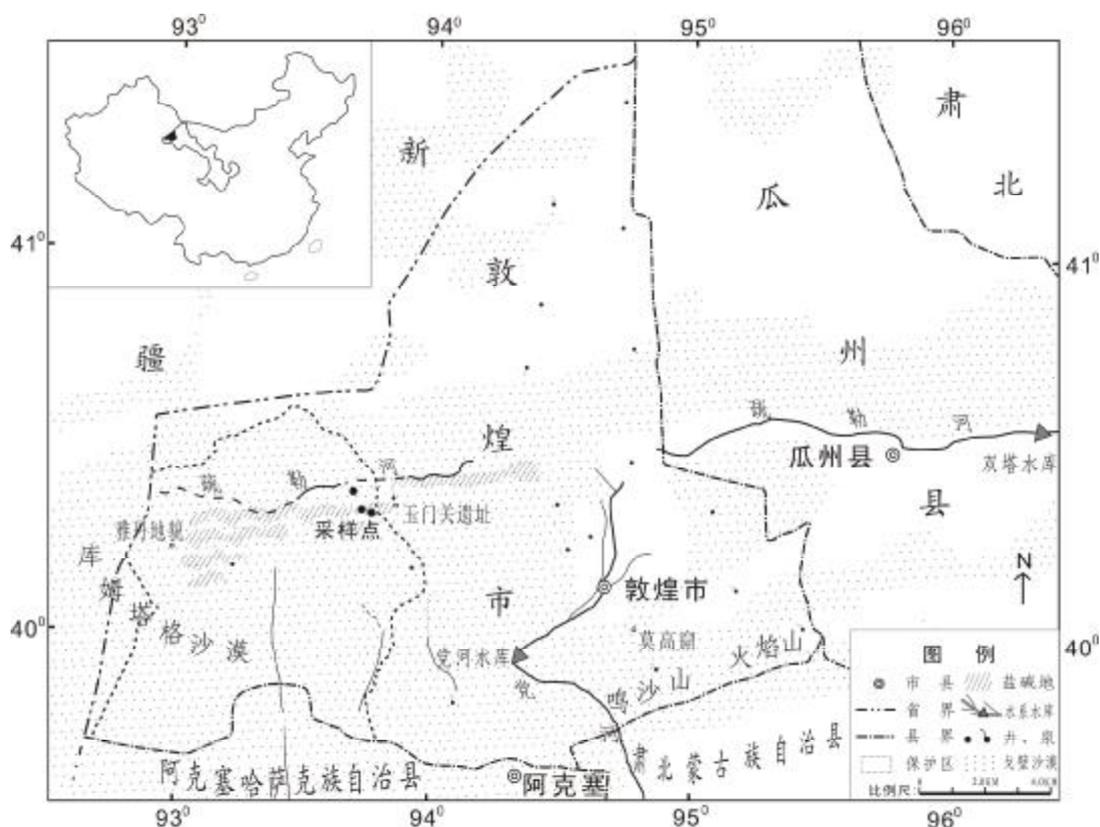


图 2-1 研究区概况图

Fig.2-1 Map of study area

35' 之间，东接安西县，南连肃北蒙古族自治县和阿克塞哈萨克族自治县，西和北与新疆维吾尔区接壤，总土地面积 $3.12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大部分为戈壁，绿洲面积仅占 4.49%(图 2-1)。平均海拔 1138.7m，年平均气温 9.3°C ，日照时数 3246.7h，多年平均降水 39.9mm，多年平均蒸发量 2486mm，气候干旱，属典型暖温带干旱气候。

2.1.1 自然环境概况

(1) 地貌

敦煌属玉门、安西、敦煌盆地的一部分，也称敦煌盆地，地势南北高，中间低，自东向西微倾斜，地貌大体可分为山地、丘陵、走廊平原三大类。

南部山地：由东向西分布有三危山、鸣沙山、崔木土山、夹山和小红山，绵延达 260km，是走廊内部一系列直线形断层隆起的断块山，海拔在 1400m-1900m 之间；三危山呈尖棱状，

是典型裸岩断块山；鸣沙山和崔木土山地势平坦，基岩上由细沙组成高大沙山，呈金字塔、网格、蜂窝状分布，三危山和鸣沙山以南有砾石戈壁和流动沙丘分布。

北部丘陵(北山)：位于疏勒河以北的广大地区，由于地壳上升缓慢，长期遭受剥蚀，致使地形支离破碎，分布有垄状或馒头状残丘，大部分为准平原化的基岩戈壁，覆盖着一层砾石，地势平坦，海拔 1100m-1500m，相对高程 50m-100m。

走廊平原：位于南北二山夹档的广大地区，横贯全境，东西长达 260 km，南北宽约 50 km-60 km。地势平坦，海拔 900m-1100m，最低海拔 827m，最高海拔 1200m，按其成因可分为四种：①洪积倾斜平原分布在市区以西，三危山、鸣沙山以北。②冲积平原分布于党河及疏勒河下游，地势平坦，微有倾斜，相对高差 5m-10m。党河冲积平原自秦家湾呈放射状向西、北、东展开，东至新店台，北至黄墩子、东沙门，西至头道沟形成扇形三角洲，坡降 3° - 4° ，全市 95%以上的农田分布在该区，疏勒河冲积平原呈东西带状分布，地势平坦，微向西倾斜。③冲湖积平原分布于疏勒河冲积平原以南，党河冲积以北的地区，地势微有起伏，湖泊洼地分布其中，海拔 827m-1060m，相对高差 2m-3m，多为盐渍化亚沙、亚粘土或淤泥，形成盐壳呈固定状态。④风积平原主要分布于西沙窝、黄墩子东部和西部、榆树泉以西的冢状和新月型沙丘地。

(2)水系分布及水资源

敦煌绿洲属内陆河疏勒河流域，六十年代前，水资源较富有，汛期和冬春季，疏勒河尾水常流入下游滩地，注入罗布泊。六十年代随着双塔水库的修建，下游基本断流，河道干甘枯，植被萎缩。

党河是目前维系敦煌生存的唯一水源，全长 390 多 km，经肃北蒙古族自治县流入敦煌，多年平均流量 $9.12\text{m}^3/\text{s}$ ，年均径流量 $2.876 \times 10^8 \text{m}^3$ 。党河水库位于市区西南，库容量 $1.5 \times 10^8 \text{m}^3$ 。此外，地表水还有西水沟、东水沟。西水沟及千佛洞沟，正常流量 $0.031 \text{m}^3/\text{s}$ ，年径流量 $0.041 \times 10^8 \text{m}^3$ ；东水沟正常流量 $0.00475 \text{m}^3/\text{s}$ ，年径流量 $150 \times 10^4 \text{m}^3$ 。南湖绿洲的灌溉用水主要为党河中游和南山沟系渗入地下水形成的泉水径流，形成黄水坝、北工坝、南工坝、新工坝、西土沟和山水沟等水系。另外，重要的水系还有崔木土沟、多坝沟等，源于阿尔金山，经阿克塞哈萨克族自治县流入敦煌市境内的西湖国家级自然保护区。

敦煌绿洲地下水资源丰富。根据 1981 年中国人民解放军 00927 部队“区域水文地质报告”估计，敦煌地下水补给量为 $1.9864 \times 10^8 \text{m}^3$ ，年排泄量为 $2.0426 \times 10^8 \text{m}^3$ ，地下水补给量不足。据水利部门的测算，年可供开采总量为 $0.5502 \times 10^8 \text{m}^3$ ，其中市区以南 $0.1533 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ，冲击平原中部至黄墩子一带，供开采的孔隙承压水和第四孔隙承

压水 $0.3969 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

近年来,随着人口增长和耕地面积的迅速增加,党河上游水量的减少,工农业用水矛盾日益突出,农林争水问题难以解决,打井提灌,超量汲取地下水致使绿洲平原地下水位迅速下降。全市现有机井 1200 余眼,地下水位每年下降 0.3-0.4m,造成湖区泉水干涸,大片湖泽、湿地萎缩,局部植被出现退化衰败景象。

(3)气候

敦煌市深居内陆,属典型的大陆性暖温带干旱气候区。日照充足,辐射量高。年平均日照时数 3246.7h,日照频率 73%,一年中大于 60%的光照时数是 294.9d,日照极为充足,年均太阳总辐射为 153.76 kcal/cm^2 ;热量资源丰富,温差大。年均气温 9.3°C ,高于同纬度地区,是酒泉市气温最高的县市,一年中 7 月最热平均气温 24.7°C ,元月最冷平均气温 -9.3°C ,最热最冷月平均温差 34°C ,年均日较差 17.7°C ;蒸发量大,降水少,变率大。年平均蒸发量 2486mm,年均降雨量 39.9mm,相对湿度 40%,干燥度 18.98,属极干旱地区;风大沙尘多,无霜期短,灾害频繁。常年多东风和西风,其中 3-9 月多东风,10 月至次年 2 月多西风,年均风速 1.9 m/s ,8 级以上大风日数 15.8d,沙暴日数 15.4d,无霜期 145d,风灾和冻害较为频繁。

(4)植被

敦煌地处暖温带荒漠植被生物气候带,天然植被以旱生和超旱生灌木、半灌木、草类为主,主要物种有红柳、白刺、沙拐枣、骆驼刺、合头草、麻黄、苏枸杞、盐爪爪、盐穗木、梭梭、胡杨、沙枣等,草类主要有芦苇、胀果甘草、罗布麻、厚穗冰草、芨芨草、艾蒿、沙蒿、茵陈蒿、沙米、胖姑娘等。其中三危山、鸣沙山以南的 70km 戈壁主要生长有裸果木、红砂、合头草、麻黄、沙拐枣、芨芨草等,其覆盖度在 20%左右;鸣沙山、三危山、崔木土山和北山丘陵地带带有散生的梭梭、霸王、沙拐枣等;党河及疏勒河冲积和冲湖积平原区植被呈带状分布,主要生长有红柳、白刺、胡杨、骆驼刺、芦苇、甘草、罗布麻等,其覆盖度在 15-45%左右。党河及疏勒河交汇的北湖一带,分布有大片红柳为主的灌木林,覆盖度在 40%左右,是敦煌主要的天然林区。山水沟、西土沟、崔木土沟等沟系下游多形成带状红柳灌丛和沙生植被群落,是敦煌西部阻挡库姆塔格沙漠东扩的主要生态屏障。人工栽植的树种主要有红柳、梭梭、杨、柳、榆、沙枣、槐及桃、杏、梨、枣、苹果、葡萄等树种。

(5)土壤

敦煌土壤分 7 个土类,24 个亚类,25 个土属,38 个土种。7 个土类是灌淤土、潮土、风沙土、棕漠土、盐土、草甸土、沼泽土。灌淤土分布于党河下游冲积、洪积扇形

平原的十乡耕作区,为农业生产的主要土类;潮土分布于冲积扇缘地下水位较高的地区,以郭家堡乡和转渠口乡最多;风沙土分布于南湖地区及党河中下游农区边缘地带;棕漠土主要为戈壁;盐土分布于湖泊洼地强烈积盐的地段;草甸土分布于后坑子以西的大部分泉水洼地及南湖乡上湖和耕作区的夹滩上;沼泽土分布于湖区地下水位较高,长期积水的湖泊、洼地中,集中分布在伊塘湖、盐池庙、哈拉诺尔、波罗湖、玉门关、盐池湾、马迷兔、天桥墩、湾腰墩及农区夹滩湖泽。

(6)生态环境

敦煌地处库姆塔格沙漠前沿,四周被沙漠戈壁包围,生态环境脆弱,自然灾害极其频繁,土地荒漠化、沙化以及干旱缺水已成为敦煌经济可持续发展的三大自然制约因素。据1999年沙漠化监测结果,全市沙漠化土地面积为 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,占总土地面积的80.6%,全市每年因沙害损失数百万元,霜冻、干热风危害频繁发生,风沙危害是敦煌生态环境的最大威胁。

建国以来,特别是改革开放以来,经过全市人民的不懈努力,生态环境建设取得了重大进展,党河绿洲和南湖绿洲已建成大型周边防护林和防风林带670km,构成1500多个林网网格,使95.3%的农田受到了庇护。“三湖两山”的沙生植被封育成林达 $1067 \times \text{ km}^2$,防风固沙作用显著,对绿洲农业生产起到了巨大防护效应。但由于受经济活动和人口增加因素以及大气候的影响,生态环境的总趋势呈现局部好转,整体荒漠化加剧的趋势。

2.1.2 社会经济状况

敦煌市辖5镇4乡,79个行政村,381个村民小组,截至2006年底总人口18.1万人,其中农村人口9.7万人,占全市人口的54%,农村劳动力3.8万人,占农村总人口的39%。

全市耕地面积 $2.07 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占全市总土地面积的0.55%,集中分布在党河、南湖绿洲灌区。2006年粮食总产量 $0.52 \times 10^4 \text{ t}$,棉花总产量 $2.50 \times 10^4 \text{ t}$,水果总产量 $5.60 \times 10^4 \text{ t}$,蔬菜总产量 $10.94 \times 10^4 \text{ t}$ 。2006年全市财政总收入完成 1.44×10^4 万元,城镇居民可支配收入达到7720元,农民人均收入4957元。

敦煌市是西北重要的交通枢纽,境内有兰新、安敦、红党公路,建有大型民用机场,辟有直达北京、西安、乌鲁木齐、兰州等地的航线。旅游业是敦煌的支柱产业和立市之本,境内的莫高窟、鸣沙山、月牙泉、玉门关、汉长城、阳关、渥洼池以及新开发的国家雅丹地质公园、西湖国家级自然保护区等人文景观和自然景观,年吸引接待国内外观光游客100余万人次,年创旅游收入 3.88×10^4 万元,已成为全省旅游开发的强劲龙头。

2.1.3 西湖自然保护区概况

敦煌西湖国家级自然保护区位于敦煌市西部，地处敦煌市最西端，库木塔格沙漠边沿，地理坐标在东经 $92^{\circ} 45'$ - $93^{\circ} 50'$ ，北纬 $39^{\circ} 45'$ - $40^{\circ} 36'$ 之间，东与玉门关相连，西与新疆库木塔格沙漠相接，南邻阿克塞哈萨克族自治县，北靠国家雅丹地质公园。保护区总面积 660km^2 ，其中核心区 198km^2 ，缓冲区 146km^2 ，试验区 316km^2 。其中分布着大面积的天然胡杨林、芦苇、红柳等干旱区荒漠植被。

2.2 样品采集与方法

本研究的切入点是胡杨生长区域，经过实地考察与调研，于 2007 年 5 月初至 5 月中旬选择天然胡杨林生长比较密集、面积较大且很少受人类影响的敦煌市西湖国家级自然保护区胡杨林内布点采样。

按照胡杨胸径不同设样地三块，分别用代码 Y、Z、D 标识。三块样地的下垫面特征基本相似，地表都有厚度约为 15cm 的碱土层，并有芦苇、红柳等耐盐碱植物伴生。在每块样地内设置 21 个采样点，每个采样点选择在特定胸径胡杨树下 1m 范围内，避开根部密集根系处，样点之间根据实际情况相距 10m-15m。

依据不同土壤特性的分析要求，确定不同取样层次。在每块样地内取 0-20cm、20-40cm、40-60cm、60-80cm、80-100cm、100-120cm 深度的混合土样用塑封袋装回，用来分析土壤机械组成、全盐量、pH 值、比重、氧化还原电位；取表层、20cm、40cm、60cm、80cm、100cm、120cm 七个土层的土壤用铝盒封存装回，用来测定土壤容重和水分。

在采样过程中对每个采样点的经纬度、海拔，胡杨胸径、根径及冠径都作了详细地记录，基本概况如表 2-1。

表 2-1 采样区胡杨基本概况

Tab.2-1 Basic situation of *Populus euphratica*

样地代码	根径范围	胸径范围	冠径范围	树高（目测）	经纬度
Y	8.44-14.80cm	6.37-9.55cm	15.92-29.92cm	3-4m	93.71E, 40.34N
Z	12.73-15.76cm	11.14-12.42cm	22.28-44.56cm	5-7m	93.74E, 40.31N
D	15.92-32.31cm	14.32-18.62cm	27.06-63.66cm	6-8m	93.78E, 40.29N

根据魏庆莒所著《胡杨》一书中对胡杨在自然条件下生长发育阶段的分类^[111]，干材阶段胡杨为 4-14 年生，一般高 4-7m，胸径 6-10cm；中年阶段胡杨为 15-35 年生，树高 10-14m，胸径 15-30cm。所以对照以上分类本文所采土样区域的胡杨林应该属于干材阶段(Y 样地)、中年阶段(D 样地)及干材和中年阶段的过度阶段(Z 样地)。但根据表 2-1

所示, 西湖保护区内采样胡杨林的树高均比上述标准低, 且出现了主干下部的小枝枯死, 部分树木顶部枯死的现象。由此说明这里的胡杨林生境正在不断恶化, 胡杨已表现出衰退迹象。

2.3 室内预处理

2007年5月中旬至7月对土壤样本进行了室内分析。土壤样品在实验室经过自然风干, 挑拣、研磨后过18号筛(1mm)制备而成。所有土样及药品的称取均用FA1004N电子分析天平(0.0001g)。

(1) 土壤水分的测定

采用烘干法进行土壤水分的测定。将已知重量的土壤样品即用铝盒取回的样品放入烘箱, 在105℃的恒温下烘10小时, 待样品在烘箱中自然冷却至常温, 称得干重。用公式(1)

$$W = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100\% \quad \dots\dots (1)$$

计算得出土壤含水量。式中W为土壤水分含量(%), W_1 为土样湿重(g), W_2 为土样干重(g)。

(2) 土壤机械组成的测定

采用甲种比重计法进行土壤机械组成的测定。取风干土样50g, 加60ml分散剂(0.5mol/l六偏磷酸钠)放入沉降桶中并加入蒸馏水定容至1000ml。用搅拌棒搅拌悬液1min, 分别记录1min和2h悬液温度及比重计读数。用公式(2-4)

$$W_1 = \frac{Y - D_{1\min}}{Y} \times 100\% \quad \dots\dots (2)$$

$$W_2 = \frac{D_{1\min} - D_{2h}}{Y} \times 100\% \quad \dots\dots (3)$$

$$W_3 = \frac{D_{2h}}{Y} \times 100\% \quad \dots\dots (4)$$

计算得出土壤机械组成。式中 W_1 为砂粒比例(%), W_2 为粉粒比例(%), W_3 为黏粒比例(%), Y为样品重(g), $D_{1\min}$ 为1分钟比重计读数, D_{2h} 为2小时比重计读数。

其中砂粒粒级为: 2-0.02mm; 粉粒粒级: 0.02-0.002mm; 黏粒粒级: <0.002mm

(3) 土壤容重的测定

采用环刀法进行土壤容重的测定。用体积为50cm³的环刀在野外取得土样后, 带回

室内，与土壤水分的测定方法相同，将其烘干，得到干重，用公式(5)

$$r = \frac{W}{50\text{cm}^3} \quad \dots\dots(5)$$

计算得出土壤容重。式中 r 为土壤容重(g/cm^3)， W 为土壤干重(g)。

(4) 土壤 pH 值的测定

采用甘汞电极法(pHS-3C 精密 pH 计)进行 pH 值的测定。先用 pH 值为 9.18 的标准缓冲液校正 pH 计；按水土比 5 : 1 配置土壤溶液，搅拌三分钟，静置半个小时左右，澄清；用 pH 计所带甘汞电极测定其 pH 值。

(5) 土壤全盐量的测定

采用电导法(DDS-307A 电导率仪)进行全盐量的测定。按水土比 5 : 1 进行泡土浸提、振荡过滤、测定样品温度，用电导率仪测定土壤溶液的电导度，选择其中土壤含盐量最高(电导度最大)的样品溶液作为标准溶液，按不同比例稀释后用重量法(水浴蒸干)测定其含盐量。根据所得值绘制标准曲线，由已知的电导度从标准曲线上查得土壤的总盐量，即可获得土壤的全盐量。

(6) 土壤氧化还原电位的测定

氧化还原电位的测定采用氧化还原电位计法(ORP-431)。按水土比 5 : 1 配置土壤溶液，搅拌三分钟，静置半个小时左右，澄清。用氧化还原电位测定其氧化还原电位值。

(7) 比重

称取风干土样 10g，装入容积为 50ml 的比重瓶，加蒸馏水至比重瓶容积的一半处，徐徐摇动。将比重瓶放在沙浴上加热煮沸并保持一小时，冷却后加满蒸馏水，静置澄清后称重。用公式(6)

$$d_s = \frac{g}{g + g_1 - g_2} \times d_{wt} \quad \dots\dots(6)$$

计算得出土壤比重。式中 d_s 为土壤比重(g/cm^3)， g 为烘干土重(g)， g_1 为 t 是比重瓶+水重(g)， g_2 为 t 是比重瓶+水重+土样重(g)， d_{wt} 为 t 是蒸馏水比重(g/cm^3)。

3. 敦煌绿洲胡杨林下土壤水盐特征

土壤水分和盐分是土壤中非常重要的两大特性，均存在明显的空间异质性，同时也是土壤学领域研究的重点对象。本章采用传统统计学的方法对三块样地的土壤水分、土壤盐分等土壤特性做了分析。

3.1 敦煌绿洲胡杨林下土壤水分特征统计分析

土壤是指陆地上能够生长植物的疏松表层，土壤肥力是土壤最本质的特征，而土壤水分是土壤的重要组成部分，是土壤肥力的一个重要因素，也是作物生活的基本条件。它对土壤的形成、演变和熟化起着重要作用，土壤里所进行的许多物质转化过程，只有在水参与下才能进行。它一方面供给植物吸收利用，另一方面也可以通过其它性质而影响植物。土壤养分的释放、转化、移动、吸收等离不开水分，土壤水分还影响土壤热量和微生物活动^[106]。

土壤水分是干旱、半干旱地区生态系统和植被建设的基础，而荒漠绿洲内靠天然降水和地下水维持的天然植被稳定性与土壤含水量密切相关。

将三块样地的土壤水分含量绘制出随深度变化的曲线图，如图 3-1 所示。

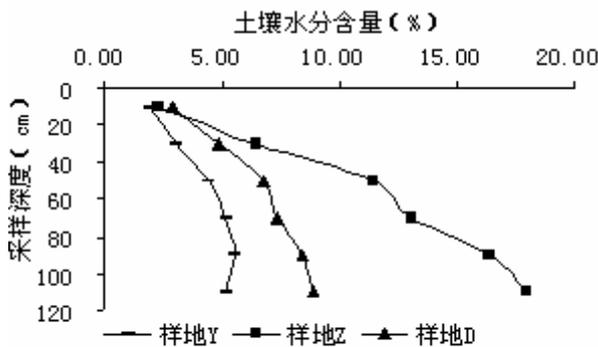


图3-1 不同土层水分含量

Fig.3-1 Change of moisture content

从图 3-1 中看出土壤水分含量呈现出显著的垂直差异。三块样地的土壤水分含量总体表现为随采样深度增加而不断增加，其中表层最小，且三块样地水分含量基本接近，平均约为 2.08%，其余各层三块样地的变化差异显著，胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地(Y 样地)最小，胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)次之，胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地中

(Z 样地)最大。胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中(Y 样地)土壤水分含量整体最小，从 80-100cm 土层以下明显转变为负增长。这与常学项等人在对黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分的研究中亦出现 80-100cm 土层土壤水分含量较高，约为 2.25%，从表层到 120cm 的其它各层含量在 1.0%-2.0%之间变动^[107]的结论相一致。胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地中(Z 样地)和胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)土壤含水量都在 60-80cm 土层中增幅急剧减少。其原因可能是在该层砂粒含量较高，而砂质土的特点就是土中水分多成不连续状态，由此而引起深层土壤水分减少的现象。

运用统计学软件 SPSS13.0 对三块样地土壤样本水分含量常用统计量进行统计分析如表 3-1 所示。本文采用了张仁铎变异程度分类标准： $Cv < 15\%$ 为低变异； $16\% < Cv < 35\%$ 为中等变异； $Cv > 36\%$ 为高度变异^[104]。

表3-1 不同样地土壤水分特性统计分析

Tab.3-1 Statistical analysis of soil moisture in different site

	深度(cm)	最大值	最小值	平均值	中值	标准差	偏度	峰度	Cv(%)
样地 Y	0-20	6.49	0.33	1.89	1.13	1.70	1.65	2.04	89.99
	20-40	10.46	0.56	3.02	1.82	2.90	1.54	1.63	96.05
	40-60	8.78	1.32	4.37	3.43	2.38	0.47	-1.15	54.56
	60-80	9.34	1.68	5.15	5.02	2.09	0.16	-0.71	40.47
	80-100	10.90	1.44	5.56	5.68	2.61	0.31	-0.61	46.98
	100-120	14.11	0.92	5.18	5.18	2.89	1.33	3.50	55.84
样地 Z	0-20	5.61	0.90	2.27	1.99	1.30	1.22	1.17	57.44
	20-40	27.82	0.59	6.41	2.37	8.27	1.76	2.18	129.01
	40-60	21.49	0.78	11.41	13.5	5.82	-0.45	-0.69	51.02
	60-80	19.29	4.42	13.03	13.84	4.33	-0.86	-0.28	33.24
	80-100	22.3	11.20	16.35	16.15	2.65	0.16	0.00	16.21
	100-120	29.35	5.80	17.99	18.07	4.65	-0.14	2.53	25.87
样地 D	0-20	12.20	0.86	2.90	1.70	2.77	2.33	5.85	95.36
	20-40	12.06	1.07	4.86	4.40	3.11	0.82	0.02	64.00
	40-60	15.99	1.18	6.73	6.14	4.35	0.64	0.02	64.61
	60-80	20.40	1.66	7.37	5.37	4.83	1.03	1.06	65.56
	80-100	16.93	2.92	8.43	7.05	4.32	0.83	-0.45	51.25
	100-120	18.82	3.04	8.83	6.93	5.17	0.48	-1.05	58.62

表中粗体为每个指标值绝对值的最大值和最小值。

从表 3-1 可以看出，三块样地各采样层土壤含水量的最大值差异明显，其中最大值 29.35% 和最小值 5.61% 都出现在胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地中(Z 样地)，相差 23.74%。变异系数也同样反应出这一信息，该样地最大值 129.01% 和最小值 16.21% 相差 113 个百分点，也是三块样地所有采样层中的最大值和最小值。胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中(Y 样地)和胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地中(Z 样地)的最大变异系数值都出现在 20-40cm 层，胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)从表层到底层有依次减少的趋势。从土壤水分含量的偏度数和峰度数总体来看，大多服从正态分布，偏度数和峰度数范围都在 -1 到 2 之间浮动，这就为后面地统计学分析提供依据。但出现个别奇异值，如 D 样地的 0-20cm 层峰度数达到 5.85，Y 样地的 100-120cm 层峰度数达到 3.5，有可能是因为采样、实验等过程中产生的误差所导致，这需要进行数据变换后方能使用。

3.2 敦煌绿洲胡杨林下土壤盐分特征统计分析

土壤盐渍化是土地荒漠化的类型之一，当土壤中积累的盐分达到一定的临界值时，会抑制作物根系吸收水分和养分的能力，或腐蚀植物根系，从而导致作物的正常生长和发育受到危害，了解土壤盐渍化的程度和特征是改善和恢复生态环境研究的重要内容之一。土壤盐分对植物的生长危害取决于盐分的含量和组成，在盐渍土地地区测定土壤中水溶性盐分，可以了解土壤盐渍化程度和盐分季节动态，以及对植物的影响。

盐分含量的变化规律是胸径为11.14-14.42cm 胡杨样地(Z样地)含量最高，胸径为14.32-18.62cm胡杨样地(D样地)次之，胸径为6.37-9.55cm的胡杨样地(Y样地)最小。

如图 3-2 中反映了采样点全盐量随深度变化的趋势。从表层到 40-60cm 层胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地 (Y 样地)和胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地 (D 样地)曲线呈

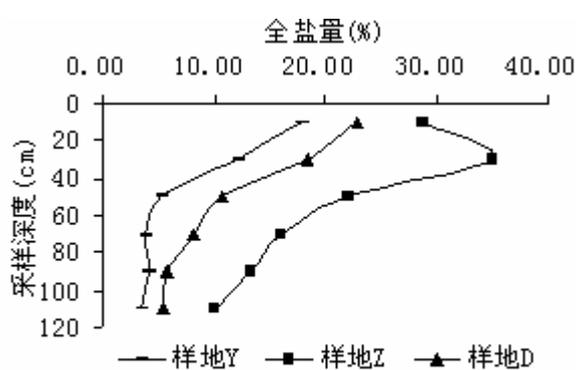


图3-2 不同土层盐分含量
Fig. 3-2 Change of salinity content

现出近似平行的趋势。从 40-60cm 层以下，Y 样地全盐量变化基本趋于稳定，在 4.5%上下浮动；D 样地的 40-100cm 层还是以较大的幅度在减小，直到 100-120cm 层才趋于稳定。胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地中 (Z 样地)没有呈现出以上两点的趋势，在 20-40cm 层不但盐分含量没有减少，而且明显大于其它各层，这与实际采样过程中出现的情况相同，采样过程中发现在 20-40cm 土层出现了明显的盐盘，而在其它两点中没有出现，这是导致该点在这个深度全盐量明显高于其它各层的主要原因。但在该层以下总体趋势三块样地是相同的：随着深度的增加，盐分含量在逐渐降低，除胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地 (Z 样地)外，其它两块样地均有逐渐趋于稳定的态势。胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)在 20-40cm 层出现高值，这与其它两块样地大相径庭，根据祖康琪^[106]、黎立群^[109]的研究，认为该高值是由于该层出现盐盘而引起。

表3-2为三块样地全盐量的统计分析结果。从表3-2中可以看出，Y样地全盐量变异系数为53.65%-72.35%，均属高度变异，其中20-40cm层最小，40-60cm层最大；胡杨胸径为11.14-14.42cm 的样地中 (Z样地)全盐量变异系数为28.95%-56.37%，属中度到高度变异，整体变异较Y样地小；胡杨胸径为14.32-18.62cm的样地(D样地)变异系数为36.86%-64.55%，也属高度变异，但变异系数均值小于胡杨胸径为6.37-9.55cm的样地中(Y样地)。所以，三块样地变异系数呈现出样地Y最高，样地Z最小，样地D介于其中的特

征。

表3-2 不同样地土壤盐分含量特性统计分析

Tab. 3-2 Statistical analysis of soil salinity in different site

	深度(cm)	最大值	最小值	平均值	中值	标准差	偏度	峰度	Cv(%)
样地 Y	0-20	38.30	4.10	17.90	16.50	1.11	0.42	-0.92	61.96
	20-40	26.80	2.70	12.10	11.20	0.65	0.45	-0.36	53.65
	40-60	15.40	1.50	5.30	4.20	0.38	1.38	1.30	72.35
	60-80	11.00	1.30	3.90	3.00	0.26	1.44	2.01	66.93
	80-100	13.30	0.50	4.10	3.50	0.29	1.95	4.83	69.85
	100-120	12.30	0.80	3.50	3.30	0.24	2.65	9.70	67.99
样地 Z	0-20	42.90	11.00	28.80	30.20	1.04	-0.24	-1.37	36.28
	20-40	51.50	14.40	35.00	37.80	1.01	-0.53	-0.32	28.95
	40-60	39.80	8.90	22.10	21.60	0.79	0.11	0.03	35.59
	60-80	35.70	7.50	16.00	14.90	0.68	1.16	2.05	42.38
	80-100	22.50	3.10	13.20	13.30	0.53	-0.25	-0.51	40.39
	100-120	29.40	3.80	10.10	7.80	0.57	2.03	5.60	56.37
样地 D	0-20	35.80	7.10	22.90	23.30	0.84	-0.51	-0.76	36.86
	20-40	32.10	7.60	18.40	16.70	0.82	0.44	-1.26	44.62
	40-60	24.50	2.60	10.70	9.20	0.68	0.87	-0.34	63.45
	60-80	17.70	1.90	8.20	5.40	0.53	0.68	-0.95	64.55
	80-100	13.80	1.70	5.80	5.00	0.33	0.93	0.34	57.32
	100-120	13.70	1.90	5.40	4.70	0.30	1.69	2.59	54.96

表中粗体为每个指标值绝对值的最大值和最小值。

3.3 敦煌绿洲胡杨林下土壤特性变异程度分析

变异系数是描述分布形状的一种方式，是一组数据的变异指标与其平均指标之比，它是一个相对变异指标，本文用它的大小反应土壤属性值的差异。变异系数越大表示其与平均值的差距越大，变异程度越高，如果大于 100%表示存在一些特别大的样本值。

表 3-3 所列出的是胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中(Y 样地)土壤性质的变异系数及变异程度。从中不难看出变异程度整体(六个土层)最高的是粉粒含量，且变异系数表现出从表层到底层不断增高的趋势；pH 值的变异程度最低，变异系数相对变化仅为 0.91%；容重和比重的变异程度也很低，分别为 12.57%和 8.39%；氧化还原电位(Eh)的变异程度为中等，变异系数从表层之底层均无表现出明显的规律性，变化也相对稳定，变幅为 2.68%；砂粒与黏粒含量均呈现出有表层至底层，变异系数由大到小，变异程度由高到低的规律。

表 3-3 Y 样地土壤特性变异程度
Tab.3-3 Variation degree of soil property in Y site

土壤性质	深度(cm)	Cv(%)	变异程度
砂粒含量(%)	0-20	36.14	高
	20-40	17.73	中
	40-60	14.01	低
	60-80	9.33	低
	80-100	10.69	低
	100-120	12.79	低
粉粒含量(%)	0-20	47.43	高
	20-40	41.54	高
	40-60	49.08	高
	60-80	50.58	高
	80-100	69.32	高
	100-120	91.79	高
黏粒含量(%)	0-20	45.09	中
	20-40	31.16	中
	40-60	31.31	中
	60-80	21.05	中
	80-100	21.09	中
	100-120	20.96	中
Eh(mV)	0-20	19.32	中
	20-40	20.54	中
	40-60	23.00	中
	60-80	20.69	中
	80-100	22.06	中
	100-120	21.56	中
pH 值	0-20	1.63	低
	20-40	2.40	低
	40-60	2.54	低
	60-80	2.36	低
	80-100	1.67	低
	100-120	2.00	低
容重(g/cm ³)	表层	12.57	低
比重(%)	表层	8.39	低

变异程度分类标准: Cv<16%为低变异; 16%<Cv<35%为中等变异; Cv>36%为高度变异。

从表 3-4 可以发现, 胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地 (Z 样地)土壤中粉粒含量变异程度为低级, 与胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中 (Y 样地)截然相反, 且变异系数也表现得散乱; pH 值、容重、比重均为低级变异程度, pH 值的变异系数还表现出从 20-40cm 层开始向深层逐渐降低的趋势; 黏粒含量、氧化还原电位(Eh)均属中等变异, 且未呈现出规律性; 而砂粒含量的变异程度从表层至底层依次降低, 变异系数从 20-40cm

层开始逐渐减少。

表 3-4 Z 样地土壤特性变异程度
Tab.3-4 Variation degree of soil property in Z site

土壤性质	深度(cm)	Cv(%)	变异程度
砂粒含量(%)	0-20	43.76	高
	20-40	77.16	高
	40-60	48.84	高
	60-80	28.74	中
	80-100	27.28	中
	100-120	25.91	中
粉粒含量(%)	0-20	17.79	中
	20-40	27.27	中
	40-60	14.82	低
	60-80	11.54	低
	80-100	14.16	低
	100-120	10.51	低
黏粒含量(%)	0-20	22.94	中
	20-40	25.66	中
	40-60	25.31	中
	60-80	25.60	中
	80-100	27.83	中
	100-120	25.28	中
Eh(mV)	0-20	17.87	中
	20-40	13.57	低
	40-60	26.53	中
	60-80	24.04	中
	80-100	24.29	中
	100-120	22.37	中
pH 值	0-20	2.50	低
	20-40	2.76	低
	40-60	2.51	低
	60-80	2.29	低
	80-100	1.93	低
	100-120	1.51	低
容重(g/cm ³)	表层	9.38	低
比重(%)	表层	7.65	低

变异程度分类标准: Cv<16%为低变异; 16%<Cv<35%为中等变异; Cv>36%为高度变异。

如表 3-5 所示, 胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地 (D 样地) 各土壤特性中, 除砂粒含量表现出高级变异程度外, 其余特性均为低中级变异程度。其中, pH 值、容重、比重与 Y 样地和 Z 样地相比, 无太大变化, 都为低级变异程度; 粉粒、黏粒含量的变异系数从表层至底层表现出逐渐增大的趋势; 氧化还原电位 (Eh) 的变异系数从 20-40cm 层至底

层表现出迂回增加的规律。

表 3-5 D 样地土壤特性变异程度
Tab.3-5 Variation degree of soil property in D site

土壤性质	深度(cm)	Cv(%)	变异程度
砂粒含量(%)	0-20	34.44	中
	20-40	66.55	高
	40-60	62.77	高
	60-80	67.08	高
	80-100	54.60	高
	100-120	53.25	高
粉粒含量(%)	0-20	23.91	中
	20-40	29.69	中
	40-60	29.48	中
	60-80	26.72	中
	80-100	32.89	中
	100-120	34.91	中
黏粒含量(%)	0-20	16.41	中
	20-40	24.67	中
	40-60	22.58	中
	60-80	24.10	中
	80-100	24.39	中
	100-120	31.79	中
Eh(mV)	0-20	19.64	中
	20-40	15.45	低
	40-60	19.04	中
	60-80	18.33	中
	80-100	21.59	中
	100-120	20.76	中
pH 值	0-20	2.24	低
	20-40	2.16	低
	40-60	1.86	低
	60-80	1.91	低
	80-100	2.25	低
	100-120	2.13	低
容重(g/cm ³)	表层	9.95	低
比重(%)	表层	8.50	低

变异程度分类标准: Cv<16%为低变异; 16%<Cv<35%为中等变异; Cv>36%为高度变异。

对 Y、Z、D 三个样地的 7 种土壤特性进行对比分析后发现, 三个点的一些土壤特性有相似之处: pH 值、土壤容重、比重均为低等级变异程度, 变异系数分别在 1.51%-2.76%、9.38%-12.57%、7.65%-8.50%之间变化, 变化幅度都很小, 呈现出比较稳定的态势; 氧化还原电位(Eh)除胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)和 D 样地 20-40cm 层表现

为低变异程度，其它变异程度均为中级，且Y样地与Z样地40-60cm土层的变异系数均为该点所有土层中的最高值。

三块样地差别较大、变化明显的是各粒级土壤含量。除土壤黏粒含量变异程度相同，均为低级外，其余各样地各粒级土壤含量的变程度高中低级都有，变异系数的范围从最小的9.33%(Y样地60-80cm层砂粒含量)到最大值91.79%(Y样地100-120cm层粉粒含量)，相差82.46个百分点。这与张仁铎的研究“pH值和土壤孔隙率属于小变异变量，而与土壤水和溶质运移有关的变量则多具有高度变异性”^[104]结论基本一致。

胡杨胸径为6.37-9.55cm的样地中(Y样地)砂粒含量最高，且呈现出随采样深度增加而增加的趋势。

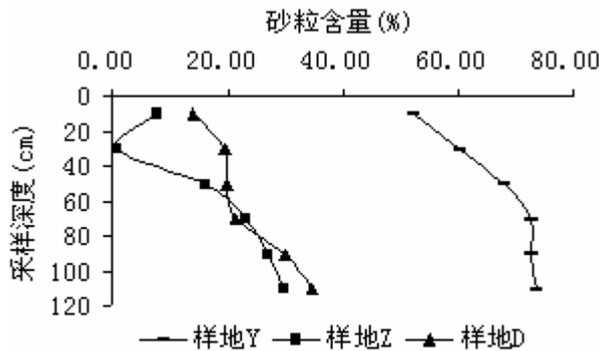


图3-3 不同土层砂粒含量

Fig.3-3 Change of sand content

增加而增加的趋势。0-20cm土层到60-80cm土层变化平稳，平均增幅约为8%，60-80cm土层到100-120cm土层增幅突然减小，60-80cm层增幅仅为0.04%。该点粉粒含量是三个采样点中最稳定的，从表层到100-120cm层变化幅度在8.02%-10.56%之间，黏粒含量与砂粒含量呈现互补趋势。

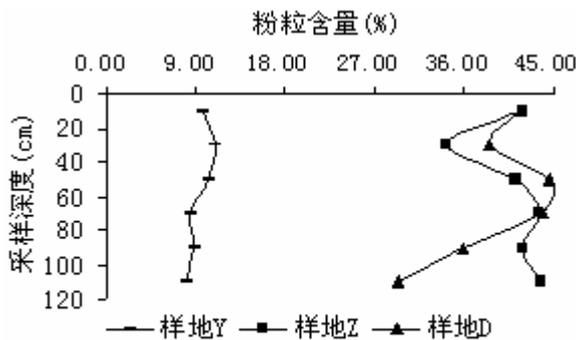


图3-4 不同土层粉粒含量

Fig.3-4 Change of silt content

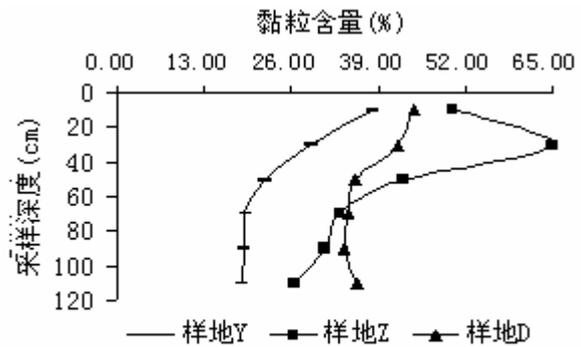


图3-5 不同土层黏粒含量

Fig.3-5 Change of clay content

胡杨胸径为11.14-14.42cm的样地(Z样地)机械组成特点为：砂粒含量较Y样地明显减少，20-40cm土层最少仅为0.71%，其余各层也呈现随深度增加而增加的趋势。粉粒与黏粒含量所占比重大，各层变化幅度也较大，黏粒含量的变化尤为明显：20-40cm层含量高达64.99%，100-120cm层仅为26.64%。胡杨胸径为14.32-18.62cm的样地(D样地)各土层各粒级土含量与Z样地较为接近，但变化幅度较Z样地趋于稳定。各粒级土含量也恰好介于Y样地与Z样地之间。

经过分析发现三个采样点的土壤质地呈现出明显的空间异质性。通过分析表 3-3 至 3-5 和图 3-3 至 3-5，并将三个采样地的机械组成与国际制土壤质地分类标准表比照得出，胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地(Y 样地)属砂质壤土，胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)和胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)都属壤质粘土。

图 3-6 为三个采样点的氧化还原电位(Eh)随深度变化的趋势图。三块样地的 Eh 值表现出共同的特点：从表层至 20-40cm 层均有所减少，而从 20-40cm 以下各层 Eh 值都以不同的速率在增加。其中，胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地 (D 样地)变化最为稳定；胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中(Y 样地)在 60-80cm 层出现一个凹点(该层较其相邻两层值较小)；胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)在 40-60cm 层和 80-100cm 层均出现凸点(该层较其相邻两层值较大)。三块样地的 Eh 值为 $D < Z < Y$ ，表明土壤的氧化还原电位随着树木胸径的增加而减小。

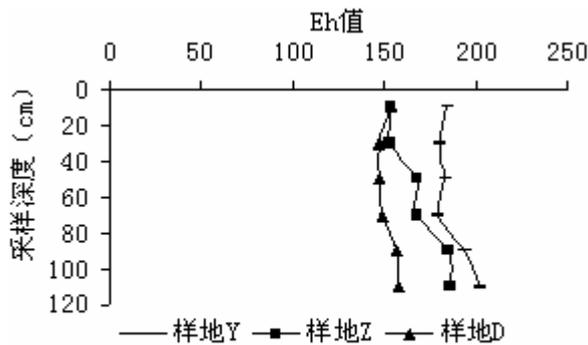


图3-6 不同土层Eh值

Fig. 3-6 Change of Eh

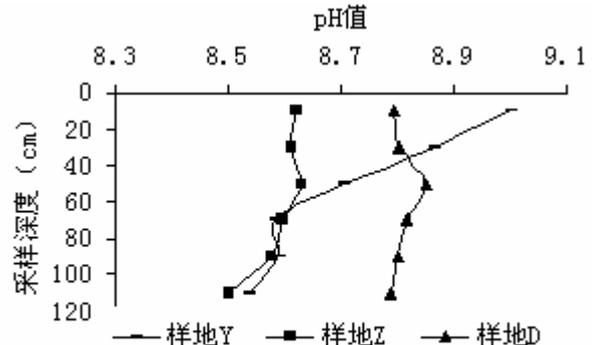


图3-7 不同土层pH值

Fig. 3-7 Change of pH

所测七种土壤属性中变化幅度最小的为 pH 值，其变化幅度在 8.32-9.14 之间，变幅不到 1 个单位。从图 3-4 看出，D 样地和 Z 样地的曲线表现出极其相似(除 100-120cm 层)、近似平行的趋势。在 40-60cm 层表现明显，pH 值都相对变大，呈现出右凸现象(40-60cm 层 pH 值较其上下两个土层超出约 0.05 个单位)。但是在 80-100cm 层以下有所差异，D 样地 pH 值稳定中降低，且变化很小；胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)pH 值也在减小，但幅度较 D 样地大(深度下降了 20cm，pH 值减少了约 0.1 个单位)。

pH 值变化幅度最大的是样地 Y，从表层到 60-80cm 层以 0.1 个单位/层的速度递减，但在 80-100cm 层突然略有增加，至最后一层恢复减小。

3.4 敦煌绿洲胡杨林下土壤特性相关性分析

土壤的各个属性都是相互关联，相互影响的，而且植被与土壤也有相关影响，对胡杨林下土壤特性进行相关分析，有助于了解其内在联系。本文运用 SPSS13.0 分析软件对

三块样地土壤特性的相关关系分析如下：

表3-6 样地Y土壤特性相关性分析

Tab.3-6 Relativity analysis of soil property in Y site

	全盐量(%)	含水量(%)	pH 值	砂粒含量(%)	粉粒含量(%)	黏粒含量(%)	Eh 值(mV)
全盐量(%)	1						
含水量(%)	-0.327(**)	1					
pH 值	0.446(**)	-0.602(**)	1				
砂粒含量(%)	-0.617(**)	0.258(**)	-0.347(**)	1			
粉粒含量(%)	0.246(**)	0.118	0.033	-0.726(**)	1		
黏粒含量(%)	0.684(**)	-0.437(**)	0.480(**)	-0.882(**)	0.371(**)	1	
Eh 值(mV)	-0.179(*)	0.045	-0.172	0.195(*)	-0.062	-0.215(*)	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

表3-7 样地Z土壤特性相关性分析

Tab.3-7 Relativity analysis of soil property in Z site

	全盐量(%)	含水量(%)	pH 值	砂粒含量(%)	粉粒含量(%)	黏粒含量(%)	Eh 值(mV)
全盐量(%)	1						
含水量(%)	-0.611(**)	1					
pH 值	-0.029	-0.142	1				
砂粒含量(%)	-0.888(**)	0.680(**)	-0.086	1			
粉粒含量(%)	-0.560(**)	0.199(*)	0.159	0.320(**)	1		
黏粒含量(%)	0.946(**)	-0.638(**)	0.013	-0.934(**)	-0.587(**)	1	
Eh 值(mV)	-0.359(**)	0.217(*)	-0.199(*)	0.377(**)	-0.006	-0.331(**)	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

表3-8 样地D土壤特性相关性分析

Tab.3-8 Relativity analysis of soil property in D site

	全盐量(%)	含水量(%)	pH 值	砂粒含量(%)	粉粒含量(%)	黏粒含量(%)	Eh 值(mV)
全盐量(%)	1						
含水量(%)	-0.384(**)	1					
pH 值	0.132	0.031	1				
砂粒含量(%)	-0.376(**)	-0.11	-0.069	1			
粉粒含量(%)	0.182(*)	0.119	0.062	-0.863(**)	1		
黏粒含量(%)	0.500(**)	0.066	0.084	-0.719(**)	0.336(**)	1	
Eh 值(mV)	0.039	-0.230(**)	-0.076	0.077	-0.114	0.025	1

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

对Y样地各土壤特性进行相关分析结果如表3-6中所显示。全盐量与其它六种土壤特性的相关系数都很高，在99%置信区间中，含水量、pH值、砂粒含量(%)、粉粒含量(%)、

黏粒含量(%)都与含盐量强相关。其中与含水量和砂粒含量(%)呈负相关,其它均为正相关;在95%置信区间中,Eh值(mV)与含盐量为负的强相关。含水量与全盐量、pH值、黏粒含量(%)均为负相关,与砂粒含量(%)为正相关,达到99%的置信水平。

如表3-7所示,在置信度为99%时,胡杨胸径为11.14-14.42cm的样地(Z样地)全盐量与含水量、砂粒含量(%)、粉粒含量(%)、Eh值(mV)均呈负相关,与黏粒含量(%)呈正相关;与pH值的相关系数仅为-0.029。含水量与全盐量、黏粒含量(%)呈负相关,与砂粒含量(%)呈正相关,置信度达到99%;含水量与粉粒含量(%)、Eh值(mV)呈正相关,置信度达到95%。

表3-8中所示置信水平达到99%时,胡杨胸径为14.32-18.62cm的样地(D样地)全盐量与含水量、砂粒含量(%)呈负相关,与黏粒含量(%)呈正相关;含水量仅与全盐量、Eh值(mV)有相关关系且为负相关;当置信水平达到95%时,全盐量与粉粒含量(%)呈正相关;含水量与其余各因子仍未表现出相关关系。

表3-6至3-8表明Y、Z、D三块样地土壤全盐量与土壤含水量有很强的负相关性,在置信度为99%时,相关系数分别达到-0.327、-0.611、-0.384,也就是说土壤全盐量越大时含水量越小。但在前文的分析过程中三块样地间土壤全盐量和含水量整体变化却呈现一致性,即均为 $Y < D < Z$ 。在置信水平达到99%时,土壤全盐量与黏粒含量也有强相关性,相关系数分别为0.684、0.946、0.500。所以认为在本研究中土壤水分对全盐量的影响较土壤机械组成小。

3.5 小结

通过对不同胸径胡杨林下土壤的各种土壤特性进行传统统计分析后得出以下结论:

(1)敦煌绿洲胡杨林土壤水分含量都随深度的增加而增加,空间分异显著,胡杨胸径为6.37-9.55cm的样地中(Y样地)土壤水分含量最小,胡杨胸径为14.32-18.62cm的样地(D样地)次之,胡杨胸径为11.14-14.42cm的样地(Z样地)最大。Z样地和D样地的土壤水分含量都在60-80cm土层中增幅突然减少,Y样地到100-120cm土层中才有减少的趋势,且表现出水分含量随深度增加而减少的趋势。其原因可能是在该层砂粒含量较高,而砂质土的特点就是土中水分多成不连续状态,由此而引起深层土壤水分减少的现象。

(2)敦煌绿洲胡杨林土壤盐分含量随深度的增加而减少,表层到100-120cm各采样层的盐分含量均呈现出 $Z > D > Y$,说明胡杨胸径为11.14-14.42cm的样地(Z样地)土壤盐分含量最高,胡杨胸径为14.32-18.62cm的样地(D样地)次之,最低的是胡杨胸径为6.37-9.55cm的样地中(Y样地)土壤盐分含量。但胡杨胸径为11.14-14.42cm的样地(Z

样地)在 20-40cm 层出现高值,这与其它两块样地大相径庭,认为该高值是由于该层出现盐盘而引起。

(3)土壤 pH 值的范围在 8.5-9.0 之间,说明该区域的土壤偏碱性,但整个实验区的盐分含量却很高,并与黎立群所绘可溶盐随深度变化的示意图进行对比,可以初步断定采样区的土壤属于盐土与碱土的过渡型土壤。胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)和胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)土壤 pH 值在 40-60cm 层出现高值,可能是因为胡杨吸收水中的碱金属重碳酸盐,并在其枝叶聚集,在其下发育的土壤有苏达的积累所致。

(4)三块样地间土壤全盐量与含水量整体变化的一致性(Y<D<Z)和相关性分析出的每块样地中土壤全盐量与含水量呈强负相关相矛盾,其原因可能是在本研究中土壤水分对全盐量的影响较土壤机械组成小。

4. 敦煌绿洲胡杨林下土壤水盐特性空间异质性分析

对土壤空间异质性的研究,传统方法基本上是定性的土壤分类,而不是定量地研究土壤空间变异,在许多情况下土壤性状的空间变异真实的形态还不清楚。地统计学方法引入土壤学后,克服了传统方法在研究土壤性质空间变异性规律方面的不足^[16],加强了对土壤特性空间变异性的分析,可以用来定量地分析土壤性质的空间分布,也可用于确定土壤空间变异的尺度,还可以用于研究引起土壤变异的各种过程,已成为土壤空间变异性研究的有效方法。

地统计学研究的区域化变量有两个显著特征,即结构性和随机性。土壤特性的结构性变异是由母质、气候、水文、地形、生物、时间、人类活动等差异造成的,而随机性变异则是由可以观测到但与土壤因素无关且不能直接分析的因素造成的,如取样、分析等产生的误差。

空间异质性分析就是为了建立一个最优的变异函数理论模型,定量地描述区域化变量的随机性和结构性,并对变量的背景和变异函数的理论模型进行专业分析和解释。变异函数理论模型的拟合,最重要的是考虑决定系数的大小,其次是考虑残差的大小,然后再考虑变程和块金值的大小。根据这个原则,本文对三块样地土壤特性的空间异质性进行了分析。

4.1 土壤特性的变异函数分析

4.1.1 Y 样地土壤特性半变异函数描述

运用 ArcGIS 软件中的地统计模块对 Y 样地土壤特性进行半变异函数分析,得出 Y 样地各土壤特性半变异函数的理论模型和有关参数如表 4-1 所示。

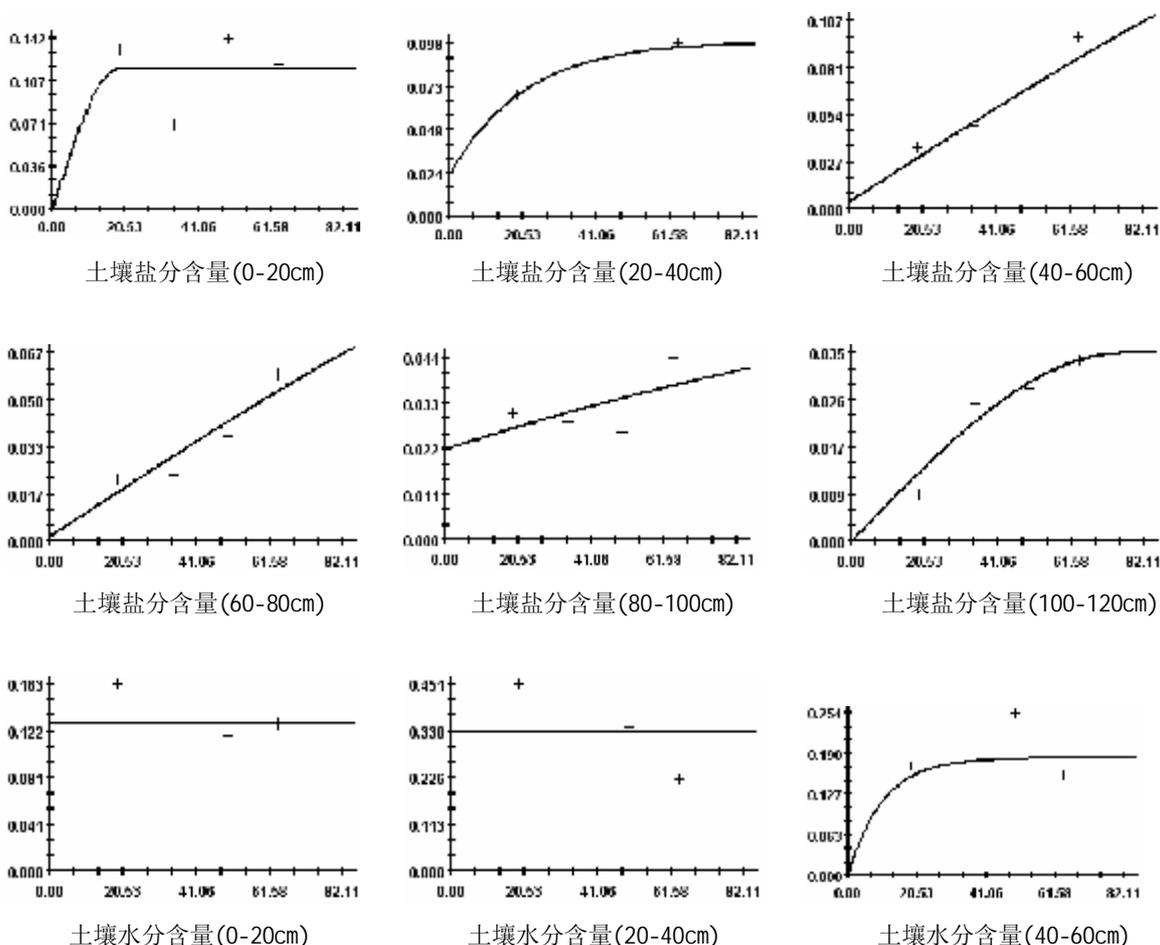
从表 4-1 和图 4-1 中看出,九类土壤特性各采样深度的理论模型主要包括了球状模型、指数模型、线性模型以及纯块金效应。

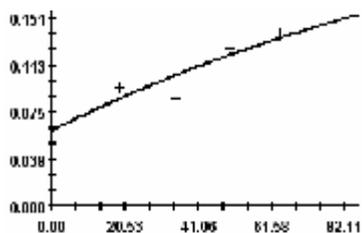
表 4-1 Y 样地不同土层土壤特性变异函数的理论模型及参数
Tab. 4-1 Theoretical model and parameters of semivariograms of soil property in different layers of Y site

土壤特性	深度 (cm)	理论模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 $A_0(m)$	结构因素比例 $C/(C_0+C)$	决定系数 R^2	残差 RSS
土壤	0-20	球状模型	0.0001	0.1172	18.7	0.999	0.000	3.064E-03
盐分	20-40	指数模型	0.0239	0.0989	20.9	0.758	0.961	1.693E-05
含量	40-60	球状模型	0.0045	0.19	210.9	0.976	0.804	4.480E-04
	60-80	球状模型	0.0018	0.1185	210.9	0.985	0.860	1.214E-04

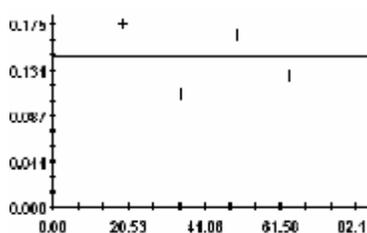
	80-100	指数模型	0.0218	0.0804	210.9	0.729	0.334	1.217E-04
	100-120	球状模型	0.0001	0.0346	75.7	0.997	0.930	2.741E-05
土壤 水分 含量	0-20	线性模型	0.12874	0.12874	64.0	0.000	0.238	1.780E-05
	20-40	线性模型	0.33844	0.33844	64.0	0.000	0.863	0.0262
	40-60	指数模型	0.0001	0.1832	10.1	0.999	0.021	0.0100
	60-80	指数模型	0.061	0.267	143.4	0.772	0.746	4.704E-04
	80-100	线性模型	0.14366	0.14366	64.0	0.000	0.135	2.951E-03
	100-120	指数模型	0.0001	0.1322	14.6	0.999	0.754	1.972E-04
土壤 Ph 值	0-20	线性模型	1.000E-007	2.492E-004	165.3	1.000	0.879	9.481E-10
	20-40	线性模型	1.000E-007	2.992E-004	163.6	1.000	0.772	3.515E-09
	40-60	线性模型	1.000E-006	6.480E-004	164.5	0.998	0.711	1.737E-08
	60-80	指数模型	1.240E-004	5.450E-004	159.8	0.772	0.507	4.749E-09
	80-100	球状模型	2.800E-006	2.066E-004	27.5	0.986	0.385	8.980E-10
	100-120	球状模型	7.200E-006	1.794E-004	32.2	0.960	0.320	2.403E-09
土壤 砂粒 含量	0-20	线性模型	0.1323	0.1323	64.0	0.000	0.430	5.535E-03
	20-40	球状模型	0.0028	0.0365	30.2	0.923	0.176	1.428E-04
	40-60	指数模型	0.00454	0.02458	13.4	0.815	0.057	1.532E-04
	60-80	线性模型	8.937E-003	8.937E-003	64.0	0.000	0.030	6.469E-05
	80-100	球状模型	2.200E-004	5.960E-003	18.7	0.963	0.004	1.084E-05
	100-120	球状模型	1.250E-003	5.130E-003	50.0	0.756	0.602	1.339E-06
土壤 粉粒 含量	0-20	球状模型	0.0001	0.1272	18.7	0.999	0.000	2.326E-03
	20-40	线性模型	0.17826	0.17826	64.0	0.000	0.001	7.834E-03
	40-60	线性模型	0.15686	0.15686	64.0	0.000	0.603	1.536E-03
	60-80	线性模型	0.021164	0.021164	64.0	0.000	0.332	2.773E-04
	80-100	线性模型	0.017469	0.017469	64.0	0.000	0.066	8.370E-05
	100-120	球状模型	0.0485	0.187	90.0	0.741	0.996	1.806E-05
土壤 黏粒 含量	0-20	球状模型	1.000E-005	6.820E-003	18.7	0.999	0.000	6.771E-06
	20-40	球状模型	0.0145	0.111	34.5	0.869	0.460	5.685E-04
	40-60	指数模型	0.0108	0.0896	14.4	0.879	0.078	2.633E-03
	60-80	指数模型	0.00001	0.02942	9.5	1.000	0.022	3.863E-04
	80-100	球状模型	0.0126	0.0337	56.3	0.626	0.822	1.496E-05
	100-120	球状模型	0.0004	0.033	26.8	0.988	0.030	3.650E-04
土壤 氧化 还原 电位	0-20	球状模型	0.0099	0.0524	64.9	0.811	0.923	3.105E-05
	20-40	指数模型	0.0242	0.1479	210.9	0.836	0.663	1.379E-04
	40-60	球状模型	0.0142	0.049	51.0	0.710	0.223	5.654E-04
	60-80	球状模型	0.0001	0.0412	20.6	0.998	0.002	9.758E-05
	80-100	线性模型	0.047966	0.047966	64.0	0.000	0.393	3.493E-04
	100-120	球状模型	0.0013	0.044	30.8	0.970	0.199	2.168E-04
土壤容重	0-20	线性模型	4.555E-003	4.555E-003	64.0	0.000	0.655	1.161E-05
土壤比重	0-20	指数模型	0.00284	0.01418	17.1	0.8000	0.153	2.972E-05

Y 样地土壤全盐量半变异函数的理论模型除 20-40cm 层和 80-100cm 层以外,其余各层均符合球状模型,决定系数除 80-100cm 层为 0.334 以外,其余各层都在 0.8 以上,残差也很小,说明土壤全盐量的理论模型拟合较好。结构方差与基台值的比值除 80-100cm 层为 0.729,其余各层都大于 0.75,说明土壤全盐量的空间变异由结构性因素引起的比例占 75%以上。土壤水分含量的半变异函数的理论模型有三层表现为纯块金效应,其余三层为指数模型,且结构性因素引起的变异性都在 75%以上,其中 40-60cm 层和 100-120cm 层达到 99.9%,几乎全部有结构性因素引起变异;土壤 pH 值半变异函数模型 0-80cm 各层符合指数模型,剩余两层为球状模型。决定系数表明出从表层至底层逐渐减小的趋势,除 60-80cm 层由结构性因素引起的变异为 77.2%,其余五层都在 95%以上;土壤机械组成的半变异函数拟合较为复杂,包括了砂粒、粉粒和黏粒含量的理论模型拟合。总体看来,纯块金效应明显,0-20cm 和 60-80cm 的砂粒含量,20-100cm 各层的粉粒含量均表现为纯块金效应,说明其变异主要由随机性因素引起;土壤氧化还原电位半变异函数的理论模型 80-100cm 层为纯块金效应,由结构性因素引起的变异最低的在 40-60cm 层为 71%,最高的在 60-80cm 层为 99.8%;土壤容重和比重只做了表层,容重表现为纯块金效应,比重的变异性由结构性因素引起占 80%。

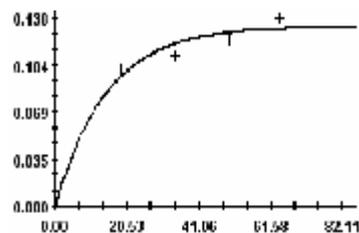




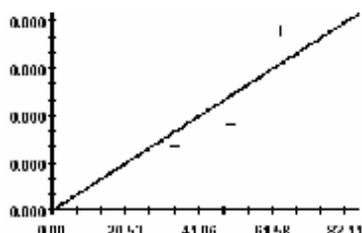
土壤水分含量(60-80cm)



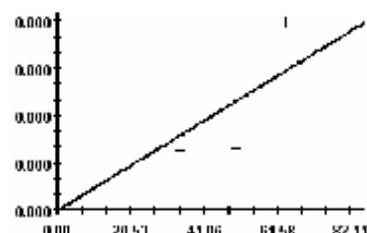
土壤水分含量(80-100cm)



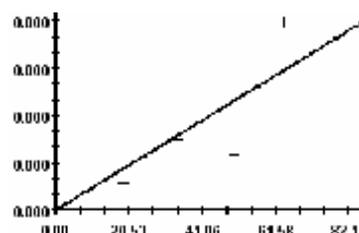
土壤水分含量(100-120cm)



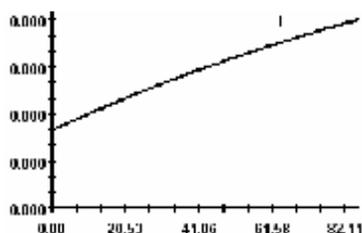
土壤 pH 值(0-20cm)



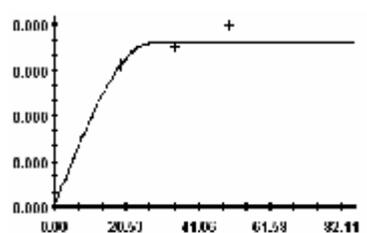
土壤 pH 值(20-40cm)



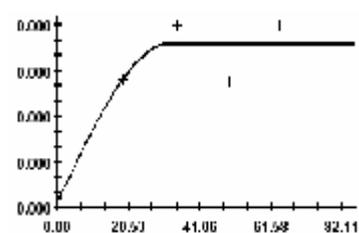
土壤 pH 值(40-60cm)



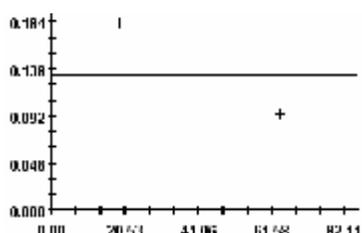
土壤 pH 值(60-80cm)



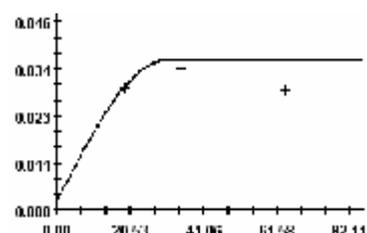
土壤 pH 值(80-100cm)



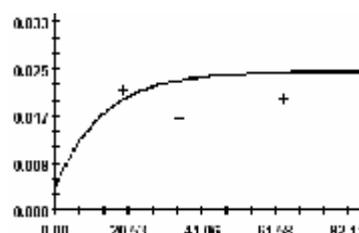
土壤 pH 值(100-120cm)



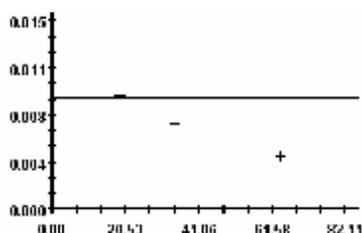
土壤砂粒含量(0-20cm)



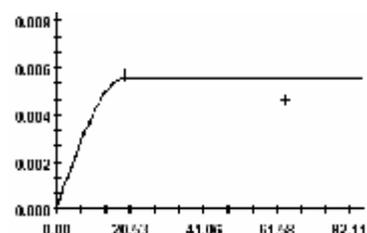
土壤砂粒含量(20-40cm)



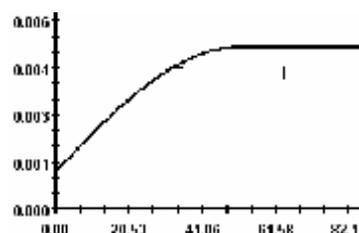
土壤砂粒含量(40-60cm)



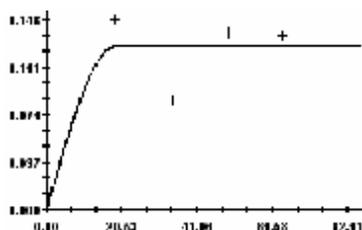
土壤砂粒含量(60-80cm)



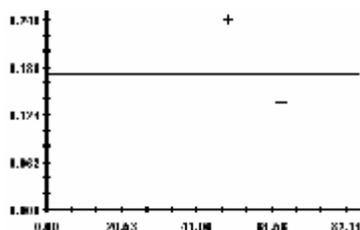
土壤砂粒含量(80-100cm)



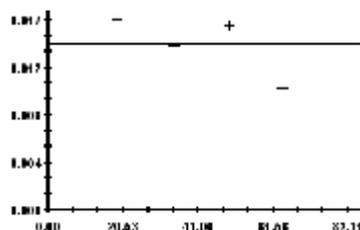
土壤砂粒含量(100-120cm)



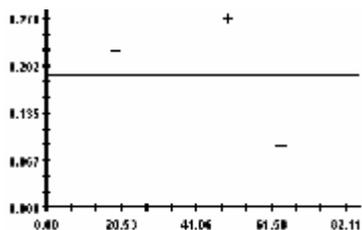
土壤粉粒含量(0-20cm)



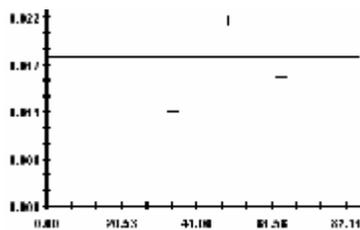
土壤粉粒含量(20-40cm)



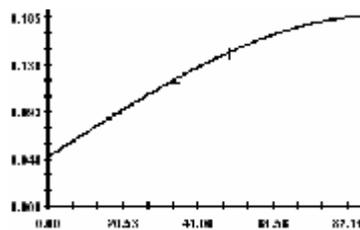
土壤粉粒含量(40-60cm)



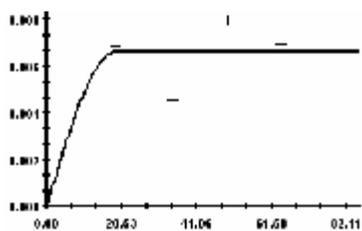
土壤粉粒含量(60-80cm)



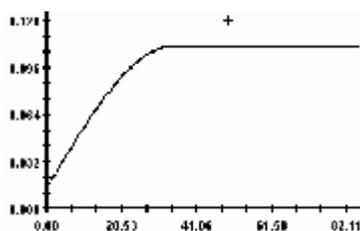
土壤粉粒含量(80-100cm)



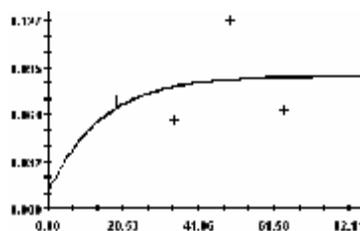
土壤粉粒含量(100-120cm)



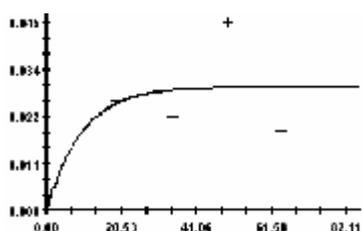
土壤黏粒含量(0-20cm)



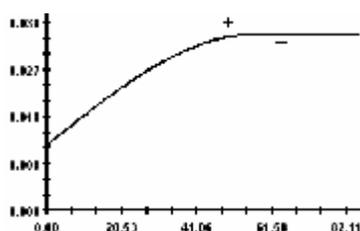
土壤黏粒含量(20-40cm)



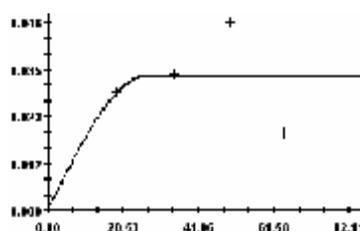
土壤黏粒含量(40-60cm)



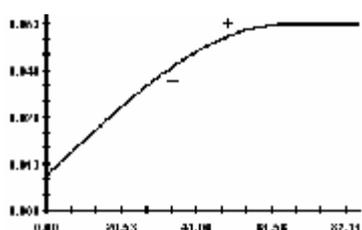
土壤黏粒含量(60-80cm)



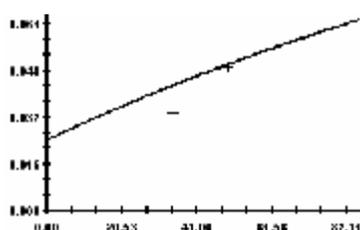
土壤黏粒含量(80-100cm)



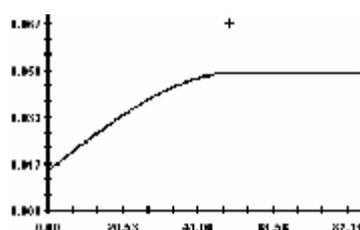
土壤黏粒含量(100-120cm)



土壤 Eh 值(0-20cm)



土壤 Eh 值(20-40cm)



土壤 Eh 值(40-60cm)

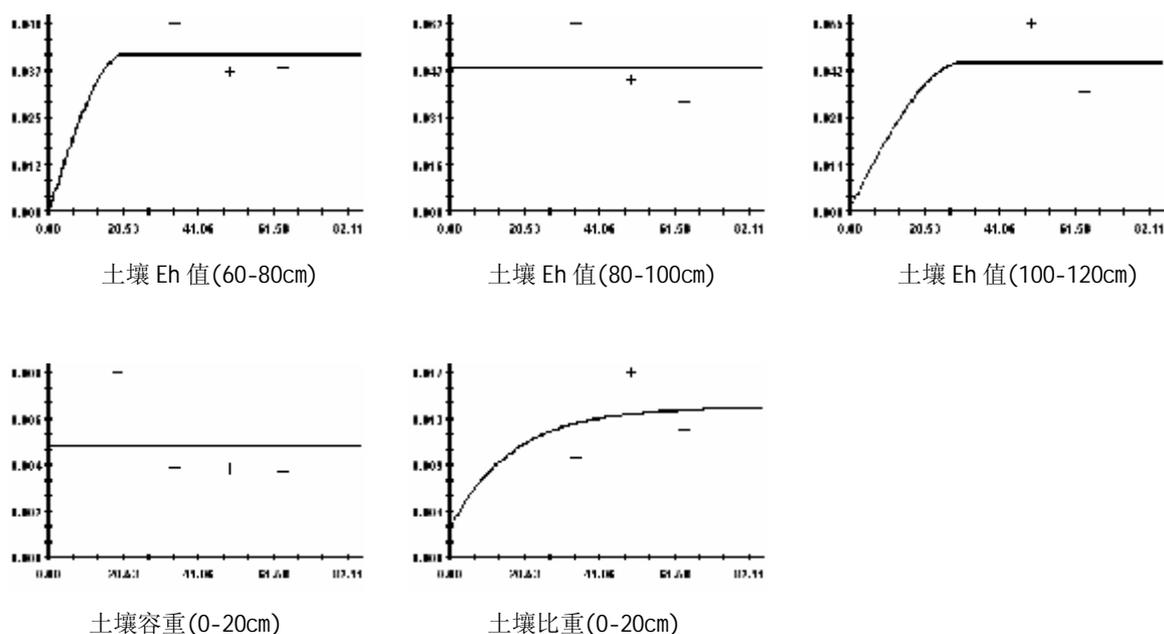


图 4-1 Y 采样区土壤特性空间变异半变异函数图

Fig. 4-1 Semivariograms of soil property spatial variability in Y site

4.1.2 Z 样地土壤特性半变异函数描述

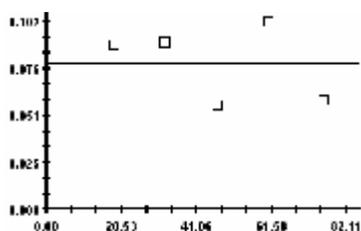
表 4-2 和图 4-2 分别描述了样地 Z 的土壤特性变异函数的理论模型及半方差函数图。

表 4-2 Z 样地不同土层土壤特性变异函数的理论模型及参数

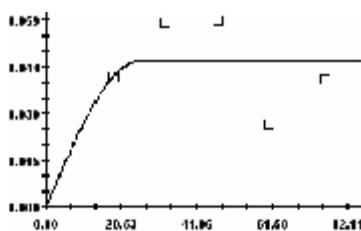
Tab. 4-2 Theoretical model and parameters of semivariograms of soil property in different layers of Z site

土壤特性	深度 (cm)	理论模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 A_0 (m)	结构因素比例 $C/(C_0+C)$	决定系数 R^2	残差 RSS
土壤盐分含量	0-20	线性模型	0.079211	0.079211	75.8	0.000	0.153	1.67E-03
	20-40	球状模型	0.0002	0.0462	25.1	0.996	0.023	7.46E-04
	40-60	球状模型	0.0459	0.1085	129.9	0.577	0.457	9.64E-04
	60-80	线性模型	0.051887	0.051887	75.8	0.000	0.004	8.46E-04
	80-100	线性模型	0.051276	0.051276	75.8	0.000	0.796	1.34E-03
	100-120	线性模型	0.075123	0.075123	75.8	0.000	0.214	1.85E-03
土壤水分含量	0-20	线性模型	0.107724	0.107724	75.8	0.000	0.550	1.81E-03
	20-40	球状模型	0.0001	0.2032	48.8	1.000	0.403	0.0174
	40-60	线性模型	0.1551	0.1551	75.8	0.000	0.059	0.0516
	60-80	球状模型	0.00001	0.01912	63.9	0.999	0.824	4.63E-05
	80-100	指数模型	0.01309	0.03968	12.8	0.670	0.330	5.31E-05
	100-120	球状模型	0.00052	0.01894	32.4	0.973	0.216	5.93E-05
土壤 Ph 值	0-20	线性模型	1.00E-06	9.50E-04	163.7	0.999	0.693	3.58E-08
	20-40	指数模型	1.41E-04	3.40E-04	43.6	0.584	0.305	1.31E-08
	40-60	指数模型	1.10E-04	1.44E-03	210.9	0.924	0.479	5.86E-08

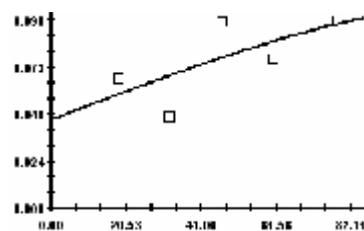
	60-80	指数模型	1.97E-04	5.86E-04	90.0	0.664	0.322	3.03E-08
	80-100	球状模型	1.00E-07	1.22E-04	18.2	0.999	0.000	5.61E-09
	100-120	线性模型	1.31E-04	2.10E-04	75.8	0.377	0.080	4.01E-08
土壤 砂粒 含量	0-20	球状模型	0.0001	0.2402	35.8	1.000	0.385	0.0196
	20-40	线性模型	0.48688	0.48688	75.8	0.000	0.789	0.111
	40-60	线性模型	0.12449	0.12449	75.8	0.000	0.344	9.64E-03
	60-80	线性模型	3.02E-03	3.02E-03	75.8	0.000	0.112	5.06E-03
	80-100	线性模型	0.044231	0.044231	75.8	0.000	0.247	1.27E-03
	100-120	线性模型	0.025697	0.025697	75.8	0.000	0.738	4.11E-05
土壤 粉粒 含量	0-20	线性模型	0.023381	0.023381	75.8	0.000	0.596	1.44E-04
	20-40	线性模型	0.067102	0.067102	75.8	0.000	0.268	1.32E-04
	40-60	线性模型	0.011824	0.011824	75.8	0.000	0.020	8.92E-05
	60-80	线性模型	0.007285	0.007285	75.8	0.000	0.152	3.53E-05
	80-100	线性模型	0.0001	0.0601	164.0	0.998	0.730	2.25E-04
	100-120	线性模型	0.00201	0.009254	75.8	0.783	0.294	1.63E-04
土壤 黏粒 含量	0-20	线性模型	0.055701	0.055701	75.8	0.000	0.509	9.08E-04
	20-40	线性模型	0.053966	0.053966	75.8	0.000	0.362	3.72E-04
	40-60	指数模型	0.0075	0.0516	13.1	0.855	0.074	5.88E-04
	60-80	线性模型	0.049261	0.049261	75.8	0.000	0.177	1.15E-03
	80-100	线性模型	0.057434	0.057434	75.8	0.000	0.269	3.56E-03
	100-120	线性模型	0.065948	0.065948	75.8	0.000	0.139	1.38E-03
土壤 氧化 还原 电位	0-20	球状模型	0.0083	0.0959	208.9	0.913	0.949	3.90E-05
	20-40	球状模型	0.00136	0.02632	69.9	0.948	0.993	1.24E-06
	40-60	球状模型	0.00001	0.02372	50.6	1.000	0.890	1.46E-05
	60-80	球状模型	0.00001	0.02212	70.9	1.000	0.920	2.57E-05
	80-100	线性模型	0.029995	0.029995	75.8	0.000	0.611	9.54E-05
	100-120	线性模型	0.031443	0.056043	75.8	0.439	0.712	1.45E-03
土壤容重	0-20	球状模型	3.00E-06	1.69E-03	18.2	0.998	0.000	7.08E-07
土壤比重	0-20	球状模型	2.90E-05	1.54E-03	28.3	0.981	0.124	3.717-07



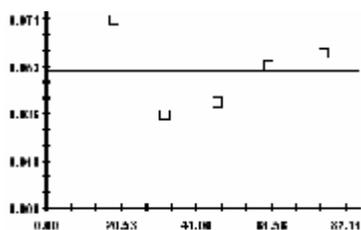
土壤盐分含量(0-20cm)



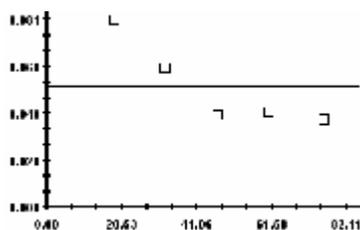
土壤盐分含量(20-40cm)



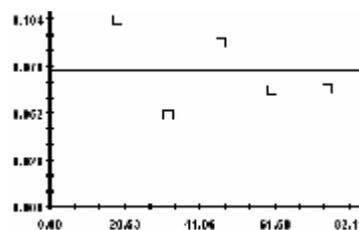
土壤盐分含量(40-60cm)



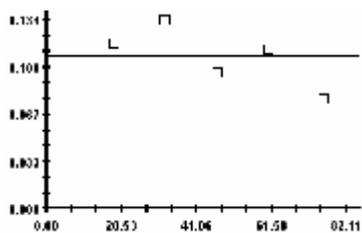
土壤盐分含量(60-80cm)



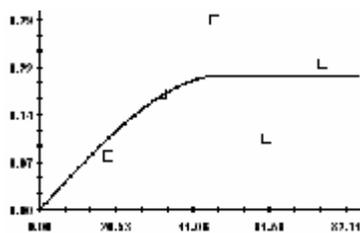
土壤盐分含量(80-100cm)



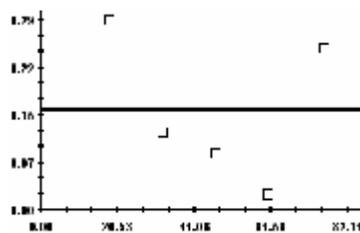
土壤盐分含量(100-120cm)



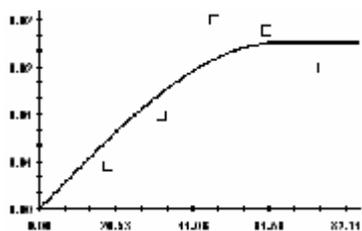
土壤水分含量(0-20cm)



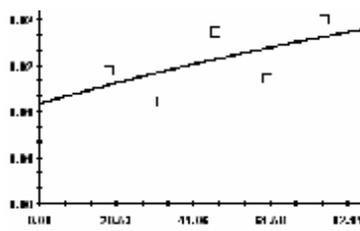
土壤水分含量(20-40cm)



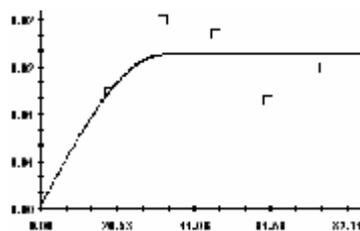
土壤水分含量(40-60cm)



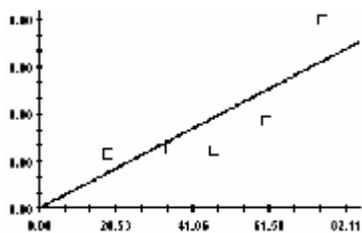
土壤水分含量(60-80cm)



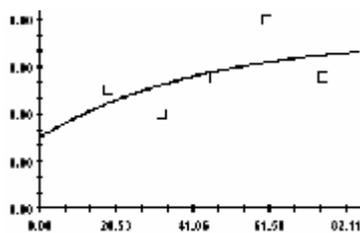
土壤水分含量(80-100cm)



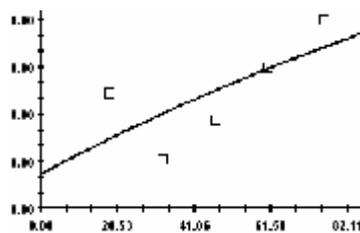
土壤水分含量(100-120cm)



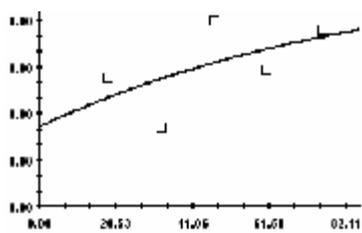
土壤 pH 值(0-20cm)



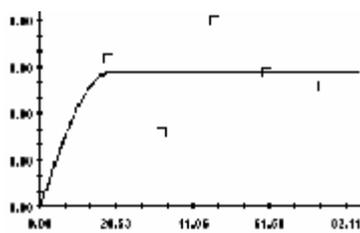
土壤 pH 值(20-40cm)



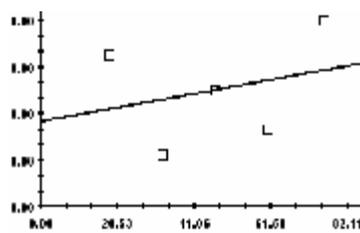
土壤 pH 值(40-60cm)



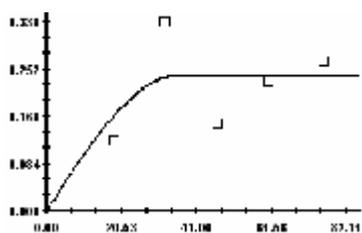
土壤 pH 值(60-80cm)



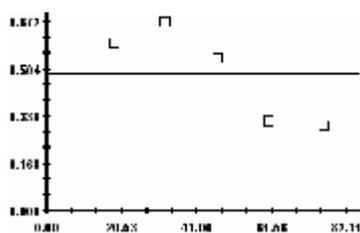
土壤 pH 值(80-100cm)



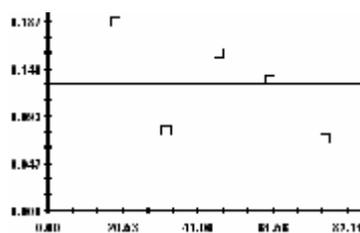
土壤 pH 值(100-120cm)



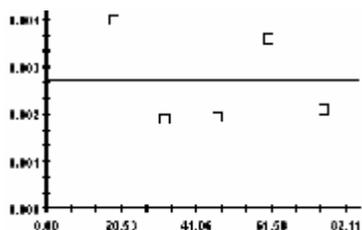
土壤砂粒含量(0-20cm)



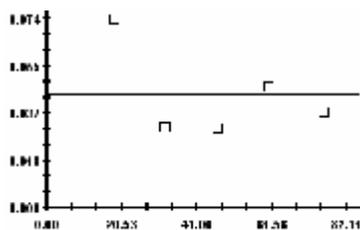
土壤砂粒含量(20-40cm)



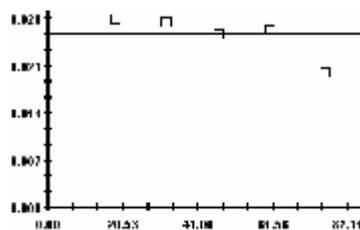
土壤砂粒含量(40-60cm)



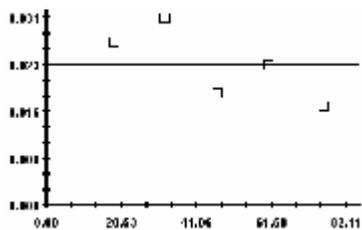
土壤砂粒含量(60-80cm)



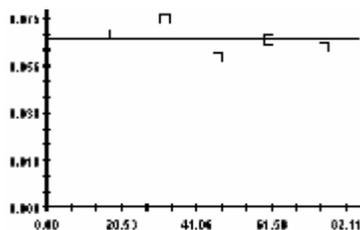
土壤砂粒含量(80-100cm)



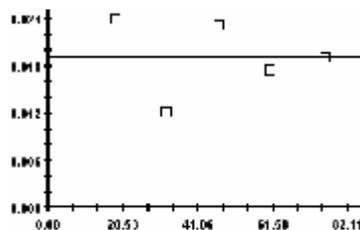
土壤砂粒含量(100-120cm)



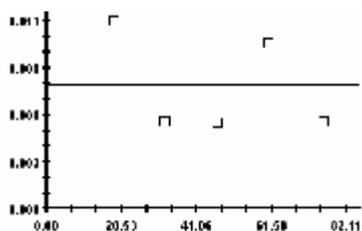
土壤粉粒含量(0-20cm)



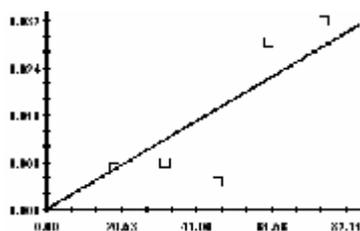
土壤粉粒含量(20-40cm)



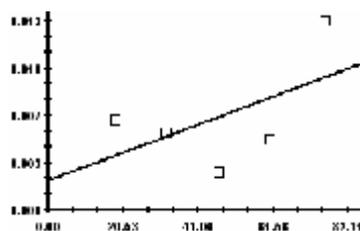
土壤粉粒含量(40-60cm)



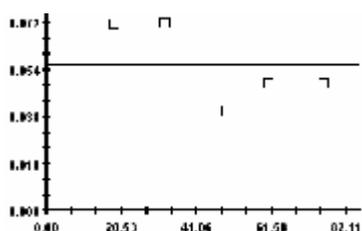
土壤粉粒含量(60-80cm)



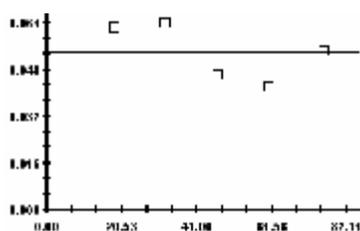
土壤粉粒含量(80-100cm)



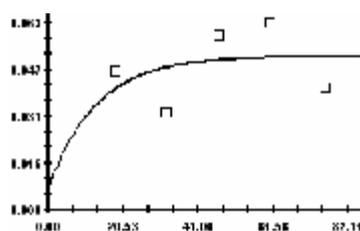
土壤粉粒含量(100-120cm)



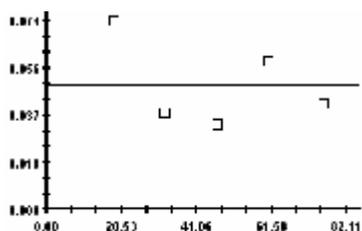
土壤黏粒含量(0-20cm)



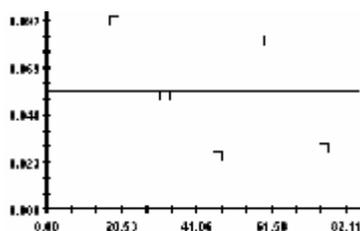
土壤黏粒含量(20-40cm)



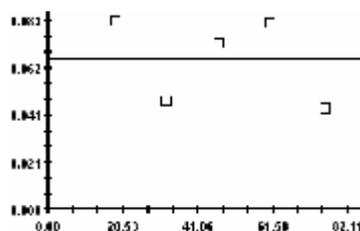
土壤黏粒含量(40-60cm)



土壤黏粒含量(60-80cm)



土壤黏粒含量(80-100cm)



土壤黏粒含量(100-120cm)

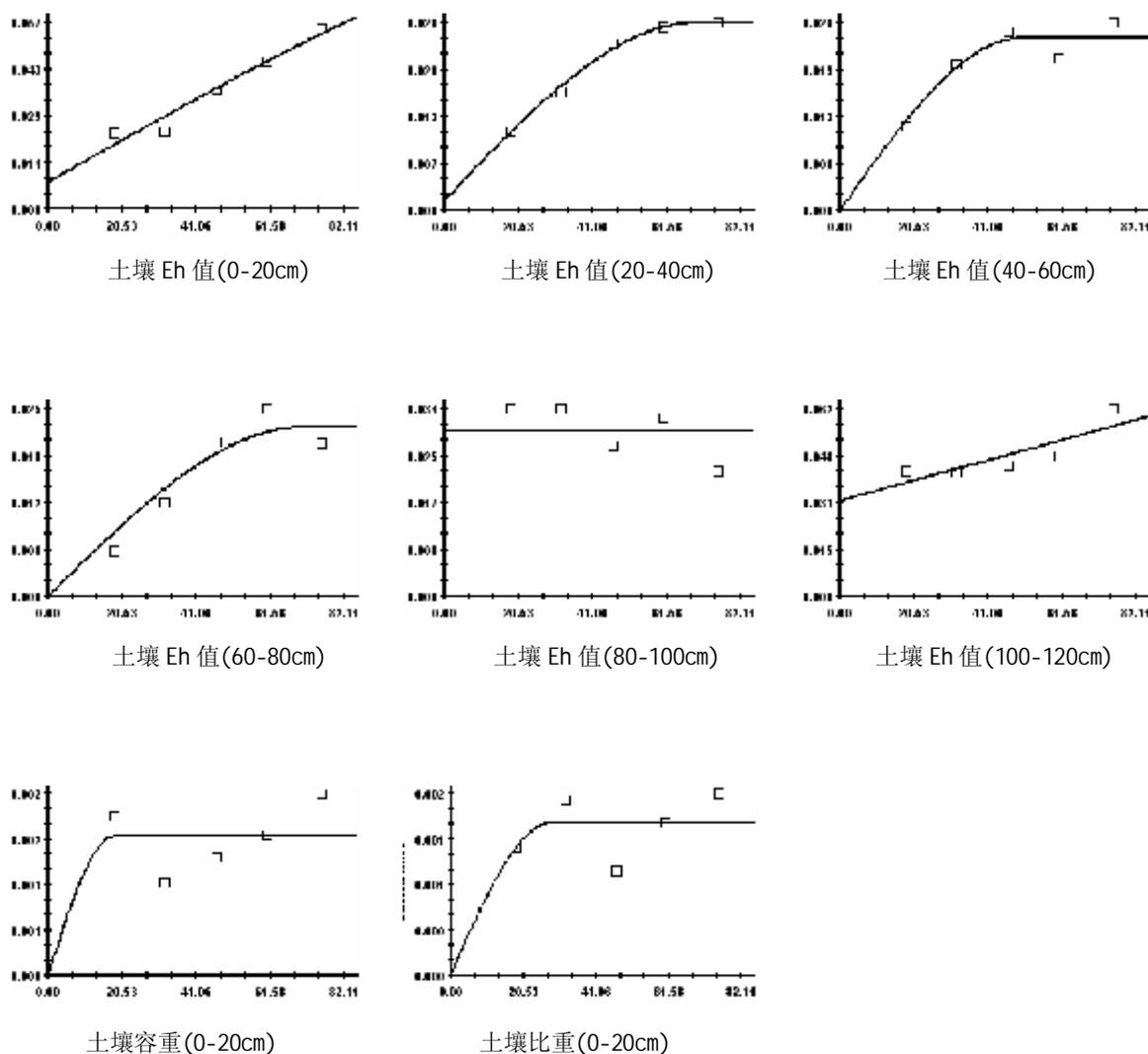


图 4-2 Z 采样区土壤特性空间变异半变异函数图

Fig.4-2 Semivariograms of soil property spatial variability in Z site

Z 样地土壤全盐量除 20-60cm 层外，其余各层均表现为纯块金效应；土壤水分含量分别在 0-20cm、40-60cm 为纯块金效应，变异由结构性因素引起最低为 67%，最高为 100%，说明该层变异完全由结构性因素引起；土壤 pH 值半变异函数的理论模型在 20-80cm 各层以及 100-120cm 层符合指数模型，空间变异由结构性因素引起最低为 100-120cm 层 37.7%，最高为 0-20cm 层 99.9%；土壤机械组成纯块金效应显著，砂粒、粉粒、黏粒含量共包括 6 个土层，18 个理论模型，其中有 14 个模型为纯块金效应；土壤氧化还原电位从表层至 80cm 层各层均符合球状模型，且由结构性因素引起的变异占 90% 以上，说明受随机性因素影响较小；土壤比重和容重都符合球状模型。

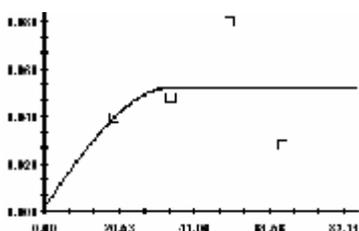
4.1.3 D 样地土壤特性半变异函数描述

表 4-3 和图 4-3 分别描述了样地 D 的土壤特性变异函数的理论模型及半方差函数图。

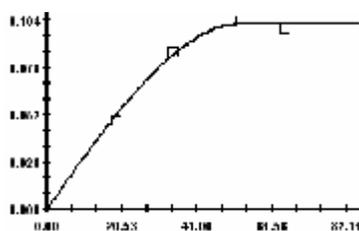
表 4-3 D 样地不同土层土壤特性变异函数的理论模型及参数
 Tab.4-3 Theoretical model and parameters of semivariograms of soil property in different layers of D site

土壤特性	深度 (cm)	理论模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	变程 A_0 (m)	结构因素比例 $C/(C_0+C)$	决定系数 R^2	残差 RSS
土壤盐分含量	0-20	球状模型	0.0021	0.0521	34.1	0.960	0.081	1.38E-03
	20-40	球状模型	0.0001	0.1022	53.8	0.999	0.989	2.54E-05
	40-60	球状模型	0.0122	0.0914	35.6	0.867	0.200	2.38E-03
	60-80	球状模型	0.0319	0.1188	120.7	0.731	0.716	4.58E-04
	80-100	球状模型	0.0027	0.0311	52.1	0.913	0.903	1.37E-05
	100-120	指数模型	0.0082	0.0635	210.9	0.871	0.116	4.49E-04
土壤水分含量	0-20	线性模型	0.033027	0.033027	65.0	0.000	0.588	1.05E-03
	20-40	球状模型	0.001	0.099	26.8	0.990	0.020	5.12E-03
	40-60	指数模型	0.088	0.468	12.5	0.812	0.974	1.09E-04
	60-80	球状模型	0.082	0.941	210.9	0.913	0.811	9.68E-03
	80-100	线性模型	0.14678	0.14678	65.0	0.000	0.720	0.0113
	100-120	指数模型	0.122	0.557	210.9	0.781	0.648	1.90E-03
土壤 Ph 值	0-20	球状模型	2.84E-04	1.11E-03	180.5	0.745	0.670	3.85E-08
	20-40	球状模型	1.00E-06	8.02E-04	81.5	0.999	0.904	7.12E-08
	40-60	球状模型	1.00E-06	5.66E-04	82.1	0.998	0.905	3.54E-08
	60-80	球状模型	1.00E-06	5.12E-04	75.6	0.998	0.888	4.30E-08
	80-100	球状模型	1.00E-06	3.93E-04	62.7	0.997	0.764	2.53E-08
	100-120	指数模型	2.54E-05	1.02E-03	210.9	0.751	0.545	1.38E-08
土壤砂粒含量	0-20	球状模型	0.0001	0.1142	80.6	0.999	0.692	1.99E-03
	20-40	球状模型	0.001	0.466	63.4	0.998	0.960	6.48E-03
	40-60	球状模型	0.001	1.032	39.5	0.999	0.905	0.0148
	60-80	指数模型	0.165	1.36	210.9	0.879	0.356	0.0482
	80-100	线性模型	0.23396	0.23396	65.0	0.000	0.868	1.32E-03
	100-120	球状模型	0.0001	0.1562	35.1	0.999	0.110	0.0168
土壤粉粒含量	0-20	线性模型	0.0001	0.1946	164.4	0.999	0.949	9.97E-05
	20-40	线性模型	0.001	1.287	164.2	0.999	0.977	0.0124
	40-60	球状模型	0.0054	0.1208	35.1	0.955	0.192	4.55E-03
	60-80	球状模型	0.0471	0.2282	210.9	0.794	0.458	2.20E-03
	80-100	线性模型	0.07841	0.07841	65.0	0.000	0.535	5.24E-04
	100-120	线性模型	0.11673	0.11673	65.0	0.000	0.623	4.71E-03
土壤黏粒含量	0-20	线性模型	0.0249	0.0249	65.0	0.000	0.228	2.33E-04
	20-40	球状模型	0.0226	0.1455	147.8	0.845	0.925	1.26E-04
	40-60	线性模型	0.03675	0.04734	65.0	0.224	0.353	2.78E-04
	60-80	球状模型	0.0067	0.1784	207.1	0.962	0.677	8.47E-04
	80-100	球状模型	0.006	0.427	210.9	0.986	0.597	7.03E-03

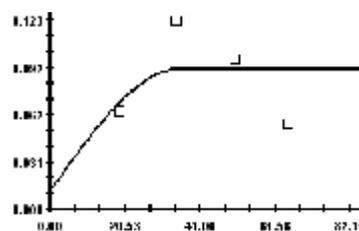
	100-120	线性模型	0.10068	0.10068	65.0	0.000	0.626	3.32E-03
土壤氧化还原电位	0-20	指数模型	0.0061	0.0515	78.5	0.882	0.690	6.27E-05
	20-40	球状模型	0.00088	0.01676	37.5	0.947	0.407	3.18E-05
	40-60	指数模型	0.0114	0.0483	210.9	0.764	0.596	1.74E-05
	60-80	球状模型	0.0012	0.0862	210.9	0.986	0.831	8.31E-05
	80-100	球状模型	0.0001	0.0491	75.7	0.998	0.760	3.07E-04
	100-120	球状模型	0.0001	0.0373	57.8	0.997	0.766	1.65E-04
土壤容重	0-20	指数模型	0.00001	0.01101	43.1	0.999	0.557	2.09E-05
土壤比重	0-20	线性模型	0.0001	0.1226	164.2	0.999	0.858	3.56E-04



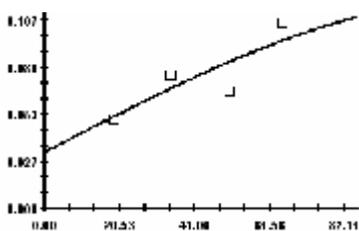
土壤盐分含量(0-20cm)



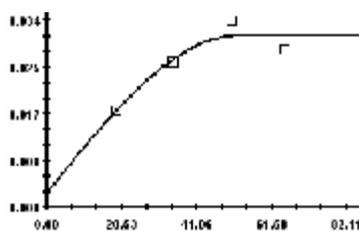
土壤盐分含量(20-40cm)



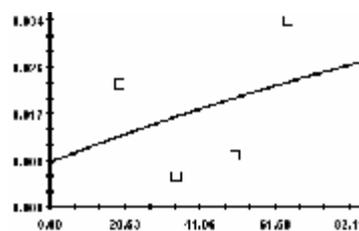
土壤盐分含量(40-60cm)



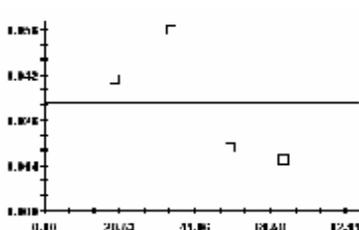
土壤盐分含量(60-80cm)



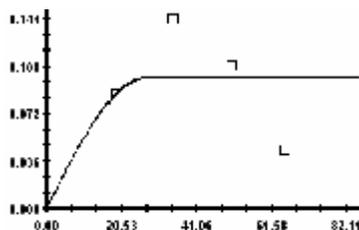
土壤盐分含量(80-100cm)



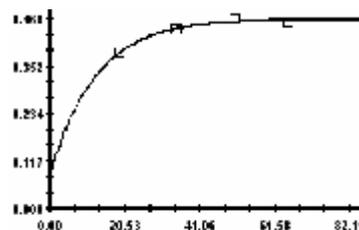
土壤盐分含量(100-120cm)



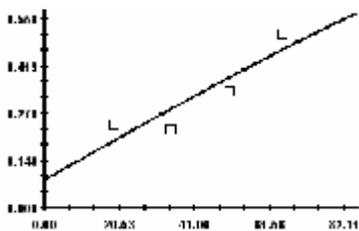
土壤水分含量(0-20cm)



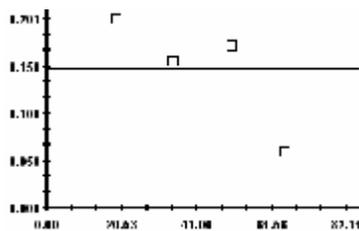
土壤水分含量(20-40cm)



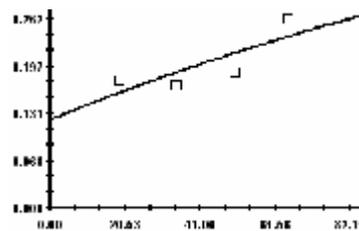
土壤水分含量(40-60cm)



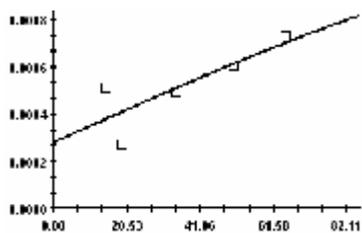
土壤水分含量(60-80cm)



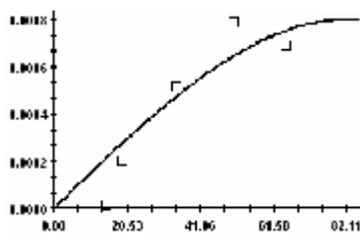
土壤水分含量(80-100cm)



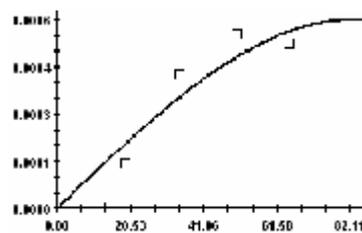
土壤水分含量(100-120cm)



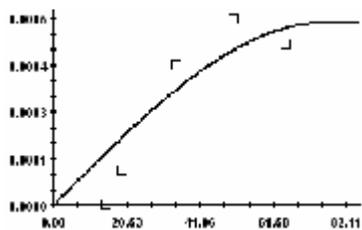
土壤 pH 值(0-20cm)



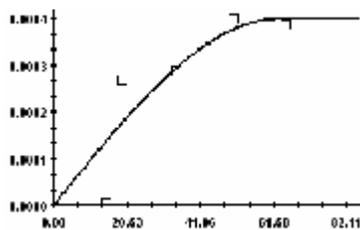
土壤 pH 值(20-40cm)



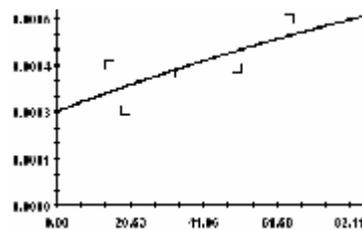
土壤 pH 值(40-60cm)



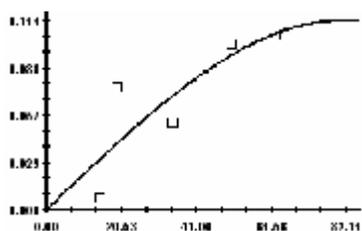
土壤 pH 值(60-80cm)



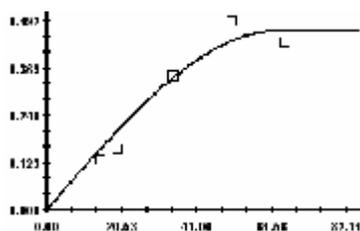
土壤 pH 值(80-100cm)



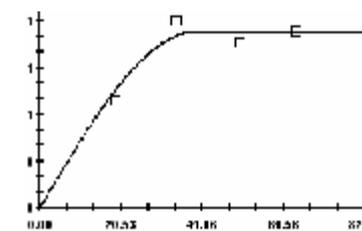
土壤 pH 值(100-120cm)



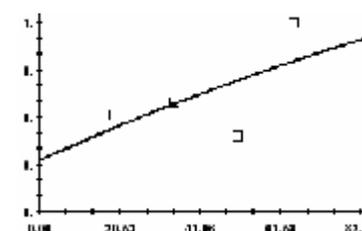
土壤砂粒含量(0-20cm)



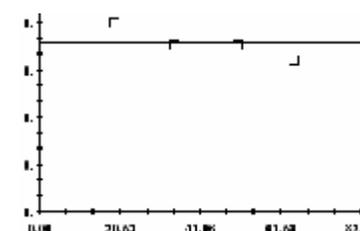
土壤砂粒含量(20-40cm)



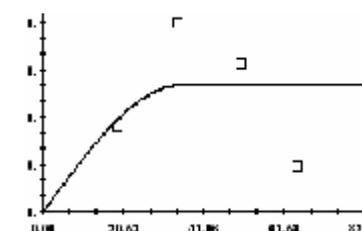
土壤砂粒含量(40-60cm)



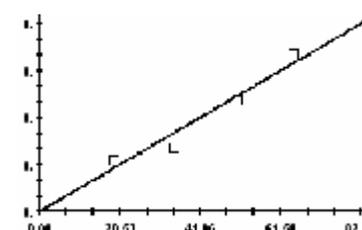
土壤砂粒含量(60-80cm)



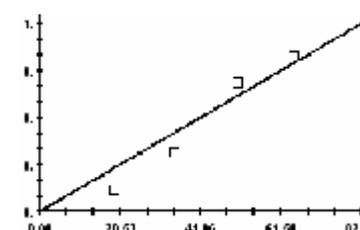
土壤砂粒含量(80-100cm)



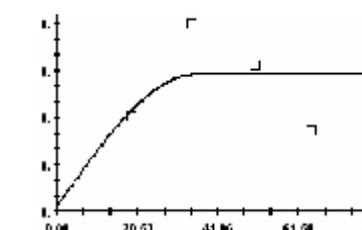
土壤砂粒含量(100-120cm)



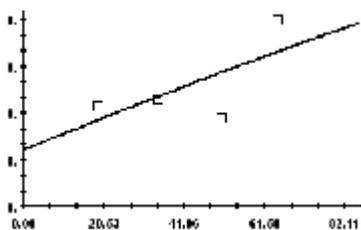
土壤粉粒含量(0-20cm)



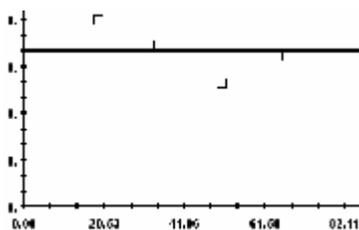
土壤粉粒含量(20-40cm)



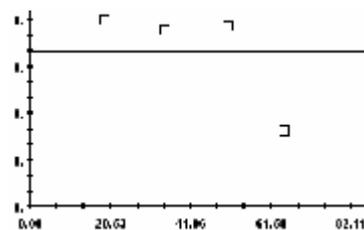
土壤粉粒含量(40-60cm)



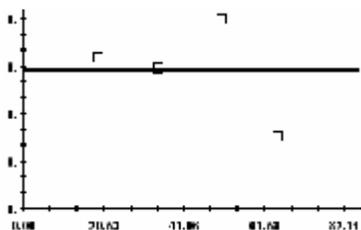
土壤粉粒含量(60-80cm)



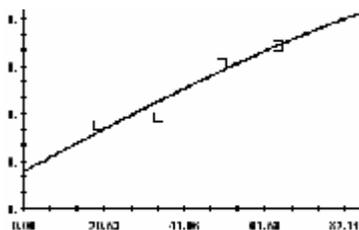
土壤粉粒含量(80-100cm)



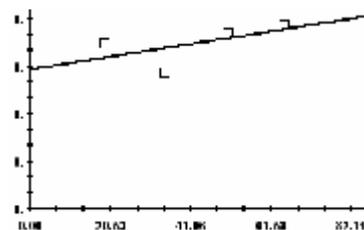
土壤粉粒含量(100-120cm)



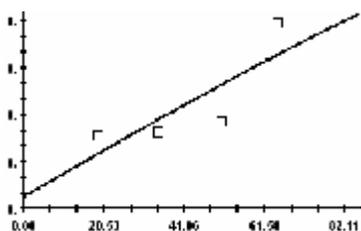
土壤黏粒含量(0-20cm)



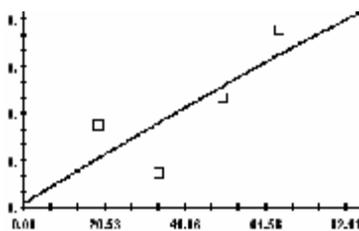
土壤黏粒含量(20-40cm)



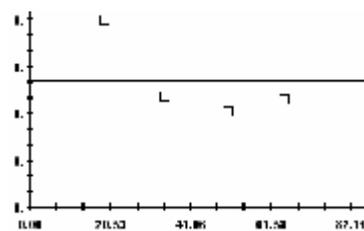
土壤黏粒含量(40-60cm)



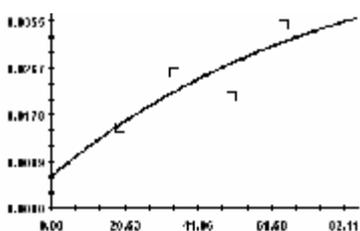
土壤黏粒含量(60-80cm)



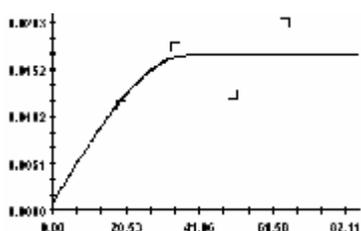
土壤黏粒含量(80-100cm)



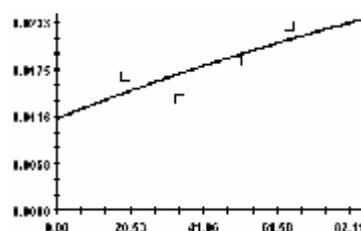
土壤黏粒含量(100-120cm)



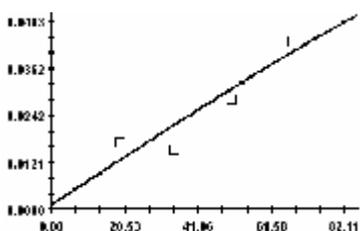
土壤 Eh 值(0-20cm)



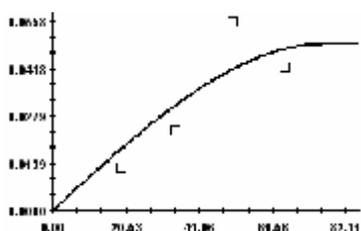
土壤 Eh 值(20-40cm)



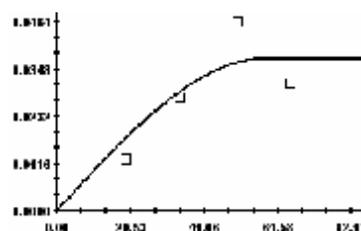
土壤 Eh 值(40-60cm)



土壤 Eh 值(60-80cm)



土壤 Eh 值(80-100cm)



土壤 Eh 值(100-120cm)

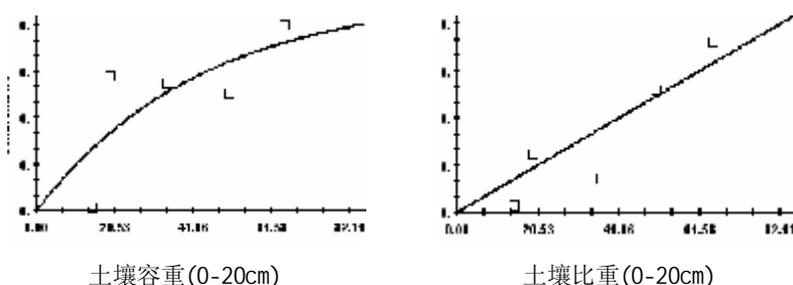


图 4-3 D 采样区土壤特性空间变异半变异函数图

Fig.4-3 Semi variograms of soil property spatial variability in D site

D 样地土壤全盐量半变异函数拟合除 100-120cm 层为指数模型，其余各层均为球状模型，由结构性因素引起变异的最低为 60-80cm 层 73.1%，其余各层均在 85%以上；土壤水分半变异函数模型在 0-20cm 层和 80-100cm 层为纯块金效应，其余各层由结构性因素引起变异均在 75%以上；土壤 pH 值的半变异函数理论模型除底层为指数模型，其余各层均符合球状模型，除表层和底层由结构性因素引起变异约为 75%，其余各层均达 99%以上，说明随机性因素影响较小；土壤机械组成仍表现出显著的纯块金效应，但没有其它两个区域明显，粉粒含量随机性因素影响较大；土壤氧化还原电位半变异函数的理论模型符合球状模型和指数模型，由结构性因素占引起变异因素的 75%以上；土壤容重和比重分别符合指数和线性模型，其变异几乎全部由结构性因素引起。

4.1.4 胡杨林下土壤特性空间变异分析

通过应用半变异函数的理论模型对采样区各个土壤特性进行拟合分析，得出以下结论：

(1)总体来看，三个采样区土壤特性的半变异函数理论模型拟合应用最多的是球状模型，这与大多数研究一致。

(2)比较各个拟合模型的决定系数、残差等因素，三个采样区土壤特性的模型拟合中土壤 pH 值和氧化还原电位的拟合效果最好，土壤机械组成的拟合效果最差，尤以 Z 区表现突出，大多为纯块金效应，这与孟宝^[108]的研究结果相一致。土壤水分和盐分的拟合效果差异很大，在某些土层决定系数可能达到 0.9 以上，而在另一些土层还不到 0.1。土壤 pH 值和氧化还原电位的拟合效果较好，其主要原因是检验方法精度相对较高，受环境和人为影响较小；土壤机械组成半变异函数理论模型拟合大多为纯块金效应，说明区域化变量空间自相关结构为零。通过分析研究区地理位置发现，采样区刚好位于疏勒河故道，河流多次改道，冲刷河床，都会使该地的土壤机械组成在较小的区域内就有很大的变化，所以出现了很多纯块金效应；土壤水分和盐分在拟合过程中受奇异值的影响很大，而奇异值对理论模型的拟合又有很大影响，致使拟合效果出现差异。采样时腐殖

质混入土样中而使所测土壤水分含量偏高，或者出现极高值。而水分含量的测定方法采用烘干法，也会降低测试结果的精度，从而影响拟合效果。采样过程中发现，在采样区不同深度均出现了盐盘，这是导致土壤盐分含量奇异值频出的主要原因。黎立群对河西走廊盐渍土的研究中也提到在疏勒河下游有大面积坚硬结壳的盐土，其厚度 5-10cm，含盐量极高^[109]。

(3)根据表 4-1、表 4-2 以及表 4-3 的分析结果，总结土壤特性变异函数的变程范围如表 4-4 所示。

从表 4-4 来看，本研究采用的采样间距大多符合“采样间距最好在变程的 1/4 到 1/2 之间”的要求，张仁铎等的研究中列出的变程都落在本研究的变程范围之内^[104]。个别变程小于理论最小采样间距，这是由于采样时顾及胡杨胸径的挑选原则而影响间距的原因。三个采样区的采样间距变化，变程也相应发生变化，说明采样间距影响着变程的大小。

表 4-4 土壤特性变程及相关程度

Tab.4-4 The scale and related degree of soil property

土壤属性	Y 样地		Z 样地		D 样地	
	变程(m)	相关程度	变程(m)	相关程度	变程(m)	相关程度
全盐量	18.7-210.9	中至强	25.1-129.9	中至强	34.1-210.9	中至强
水分含量	10.1-143.4	强相关	12.8-48.4	中至强	12.5-210.9	强相关
pH 值	27.5-165.3	强相关	18.2-210.9	中至强	62.7-210.9	中至强
砂粒含量	13.4-50.0	强相关	—	—	35.1-210.9	强相关
粉粒含量	18.7-90.0	中至强	75.8-164.0	强相关	35.1-210.9	强相关
黏粒含量	9.5-56.3	中至强	—	—	65.0-210.9	中至强
氧化还原电位	20.6-210.9	中至强	75.8-208.9	中至强	37.5-210.9	强相关

$C/(C_0+C) > 75\%$ ，为强相关； $C/(C_0+C) < 25\%$ ，为弱相关； $25\% < C/(C_0+C) < 75\%$ ，为中等相关。

4.2 土壤水盐特性空间插值

根据第一节分析发现，土壤特性都具有一定程度的空间自相关，传统的统计学不能反应其局部的变化特征，而地统计学恰恰弥补了这一不足。因此，可利用其对土壤特性空间变异结构进行分析和讨论。本文选取对胡杨生长起重要作用的土壤盐分含量和土壤水分含量进行插值分析。

4.2.1 数据检验

地统计学分析要求数据符合正态分布。利用 ArcGIS 9.0 软件的 Geostatistical analyst 模块中的 Explore data 工具，通过绘制不同土层各土壤特性的直方图或者 QQ 图等，检验其是否满足正态分布，如果不满足的要将其进行对数或者 Box-Cox 转换，使

其符合正态分布。

如表 4-5、4-6、4-7 中所示，三个采样区域的土壤盐分和水分部分满足正态分布，其余数据也经对数变换满足对数正态分布。

表 4-5 Y 样地土壤盐分与水分正态分布检验结果

Tab. 4-5 Test result of normal distribution of soil moisture and salinity in Y site

	深度(cm)	分布类型	偏态度	峰态度		深度(cm)	分布类型	偏态度	峰态度
土壤 盐分 含量	0-20	正态分布	0.3861	2.0132	土壤 水分 含量	0-20	对数正态	0.3323	2.3677
	20-40	正态分布	0.4174	2.4478		20-40	对数正态	0.2869	2.0130
	40-60	对数正态	0.2917	2.1577		40-60	对数正态	-0.1475	1.8090
	60-80	对数正态	0.2355	2.0983		60-80	正态分布	0.1447	2.1788
	80-100	对数正态	-0.5160	4.2361		80-100	对数正态	0.2829	2.5430
	100-120	对数正态	-0.1221	3.6635		100-120	对数正态	-0.7069	3.5229

表 4-6 Z 样地土壤盐分与水分正态分布检验结果

Tab. 4-6 Test result of normal distribution of soil moisture and salinity in Z site

	深度(cm)	分布类型	偏态度	峰态度		深度(cm)	分布类型	偏态度	峰态度
土壤 盐分 含量	0-20	正态分布	-0.2209	1.6649	土壤 水分 含量	0-20	对数正态	0.2574	2.0429
	20-40	正态分布	-0.4936	2.4771		20-40	对数正态	0.5202	2.0254
	40-60	正态分布	0.0976	2.7528		40-60	正态分布	0.1328	2.8476
	60-80	对数正态	0.0714	2.4699		60-80	正态分布	0.1489	2.1723
	80-100	正态分布	-0.2311	2.3310		80-100	正态分布	0.1461	2.7279
	100-120	对数正态	0.3747	3.1072		100-120	对数正态	0.4694	3.3295

表 4-7 D 样地土壤盐分与水分正态分布检验结果

Tab. 4-7 Test result of normal distribution of soil moisture and salinity in D site

	深度(cm)	分布类型	偏态度	峰态度		深度(cm)	分布类型	偏态度	峰态度
土壤 盐分 含量	0-20	正态分布	-0.4711	2.1386	土壤 水分 含量	0-20	对数正态	0.6899	3.4998
	20-40	正态分布	0.4106	1.7497		20-40	正态分布	0.3709	2.4423
	40-60	对数正态	-0.0687	2.1256		40-60	对数正态	-0.4793	1.9833
	60-80	正态分布	0.6345	1.9921		60-80	对数正态	-0.1111	1.9288
	80-100	对数正态	-0.0799	2.1022		80-100	对数正态	0.0731	2.1261
	100-120	对数正态	0.5121	3.0814		100-120	对数正态	-0.0821	1.5393

4.2.2 空间插值

土壤属性值的空间插值是通过 ArcGIS 9.0 软件 Geostatistical analyst 模块中的 geostatistical wizard 工具实现的。主要运用普通克里金法，对采样区土壤水分和盐分的空间变化模拟，并绘制空间分布图。

由第三章的统计分析得出三个采样区土壤水分含量和全盐量值的最大及最小值，按

照等间距的原则，将其数据值从小到大分为二十等分，并按此统一原则分别对土壤水分含量和全盐量进行插值，如图 4-4 到 4-9 所示。

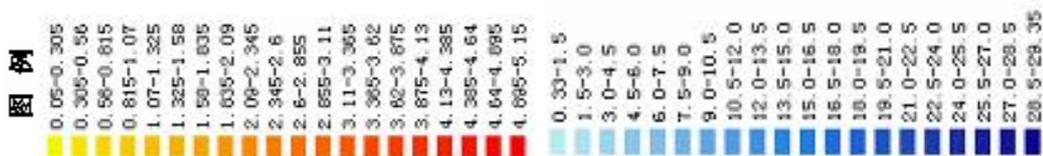
如图 4-4 至 4-6 所示，颜色越深说明盐分含量越高，由此判断，Z(胸径为 11.14-14.42cm)样地整体含盐量均比其它两个采样区的高，且最高值不是出现在表层，而是在亚表层，这与其它两区也截然不同。含盐量次高的是 D(胸径为 14.32-18.62cm)样地，相对最低的是 Y(胸径为 6.37-9.55cm)样地。从图中还可发现，图片的颜色越来越趋于单一化，说明三块样地含盐量从表层到 100-120cm 层变异程度越来越小，Y 样地表现尤为明显，在其 80-100cm 层和 100-120cm 层基本没什么变化，说明该区盐分含量到 80cm 以下的深度趋于稳定。D 样地在 100-120cm 深度仍有明显变异。

图 4-7 至 4-9 为三块样地表层到底层土壤水分含量进行空间插值绘制的分布图，颜色越深说明水分含量越高。图中显示 Z 样地颜色较深，表明水分含量较其它两个区域高，从 40-60cm 层以下各层更为显著。Y 样地和 D 样地颜色较浅，表明土壤水分含量相对较低。从表层到底层颜色梯度越来越明显，说明其变异程度也越来越高，这一点在 Z 样地表现最为突出。

土壤水分含量随深度变化的趋势与盐分含量的变化趋势恰好互补，土壤盐分含量随深度越深含量越少，而水分是刚好相反，深度加大其含量也越高。这主要是因为土壤盐分随水分蒸发而不断向地表迁移。但横向比较三个采样区含水与含盐量，又有趋同的表现，其含量都是 $Z > D > Y$ ，这是由于土壤水分运移的过程带动了土壤盐分的运动。就是在这两种不同运动形式的作用下，土壤盐分与水分含量才表现为图 4-4 至图 4-9 反映的这种现象。

4.2.3 模型的精度评价

绘制完成了对实验数据的空间插值分析，需要对其进行精度检验。这项工作是在差值过程的交叉验证面板中进行，并根据以下标准对模型的精度进行评价^[110]：标准平均值(mean standardized)最接近于 0，均方根预测误差(root-mean-square)最小，平均标准误差(average standard error)最接近于均方根误差(root-mean-square)，标准均方根预测误差(root-mean-square standardized)接近于 1。经过对生成的插值预测图进行以上误差分析，结果发现预测的精度较高。



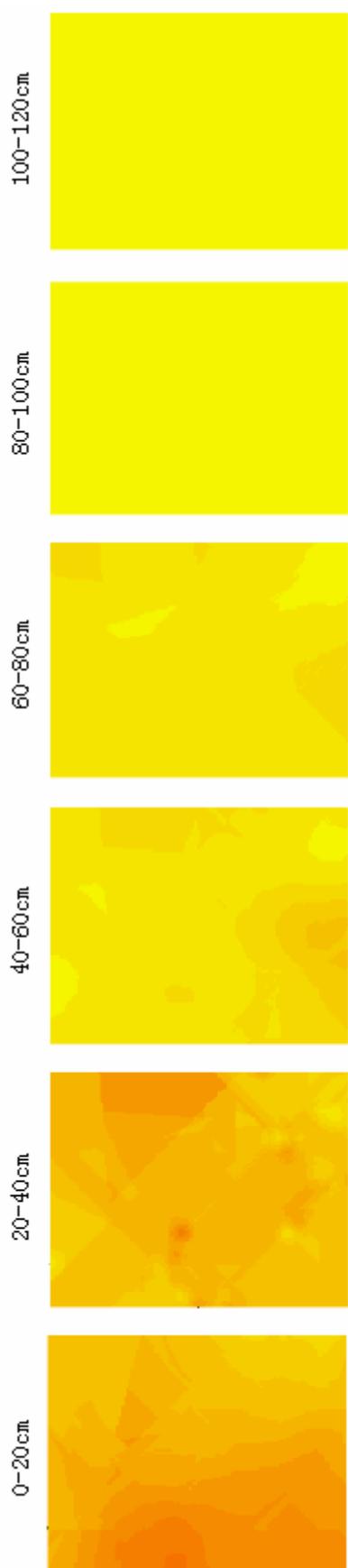


图4-4 Y样地不同深度土壤盐分含量空间插值拟合分布图

Fig. 4-4 Distribution of Spatial interpolation fitting of Salinity content at different layers in Y plot



图4-5 Z样地不同深度土壤水分含量空间插值拟合分布图

Fig. 4-5 Distribution of Spatial interpolation fitting of Salinity content at different layers in Z plot

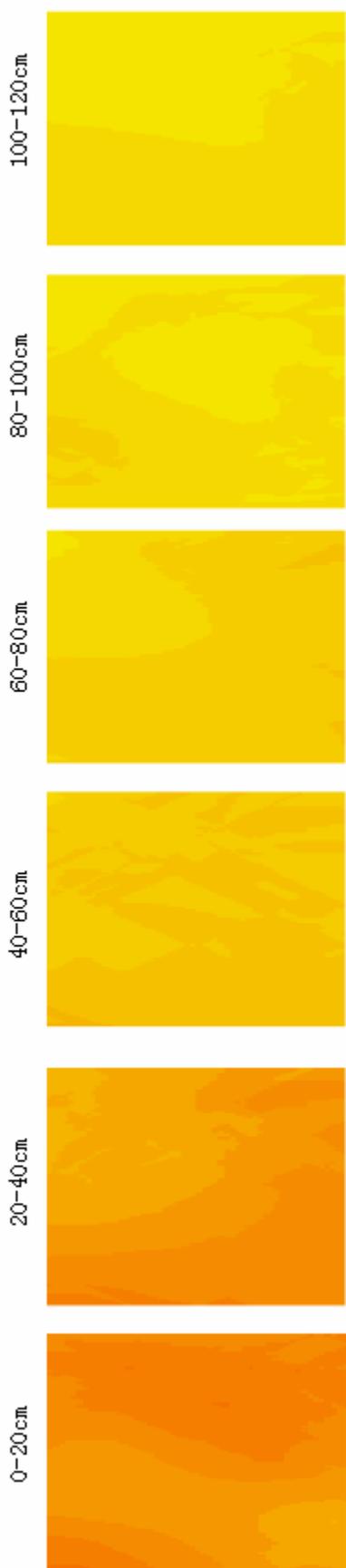


图4-6 D样地不同深度土壤水分含量空间插值拟合分布图

Fig. 4-6 Distribution of Spatial interpolation fitting of Salinity content at different layers in D plot

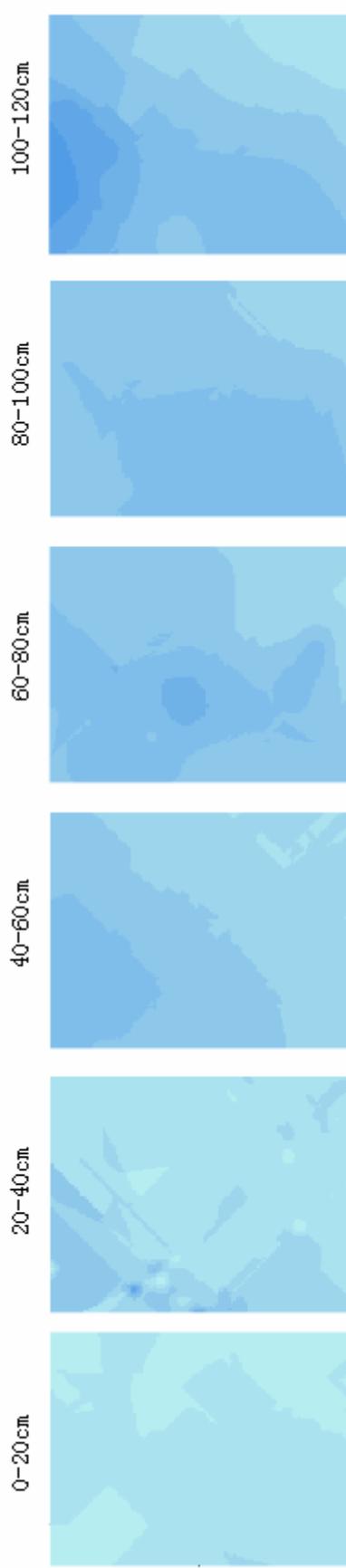


图4-7 Y样地不同深度土壤水分含量空间插值拟合分布图

Fig. 4-7 Distribution of Spatial interpolation fitting of Water content at different layers in Y plot

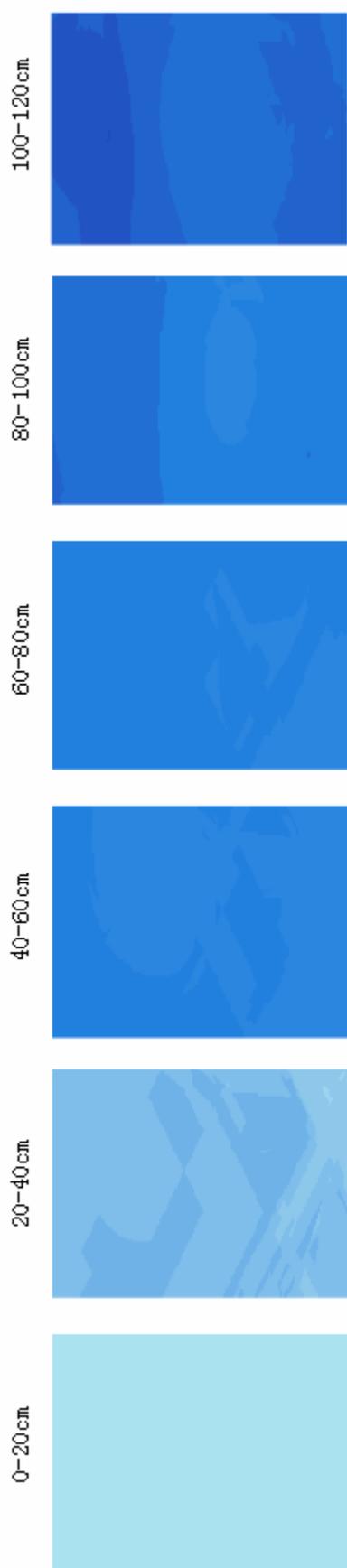


图4-8 Z样地不同深度土壤水分含量空间插值拟合分布图

Fig. 4-8 Distribution of Spatial interpolation fitting of Water content at different layers in Z plot

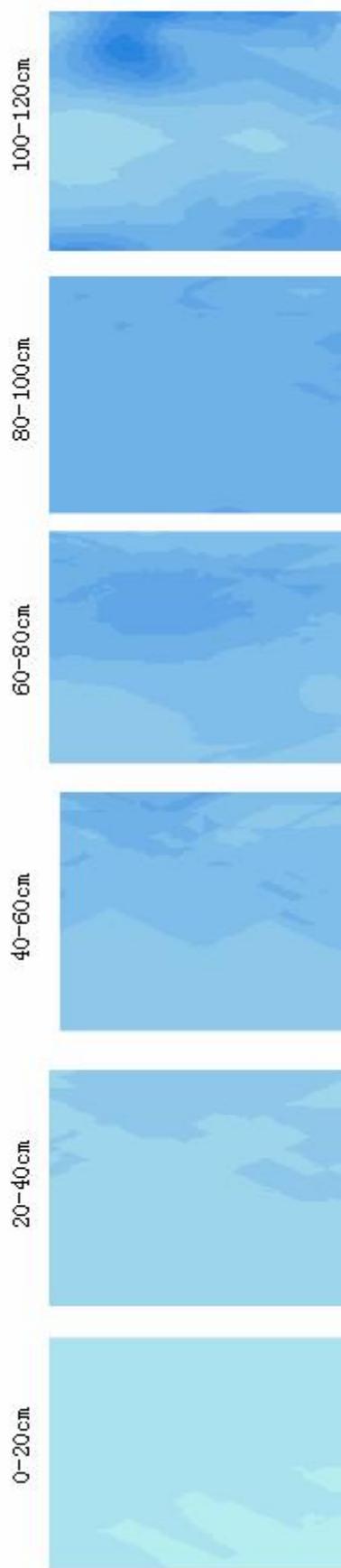


图4-9 D样地不同深度土壤水分含量空间插值拟合分布图

Fig. 4-9 Distribution of Spatial interpolation fitting of Water content at different layers in D plot

5. 结论与展望

5.1 结论

本文以敦煌绿洲为研究区域，以绿洲内天然胡杨林生长区域为试验区。采用统计学和地统计学的方法，分别对胸径为 6.37-9.55cm(Y 样地)、11.14-14.42cm(Z 样地)、14.32-18.62cm(D 样地)的胡杨林下土壤水盐含量及其它一些土壤特性的空间异质性进行了分析，并对不同胡杨胸径、不同层次土壤水盐含量进行了比较及原因探讨；同时对不同胸径、不同层次胡杨林下土壤水分与盐分含量进行空间插值模拟。统计特征分析使用的是统计软件(SPSS)，地统计特征分析使用的是地理信息系统软件(ArcGIS)与地统计软件(GS⁺)。

对敦煌绿洲胡杨林生长区域土壤水分和盐分含量的空间异质性研究结果，从以下几个方面总结为：

(1)敦煌绿洲胡杨林土壤水分含量都随深度的增加而增加，空间分异显著，胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中(Y 样地)土壤水分含量最小，胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)次之，胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)最大。

(2)敦煌绿洲胡杨林土壤盐分含量随深度的增加而减少，胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)土壤盐分含量最高，胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)盐分含量次之，最低的是胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地中(Y 样地)土壤盐分含量。Z 样地在 20-40cm 层土壤盐分含量出现高值，这与其它两块样地大相径庭，认为该高值可能是由于该层出现盐盘而引起。

(3)三个采样区的土壤质地分别为，胡杨胸径为 6.37-9.55cm 的样地(Y 样地)属砂质壤土，胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)和胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)都属壤质粘土。

(4)采样区土壤 pH 值经测定范围在 8.5-9.0 之间，表明该区域的土壤偏碱性，初步断定采样区的土壤属于盐土与碱土的过渡型土壤。胡杨胸径为 11.14-14.42cm 的样地(Z 样地)和胡杨胸径为 14.32-18.62cm 的样地(D 样地)土壤 pH 值在 40-60cm 层出现高值，可能是因为胡杨吸收水中的碱金属重碳酸盐，并在其枝叶聚集，在其下发育的土壤有苏达的积累所致。

(5)三个采样区土壤特性的半变异函数理论模型拟合应用最多的是球状模型，这与大多数的研究相符合。比较各个拟合模型的决定系数、残差等因素，三个采样区域土壤特性的模型拟合中土壤 pH 值和氧化还原电位的拟合效果最好，土壤机械组成的拟合效

果最差。

(6)通过研究发现土壤水分含量随深度变化的趋势与盐分含量的变化趋势恰好互补,土壤盐分含量随深度越深含量越少,而水分是刚好相反,深度加大其含量也越高。这主要是因为土壤盐分随水分蒸发而不断向地表迁移。但横向比较三个采样区含水与含盐量,又有趋同的表现,其含量都是 $Z>D>Y$,这是由于土壤水分运移的过程带动了土壤盐分的运动。就是在这两种不同运动形式的作用下,土壤盐分与水分含量才表现为每块样地和三块样地之间所反映规律相矛盾的现象。

5.2 问题与展望

本论文基本达到了预期的目标,但受研究条件及作者知识水平的限制,论文尚存在一些不足之处,主要有以下几个方面有待进一步深入与探讨。

(1)本研究采用的采样间距大多符合“采样间距最好在变程的 $1/4$ 到 $1/2$ 之间”的要求,受采样原则(选取特定胸径胡杨下土壤)的限制,个别变程小于理论最小采样间距,在以后类似的采样设计中应相应做出修正。

受西湖自然保护区胡杨林生长现状及研究经费的限制,本研究中的三个采样区域生长的胡杨树龄仅表现为干材阶段和中年阶段,没有更好地体现幼、中、老三种林型生长对生境土壤水分与盐分或者其它土壤特性的相互作用与关系。今后的研究中应尽可能选择各生长阶段的同种植被进行深入细致的研究。

(2)受实验条件等因素的限制,本文所采用的一些实验方法与手段对实验结果的精准性有一定的影响,从而影响后来的分析结果,在今后的研究中可采用更先进的方法与手段,以期达到更好的效果。

(3)本研究中未能确定胡杨的生长年限,只能根据胡杨胸径、冠径和树高等指标对比他人研究大致推断胡杨年龄,在今后的研究中应尽量采用科学方法断定胡杨生长所处阶段,为相关研究提供可靠依据。

参考文献

- [1]李博.杨持等.生态学[M].北京:高等教育出版社,2000,3-334.
- [2]陈亚宁.干旱荒漠区生态产业建设理论与实践[M].北京:科学出版社,2004,1-6.
- [3]黄领梅.沈冰.水盐运动研究述评[J].西北水资源与水工程,2000,11(1):6-12.
- [4]C.Kosmas and N.Moustakas,Hydraulic conductivity and leaching of an organic saline-sodic soil, *Geoderma*, Volume 46,Issue 4,June 1990,Pages 363-370.
- [5]J.G.Annandale, N.Z.Jovanovic,Modelling the long-term effect of irrigation with gypsumiferous water on soil and water resources,*Agriculture, Ecosystems & Environment*,Volume 76,Issue s 2-3,November 1999,Pages 109-119.
- [6]Holger Lange,Svein Solberg,Aluminum dynamics in forest soil waters in Norway,*Science of The Total Environment*, Volume 367, Issues 2-3, 31 August 2006, Pages 942-957.
- [7]L.Andreu, F.Moreno,N.J.Jarvis,Application of the model MACRO to water movement and salt leaching in drained and irrigated marsh soils, Marismas, Spain,*Agricultural Water Management*, Volume 25, Issue 1, February 1994, Pages 71-88.
- [8]J. G. Annandale, N. Z. Jovanovic, J. J. B. Pretorius, S. A. Lorentz, N. F. G. Rethman and P. D. Tanner, Gypsiferous mine water use in irrigation on rehabilitated open-cast mine land: Crop Production, soil water and salt balance,*Ecological Engineering*, Volume 17, Issues 2-3, 1 July 2001, Pages 153-164.
- [9]Joe T.Ritchie,Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed:The role of agronomic management,*European Journal of Agronomy*,Available online 2 October 2007.
- [10]Kunimitsu Inouchi, Yosuke Kishi,The regional unsteady interface between fresh water and salt water in confined coastal aquifer,*Journal of Hydrology*, Volume 77, Issues 1-4, 25 April 1985, Pages 307-331.
- [11]K. Shati,A regional approach to salinity management in river basins. A case study in southern Iran, *Agricultural Water Management*, Volume 19, Issue 1, January 1991, Pages 27-41.
- [12]Sunil Mehta, Alan E. Fryar,Controls on the regional-scale salinization of the Ogallala aquifer, Southern High Plains, Texas, USA,*Applied Geochemistry*, Volume 15, Issue 6, 1 July 2000, Pages 849-864.
- [13]Ian D. Jolly, Glen R. Walker, Trevor I. Dowling, Evan W. Christen and Elaine Murray,Regional planning for the siting of local evaporation basins for the disposal of saline irrigation drainage: Development and testing of a GIS-based suitability approach,*Journal of Environmental Management*, Volume 63,Issue 1, September 2004, Pages 51-70.
- [14]J. Herrero, D.A. Robinson,A regional soil survey approach for upgrading from flood to sprinkler irrigation in a semi-arid environment,*Agricultural Water Management*, Available online 24 August 2007.
- [15]K.Paijmans and B.Rollet.The mangroves of Galley Reach,Papua New Guinea. *Forest Ecology and Management*,Volume 1,1976-1977,Pages 119-140.
- [16]E.A.N.Greenwood and J.D.Beresford. Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated-chamber technique: I.Comparative transpiration from juvenile Eucalyptus above saline groundwater seeps.*Journal of Hydrology*, Volume 42, Issues 3-4, July 1979,

Pages 369-382.

- [17]Kevin A.Ritchie.Shelterbelt plantings in semi-arid areas.Agriculture, Ecosystems & Environment, Volumes 22-23, August 1988, Pages 425-440.
- [18]M.A.Bari and N.J.Schofield.Lowering of a shallow, saline water table by extensive eucalypt reforestation.Journal of Hydrology, Volume 133, Issues 3-4, May 1992, Pages 273-278.
- [19]Peter J.Thorburn,Thomas J.Hatton and Glen R.Walker.Combining measurements of transpiration and stable isotopes of water to determine groundwater discharge from forests.Journal of Hydrology, Volume 150,Issues 2-4,1 October 1993,Pages 563-587.
- [20]Hugo H.Rogers,G.Brett Runion and Sagar V.Krupa.Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere.Environmental Pollution,Volume 83,Issues 1-2,1994, Pages 155-189.
- [21]P.G.Slavich, G.R.Walker and I.D.Jolly.A flood history weighted index of average root-zone salinity for assessing flood impacts on health of vegetation on a saline floodplain.Agricultural Water Management, Volume 39,Issues 2-3,25 February 1999,Pages 135-151.
- [22]J.Álvarez Rogel,R.Ortiz Silla,Edaphic characterization and soil ionic composition influencing plant zonation in a semiarid Mediterranean salt marsh.Geoderma,Volume 99,Issues 1-2,January 2001,Pages 81-98.
- [23]Fatma M.Ghaly.Role of natural vegetation in improving salt affected soil in northern Egypt.Soil and Tillage Research,Volume 64, Issues 3-4,March 2002,Pages 173-178.
- [24]N.Fernández-Buces, C.Siebe, S.Cram and J.L.Palacio.Journal of Arid Environments, Volume 65, Issue 4, June 2006, Pages 644-667.
- [25]C.G.Ladenburger, A.L.Hild, D.J.Kazmer and L.C.Munn.Journal of Arid Environments, Volume 65, Issue 1, April 2006, Pages 111-128.
- [26]K.Saleh,J.-P.Wignerou,P.Waldteufel,P. de Rosnay,M.Schwank,J.-C.Calvet and Y.H.Kerr.Remote Sensing of Environment,Volume 109,Issue 1,12 July 2007,Pages 42-53.
- [27]J.Álvarez-Rogel, L.Carrasco, C.M.Marín and J.J.Martínez-Sánchez. CATENA, Volume 69, Issue 2, 1 March 2007, Pages 111-121.
- [28]高明珠.利用“土壤溶液法”及“土壤水浸提液法”研究盐渍化土壤中可溶盐的动态和浓度简介[J].土壤通报,1960,(2):4-8.
- [29]刘福汉.王遵亲.潜水蒸发条件下不同质地剖面的土壤水盐运动[J].土壤学报,1993,30(2):173-180.
- [30]曹红霞.不同灌溉制度条件下土壤溶质迁移规律及其数值模拟[D].西北农林科技大学,2003.
- [31]史文娟.蒸发条件下夹砂层土壤水盐运移实验研究[D].西安理工大学,2005.
- [32]邓友生.何平等.含盐土渗透系数变化特征的试验研究[J].冰川冻土,2006,28(5):772-775.
- [33]张余良.陆文龙等.长期微咸水灌溉对耕地土壤理化性状的影响[J].农业环境科学学报,2006,25(4): 969-973.
- [34]李国振.不同作物下的土壤水盐运动分析[J].干旱区地理,1997,20(4):84-90.
- [35]徐力刚.杨劲松等.种植条件下粉沙壤土质土壤水盐运移的数值模拟研究[J].土壤学报,2004, 41(1):10-17.

-
- [36]夏增禄.穆从如等.我国若干土壤类型剖面中汞的自然含量及其分异初步分析[J].科学通报,1984,29(10):620-622.
- [37]裴钟源.刘君阁.背河洼地土壤水盐动态研究[J].郑州工程学院学报,1994,15(5):41-47.
- [38]高瑾.刘延锋等.干旱区灌排条件下田间土壤盐分动态分析[J].中国农村水利水电,2004,(11):14-15.
- [39]张振华.严少华等.覆盖对滨海盐化土水盐运动和大麦产量影响的研究[J].土壤通报,1996,27(3):136-138.
- [40]邓力群.陈铭达等.地面覆盖对盐渍土水热盐运动及作物生长的影响[J].土壤通报,2003,34(2):94-97
- [41]虎胆·吐马尔白.吴旭春等.不同位置秸秆覆盖条件下土壤水盐运动实验研究[J].灌溉排水学报,2006,25(1):34-37.
- [42]王保真.满润.疏勒河流域冻结期水盐动态研究[J].土壤通报,1991,(5):17-18.
- [43]李新.李国振.塔里木河上游地区土壤水盐变化与作物的关系[J].干旱区地理,1997,20(4):11-15.
- [44]周智彬.徐新文等.塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地水盐动态的研究[J].干旱区研究,2000,17(1):21-26.
- [45]张立新.韩文玉等.冻融过程对景电灌区草窝滩盆地土壤水盐动态的影响[J].冰川冻土,2003,25(3):297-302.
- [46]赵丹.邵东国等.干旱灌区水盐动态模拟与实验研究[J].灌溉排水学报,2004,(2):43-46.
- [47]赵万羽.符义坤.河西半荒漠驴蒿草原土壤水盐动态及其对牧草生长的影响[J].草业学报,1993,2(4):7-12.
- [48]李卫军.高辉远等.不同生长型芦苇与水盐相关的研究[J].中国草地,1995,(6):20-23.
- [49]张希明.Andrea Foetzki 等.新疆策勒绿洲胡杨水分生理特性研究[J].干旱区研究,2002,19(2):26-30.
- [50]胡旭.王海涛等.干旱和半干旱区油蒿对土壤空间异质性的响应[J].中国沙漠,2007,27(4):588-592.
- [51]张林静.岳明等.新疆阜康绿洲荒漠过渡带主要植物种的生态位分析[J].生态学报,2002,22(6):969-973.
- [52]莫治新.尹林克.塔里木河中下游表层土壤盐分空间变异性研究干旱区研究[J].2004,21(3):250-253.
- [53]付爱红.陈亚宁等.新疆塔里木河下游怪柳茎水势变化与影响因子研究[J].干旱区地理,2007,30(1):108-114.
- [54]肖明.安沙舟.干旱区不同草地土壤植物系统水盐的特征[J].植物生态学报,1996,20(5):397-403.
- [55]徐荣.宁夏河东沙地不同密度柠条灌丛草地水分与群落特征的研究[D].中国农业科学院,2004.
- [56]马海艳.龚家栋等.干旱区不同荒漠植被土壤水分的时空变化特征分析[J].水土保持研究,2005,12(6):231-234.
- [57]李佳陶.河岸胡杨林生长及水分生理特性的研究[D].内蒙古农业大学,2006.
- [58]萨如拉.豪树奇等.额济纳胡杨林土壤含水量时空变化的研究[J].林业资源管理,2006,(1):59-62.
- [59]秦嘉海.金自学等.垃圾复混肥对土壤理化性质及牧草产草量的影响[J].草业科学,2004,21(10):33-36.
- [60]郭忠升.邵明安.半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J].生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [61]郭胜利等.半干旱区流域土壤养分分布特征及其与地形植被的关系[J].干旱地区农业研究,2004,21(4):40-43.
- [62]李世荣.张卫强等.黄土半干旱区不同密度刺槐林地的土壤水分动态[J].中国水土保持科学,2003,

-
- 1(2):28-32.
- [63]徐炳成等.半干旱黄土丘陵区沙棘和柠条水分利用与适应性特征比较[J].应用生态学报,2004,15(11):2025-2028.
- [64]刘晨峰等.林下植被对半干旱区不同密度刺槐林土壤水分环境指示作用[J].中国水土保持科学,2004,2(2):62-67.
- [65]王红梅.宁夏南部半干旱黄土丘陵区封育草地土壤水分特征研究[D].宁夏大学,2005.
- [66]李朝生.杨晓晖等.放牧对黄河低阶地盐化草场土壤水盐空间异质性的影响[J].生态学报,2006,26(7):2402-2408.
- [67]钟哲科.方少华等.浙北涂区杨树生长与土壤条件关系初报[J].浙江林业科技,1995,15(5):25-29.
- [68]胡海波.陈金林等.苏北淤泥质海岸防护林土壤水分的研究[J].中国生态农业学报,2002,10(4):24-27.
- [69]刘庆生.刘高焕等.辽河三角洲土壤盐分与上覆植被野外光谱关系初探[J].中国农学通报,2004,20(4):274-278.
- [70]李晓军.李取生.松嫩平原两种覆被盐渍化特征的时空变化研究[J].水土保持学报,2004,18(5):108-111.
- [71]杜鹃.赵景波.西安地区不同植被下土壤含水量及水分恢复研究[J].水土保持学报,2006,20(6):58-61.
- [72]沈禹颖等.河西走廊盐化草甸主要植物群落分布特点及其土壤环境特征[J].植物生态学报,1994,18(1):95-102.
- [73]李兴东.典型分析法在黄河三角洲莱州湾滨海区盐生植物群落研究中的应用[J].植物学学报,1988,12(4):300-305.
- [74]刘庆.周立华.青海湖北岸植物群落与环境因子关系的初步研究[J].植物学报,1996,38(11):887-894.
- [75]初玉.杨慧玲等.浑善达克沙地小叶锦鸡儿灌丛的空间异质性[J].生态学报,2005,25(12):168-174.
- [76]郭晓敏.牛德奎.奉新毛竹林土壤养分空间变异性研究[J].植物营养与肥料学报.2006,12(3):420-425.
- [77]杨帆.邓伟.土壤含水量和电导率对芦苇生长和种群分布的影响[J].水土保持学报,2006,20(4):199-201.
- [78]杨根生.曲耀光等.疏勒河下游生态保护研究[J].中国沙漠,2005,25(4):472-482.
- [79]王庭芳.疏勒河中下游的气候及其改造[J].兰大学学报(自然科学版),1957,1:205-221.
- [80]习耀国.从河西走廊的气候条件探讨发展棉花的前途[J].气象学报,1959,30(2):137-149.
- [81]甘肃省农业科学院土肥所盐改组.疏勒河流域土壤的板结问题[J].土壤通报,1965,5:49-50.
- [82]傅兴启.高前兆.疏勒河流域的水资源与绿洲建设[J].中国沙漠,1986,6(3):52-61.
- [83]丘明新.杨祖成.甘肃疏勒河中、下游地区地下水位下降和土壤盐渍化对草甸植被的影响及其解决的途径[J].生态学杂志,1986,5(4):46-49.
- [84]陈仲全.绿洲节水系统监控与绿洲开发[J].环境科学学报,1987,7(1):1-7.
- [85]陈荷生.疏勒河流域水资源系统及其合理开发利用[J].干旱区研究,1988,2:26-32.
- [86]刘胤汉.河西走廊绿洲土地类型及其开发利用——以敦煌、武威为例[J].干旱区资源与环境,1990,4(1):50-58.
- [87]葛秉钧.河西走廊灌溉农业区农业气候适应性分析[J].资源科学,1982,2:49-54.
- [88]敦煌县农科所.关于敦煌使用化肥问题的初步探讨[J].甘肃农业科技,1981,3:15-17.
- [89]旱农分区课题组.甘肃省主要粮食作物对水分的需求[J].甘肃农业科技,1987,9:2-5.

-
- [90]牛天龙.敦煌市发展节水农业的几点做法[J].甘肃农业,1997,10:20-21.
- [91]汤明宝.甘肃旅游资源的开发和利用[J].科学经济社会,1985,3(4):252-255.
- [92]石磊.甘肃旅游业面临的问题及建议[J].开发研究,1990,6:34-35.
- [93]陈传康.把敦煌建设成为具有开放性经济结构的旅游县[J].干旱区地理,1987,10(4):55-60.
- [94]裴建明.党河水力资源开发利用探讨[J].甘肃水利水电技术,2004,40(4):359-360.
- [95]刘琴.敦煌大泉河水环境特征与水资源合理利用研究[D].兰州大学,2006.
- [96]张明泉.赵转军等.敦煌盆地水环境特征与水资源可持续利用[J].干旱区资源与环境,2003,17(4):71-77.
- [97]杨力扬.敦煌市水资源可持续利用问题研究[D].西安理工大学,2005.
- [98]方创琳.孙心亮.基于水资源约束的西北干旱区城镇体系形成机制及空间组织[J].中国沙漠,2006,26(5):860-867.
- [99]张小军.叶舜赞.甘肃省旅游城市体系研究[J].中国人口资源与环境,2006,16(2):76-82.
- [100]王计平.肖星.甘肃省旅游资源保护研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):36-41.
- [101]郭剑英.王乃昂.敦煌旅游资源非使用价值评估[J].资源科学,2005,27(5):187-192.
- [102]郭剑英.王乃昂.旅游资源的旅游价值评估[J].自然资源学报.2004,19(6):811-817.
- [103]湛永生.王乃昂.敦煌市居民旅游感知及态度研究[J].人文地理,2005,2:66-71.
- [104]张仁铎.空间变异理论[M].北京:科学出版社,2004.
- [105]李毅.刘建军.土壤空间变异研究方法[J].石河子大学学报(自然科学版),2000,4(4):331-337.
- [106]祖康祺.土壤[M].北京:科学普及出版社,1986,1-117.
- [107]常学向.赵爱芬等.黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况[J].水土保持学报,2003,17(2):126-129.
- [108]孟宝.土壤特性的空间变异性与绿洲生态空间稳定性研究[J].西北师范大学,2006.
- [109]黎立群.盐渍土基础知识[M].北京:科学出版社,1986,8.
- [110]汤国安.杨昕.ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006,236.
- [111]魏庆莒.胡杨[M].北京:中国林业出版社,1990,1-137.

致 谢

时光荏苒，岁月如梭，三年时间，转瞬即逝，入校时的欣喜与懵懂仿佛就在昨天，而今已是一名即将毕业的硕士生。回想起来，攻读硕士期间的学习和生活，不是我独自走过，而是在周围许多人的帮助和鼓舞下一路走来。

导师刘普幸教授治学严谨，诲人不倦。既注重培养学生的学识，培养学生严谨的治学态度，又不忘塑造学生高尚的道德与素质。学业的顺利完成，无不倾注着刘老师大量的心血，从论文的选题、野外采样直到下笔写作每字每句的推敲都是在导师悉心的指导下完成。谨向刘老师致以崇高的敬意和诚挚的感谢。

在此还要特别感谢张勃教授、赵成章副教授、张明军副教授、杨东副教授等老师在论文的立意、结构和内容等方面提出了宝贵意见，感谢张志斌教授、姚晓军老师、胡梦珺老师、陶乐群老师对我学业提供的帮助，还要向地理与环境科学学院的领导和老师们表示诚挚的谢意。

感谢敦煌市西湖国家级自然保护区管理局局长吴三雄、科研管理科科长孙志成、保护监测科科长袁海峰以及玉门关管护站站长和工作人员；敦煌市统计局、敦煌市年鉴编纂办公室、敦煌市林业局、敦煌市税务局在野外采样和资料收集给予的热心帮助和指导，由衷的感谢那些不知名地当地群众和工作人员，谢谢你们！

感谢同门师兄赵志峰、雒应福，师姐王志敏、张惠娥、寇薇，师弟孙国军、白扬、潘竟元，师妹程英、马亚兰、王枫叶，感谢三年来所有给予我帮助和关怀的各位好友，感谢室友郭玲霞、王海青、张遇春，三年来大家共同度过许多美好时光，给予我很大帮助，谢谢大家！

感谢深爱我的父亲母亲弟弟，感谢给我无限关怀的家人，多年无私无畏的支持与鼓励、理解与帮助，才使我独享这校园的宁静，畅游于知识的海洋，获取成就，收获希望。

感激之情难于言表，只愿将来用更高的成就回报社会，忠心的谢谢大家！

李慧芳

2008年5月于西北师范大学