

中国农业科学院

硕士学位论文

不同固沙模式土壤水分动态变化及预测研究

姓名：郭守平

申请学位级别：硕士

专业：生态学

指导教师：徐斌

20060601

摘要

土地沙化已经成为我国最严重的生态环境问题之一，而不断加剧的沙尘暴又使生态环境问题雪上加霜。流动沙丘作为沙尘暴的主要源头之一，其风蚀移动造成大面积农田掩埋、沙埋村庄、道路等，造成巨大的经济损失，因此，流动沙丘的防风固沙工作已刻不容缓，其工作的成败影响着整个沙化防治工作的进展。而土壤水分状况是决定植被治沙成败的重要条件。土壤水分作为土壤-植物-大气连续体（SPAC）的一个关键因子，它不但直接影响土壤的特性和植物的生长，而且间接影响植物分布和在一定程度上影响小气候的变化。随着固沙植被的建立、发展和演变，固沙年限的增加及人工固沙植被群落的生物类群剧增，沙丘的土壤水分呈现明显的下降趋势，土壤水分不足成了植被生长的最大阻碍，整个体系出现了不稳定现象，植被提前衰弱。因此，采取措施提高土壤水分的含量，及提高有限降水量的利用率，是长期固沙及植被恢复的关键所在，具有重要的现实意义。

基于以上背景，本试验在前人固沙模式的基础上，吸取前人固沙模式的成功经验及教训，在流动沙丘上，分别采取化学固沙及草栅格沙障生物固沙措施，并通过化学固沙区及栽植植物区不同面积搭配形成不同处理模式，以通过对降水截流，利用沙丘坡位优势，改变土壤水分径流增加生物区的土壤水分含量，以保证植被的正常生长，提高植被的成活率。

本试验利用中子水分仪长期监测流动沙丘的土壤水分状况，在时间序列上，对不同固沙模式土壤水分含量进行比较分析，优选出土壤水分含量较高的模式，并对此模式生物区表层 0-30cm 的土壤水分进行预测。主要结论如下：

1. 中子水分仪的应用及标定方法

本研究证实了中子水分仪在流动沙丘上应用的可行性及可靠性，且就其标定方法提出了分段标定及线性非线性回归多种方法结合的方法，此方法标定方程精度较高，相关系数达到 0.98 左右，相对误差在 5% 左右，具有一定的推广利用价值。

2. 不同化学固沙模式的土壤水分含量比较分析

通过不同化学固沙模式在时间序列上的土壤含水量比较分析，得出：整个流动沙丘，不同部位适用的最优模式不同，不同土层深度亦不同。在沙丘上部 0-30cm 土壤表层，化学固沙区中第一个模式（化学固沙带宽为最大 8m）的土壤水分含量最高，在 30-80cm 土层深度，为第四个模式（化学固沙带宽为 6m）的土壤水分含量最高；在沙丘中部化学固沙区的不同模式中，表层 0-30cm 为第六个模式（化学固沙带宽为 2m）的土壤水分含量最高，而深层 30-80cm 为第四个模式（化学固沙带宽为 6m）的土壤水分含量最高。

3. 运用不同模型方法对土壤水分的动态模拟及预测

本文运用指数平滑法、自回归时间序列模型、及 BP 神经网络模型对土壤水分进行动态模拟预测研究。通过不同方法比较研究，得出 BP 神经网络方法在土壤水分模拟及预测方面精度都优于其他方法。

关键词：不同固沙模式，土壤水分，动态变化，模型预测

Abstract

The desertification of land has already become one of our country's most serious ecological environment problems, and sandstorm aggravating constantly makes ecological environment more serious. The shifting dunes is regarded as one of the main sources of the sandstorm, it causes the large area farmland to bury, bury villages, roads etc, and causing the enormous economic losses, so, the work of harnessing shifting dune has been already very urgent, the success or failure is influencing the progress of the whole desertification preventing and controlling. And the soil moisture state is the important condition of the success or failure in the vegetation recovery and controlling sands. The soil moisture is regarded as a key factor of the SPAC; it not only influences the characteristic of the soil and growth of the plant directly, but also influences plants to distribute and the changes of the local conditions to a certain extent indirectly. With development of the vegetation in harnessing sand, soil moisture of sand dune appears obviously downward trend, moisture enough becomes the most baffle, the whole system has presented the unstable phenomenon, the vegetation is weak ahead of time. So, it is the key point of fixing the sand for a long time and the vegetation recovery that taking measures to raise the content of the soil moisture, and improve the utilization ratio of the limited precipitation, and it is of very important realistic meaning.

Because of the above background, based on forefathers foundation of the harnessing sand modes that originally test, drawing forefathers successful experience and lesson of harnessing sand mode. At the shifting dunes, chemistry methods and sand of grass bar hinders were taken in fixing the sand separately, and plant different areas in the plant district and chemistry districts to match and forms different modes, and utilized sand dune slope location advantage, change soil moisture surface flow increase biological soil moisture content of district, so as to ensure the normal growth of the vegetation, the survival rate of the vegetation is improved.

During the experiment, soil moisture content of the moving-dune was measured regularly with neutron moisture apparatus. Then, through comparing the soil moistures content of different harnessing modes, comparing the soil moisture content of harnessed areas with that of naked areas, higher soil moisture content of harnessing modes was selected. At last, the soil moisture (0-30cm soil depth) of planting areas with higher soil moisture content of harnessing modes was forecasted, and then the conclusions were drawn as follows:

1. Application of neutron apparatus and the method of demarcating

The research had verified that neutron moisture apparatus has practical and credible application to harness the moving-dunes. Furthermore, the research also had found that demarcating equation, combined with a slice-paragraph demarcating method and linear/non-linear regression method, had high precision and can be spread.

2. Analysis of soil moisture content of harnessed areas through harnessing modes with chemical measures

Based on the analysis of the time-series soil moisture content of harnessed areas with different measures, the conclusions of different parts and soil depth of the moving-dune were all different each

other. On the top of the dune, in 0-30cm soil depth the soil moisture content of the harnessed area through first harnessing mode (harnessed area with chemical measure was 8m width) was the highest; in 30-80cm soil depth that through the fourth harnessing mode(harnessed area with chemical measure was 6m width) highest. At the middle of the dune, in 0-30cm soil depth that through the sixth harnessing mode (harnessed area with chemical measure was 2m width) was the highest; and in 30-80cm that through the fourth mode (harnessed area with chemical measure was 6m width) was the highest.

3. Dynamic simulating and forecasting of soil moisture with different simulating methods

On the basis of dynamic simulating and forecasting the soil moisture content with the methods of the exponent smooth and self-regression model and BP neural net model, some conclusions as bellow: the current soil moisture content of the dune was influenced by that of the dune during former two month; the modeling and forecasting precision of BP neural net model was higher than that of other methods. But, all in all, the soil moisture content of the dune had been on the downside.

Keywords: Different harnessing mode; Soil moisture content; Dynamic change; Modeling forecast

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，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业科学院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。

研究生签名：郭守平

时间：2006年 6月 21日

关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业科学院有权保留送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

论文作者签名：郭守平

时间：2006年 6月 21日

导师签名：程斌

时间：2006年 6月 21日

第一章 绪论

1.1 选题背景

土地沙化是我国特别是西北地区当前最为严重的生态环境问题,不断加剧的沙尘暴与沙化土地的扩张更使生态环境问题雪上加霜。

土地的沙化程度分为流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘、非生物治沙工程地、风蚀劣地、戈壁和闯田。沙化过程是渐进的,但其危害及其产生的灾害却是持久和深远的,它不仅对当代人产生影响,而且还将祸及后代。沙化造成的危害既有突发性和局部性(沙尘暴),又有持续危害的渐变性和广泛性(沙埋、沙压)。

国家林业局进行的第二次全国荒漠化和沙化监测结果显示,截至 2004 年底,中国荒漠化土地为 263.62 万 km^2 , 占国土面积的 27.46%, 沙化土地面积为 173.97 万 km^2 , 占国土面积的 18.12%, 分布在除上海、台湾及香港和澳门特别行政区外的 30 个省(自治区、直辖市)的 889 个县(旗、区)。我国沙化土地的分布情况如下:

1.各沙化土地类型现状。流动沙丘(地)面积为 41.16 万 km^2 , 占沙化土地总面积的 23.66%; 半固定沙丘(地)为 17.88 万 km^2 , 占 10.28%; 固定沙丘(地)为 27.47 万 km^2 , 占 15.79%; 戈壁为 66.23 万 km^2 , 占 38.07%; 风蚀劣地(残丘)为 6.48 万 km^2 , 占 3.73%; 沙化耕地为 4.63 万 km^2 , 占沙化土地总面积的 2.66%; 露沙地面积为 10.11 万 km^2 , 占沙化土地总面积的 5.81%; 非生物工程治沙地面积为 96 km^2 。

2.各省区沙化土地现状。主要分布在新疆、内蒙古、西藏、青海、甘肃、河北、陕西、宁夏 8 省(自治区), 面积分别为 74.63 万 km^2 、41.59 万 km^2 、21.68 万 km^2 、12.56 万 km^2 、12.03 万 km^2 、2.40 万 km^2 、1.43 万 km^2 、1.18 万 km^2 , 8 省(自治区)面积占全国沙化土地总面积的 96.28%; 其它 22 省(自治区、直辖市)占 3.72%。

据国家林业局监测结果,我国的沙化土地面积较大,分布较广,而从我国沙化土地类型上来看,其中流动沙丘面积占沙化土地的面积比例最大,面积最大,所以,流动沙丘的固沙治沙是整个沙化治理的重点。

流动沙丘 (Shifting dune)是植被稀少,在风力作用下不断移动的沙丘。其风沙活动强烈,在风力作用下,地表沙大量被吹蚀,可掩埋农田、道路、居民点和水利设施等,同时有积沙现象,引起严重的风沙灾害,严重影响交通运输、农业及人们的正常生活,造成巨大的经济损失。

由于风沙所带来的沙尘天气,其中最为严重的便是近几年来日益频繁发生的沙尘暴,危害十分严重,造成的危害及损失不可估量,竟有关部门统计,60 年代特大沙尘暴在我国发生过 8 次,70 年代发生过 13 次,80 年代发生过 14 次,而 90 年代至今已发生过 20 多次,并且波及的范围愈来愈广,造成的损失愈来愈重。

依据我国最新公布的荒漠化和水土流失监测数据进行估算,中国荒漠化危害和风沙危害造成的直接经济损失每年约 642 亿元,平均每天损失 1.76 亿元;据估算每年因沙尘暴造成的经济损失超过 13 亿元。

而流动沙丘是重要的沙尘源头之一,因此,流动沙丘的防风固沙工作已刻不容缓,其工作的成败严重影响着整个沙化防治工作的进展,为治理沙化土地的重要组成部分,故探讨高效长期的成败严重影响着整个沙化防治工作的进展,为治理沙化土地的重要组成部分,故探讨高效长期

的固定流动沙丘的方法具有重要的现实意义。

1.2 研究目的与意义

土壤水是一种重要的水资源,是四水(地表水、地下水、大气水、土壤水)转化的纽带,在水资源的形成、转化与消耗过程中,它是不可缺少的成分。降水或灌溉都要转化成土壤水才能被植物吸收,它是陆地植物赖以生存的源泉;同时,土壤水分是土壤的重要性质之一,是土壤物理学的重要内容。土壤水分是土壤-植物-大气连续体(SPAC)的一个关键因子,是土壤系统养分循环和流动的载体,它不但直接影响土壤的特性和植物的生长,而且间接影响植物分布和在一定程度上影响小气候的变化;另外,土壤水分是一个重要的环境因子。土壤含水量随时空的分布和变化对地-气间的热量平衡、土壤温度和农业墒情等都会产生显著的影响,因而土壤水分对气候、农业是极为重要的。

从过去的治沙情况看,沙化土地的治理主要是以植树造林为主体的植被恢复重建,取得了一定的成果,但是长期的社会效益和生态效益无法保证。如始建于1956年位于包兰铁路沙坡头段的人工固沙植被防护体系是我国沙漠化防治的成功模式之一和流沙固定的典范,也是我国干旱及沙漠地区人工绿洲植被建设的典型代表,建立起“以固为主,固阻结合”,“以生物固沙为主,生物固沙与机械固沙相结合”的防护体系。确保了包兰铁路45年畅通无阻,不仅创造了巨大的经济效益,而且取得了很大的生态效益和社会效益。

但是,随着固沙植被的建立、发展和演变,固沙年限的增加及人工固沙植被群落的生物类群剧增,沙丘的土壤水分呈现明显的下降趋势,土壤水分不足成了植被生长的最大阻碍,整个体系出现了不稳定现象,植被提前衰弱。土壤的水分状况成为决定植被治沙成败的重要条件。且植被出现了衰退现象。因此,采取措施提高土壤水分的含量,及提高有限降水量的利用率,是达到长期固沙及植被恢复的关键所在。

阿鲁科尔沁旗地处浑善达克沙地严重沙化区域东北部,属于我国典型的农牧交错区,由于长期以来的不合理开发和农业耕作,土地退化、沙化严重。而浑善达克沙地成为环京津地区近年来频发的沙尘暴的主要沙尘来源区之一,也是国家多年来重点防沙治沙区。

因此,在阿鲁科尔沁旗进行流动沙丘的固定及土壤水分的研究对治沙工作具有重要的现实及潜在的意义。

(1) 有利于提高植被的成活率,保证植被的长期成长,以提高固沙模式的长期生态效益、经济效益和社会效益

植被恢复是治沙工作的核心部分,也是治沙工作的主要目的。干旱半干旱地区降雨少,水分严重缺乏,且流动沙丘风沙活动强烈,基质贫瘠,生物活动极其微弱,其制约因素中最重要因素是水分分布状况及其量值;土壤水分是人工植被生存和稳定的最敏感的限制因子,因此本试验通过化学固沙改变降雨的再分配,以提高有效降雨量的利用率,有利于种植植物的成活及生长,从而改变流动沙丘的土质,形成一定范围的群落,达到长期固沙的目的。

(2) 有利于推进沙化治理工作的进展,有效的遏制沙化的蔓延

我国治沙工作已经开展了几十年,其中也取得了不少成绩,然而“局部治理、整体恶化”和沙区贫穷的局面仍然存在,目前的沙化地区及潜在的沙化地区仍有扩张趋势,整体的生态环境仍

有继续恶化的趋势。

我国沙化的面积大，而大多数发生在干旱半干旱地区，并且流动沙丘在沙化土地类型中所占面积比例最大，且流动沙丘有流动性，其流动性造成沙化地区的扩展，因此寻求有效的治理流动沙丘的措施，将有利于推进整个沙化治理工作的进展，并一定程度上有效遏制沙化地区的蔓延。

(3)有利于减少风蚀，减少风沙危害，减少其带来的经济损失

本试验点为阿鲁科尔沁旗天山镇的一个流动沙丘，阿鲁科尔沁旗地处浑善达克沙地严重沙化区域东北部，土地退化、沙化严重。而浑善达克沙地成为环京津地区近年来频发的沙尘暴的主要沙尘来源区之一，也是国家多年来重点防沙治沙区。

流动沙丘地表植被稀疏，在风的作用下容易引起土壤的风蚀，造成风沙危害，掩埋农田、堵塞交通等，给人民带来巨大的经济损失，因此，探讨研究有效的流动沙丘固沙措施，将有利于减少风蚀，减少风沙危害，为当地农业、交通运输等提供保障，减少经济损失。而且流动沙丘的风蚀是沙尘暴的源头之一，减少风沙，将有助于减少甚至控制沙尘暴，减少周边城市因沙尘暴所带了一些灾难及经济损失。

(4)有利于初步了解不同固沙处理土壤水分的动态变化规律，初步掌握不同处理的固沙效果，是以后的工作的基础，及对其进一步的措施给予指导

本文利用固沙一年后的土壤水分检测数据，通过分析土壤水分的动态变化规律，初步了解掌握不同处理的改变土壤水分再分配的规律，分析比较不同处理的固沙效果，发现不足，及时采取措施，为以后的工作提供基础性的数据，一定程度上给予指导。

本试验是一种有效长期固沙措施的尝试，将是固沙技术措施的一个重大突破，将为发展生态农业治理沙化土地提供技术借鉴。

1.3 研究现状

1.3.1 流动沙丘治理措施研究进展

长期以来，针对沙化世界各国都采取了相应的措施，进行了大量的研究，并且取得了可观的成就，积累了许多宝贵的经验。

日本在5万亩的沙岸宜林地上营造150—250米宽的海岸防护林，先设置植物沙障固定流沙，形成防护林后对沙丘内侧进行开发利用；美国针对1934年的特大黑风暴，1935年罗斯福下令制订《大平原各州林业工程》，通称“防护林带工程”、“罗斯福工程”，国会为此拨款7500万美元，并通过法案，实行免耕法，授权政府对农庄主给予补助，8年共营造防护林带28962公里，保护农田2430万亩。截止1992年，美国人工防护林带总长度16万公里，面积975万亩。德国于1965年开始大规模兴建海岸防风固沙林等林业生态工程，号召回归自然；以色列的荒漠化面积约占国土总面积的75%，年平均降水量仅为300多毫米，其从发展节水灌溉和现代高效农业入手，提高在小范围内获取高效益的生产能力，从而为干旱区植被建设、保护与合理利用创造了条件。

我国早在50-60年代针对流动沙丘的治理已有成功的治沙模式，并取得了一定的效益，如辽宁省章古台流动沙丘固定方法与沙丘营造樟子松固沙林，是在上世纪50—60年代试验成功的一种

治沙模式。其特点是,先固沙后造林,流动沙丘恢复以樟子松为主的人工林植被;治沙与造林的投入高,林分的产量高,经济效益与生态效益强。但是,在 35—40 年生以后,出现了枯梢病、林分提早衰弱等不稳定现象。

总结目前在治沙过程中,防风固沙技术主要包括生物固沙技术、工程技术和化学技术三大类。

生物固沙技术包括林带林网、团块状片林、灌木丛和灌木篱障、草本植被、作物覆盖以及沙面的生物结皮等。

工程技术包括以秸秆、枝条、竹片、木板条、粘土、水泥、砾石以及塑料网等为材料制作和布置的各种直立式或平铺式防风阻沙固沙设施。

化学技术则主要指利用各种天然和人工合成的材料胶结沙地或沙丘表面,既隔断风力对地表颗粒的冲击,又防止水分蒸发损失。

生物固沙具有成本低、可持续、有生产力和经济效益、可净化与绿化环境等优点,无疑应当作为最主要的防沙治沙技术。然而,它是与一定的水分供应(包括天然降雨供水)为先决条件的,年年如此;工程机械固沙技术成本虽然略高于生物固沙技术,而且可持续性差,但是具有见效快和不受缺水条件制约的优点;化学固沙技术的最大优点是持久性好和施工之后不再依赖水资源,但是成本目前仍然偏高,完全去除残毒仍有一定困难。因此,应该因地制宜将各类技术在防沙治沙中巧妙结合。

化学固沙的原理是利用稀释了的具有一定胶结性的化学物质喷洒于松散的流沙沙地表面,水分迅速渗入到沙层以下,而那些化学胶结物质则滞留于一定厚度(1—5mm)的沙层间隙中,将单粒的沙子胶结成一保护壳,以此来隔开气流与松散沙面的直接接触,从而起到防止风蚀的作用。

目前用的化学物质的种类和组成主要是沥青乳液(主要是 HD-200/300 和 HD-130/200 沥青制成的慢性裂型沥青乳液,作为临时固定沙面的粘结剂);及沥青化合物(一种含有沥青或粘土、水和矿物粉末(黄土、壤土、水泥或石灰)的暗棕色物质)。

在流动沙丘治理措施方面,很多人对固沙技术进行了阐述并对其实际应用及对其效果进行了研究。

刘艳军等(1995)就吉林省新发流动沙丘对前档后拉、网格沙障、林草覆盖,乔灌木相结合的治理措施进行了研究,并分析治理措施的生态效益、经济效益;刑兆凯(1999)介绍了章古台地区流动沙丘的固定方法,封沙育苗、栽植灌木,以植物治沙为主、机械沙障为辅的方法,并对其技术进行了效益评价。

张铜会等(2000)在科尔沁沙地的流动沙丘上采用不同的人工措施,即铺设秸秆栅栏沙障,草方格和栽植差不嘎蒿,对沙丘的固定作用进行了研究;并从增加土壤水分含量、植被的生物量等方面,比较了不同措施的固沙效果。

郭云义等(2002)针对翁牛特旗流动沙地提出了围栏封育、设置沙障、草方格机械固沙及生物沙障等综合治理技术,并提出了不同措施的适用范围、推广应用情况,并分析了试验研究结果;等等。

另外,就对化学固沙剂的研究。迄今国内外已用几十种化学固沙胶结材料,但是绝大多数都没有得到推广利用,由于有的价格高,有的材料稀缺,有的效果不佳,有的污染环境,(李臻,1997)。针对上述情况,许多研究者就化学固沙剂进行了开发研究。

李臻等(1997)以无机材料水玻璃为基础,通过对其改性或添加有机、无机胶凝剂进行复合,获得了液态高效复合固沙剂,并在流动沙丘上试验,证明其固沙效果好,持续时间较长,等等。

1.3.2 土壤水分监测方法研究

土壤水分监测是进行土壤水分其他各方面分析的基础工作,土壤水分快速有效的监测是进行土壤水分动态变化规律研究的基础,因此,一直以来研制精确测试土壤水分的仪器工作受到各国学者的重视。

国外对土壤水分的测试方法的研究较早,1922年 Gardner 等人建议使用多孔陶土围成的设备测定土壤含水量和土壤水能态间的关系, Richard (1928)、Heck (1934)、Roger (1935) 等人将多孔陶土杯与真空计或压力计连接起来测定土壤水的毛管势(Klute,1986),1931年 Richard 发明了张力计;Rice(1969)将液体开关片联结在一系列具有感应转化器和曲线记录仪的张力计上,进行自动扫描;Thony 和 Vauchaud(1980)采用了一种电容水银压力计系统;Long(1984)设计了一套适合于田间的用电池驱动并能将张力计读数自动记录在磁带上的土壤水势测定系统。张力计能够直接测定土壤水势,但其测值范围仅在-0.085MPa 以上,因此一些能够间接测定较低水势的方法相继出现,其中应用较多的为电阻传感法(electrical resistance-sensors)。Bouyoucos 和 Mick (1940) 首先使用石膏块法测定土壤水势,时至今日,它已作为常规法而广为应用。

(一) 几种常用的土壤水分监测方法比较

半个多世纪以来,对土壤水分测量的研究一直没有停止,各种测量技术层出不穷,形成了各具特色的当代土壤水分测量技术。

目前,已有多种土壤水分测量方法。从测定的空间尺度上,大致可以分为定点测定和大面积测定两种方式。定点测定的常规方法有烘干法、中子水分仪测定法、时域反射仪(TDR)测定法、伽玛射线法、张力计测定法、露点仪测定法和电阻法等,前四种方法测定土壤含水量,后三种方法测定土壤水势。大面积测定包括中等尺度范围的测定(如使用地表穿透雷达(GPR)进行的测定)和大范围的遥感测定。几种常用的土壤水分监测方法如表 1.1 所示。

表 1.1 几种常用的土壤水分监测方法比较
 Table 1.1 the comparison of several testing soil water methods

测定方法	基本原理	特点
烘干法 (土钻法 Soil Aiguilles)	在摄氏 105 度左右烘干土壤, 计算水分占干土重的比率	最经典和最精确的方法, 直接测定土壤水分含水量, 成本低, 简单准确性高, 但是费时费力, 破坏土壤结构, 较难实现长期定点连续测定土壤水分的动态变化
时域反射仪法 (TDR)	电磁波在土壤介质中的传播速度与土壤的介电常数呈对应关系	快速、准确, 可对原位土壤进行连续自动监测, 但是测量值需要校正, 且价格昂贵
张力计法	负压管的负压与土壤吸力呈对应关系	价格较便宜, 操作简单可对原位土壤长期监测, 具有滞后效应, 不能及时反映土壤水分状况, 而且受温度影响大, 在土壤含水量低时即失效此外, 负压管中的水进入土壤会带来误差, 稳定性差, 且不宜沙质土壤
电阻法	电阻材料电阻的变化与周围土壤水势有对应关系	价格便宜, 对土壤类型、盐分浓度和土壤温度敏感, 测量范围随电阻块不同而各异, 不宜沙质土壤测量
遥感法	不同含水量的土壤反射的电磁波强度不同	测量的空间范围大, 只能测量地面以下几厘米的土壤, 且须以定点测定数据为基础, 测定的数据精度不高
GPR 法	电磁波在土壤中的传播速度与土壤的介电常数呈对应关系	测量的空间范围较大, 只能测量地面以下几厘米的土壤, 且必须以定点测定数据为基础, 测定的数据精度较差
γ 射线法	γ 射线在穿透土壤时, 能量衰减程度与土壤含水量呈对应关系	快速、准确, 可对土壤进行连续自动监测, 测量值受土壤干容重影响大, 仅适于实验室测定
中子水分仪法	通过记录快中子遇到与之质量相近的氢原子变为慢中子的数量来计算土壤含水量	仪器探头在一个相当大的土壤样本中测定, 测量值更具代表性。可对原位土壤进行连续测定。不受土壤水状态影响, 测定数据准确性较高。仪器价格适中, 测定的慢中子数有赖于标准曲线转换成含水量, 标定过程会带来误差, 此外仪器有一定放射危害, 适于长期定点监测

(二) 中子水分仪在干旱半干旱区沙地上的应用

在测定土壤含水量方面,中子测水法应用最为广泛。中子法起源于 40 年代后期,经过 Belcher、Cuykendall 和 Sack(1950), Spinks、Lane 和 Torchinsky(1951), Gardner 和 Kirkham(1952), Glasstone 和 Edlund(1953), VanBavel(1956)及其他人的基础性研究,约于 1956 年开始推广使用商业设备。约 1963 年起,中子法开始应用于水文领域的土壤水分定量化研究,进入 80 年代后,仪器本身已实现了数据存贮电脑化。Greminger(1984)、Buchter(1986)、Vogelsanger(1986)、Hurst(1988)、马履一等人(1995)分别将中子法、张力计法和石膏块法在田间联用,以研究某一地区的土壤水分能量平衡。

中子测水技术是农业上田间实地测定土壤水分较先进的方法之一,是目前国内外测定土壤水分常用的先进技术,它的突出优点是:不破坏土壤结构,不受水分子物理状态变化的影响,有利于长期定位观测田间土壤水分,不受季节限制,能做任何深度的水分测定,简便、迅速、准确,由于此项技术具有其他方法难以代替的优点,因此,得到广泛的应用,被作为长期定点监测土壤水分的方法。

中子水分仪是目前最快捷,准确性和稳定性都较好的土壤水分含量测定仪器。在干旱、半干旱地区沙地的土壤水分研究中得到了一定的应用,如冯起(1995)采用中子水分仪,在禹城沙地,进行了连续 3 年的土壤水分动态观测;刘元波等(1996)利用中子水分仪测定沙地的土壤水分含水率,对田间测定沙地水分运动参数进行了初步研究,及王新平等(1996)利用中子水分仪测定土壤水分对干旱沙区进行了陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算,冯起等(1995)应用中子水分仪研究了干旱地区和半湿润地区半固定沙丘、裸沙及固定沙丘的沙地水分的动态变化规律及其影响因素,等等。

此外,新的测定手段不断出现,如 Joseph 等介绍的一种价格远比时域反射仪便宜但同样有效的土壤水分测定仪器 CS615 反射仪,Gaylon 等提供的振动仪(oscillater)也是一种价廉物美的土壤水分测定仪等(高照阳,2004)。

1.4 干旱半干旱区沙地土壤水分动态变化研究进展

水分是干旱区半干旱地区农牧业生产和治沙植被恢复的主要限制因子。土壤既是水分的载体也是植物的载体,植物为了生存不断地从土壤中吸收水分和养分,另一方面,土壤本身也通过蒸发不断的散失水分,造成植物枯萎,给农牧业生产和治沙植被恢复带来危害。因此对土壤水分状况进行研究,可以合理利用土壤水分,保证植物正常生长和进行治沙植被恢复工作。因此,土壤水分一直是研究的热点问题。国外对土壤水分的研究较早,50 年代中期至 60 年代中期,主要以苏联 A. A. P o d e 为代表的形态水分研究观点和方法支配着我国土壤水分研究的学术界,一些术语和概念一直延用到今天。1977 年在杭州举行的第一次土壤物理学术讨论会上,首次将土壤水分的能量概念介绍到国内(朱祖祥,1979),使得我国土壤水分研究步入一个崭新的阶段。随后几十年来,我国在土壤水分监测和动态变化等各方面作了大量的研究,取得了较大的研究成果。

近年来,很多学者对耕地、林地土壤水分和土壤物理性状的时空变化作了大量研究(刘新平,2005),本文主要综述介绍干旱半干旱区沙地土壤水分动态变化研究。

我国学者在土壤水分动态的研究主要研究内容为三个方面:土壤水分的季节变化、土壤水分的垂直变化以及土壤水分有效性评价。

沙地的土壤水分动态变化与农田、山地等相同,在时间序列上都具有明显的季节变化特征,且受降水的影响显著;在土壤垂直剖面上,随着土层的增加也表现为一定的变化规律。

时间序列上的季节变化特点主要有降水的季节分布差异引起的,表现为降水多的月份土壤水分含量高,在无降雨的季节,土壤水分变化平稳,若连续多日无降雨,则土壤水分骤减。

在季节变化方面,一般将其划分为土壤水分消耗期、土壤水分积累期、土壤水分消退期及土壤水分稳定期四个时期,但是由于地理位置不同,水分状况差异很大,影响土壤水分条件变异也很大(陈有君,2000),张国盛等(1999)对毛乌素沙区风沙土含水率季节变化进行研究,结果表明:整个生长季节流动风沙土地含水率较稳定;且风沙土含水率主要受降雨、植物蒸腾和土面蒸发的影响,季节变化表现为4~6月和9~11月的失水期、7~8月的降水补给期、翌年4月以前的冻结滞水期。

另外由于沙土的本身特性,其含水量低、持水力差、容易渗漏等,土壤水分与降水的关系与其他土质不相同。常兆丰等(2002)在民勤沙区研究了降水在沙丘中的渗透过程,观测研究结果表明:(1)降水在沙丘上下渗深度与降水量及降水强度成正相关,与气温成负相关。在民勤沙区雨季降水量在40mm以上时在沙丘中的下渗深度可以达到50~90cm。在当地,秋季降水尤其是秋季连续降水是沙丘储存水分的主要来源。(2)降水在沙丘上的下渗速率与降水量正相关,降水量大,主要含水层的含水率则高,下渗速度自然就快。(3)在0~45mm的降水量范围内,流动沙丘的降水的主要含水层在表层0~20cm范围内。

刘新平等(2006)对流动沙丘不同部位的土壤物理特征和土壤水分作了系统的观测,并通过自然和人工模拟降雨对流动沙丘降雨入渗、再分配过程及蒸发消耗三个方面作了定量的研究,同时应用Micro-lysimeter对不同干沙层厚度下的沙面蒸发状况作了长期的试验,主要结论如下:(1)科尔沁沙地流动沙丘0-200cm深度土壤层的水分具有明显的垂直变化,0-20cm为表层干沙层,20-140cm为降雨影响变化层,其中20-40cm为降雨影响剧变层,140cm以下为深部稳定层,受地面气象要素的影响很小。(2)降雨可以有效的降低沙地表层(0-10cm)土壤温度,增加土壤水分,从而为沙地植物种子萌发创造了机会;表层(1cm)土壤受外界气象因素的影响最为显著,随深度的增加,外界气象因素的影响作用逐渐降低,而且出现高峰值的滞后现象,深度越大,滞后现象越明显。(3)流动沙丘土壤表层蒸发量主要取决于干沙层的厚度,表现为随着干沙层厚度的增加,沙丘表层的蒸发量逐渐降低。

垂直变化方面,也呈现一定的规律,上层土壤受外界环境影响大,随着深度的增加土壤所受的环境影响减弱。一般来讲,随着深度的增加,土层平均含水量的变化幅度减少。

秦佳琪,托亚等(2004)通过对乌兰布和沙漠不同沙地水分状况研究表明:流动沙地土壤水分垂直分布状况划分为:表层干沙层、湿度变化层、稳定层,其迎风坡不同坡位含水量均呈现:坡上部<坡中部<坡下部,固定沙地土壤含水量小于流动沙地丘间低地。

陈有君等(2000)分析了内蒙古浑善达克沙地的土壤水分状况,得出其时空变化规律,土壤含水量的动态特征在不同土层也有差异,表土层,春末夏初之前土壤比较干,以后在波动中上升,8月份土壤含水量比较大,8月底以后又迅速下降到春末夏初的水平。心土层则在前期土壤比较湿润,而后逐渐下降,在6月中旬至7月中旬出现土壤含水量的低谷,7月中以后又逐渐升高,并在8月底达最大含水量,9月中旬后又降到年初的水平。6、7月间含水量的低谷可能是由于植物

大量耗水造成的。表土层和心土层(70cm以上土层)在9月上旬基本降到了5月初的水平。但底土层土壤含水量在波动中升高,9月上旬虽有所下降,但仍高于5月初的土壤湿度。在某些地形部位,随植被盖度的增加,土壤含水量有增大的趋势。

1.5 土壤水分动态预测模型研究进展

近20年来对土壤水分的预测研究已取得许多重要成果,总结土壤水分动态模拟主要有两类方法,即确定性方法和随机性方法(尚松浩,2004)。

1.5.1 确定性模型

确定性模型从土壤水分运移、转化所遵循的物理规律(如质量守恒、能量守恒)出发,建立土壤水分动态模型。主要包括概念性模型(水量平衡模型)、机理性模型(SPAC水分传输模型、SPAC水热传输模型)等。

国外有Thorthwaite(1954)提出的气候水分平衡的薄记法和Baier等(1966)研制的通用水分平衡法,在加拿大用语预报土壤水分的业务工作,等;国内康绍忠(1987)、吴厚水(1981)等都曾在这方面进行过研究。

近年来,国外的科研工作者为此作了大量工作,建立了不少土壤水分空间模型,有力地推进了土壤水分区域性研究,但是由于土壤水分变异的复杂性,迄今为止还没有一个较完善较普遍适用的模型。

法国Granier, A等(1999)以每天的土壤水分潜在的蒸腾蒸发量(PET)和降雨量为因子,以及温度等气候因子,建立了模型,来估计生长季节土壤水分耐干旱的程度,并用实际的蒸发量(AET)进行检验;同时,指出此模型在应用软件等方面存在着局限性。

日本的Katsuyama M(2004)分析应用了草原草甸的土壤水分的对数正态分布模型。Eitzinger J.等(2004)分析比较了不同的土壤条件下的三种模型在估算土壤水分的一致性,指出三种模型均的估计的损耗,并且分析了土壤水分的季节性平衡。

新西兰的Barker DJ等(2001)以数学模型分析了的新西兰草场土壤水分的空缺。该模型以每天的降雨量和每天的土壤潜在蒸腾量(PET)为因子,最后以实际的每天蒸腾蒸发量(ATE)检验模型的可行性。

国内许多学者多以农田为研究对象,建立了土壤水分动态模拟模型,如申双和,周英(1994)在从农田土壤水分平衡方程出发,建立了旱地农田土壤水分的动态模型。

李英年等(1994)以谐波分析法对周期项进行随时间序列的模拟处理,以剩余土壤水分(随机波动项)建立与自然降水量的线性回归关系后,据加法模式确定了高寒草甸地区的土壤水分动态变化预报模型方程。

1.5.2 随机性模型

影响土壤水分动态变化的因素(气象、土壤、作物等)在时间、空间上均有一定的随机特性,从不同的角度考虑以上随机因素的应用,便可得到不同类型的随机性预报模型,如数理统计

模型、随机水量平衡模型与随机土壤水动力学模型等。

数理统计模型根据土壤水分变化与其主要影响因素的统计关系或土壤水分自身的变化规律进行墒情预报,一般不考虑土壤水分运动的机理。在数理统计模型中,统计回归模型利用土壤水分与降水等因素的相关关系进行墒情预报;时间序列分析模型将土壤水分的变化分解为趋势项、周期项和随机项消退指数模型则通过土壤水分消退指数的动态变化过程进行墒情预报;人工神经网络(ANN)模型利用ANN结构来反映气象、作物等因素对土壤水分变化的影响。

确定性的水量平衡模型与水动力学模型不考虑有关因素的随机性,适合于下垫面(土壤、作物等)均匀的情况。随机水量平衡模型与随机水动力学模型在处理时空随机性方面比确定性模型具有明显的优势,需要首先建立主要影响因子时空变化的随机模拟模型,进而进行土壤水分动态的模拟与预测。随机性模型比确定性模型复杂,研究还不够深入,在墒情预报中的应用还不广泛。

但土壤含水量受众多因素影响,具有系统稳定性和非线性特点,当根据这类模型建立方程时,由于涉及因素过多,使得参数选取较为困难,导致预测结果不甚理想。目前应用较多的是时间序列模型及神经网络模型。

土壤水分含量受气候条件的影响,具有较大的随机性。时间序列分析主要是采用参数模型对所观测到的有序的随机数据进行分析与处理的一种方法,它所建立的模型是随机模型。目前,时间序列分析的方法主要应用在医学、金融及各种工程应用的领域。在土壤水分动态模拟方面,在北方气候条件下康绍忠(1990)对较厚土层用提取周期趋势的方法作了土壤水分动态的随机模拟研究,取得了一定的效果。

刘洪斌等(2004)利用时间序列分析方法进行丘陵地区紫色土土壤水分含量变化的预测建模研究,应用AR时间序列模型进行土壤水分含量的预测,得到了较好的预测效果。

罗长寿等(2002)应用时序模型对四川盆地土壤水分作了动态预报,针对土壤水分含量的非平稳随机特性,建立了预报丘陵旱坡地土壤水分动态的季节性时序模型。结果表明,该方法所得的理论预报结果与实测数据吻合较好。

在利用神经网络法进行非线性时间序列预测时,不需建立复杂的显式关系,非专业人员只需对获得的数据进行简单的处理,便可建立新的预测模型,方法简便、快捷、实用。土壤墒情的预报研究,国内外已有很多。近年来人工神经网络(Artificial Neural Network,简称ANN)中的BP网络(Back Propagation Network,反向传播算法)在相关工程领域得到了广泛的应用,同时在水科学中也有广泛的应用。

刘洪斌等(2003)利用径向基函数神经网络建立了土壤水分预测模型,结果表明,模型有较好的预测效果;证明了神经网络建立土壤水分预测模型的可行性。

周良臣等(2005)利用多年的土壤水分资料和气象资料,建立了BP人工神经网络模型,对土壤墒情进行较好的预测;范爱武等基于BP网络对不同深度的土壤水分进行了同时预报;

李兴旺等(2002)以降水入渗时间为输入变量,土壤水分含量为输出变量,建立BP神经网络,并对BP网络算法与数值算法进行对比分析,得出应用BP网络进行土壤水分含量时空变化分析的可行性。等等。

第二章 试验方案

2.1 试验区位置和概况

阿鲁科尔沁旗地处浑善达克沙地中部，属于我国典型的农牧交错区，由于长期以来的不合理开发和合理的农业耕作，土地退化、沙化严重。浑善达克沙地成为环京津地区近年来频发的沙尘暴的主要沙尘来源区之一。也是国家多年来重点防沙治沙区。



图 2.1 试验点地理位置图

Fig 2.1 the position of the Aluke'erqin Banner

阿鲁科尔沁旗位于内蒙古自治区中部，赤峰市东北部，地处西拉沐伦河北岸，大兴安岭南端东麓。地理坐标为东经 $119^{\circ}2' - 120^{\circ}1'$ ，北纬 $43^{\circ}21' - 45^{\circ}24'$ 。全境南北狭长，最长 232 公里，东西宽 114.4 公里，总面积 14277km^2 。有大小河流 12 条，流域面积 8819.4 公顷，均属西辽河水系。有大小湖泊 51 处，水面 2707 公顷，地下水总储量 428 亿立方米。地势西北高，东南低，北部为山区，中部为丘陵区，南部为科尔沁草原沙土波状平原。平均海拔 430 米，最高 1540 米，最低 266 米。

本旗属中温带半干旱大陆性季风气候区，降雨量集中，冬春多大风，地势起伏多变，高低悬殊，土壤结构不良。四季分明，年平均气温 5.5°C ，无霜期 95—140 天，年平均降水量 300—400 毫米。干旱、风、雹、洪涝外，雪灾、寒潮等自然灾害也常有发生。

阿鲁科尔沁旗有较丰富的草地和森林资源，但是由于长期的掠夺生产方式的影响，“多开荒”、超载过牧、乱砍滥伐，使自然植被遭到严重破坏，造成森林减少、草地退化、沙化，水

土流失日趋加剧，生态环境严重失调。根据本旗地形、地貌特点及水土流失程度分为五个类型区：森林草原区、风沙区、土石山区、丘陵沟壑区及河谷平川区，其中风沙区中风蚀面积 2337.4km²，占总面积的 16.4%，占本区面积的 49.3%。其中该区土地平坦，地广人稀，干旱少雨，冬春风沙大，自然植被由于气候和利用不当造成的破坏，沙化面积逐年扩大，区内有固定沙丘 44880 公顷，半固定沙丘 40040 公顷，流动沙丘 15813 公顷。由于水土流失，气候变旱，雨量减少，40 年代全旗平均降水量 480 毫米，80 年代已降到 320 毫米，地表水量锐减，地下水位下降 2—4 米。

1978 年，阿鲁科尔沁旗被列入“三北”防护林体系工程区；而水土保持工作始于 1956 年。治理措施原则为先治上后治下，沟坡兼治，以坡为主。主要措施：以土蓄水，以水养树，以树固土，工程措施雨生物措施结合进行。工程措施如：梯田、地埂、水簸箕、堰坝、谷坊、蓄水池、鱼鳞坑、水平沟等；生物措施有：水土保持林、沟头防护林、水源涵养林、渠道保护林、农田防护林、封山育林、育草、种植优良牧草等等。

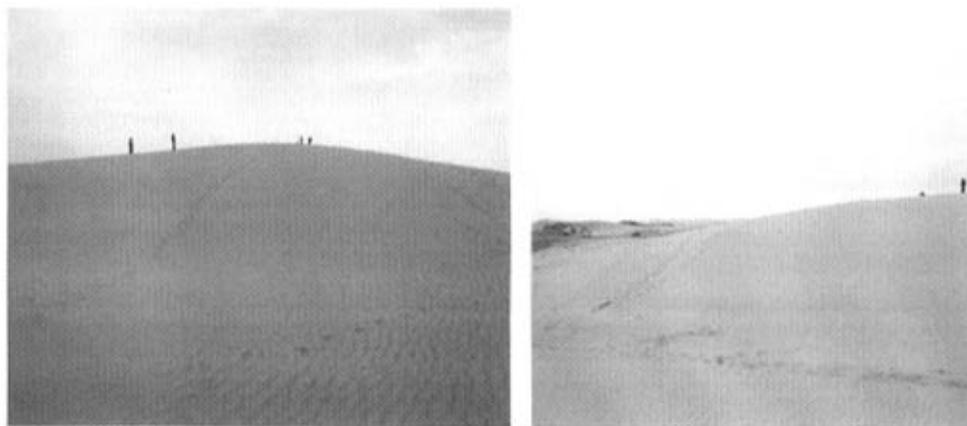


图 2.2 试验点流动沙丘实景图
Fig.2.2 Photograph of the mobile dune in examination site

2.1.1 自然条件简介

(1) 地形地貌

阿鲁科尔沁旗地处大兴安岭南段东麓山地丘陵与西辽河上游平原覆合截接部位。地势西高东低，北高南低，由西北向东南倾斜。基本的地貌类型为中山地区（大兴安岭南段东麓中山区）、低山丘陵区、平原区、沙漠、河流。中山地区的地表物质由侏罗系火山岩及燕山期花岗岩组成；低山丘陵区山丘间谷地多为树枝状，有小溪流；沟谷川地切割剧烈，植被稀疏，水土流失严重；平原地区属乌力吉沐伦河及其支流砂质平原和台河、西辽河砂质平原的一部分；沙漠为阿鲁科尔沁草原地貌类型之一，由于历史上的耕收、放牧、砍伐、干旱少雨等多种原因，造成沙化，沙漠面积不断扩大。

(2) 气候特征

阿鲁科尔沁旗属于中纬度温带半干旱大陆性季风气候，总的气候特征为：春旱温差大，

雨少, 风多, 蒸发量大, 冷暖气流交绥频繁, 常有倒春寒天气出现, 季平均气温年际变化大, 夏季温湿雨集中, 秋高雨少霜期早, 冬季漫长而寒冷。光照充足, 积温有效性高。阿鲁科尔沁旗气温由南向北随海拔上升而下降, 年平均气温为 5.5℃, 南北部差异大, 东西部差异小, 年际变化小; 常年最热月为 7 月, 最冷月为 1 月。地面极端最高温度为 46.4℃, 地面极端最低温度为 -25.6℃; 年日照时数 2700—3100 小时, 太阳总辐射量最高值出现在 5—6 月份; 年平均降水量为 300—400 毫米, 地域差异明显, 北部>中部>南部, 全年降水量集中在夏季, 以 7 月份最多, 降水量最少的为 1 月份, 冬季降水量仅为 6—9 毫米; 年蒸发量为 1958.1—2259.0 毫米, 为降水量的 5—6 倍, 季蒸发量最大值为春季, 是春季降水量的 10.3 倍, 以 5 月份蒸发量最大, 占春季总蒸发量的 40.2%, 是月降水量的 17.3 倍, 以 12 月份为最小值月, 只 30.2 毫米。该旗冬春多有大风, 风南部多于北部, 平原多于山地, 沙漠多于草原和林地。一年四季都有大风日, 冬春季节以西风、西北风为主, 夏秋季节以南风、东南风为主, 年最大风速为 25 米/秒。

(3) 土壤状况

据 1985 年土壤普查阿鲁科尔沁旗全旗土壤大体归纳为 13 个土类: 1) 灰色森林土类 2) 暗棕壤土类 3) 黑钙土类 4) 草甸土类 5) 栗钙土类 6) 灰色草甸土类 7) 沼泽土类 8) 风沙土类 9) 泥炭土类 10) 灌淤土类 11) 新积土类 12) 石质土类 13) 粗骨土类

(4) 植被覆盖

阿鲁科尔沁旗境内已无原始植被, 从北到南大体可分为六种植被区: 1) 森林植被区 木本植物以天然次生林为主, 草本植物以岩蒿、萎陵菜、黄花菜、大针茅、苔草为主; 2) 草甸草原植被区 木本植物主要有山杏、胡枝子、山黄榆等灌木, 草本植物有中华隐子草、大针茅、冷蒿等; 3) 干旱草原植被区 木本植物有: 人工栽培的杨树、榆树, 还有天然次生的杏树等灌木, 草本植物有碱草、赖草、狗尾草等, 由于历年开垦、搂柴草、滥砍树木、挖药材, 过牧而植被遭到破坏, 造成水土流失, 土壤沙化, 植被退化、种类减少; 4) 草甸植被区 多为湿生植物, 木本植物以杨柳为主, 草本植物有芦苇、车前草、碱蓬等; 5) 沙生植被区 木本植物有: 人工栽培的杨柳榆等, 天然次生的杏树、柳树, 还有锦鸡儿、黄柳, 草本植物有: 麻黄、沙蒿、碱草等; 6) 沼泽植被区 植被以水生和湿生植物为主, 植物有: 芦苇、三菱草、水葱等。植被覆盖率不同的植被区有明显的区别。

2.1.2 社会人文背景

阿鲁科尔沁旗辖 12 个苏木、10 个乡、5 个镇。有蒙、汉、满、回、藏、朝鲜族、达斡尔、壮、苗、彝、鄂温克等 11 个民族。全旗 62581 户, 266369 口人。其中农牧业户口 243627 人, 占总人口 91.5%; 非农业户口 22742 人, 占总人口 8.5%。平均每 km²19 人。新中国建立 40 年来, 该旗的教育、文化、科技、卫生、体育、广播电视等事业均取得显著成绩, 适龄儿童入学率、年巩固率、毕业率、普及率等“四率”均达到国家教育部颁布标准, 扫盲脱盲率达国务院规定标准, 成为脱盲旗。有科技研究所 3 个, 群众学术会及专业协会 9 个, 科研项目遍及各个经济领域。全旗医疗卫生机构 73 个, 有卫生技术人员 548 名, 苏木、乡、镇均设卫生院或卫生所, 农村牧区缺医少药局面已明显改善。

1978 年, 阿鲁科尔沁旗被列入“三北”防护林体系工程区。80 年代起始, 旗委、旗人民

政府在林业生产上落实各种形式的承包责任制,改变了过去“造林不见林”、“造林不护林”的现象,加快了绿化步伐。阿鲁科尔沁旗水土流失、沙化、草原退化严重,水土保持工作始于1956年,生物措施与工程措施结合进行;水保治理,实行单户、联户承包,“林草有人管”,全旗承包户有8527户,有21户进山,承包面积14333公顷,出现了水保造林的重点户;针对沙化、退化严重情况,实行封山育山、护林。造林政策及一系列的管理政策,执行“以造林为基础、造林管并重、采育结合、永续利用”和“普遍护林、重点造林、合理采伐和合理利用”的方针。

2.2 试验区规划处理

2.2.1 化学固沙剂作用原理及简介

1) 化学固沙的作用原理

化学固沙的原理是利用稀释了的具有一定胶结性的化学物质喷洒于松散的流沙沙地表面,水分迅速渗入到沙层以下,而那些化学胶结物质则滞留于一定厚度(1~5mm)的沙层间隙中,将单粒的沙子胶结成一保护壳,以此来隔开气流与松散沙面的直接接触,从而起到防止风蚀的作用。

2) 化学固沙物质的种类和组成

a. 沥青乳液固沙

沥青乳液固沙主要是用HD—200/300和HD—130/200沥青制成的慢性裂型沥青乳液,作为临时固定沙面的粘结剂。沥青乳液形成的沙面保护层能保持在2~3年内有防止风蚀的作用。喷洒前应先将乳化厂制成的50%沥青乳液用2~6份水进行稀释,而且喷洒前预先在沙面上先喷水浇灌沙面,还可以增加乳液的渗透深度。乳液渗入干沙层和湿沙层的深度分别是10~15mm和20~30mm,可在沙面留下一层多孔性薄膜(厚2~3mm)。沥青乳液喷洒后在其薄壳边缘易形成卷曲现象而破裂,因此,在用水稀释乳液时,沥青乳液含量不宜过多,一般不超过10%~15%。

另外沥青乳液在贮存时应注意不要失水和不应低于0℃,可以使用各种能防止水分蒸发的贮藏罐贮存。在长途运输中为防止沥青乳液发生分解,可在每10t乳液中加入0.5kg烧碱。

沥青乳液是由石油沥青、乳化剂和水组成。其中乳化剂的材料可用硫酸处理过的造纸废液或油酸钠($C_{17}H_{35}COONa$),均是较好的乳化剂。为了增加其稳定性和分散度还可适当加些玻璃或烧碱(每10kg可加入0.5kg)。

b. 沥青化合物固沙

沥青化合物是一种含有沥青或粘油、水和矿物粉末(黄土、壤土、水泥或石灰)的暗棕色粘性物质。它是在灰浆搅拌机中经强力搅拌制成的。可用泥浆泵喷洒在流沙表面。如苏联道路研究所哈萨克分所研制成了一种固定流沙的化合物,其组成成分如下:

沥青 MG—70/30 或粘油 30%~50%;

矿物粉 30%~40%;

水 30%~35%。

此化合物在喷洒前须用水(1:1~1:10)稀释。沙面喷洒沥青或粘油 $0.25\sim 0.38\text{kg/m}^2$ (即

6~8/m² 稀释化合物)。渗入沙层深度为 10~30mm, 用量不可太大, 喷洒速度不可太快, 否则容易造成渗透不及而淌到低洼处积聚。造成沙面沥青沉淀不均匀。而且最好采取分次喷洒, 即第一次喷洒后 1.5~2 个月再喷 1 次, 以达到使所有沙面都能喷洒到。

3) 对植物生长的影响

通过沙表喷洒沥青以后, 形成一层保护壳首先起到固定沙粒的流动, 使植物有稳定发芽生根和生长的条件, 免除遭受风蚀沙埋, 沙打、沙割幼苗的威胁, 另外由于沥青层的存在, 使沥青层下的沙地的人文条件, 土温条件均得到改善, 而且是朝着有利于植物生长发育的条件转化。春秋两季沥青层下温度增加, 无疑能使种子及植物提早萌动, 延长了植物的生长期, 夏季地表及沥青层沙层都比对照区温度低, 又可使植物免遭日灼的危害。对根系还有延长生长期的作用。另外还有在试验过程中, 不但认为沥青保护了植物不受风蚀, 使流沙地水分和温度等条件得到了改善, 而且还认为沥青中的微量放射性物质对植物也有一定的刺激作用, 使植物生长效果好。

2.2.2 试验设计

本试验点选定为一个流动沙丘, 属于干旱区重要交通沿线处, 根据试验需要, 主要在迎风坡分别作化学固沙、建立草栅格和栽培草、灌木等处理, 试验区面积 200×50m², 沙丘高度 5m 左右。

2004 年 5 月, 对试验点进行围封、化学固沙、建立草栅格; 裸沙区(对照区)撒播草种(针茅、沙蒿、柠条等), 生物固沙区建立草栅格, 撒播植被; 化学固沙区喷洒化学固沙剂、建立草栅格, 并在草栅格内撒播草种, 栽植灌木, 并且根据化学固沙面积及草栅格面积不同搭配, 分为六种不同模式。试验区规划图如图 2.3。

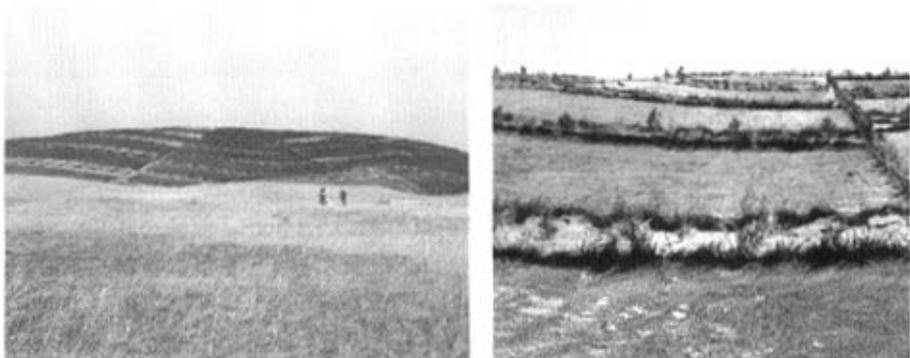


图 2.4 化学固沙区实景图

Fig 2.4 photograph of the chemistry examination site

第一个规划, 化学区宽为 8m, 坡顶至坡底生物区面积分别为: 4×2m², 6×2 m², 9×2 m², 10×2 m², 12×2 m², 15×2 m², 栽植灌木为 1 行;

第二个规划, 化学区宽为 8m, 坡顶至坡底生物区面积分别为: 4×2m², 6×2 m², 9×2 m², 11×2 m², 14×2 m², 栽植灌木为 2 行;

第三个规划, 化学区宽为 6m, 坡顶至坡底生物区面积分别为: $3 \times 2 \text{ m}^2$, $4 \times 2 \text{ m}^2$, $5 \times 2 \text{ m}^2$, $7 \times 2 \text{ m}^2$, $9 \times 2 \text{ m}^2$, $10 \times 2 \text{ m}^2$, $12 \times 2 \text{ m}^2$, $14 \times 2 \text{ m}^2$; 栽植灌木为 1 行;

第四个规划, 化学区宽为 6m, 坡顶至坡底生物区面积分别为: $3 \times 2 \text{ m}^2$, $5 \times 2 \text{ m}^2$, $7 \times 2 \text{ m}^2$, $9 \times 2 \text{ m}^2$, $12 \times 2 \text{ m}^2$, $14 \times 2 \text{ m}^2$; 栽植灌木为 2 行;

第五个规划, 化学区宽为 4m, 坡顶至坡底生物区面积分别为: $3 \times 2 \text{ m}^2$, $5 \times 2 \text{ m}^2$, $7 \times 2 \text{ m}^2$, $9 \times 2 \text{ m}^2$, $10 \times 2 \text{ m}^2$, $13 \times 2 \text{ m}^2$; 栽植灌木为 2 行;

第六个规划, 化学区宽为 2m, 坡顶至坡底生物区面积分别为: $3 \times 2 \text{ m}^2$, $5 \times 2 \text{ m}^2$, $7 \times 2 \text{ m}^2$, $8 \times 2 \text{ m}^2$, $10 \times 2 \text{ m}^2$, $10 \times 2 \text{ m}^2$, $11 \times 2 \text{ m}^2$, 栽植灌木为 2 行。

2.2.3 试验仪器设置

中子水分仪是现代微电子技术和安全应用核技术相结合的产物, 是一种高技术产品, 先进的野外测量土壤含水量的小型便携式仪器。测量过程, 不用取样, 不扰动被测介质, 不受水分物理状态的影响, 快速、精确、稳定, 测量深度不限, 以及可以与自动记录系统和计算机相连接, 因此, 其在相对测量或观察水分动态变化方面有其独到之处, 是传统取样烘干称重法的满意替代法, 具有其他方法不可替代的优越性。

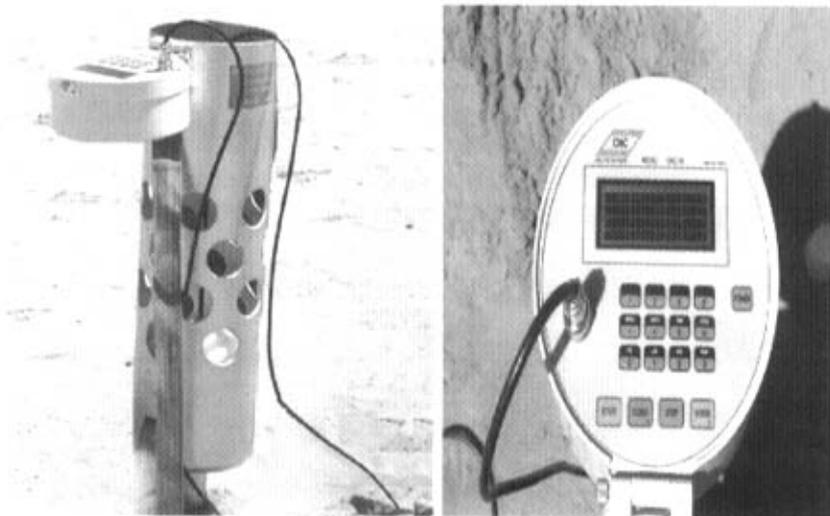


图 2.5 中子水分仪仪器实物图

Fig.2.5 Photograph of the calibration of neutron probe

鉴于以上中子水分仪的优点, 本试验选择中子水分仪测定土壤水分。选用北京超能科技公司研制生产的 CNC503B (DR) 新型智能中子水分仪。其是在 CNC503(DR) 的智能中子水分仪的基础上, 结合几年来的现场应用情况, 经过厂家、用户和国内外专家精心研究反复验证后而改进生产的第五代新型智能中子水分仪。该仪器的性能指标完全达到或超过美国 CPN 公司 503DR 和 TROXLER 公司的 4300 系列中子水分仪的水平, 可替代国外仪器, 仪器工作稳定可靠, 连续工作时间长, 工作环境温度范围宽。

本试验于 2004 年 8 月进行仪器安装, 在不同处理区按着坡顶、坡中和坡底不同坡位分别

埋设中子管（铝管），中子管长度为 2m，地下埋深 1.8m，露出地面 0.2m。化学固沙区每个模式的化学区与种植植物区设置两个重复；裸沙对照区每个坡位设置三个重复，此区共 9 个铝管；生物固沙区每个坡位两个重复，共设置 6 个铝管，整个试验区共埋设中子管 78 根。

试验现场铝管的设置情况如图 2.6 所示



图 2.6 裸沙对照区中子导管实景图
Fig2.6 the photograph of the return pipes in the naked dune

2.3 土壤基本物理性质测定

土壤容重采用环刀法测定，于 2004 年 8 月采取土样，在挖取的土壤剖面上，采用定容积的环刀（100cm³），取原状土样，每 20cm 取三个重复，至 160cm，土样带回实验室内，在 105℃烘箱内烘干至恒重，待冷却后称其干重，计算土壤容重，其计算公式：

$$\text{土壤容重 (g/m}^3\text{)} = (\text{湿土重量} - \text{烘干土重}) / \text{环刀容积} \quad (2.1)$$

取土样，0-160cm 每层三个重复，每 20cm 取一层，将土样自然风干，其由中国农业科学院农业资源与农业区划研究所植物营养重点实验室测定，最后土壤基本物理性质见表 2.1

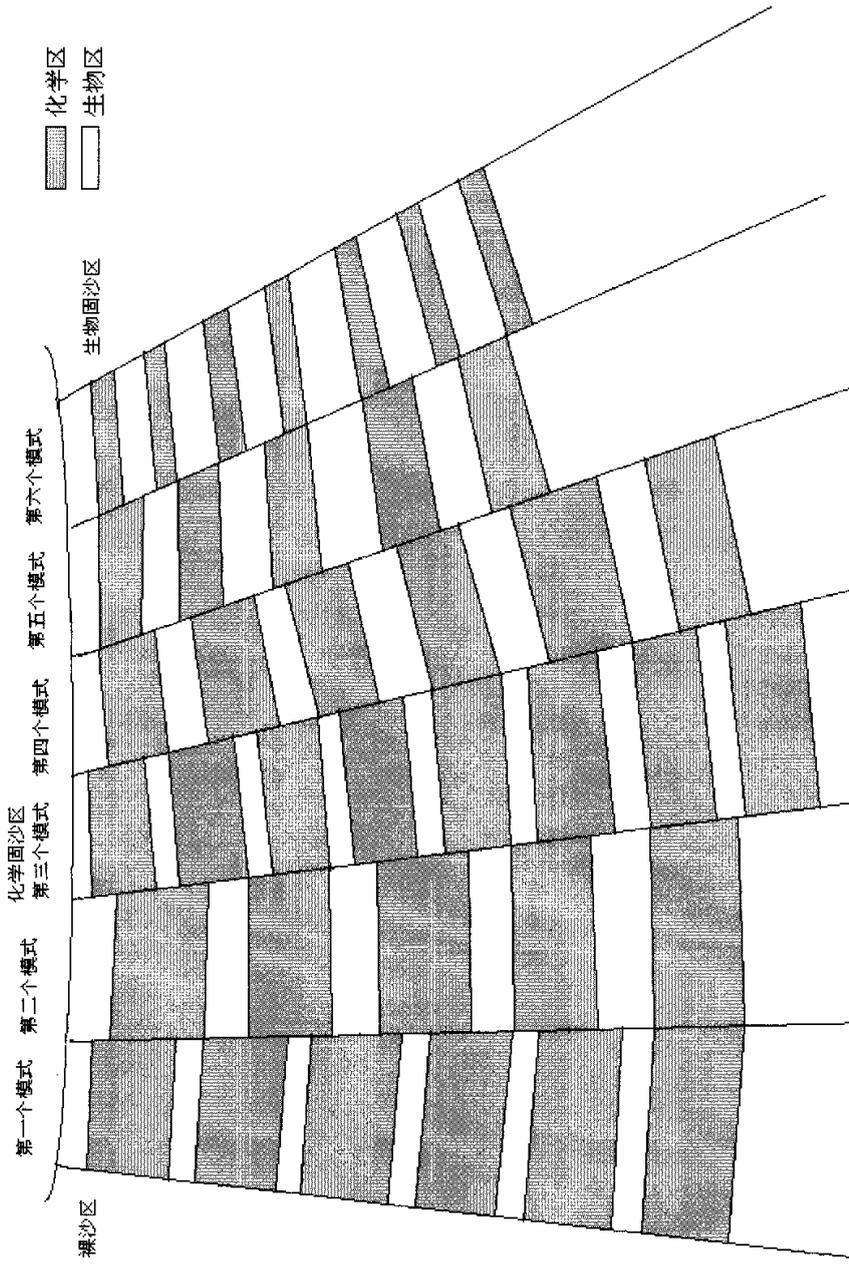
表 2.1 土壤基本物理性质
Table2.1 The basic physics properties of soil

层次	容重	机械组成 (%)			
		1-0.25mm	0.25-0.01mm	0.01-0.001mm	<0.001mm
0-20	1.792	67.05	22.33	5.21	5.41
20-40	1.768	57.47	32.11	4.81	5.61
40-60	1.765	60.56	26.82	6.41	6.21
60-80	1.666	58.72	30.66	6.01	7.61
80-100	1.730	81.40	8.38	5.01	5.21
100-120	1.750	72.55	17.83	4.61	5.01
120-140	1.759	73.78	14.41	5.41	6.41
140-160	1.735	72.74	18.65	5.41	6.41

2.4 试验指标观测

试验指标自 2004 年 8 月开始测定，土壤水分含量分别测量 5cm、15cm、25cm 一直测量至 145cm，土壤表层（0-35cm）每 10cm 测定一次，土层深处每 20cm 测定一次；分两个不同的时期：植被生长期（5 月-9 月）、植被非生长期（4 月-次年 10 月）。生长期每 10 天测定一次，非生长期每个月测定一次。

本试验由阿鲁科尔沁旗天山镇畜牧局负责测定，测定小组由张彩枝工程师带领其工作人员，工作人员均为大学学历。在进行测定工作前首先对工作人员给予现场演示训练，然后进行实地练习，从而保证其仪器操作的准确性，并且工作曾参与试验区的设置，对试验区布局熟悉，从而保证了数据的可靠性。



2.3 试验区规划横切面图
Fig the picture of trial site transverse section

第三章 中子水分仪的标定

中子散射法(The neutron scattering method)测量土壤体积含水量在20世纪50年代已有介绍。此后人们广泛利用其测量土壤水分变化。中子测水技术是农业上田间实地测定土壤水分较先进的方法之一,是日前国内外测定土壤水分常用的先进技术,它的突出优点是:不破坏土壤结构,不受水分物理状态变化的影响,有利于长期定位观测田间土壤水分,不受季节限制,能做任何深度的水分测定,简便、迅速、准确,由于此项技术具有其他方法难以代替的优点,因此,得到广泛的应用,被作为长期定点监测土壤水分的方法。

中子水分仪被广泛应用于长期定点监测土壤水分,长期以来土壤水分一直是植被恢复和沙化治理的研究热点问题,在沙地及流动沙丘上进行土壤水分研究应用中子水分仪很多,冯起等(1995)应用中子水分仪研究了干旱地区和半湿润地区半固定沙丘、裸沙及其固定沙丘的沙地水分的动态变化规律及其影响因子,王新平等(1996)利用中子水分仪测定土壤水分对干旱沙区进行了陆面蒸散量与土壤水分关系的数值计算,但就其中子水分仪在流动沙丘上的标定问题一直缺乏深入系统的研究,本研究选定在流动沙丘利用中子水分仪测定土壤水分,探讨了其在沙丘上的应用可行性,并综合应用多种方法研究了中子水分仪在流动沙丘上的标定问题,为干旱区沙化的土壤水分动态变化研究及植被恢复工作提供基础性数据。

前人对中子水分仪的标定方法进行了很多的研究,提出了几种行之有效且提高标定方程精度的方法,如分段标定、分层标定、容积含水率三点平滑及容积权重平滑处理以及进行点聚图筛选等。本研究采用分层标定和分段标定相结合的方法,并对其土壤容积含水率进行三点平滑和点聚图处理,对中子水分仪在流动沙丘上进行了系统和多种方法比较标定。

3.1 中子水分仪的原理及标定的必要性

中子水分仪的探头包括一个密封的锃一铍环状中子源,中子源把快中子射入土壤,与土壤中的原子,主要是土壤水的氢原子相碰撞,引起快中子散射、慢化和损失能量,当它们变慢到“热”能量水平,它们为其他中子反应所吸收,在中子源周围的土壤形成了一个“慢中子云”。慢中子云的密度在很大程度上是土壤水分含量的函数,由探头里的一个慢中子探测器(BF_3 正比计数管)进行采样,最后,由计数器上的数字直接显示数据,因此,显示器上的读数和土壤水分含量是成比例的,之间存在着一定的函数关系。

准确的标定是使用中子水分仪中最为重要的一环,也是基础;中子水分仪在出厂时都有其标定方程,但是,此标定关系受很多因素影响:通路管材料和种类,土壤容重,土壤化学成分等;而且土壤基质中的每一种要素都具有散射和吸收中子的性质,各种要素综合起来影响读数,其量是不可忽略的,因此,在理论上每种土壤都应该有其独特的标定曲线,不同类型土壤上测定时不能使用同一条标定曲线,与其给定的标定方程有很大的差异,在利用其测定土壤水分时进行田间标定是必要的。

冯起(1994)研究表明,中子仪在沙地测定土壤水分的方差分析中,仪器方差、位置方差及标定方差中标定方差占95%以上,其他方差影响很小,可以不加以考虑。说明在应用中子水分仪测定土壤水分时标定工作至关重要,其标定方程的精度直接影响测定土壤水分的准确

度。

3.2 测定试验

试验区设在内蒙古自治区阿鲁科尔沁旗，处于干旱区重要交通沿线的一个流动沙丘上，其土壤是典型的风沙土，机械组成中主要为砂粒，且各个土层粗砂粒均占 55% 以上，土壤各层次质地均匀，土壤基本物理性质见表 2.1。

于 2004 年 7 月及 2005 年 5 月测定，土壤容积含水率应用传统的烘干称重法测的；中子水分仪为北京核子仪器公司生产的 CNC503B (DR)，计数时间是 64s；在田间标定前，将中子仪在室内标准条件下测定标准计数 (std)，然后在田间测定 cnt，计算计数比 cnt/std。

中子水分仪标定时按着坡上、坡中、坡下的坡位选择有代表性的中子管，安装中子导管，同时，在管子周围 10cm 以内用土钻法取土样，并同步在管内用中子水分仪计数，将土样带回实验室，烘干称重法测得土壤重量水分含量，两次重复；土壤容重用环刀法测的，从而计算土壤容积含水率，与中子仪计数比进行标定。

3.3 标定方法

中子水分仪测定土壤水分时，探头对从不确定的容积，即所谓的“影响圈”返回的热中子进行反应，所得的不是对一个点的测量，大多数计数值是来自反射源 10—15cm 的范围内（干土范围更大）。所以，一般意义上我们可以认为：中子仪所测得土壤湿度是一定球形容积（半径 10—15cm）内的容积含水率，因此，深度间隔定为 10cm 所取的读数能得到真实土壤剖面的一个平滑水分反映形式，因此，在标定工作中，进行了容积含水率的三点平滑及点聚图筛选处理，以提高标定方程的精度。

3.3.1 三点平滑

基于上述的中子仪的测湿原理，将烘干称重法得到的容积含水率进行三点平滑处理。公式如下，两端点：

$$Q = \{3q_1 + q_2\} / 4 \quad (3.1)$$

$$Q_m = \{q_{(m-1)} + 3q_{(m)}\} / 4 \quad (3.2)$$

其他：

$$Q_i = \{q_{(i-1)} + 2q_{(i)} + q_{(i+1)}\} / 4 \quad (3.3)$$

其中： m 为测量土壤层次最底层，即末端点， Q_i 为三点平滑处理后的第 i 层土壤水分含水率，

$q_{(i)}$ 为烘干称重法测得第 i 层的土壤水分体积含水率， i 为土壤层次。

3.3.2 点聚图筛选

在进行点聚图分析时可以看出：大部分点子都集中在一条直线周围（在理论上中子仪的计数率比与土壤容积含水率的确成直线关系），而有极个别“野点子”却四处散落，这种测量原

理的差异将对方程的精度产生一定的影响,在回归分析前,有必要将这些数据进行剔除,这种人为的参与既不违背统计的原则,又弥补了中子仪测量土壤水分的不足,对提高回归方程的精度大有裨益。

3.3.3 分段标定与分层标定相结合

由于中子水分仪测定土壤表层含水量时,有部分中子溢出,因此表层数据标定差异较大,据前人研究成果,土壤表层 0—30cm 计数比与土壤容积含水率线性关系不明显(1997);胡顺军等(2000)提出中子水分仪标定分层标定,监测深度小于探测半径的和大于探测半径的分开标定,同样选定 30cm 为分界点,另外, CNC503DR 中子水分仪的探测半径为 25cm—30cm,因此与深层同时标定误差高,应分段标定,0—30cm 浅层,30—150cm 为深层,浅层应用非线性标定。

另外,由于深层 30—150cm 所含深度跨度较大,用一条标定方程误差较高,且考虑试验地风沙土的特性,采用伍维模等(2002)提出的分层标定,再根据当地土壤特性及每层标定的统计参数进行合并成几条有代表性的标定直线,以降低标定误差,提高标定精度。

3.4 标定结果与分析

3.4.1 浅层 0—30cm 土壤标定方程的确定

胡顺军(2000)就表层 10cm 处的标定问题曾提出运用非直线标定,本研究根据风沙土本身的性质,土质疏松均匀,且土壤含水量较低等确定为 0—30cm 为表层进行综合标定,采用二项式回归,运用三点平滑及点聚图筛选处理,最终确定标定方程: $y=72.97x^2+11.847x+4.6901$,相关系数 $r=0.8953$,相对误差(%)为 8.58。相关系数达到高度相关,且通过 $t_{0.001}$ 下的检验,因此方程是可信的。散点图如图 3.1 所示:

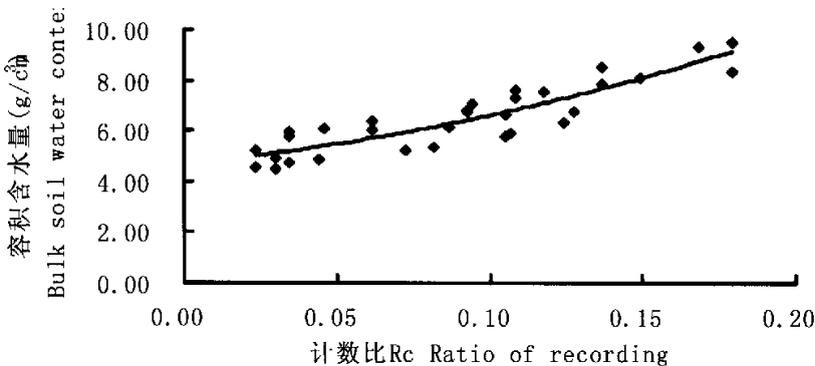


图 3.1 表层 0—30cm 标定直线
Fig 3.1. Calibrating curve of 0-30cm

3.4.2 深层土壤标定方程的确定

以中子水分仪在土壤中的计数比 (cnt/std) 为自变量 x , 同一层土壤容积含水率为因变量

y ，分层对 30—150cm 进行直线回归，标定直线为 $y = ax + b$ ，由表 3.2 可知，深层各层次土壤的标定直线均成立，且相关系数达到高度相关，相对误差较低。

表 3.2 30—150cm 各层土壤的标定直线的统计参数
Table 3.2 The statistical parameters of calibrations equations of 30—150cm depths soil

土壤层次 Soil depths (cm)	样本数 (n)	斜率 (a)	截距 (b)	相关系数 (r)	相对误差 (%)
35	12	41.656	0.2158	0.9766	4.63
45	12	49.098	-0.9145	0.9842	4.50
55	11	42.283	-0.3459	0.9842	4.14
65	11	40.476	-0.0568	0.9798	4.35
75	12	45.687	-0.7821	0.9846	3.26
85	15	65.004	-3.2090	0.9978	4.26
95	15	59.566	-2.6354	0.9958	3.90
105	14	48.066	-1.2038	0.9941	4.17
115	14	45.745	-0.9004	0.9943	3.67
125	15	56.766	-2.3069	0.9984	4.52
135	16	56.839	-2.3571	0.9983	4.79
145	14	57.110	-2.2207	0.9990	4.21

在实际应用中，不可能如此详细的每层进行标定及运用标定方程，根据当地的土壤状况及上表中的每层土壤标定直线的统计参数，可以合并几层有代表性的方程，分别是 30—80cm、80—100cm、100—130cm 及 130—150cm 四层；另外，在进行深层土壤最终方程确定过程中，对深层 100—130cm 及 130—150cm 两层进行了直线回归和二项式回归的比较，发现这两层二项式回归标定效果要好于直线方程，结果见表 3.3。

表 3.3 100—130cm 及 130—150cm 不同回归方程比较
Table 3.3 The comparison of different calibration equation in 100—130cm and 130—150cm depths

土壤层次 Soil depths (cm)		标定方程 Calibration equation	样本数 (n)	相关系数 (r)	相对误差 (%)
100-130cm	直线	$y=48.119x-1.231$	43	0.9966	3.66
	二项式	$y=12.787x^2+40.374x-0.4439$	43	0.9968	3.60
130-150cm	直线	$y=57.020x-2.3029$	30	0.9987	5.02
	二项式	$y=18.708x^2+42.636x-0.7865$	30	0.9988	4.25

由上表所示，深层土壤标定方程二项式回归相关系数和相对误差均较直线回归好，因此最终深层标定方程的确定见表 3.4。

表 3.4 深层土壤不同层次的标定方程
Table 3.4 The calibration equations of different depths soil

土壤层次 Soil depths (cm)	标定方程 Calibration equation	样本数 (n)	相关系数 (r)	相对误差 (%)
30—80	$y=43.467x-0.3423$	55	0.9781	4.74
80—100	$y=60.713x-2.7173$	30	0.9919	4.19
100—130	$y=12.787x^2+40.374x-0.4439$	43	0.9968	3.60
130—150	$y=18.708x^2+42.636x-0.7865$	30	0.9988	4.25

由上述表可以看出，将深层土壤分为四层来分别标定，相关系数均达到高度相关，且利用回代法检验的相对误差较低；另外可以看出，100—130cm 和 130—150cm 两层的标定方程的精确度要稍高于 30—80cm 和 80—100cm 两层。

3.5 结论

(1) 本研究表明，中子水分仪的标定工作是必要的，将土壤层次分为浅层及深层分段标定能大大提高标定方程的精度且相对误差大大降低，效果远远好于单纯使用一条标定直线。本研究标定土壤范围广，且就表层及深层不同土壤层次利用不同方法同时标定，在提高标定方程精度的同时，标定方程的误差也大大降低，结果令人满意。

(2) 土壤表层 0—30cm 标定方程的精确度明显低于深层 30—150cm 标定方程的精度，相对误差较深层高，目前对浅层的标定方法研究方法比较深层较少，其标定精度有待于进一步提高。

(3) 本研究结合多种方法进行标定，浅层用非线性标定；深层用分层标定，再根据当地土壤特性及每层的标定统计参数合并为几条标定直线；另外，将深层两层直线回归和二次项式回归进行了比较，结果表明部分深层用二次项式标定效果要比线性标定稍好，误差会降低；最终确定的标定方程效果较好，此方法具有一定的推广价值。

(4) 前人就中子水分仪在农田的标定及应用做了很多研究，而沙土尤其是典型的风沙土的研究很少，本研究对中子水分仪在流动沙丘测量土壤水分进行了尝试，应用多种方法其标定方程达到高度相关 0.98 左右，且相对误差较低，在 5.0% 以下。证实了中子水分仪在流动沙丘测定土壤水分测定的可行性及可靠性。

(5) 此标定工作为应用中子水分仪长期定点监测流动沙丘土壤水分变化的基础性工作，证实了其研究的可行性及可靠性，另外，是及时掌握流动沙丘土壤水分动态变化从而进行固沙植被恢复的重要前提性工作，其理论和实用意义深远。

第四章 固沙初期不同处理土壤水分动态变化

流动沙丘风沙活动强烈, 基质贫瘠, 生物活动极其微弱, 特别是干旱地区, 降雨稀少, 水分严重缺乏, 其制约因素中最重要因素是沙地水分分布状况及其量值。土壤水分是人工植被生存和稳定的最敏感的限制因子, 是“箍桶”效应中的短板, 因此提高有效土壤水分的含量及提高有限降雨的利用率是固定流动沙丘、减少风蚀沙化的关键因素。

始建于 1956 年位于包兰铁路沙坡头段的人工固沙植被防护体系是我国流沙固定的典范和沙漠化防治的成功模式之一, 其采用“以固为主, 固阻结合”, “以生物固沙为主, 生物固沙与机械固沙相结合”的防护体系, 创造了巨大的经济效益、生态效益和社会效益; 但是, 随着固沙植被的建立、发展和演变, 沙丘的土壤水分呈现明显的下降趋势, 且植被出现了衰退现象。因此, 采取措施提高土壤水分的含量, 及提高有限降水量的利用率, 是达到长期固沙及植被恢复的关键所在。

本试验采取化学固沙和生物固沙相结合的措施, 通过化学固沙改变水分的分布及再分配, 提高生物固沙区的土壤水分含量, 提高有限降水量的利用率, 提高植被的成活率, 以期达到长期固沙的效果。根据化学固沙及生物固沙区的不同面积比例分为不同模式, 根据长期监测土壤水分的结果选出固沙效果较好的一个模式进行推广利用。本试验将是固沙措施的一个重大突破, 为“发展生态农业治理沙漠化土地”提供技术借鉴。

本部分根据 2004 年 8 月至 2005 年 8 月的土壤水分含量数据, 对不同处理的土壤水分含量进行比较分析, 以掌握了解不同处理的沙地土壤水分变化, 及通过处理后土壤水分的变化情况, 比较不同处理及不同模式的时间序列土壤水分含量, 分析不同措施的防风固沙及增水保水效果。

4.1 流动沙丘水分动态变化

4.1.1 流动沙丘土壤水分动态变化

流动沙丘上稀疏的散布着草类和小灌丛, 本试验流动沙丘的土壤为典型的风沙土, 0-140cm 土壤各层次质地均匀, 分析其机械组成, 其砂粒占 90% 左右, 土壤孔隙度大, 因而其通透性大, 渗漏强烈, 保水保肥能力差。

为初步了解此地区流动沙丘的土壤水分状况, 以无处理裸沙对照区每月中旬的土壤水分含量作为月土壤含水量。用 2004 年 8 月至 2005 年 8 月一年数据生成土壤水分等值线图图 4.1, 从图 4.1 可以看出 10-40cm 土层的土壤水分较活跃, 尤其是 10-30cm 处土壤水分季节变化剧烈, 说明其受季节降雨的影响显著。从整个土层来看, 表层 0-10cm 处土壤水分较低, 容积含水率在 5.0% 左右, 且随季节变化不明显, 其土层为干沙层, 且由于风沙的渗漏强烈, 表层土壤水分受降雨影响时间效应较短, 降雨后仍表现为较低的含水量, 表现为无明显的季节特征。10-30cm 土壤水分呈剧烈增加趋势, 至 30cm 处达到最高值, 40cm 处土壤水分下降, 随后有升高趋势, 但不明显, 比较平缓。

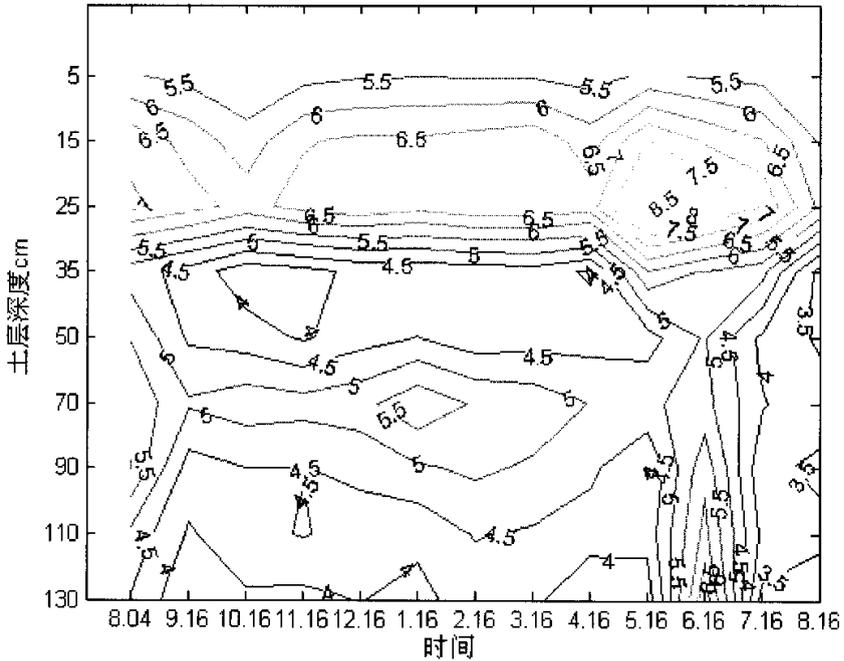


图 4.1 流动沙丘土壤水分含量等值线图

Fig4.1 Distribution of isoline of soil moisture in mobile dune

从季节上看,在降雨季节 5-8 月份,表层土壤水分含量大为提高,由原来的土壤容积含水率 5.5%左右升至 8.5%左右。由于风沙土,孔隙度大,渗漏强烈,深层土壤在雨季表现为较高的土壤水分含量,表明,降雨入渗至 100cm 以下的深层土壤,使其在降雨季节土壤水分含量提高。

4.1.2 流动沙丘的土壤垂直动态变化

在荒漠化地区,一方面,沙土中的水分向下湿润的深度一般较浅,通常在降雨以后土壤表层立即蒸发,湿润层的水分由于蒸发而向下的再分配逐渐减少(刘发民, 2001); 因为试验区降水少,且蒸发强烈风沙大,所以降水对该地区深层土壤水分的影响微弱。降雨量对风沙土含水率的影响,不仅表现在降雨总量上,还与一次降雨量的大小、风沙土的颗粒组成有关,风沙土含水率的垂直变化因受每次降雨量的大小、风沙土的机械组成、植物根系分布和根量等多种因子的综合影响,变化较为复杂(张国盛, 1999)。

很多研究表明,降水对沙丘地土壤含水量影响较大(冯起, 1995); 而研究降水在沙丘地入渗表明,降水对较浅层沙土的含水量的影响较为显著,而对深层沙土含水量的作用愈加不明显(常兆丰, 2002)。图 4.2 表明,不同时期表层 0-30cm 线分离,本试验区流动沙丘风沙土 0-30cm 受降雨影响较大,一般降水的影响深度为 30cm; 由于降雨总量小及每次降雨强度小的原因,降水很难向深层下渗,且地下水位较低,故土壤深层的含水量较低。同时,由于表层

干沙层的存在, 阻碍了土壤水分的蒸发, 使得土层 20-30cm 处土壤含水量最高, 而 30-40cm 骤然下降, 40cm 深度以后, 由于受降雨影响小, 且本地区干旱地下水位较低, 深层土壤水分不同季节时期变化平稳。

因此, 由图 4.2 可知, 根据流动沙丘土壤水分含量的垂直深度变化, 可将不同层次分为 0-30cm 土壤水分剧烈增加层, 30-40cm 土壤水分骤减层, 40-80cm 土壤水分平缓层, 80cm 以下是深部水分稳定层; 80cm 以下土层不易受外界因素影响, 水分运行较缓慢, 含水量多随深度增加而增加, 其含水量主要受地下水位或地下水位以上引起的毛细管上升高度的沙地含水量影响 (冯起, 1995)。

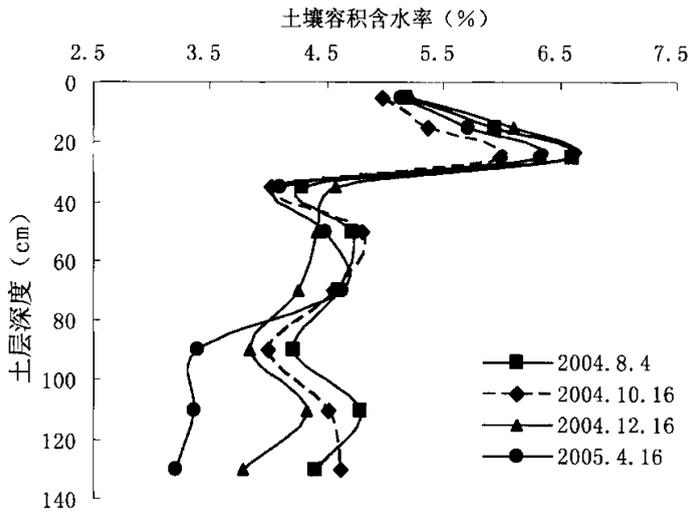


图 4.2 流动沙丘不同季节垂直剖面水分变化
Fig4.2 Profile changes of soil moisture in different seasons of mobile dune

4.2 沙丘上部不同处理土壤水分含量比较分析

本试验对流动沙丘进行处理, 在整个流动沙丘的迎风坡位, 分为三个不同的处理区, 分别为对照区裸沙区, 建立草栅格种植植物的生物固沙区, 及利用化学固沙剂进行固沙, 并同时建立草栅格的化学固沙区, 化学固沙区根据化学区不同的宽度及生物区搭配分为六个模式。

裸露的流动沙丘地表植被稀疏, 在风力作用下风沙活动强烈, 产生严重的风蚀, 另外, 其土壤基质贫瘠, 通透性强, 渗漏强烈, 故其土壤水分含量低, 保水保肥能力差, 不易植物生长; 生物固沙区通过建立草栅格及种植植物对沙土进行阻拦, 以降低风速减少风蚀, 从而达到固沙效果; 化学固沙区通过化学固沙剂的作用, 防止风蚀, 减少土层水分蒸发及阻止降水下渗, 改变降水径流, 利用沙丘的坡位优势增加其下部生物区的土壤水分含量。

由于 2004 年秋季尤其是 10 月的大风吹蚀, 沙丘丘顶的化学固沙区化学固沙受到破坏,

影响了试验,故沙丘丘顶的分析处理数据为2004年8月至2005年4月,分别分析了0-10cm, 10-30cm, 30-40cm、40-60cm及60-80cm的土壤水分变化及不同处理不同模式之间的差别,选出不同处理中较好的处理,以选出对沙丘丘顶上防风固沙、提高土壤水分含量较好的模式。

4.2.1 沙丘上部不同土层深度化学固沙区生物区六种不同模式比较分析

试验设计中,根据化学固沙区化学区带宽的不同及与草栅格生物区种植植物行数不同分为六种不同模式,化学固沙剂的作用是在沙层表面形成一层胶结面,形成一层保护层,从而隔开沙层与外界的直接接触,起到防风固沙的效果。化学固沙面水分不渗漏,从而阻止降水的下渗,对降水截流,改变了其地表的径流。化学固沙面面积不同其对降雨的截流量不同,从而改变生物区的土壤水分含量不同,以下对不同土层深度六个模式的土壤水分含量进行比较,结果如图4.4。

从图4.4中可以看出,在时间序列上,不同层次六种不同模式均表现出一定的季节动态变化,降雨季节土壤水分含量增高,非降雨季节,土壤水分含量下降,且除30-40cm层次外,其他层次在2004年8月至2004年10月的变化规律一致,2004年10月至2005年8月时间序列上,各个模式变化规律不尽相同。

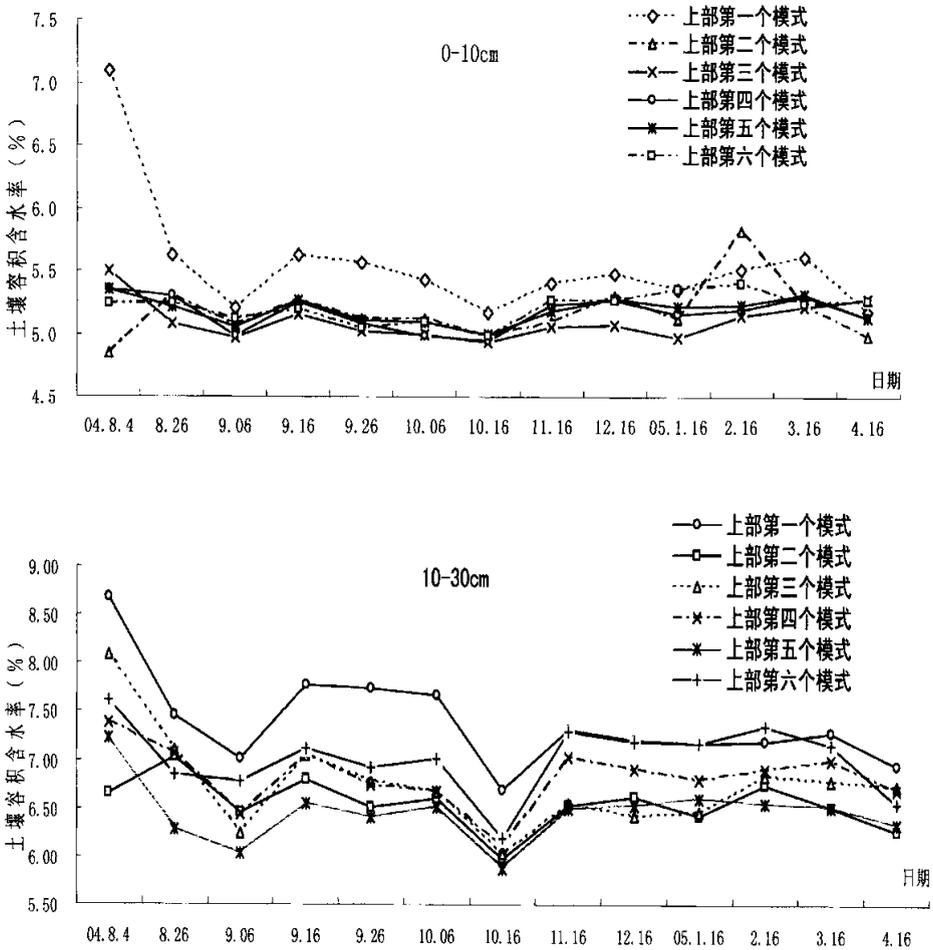
0-10cm层次,六种模式土壤水分含量比较,整个时间序列上第一个模式最高,其他五个模式之间没有明显差异,土壤容积含水率在5.0-5.5%范围内。在2004年8月4日,土壤含水量第一个模式>第三个模式>第五个模式>第六个模式>第二个模式,土壤容积含水率分别为8.6764%、6.6536%、8.0916%、7.3874%、7.2195%、7.6136%,而与2004年8月26日相比,第一个模式下降显著,土壤水分相对下降14.11%,而其他无明显下降,比较平缓,表明在降雨季节,第一个模式除了本身接受雨水外,受相邻化学区影响较其他模式显著。分析其原因是其化学固沙带宽为模式中最宽8m,对流沙覆盖面积大,故对降雨截流量多,因此对其下部生物区水分补充较多。

10-30cm层次,六种模式土壤水分含量比较其它层次高,2004年8月4日至2004年10月16日时间段上,土壤水分含量表现为第一个模式为最高,第五个模式为最低。各个模式在时间序列上表现出明显的波动性,且变化规律基本一致。

40-60cm、60-80cm六种模式在时间序列上的变化规律基本一致,而2004年8月至2004年10月与2004年11月至2005年4月两个时间段,规律不尽相同,原因是经过2004年秋季尤其是10月风蚀影响,化学区遭到破坏,鉴于此原因,六种模式比较时,只考虑第一个时间段。在此时间段上,整体上第四个模式>第二个模式>第三个模式>第五个模式>第一个模式>第六个模式。

在2004年8月至2004年10月时间列上,综合考虑不同层次不同模式的土壤含水量,0-10cm与10-30cm层次上第一个模式最好,0-10cm其他模式无显著差异,10-30cm层次上,第一个模式最好,其次是第六个模式、第三个模式、第四个模式、第五个模式、第二个模式。30-40cm第五个模式、第二个模式较低。其他无显著差异,40-60cm,60-80cm两层土层,整个时间序列上,土壤含水量顺序为第四个模式>第二个模式>第三个模式>第五个模式,第一个模式与第六个较低,其两者之间无显著差异。

综上所述分析图 4.3 可得, 同一土层六种不同模式的土壤水分变化规律不尽相同, 同一模式在不同土层的变化规律亦不相同, 不同模式土壤水分比较, 0-10cm 及 0-30cm 土壤表层, 第一个模式土壤水分含量较高, 在 2004 年 8 月至 2005 年 4 月土壤水分均高于其它模式, 尤其是在降雨季节, 其土壤水分含量显著高于其它模式; 30-40cm 不同模式此层次上均变化剧烈, 除第二个、第五个模式水分明显较低外, 其他模式之间没有显著差异; 40-60cm 与 60-80cm 深层不同模式在整个时间序列上表现规律基本一致, 且两个模式均为第四个模式水分较高, 第六个模式土壤水分含量较低。从而得出, 在表层 0-30cm 第一个模式增加土壤水分效果佳, 而在深层 30-80cm 第四个模式土壤水分含量最高。



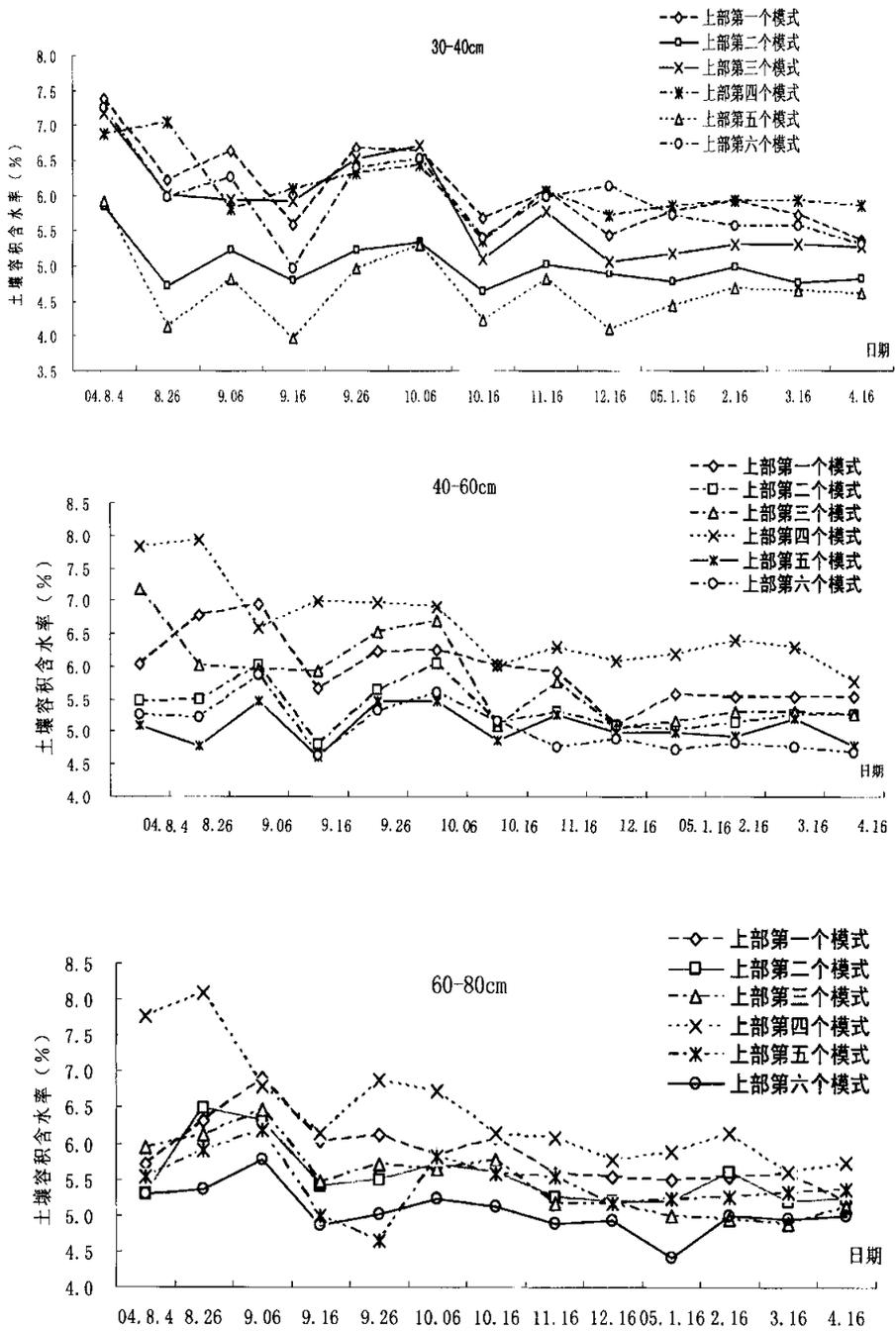


图 4.3 沙丘丘顶不同层次六种不同模式生物区比较

Fig4.3 Different soil levels comparison of the six models plant district on top dune

4.2.2 化学固沙区生物区与化学区、裸沙区、生物固沙区比较分析

分析化学固沙区的六种模式与化学区、生物固沙区及对照裸沙区的表层土壤水分变化,六种模式在时间序列上的变化趋势基本一致,据上述分析,本部分以表层最优模式第一个模式为例分析不同土层与其他不同处理的土壤水分比较。

由于沙丘丘顶的特殊地理位置,在经过2004年秋季及2005年春季的大风季节后,沙丘丘顶的化学固沙区被严重风蚀,化学固沙层被风蚀破坏,故沙丘丘顶的土壤水分分析数据应用的为2004.8.4至2005.4.16,不同层次不同模式分析比较见图4.3

1)从整个图4.3可以看出,不同层次各种不同处理之间进行比较分析,在整个时间段上,生物固沙区、化学固沙区生物区与化学区均高于裸沙对照区,表明各种处理对提高土壤水分、固沙均有一定程度的效果。且不同处理在时间序列上,表层0-10cm土壤水分含量无明显差异,在10-30cm及深层有较大差异,土壤水分含量差距较大。

在2004年8日至2005年4月16日的时间序列上,各种处理均表现两个时间段变化,2004年8月4日至2004年10月16日,各种处理土壤水分呈下降趋势,2004年8日土壤水分为最高点,因为在此前几天有降雨过程,土壤表层受降雨影响,水分较高,2004年10月16日至2005年4月16日,各种处理土壤水分变化剧烈,10月为试验点的强风季节,顶部发生严重的风蚀,破坏了化学固沙区化学区的化学物质,使化学固沙区化学区的结构遭到一定程度的破坏。

在2004年8月4日,由于降水的影响,第一个模式生物区表层土壤含水量显著高于其他处理,0-10cm处的土壤容积含水率达到7.0980%,高于裸沙对照区45.06%,高于生物固沙区20.34%,显著高于化学区,同时表明在降雨季节,化学固沙区化学区对降雨截流,改变降雨的径流作用,有效的增加了其下坡位生物区的土壤水分含量,10-30cm处,化学固沙生物区土壤水分含量为8.8764%,为整个土层的水分最高点,高于裸沙对照区32.39%,高于生物固沙区7.60%。

2)0-10cm为流动沙丘表层干沙层,其土壤含水量较低,受降雨影响显著,但沙丘持水能力很弱,降水一般均渗入土体内,故表层受降雨影响的时间效应较短。

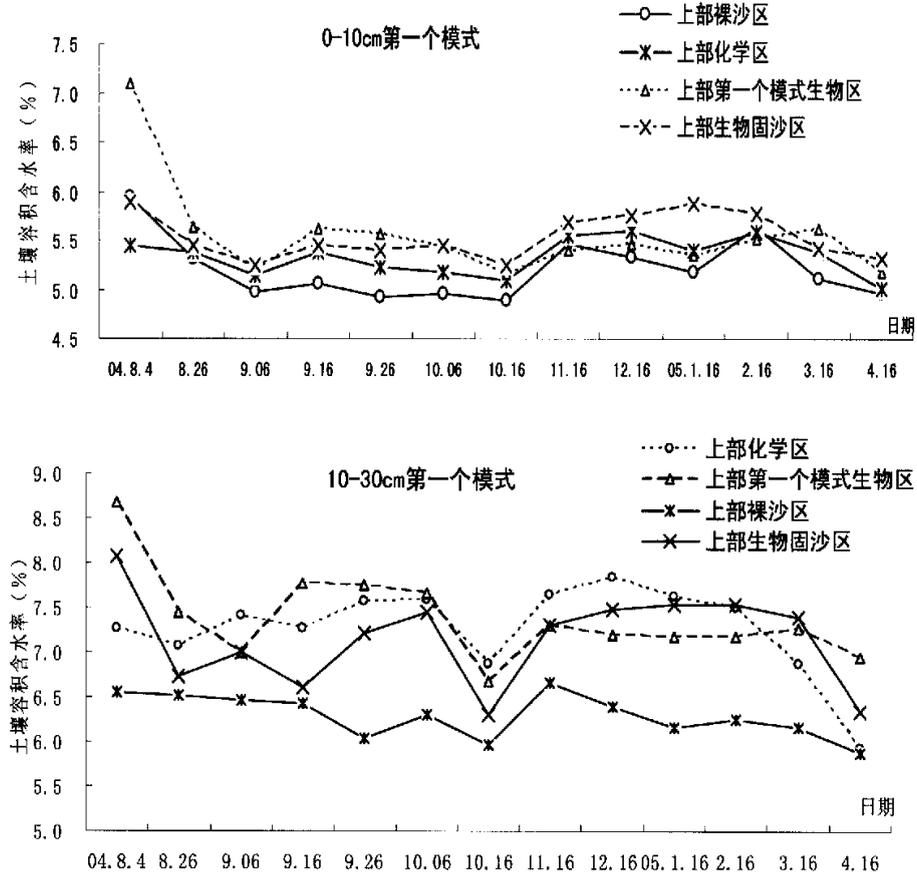
从图4.30-10cm第一个模式图可以看出,在2004年8月至2004年9月几个时间点几种处理模式中,第一个模式生物区土壤含水量最高,土壤水分为第一个模式生物区>生物固沙区>化学固沙化学区>对照裸沙区,而经过秋季尤其是10月的大风季节后,第一个模式生物区的土壤含水量下降,生物固沙区的为最高,土壤水分为生物固沙区>化学固沙化学区>生物固沙区>对照裸沙区。

3)10-30cm土层为土壤水分的剧增层,此层次受降雨的影响十分显著,根据前面分析的结果30cm处为0-80cm土层中土壤水分含量的最高点,表明,在此地区的流动沙丘一般降雨影响深度为30cm。

从图4.310-30cm第一个模式图可以看出,其整个时间序列上,变化趋势与0-10cm相同,不同之处为在2004年10月16日至2005年3月16日,化学固沙区化学区的土壤水分高于生物固沙区;其后,由于春季4月的大风,沙丘丘顶化学固沙区风蚀严重,其化学区的土壤

水分迅速降低。

4) 30-40cm 土层为土壤水分的骤减层, 其土壤水分含量较低, 从图 4.330-40cm 第一个模式图可以看出其在时间序列上表现了与土壤表层不同的规律, 前期为化学固沙区化学区的土壤水较高, 至 2005.2.16 骤然下降, 低于对照裸沙区。



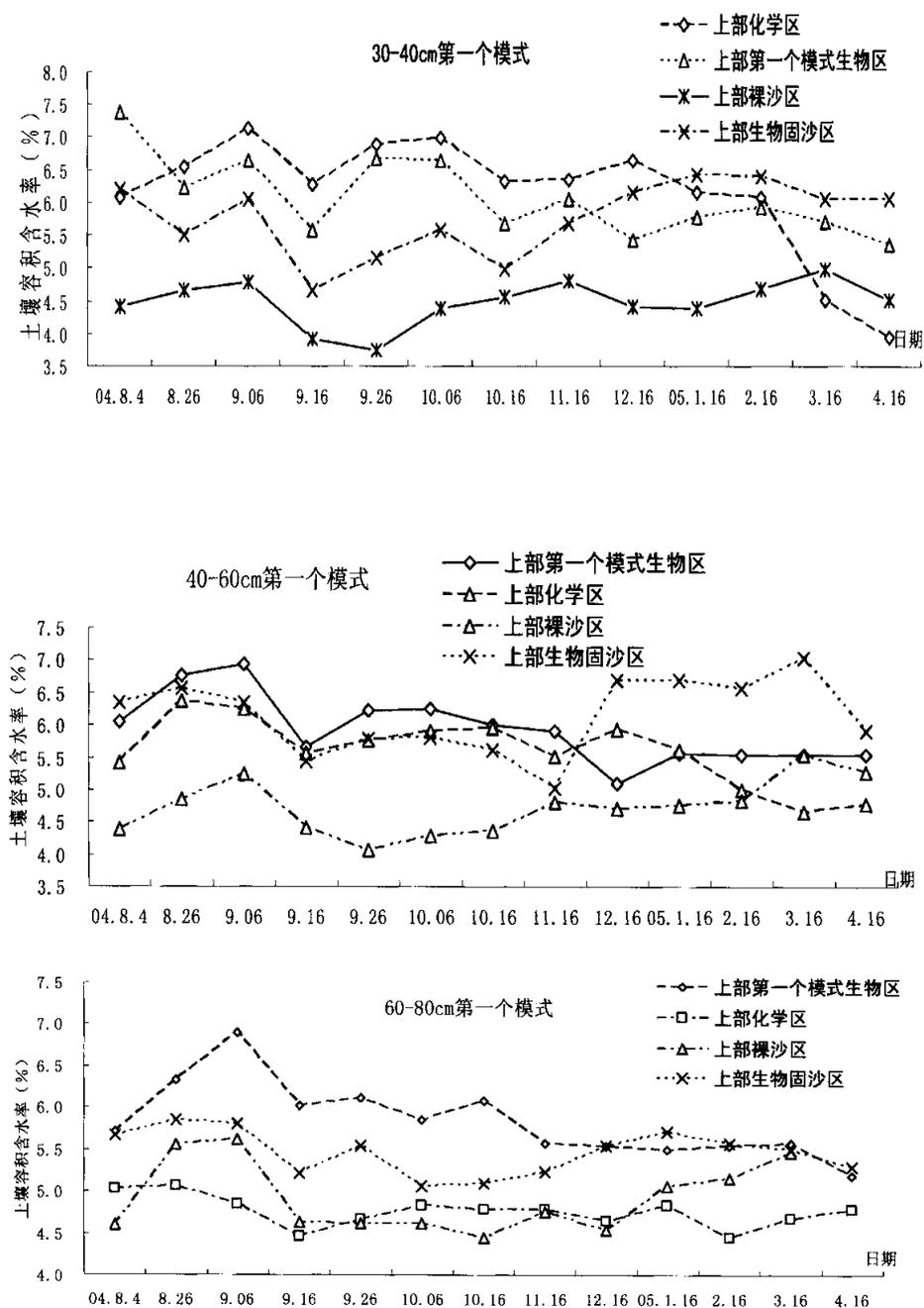


图 4.3 不同层次沙丘顶部第一个模式生物区与其他处理比较

Fig4.3 Different soil levels comparison of the first model plant district with other disposes on top dune

5)40-60cm 土壤水分含量有增加趋势, 但是比较缓和, 从图 4.340-80cm 第一个模式可以看出, 两个不同的时间段, 2004.8.4 至 2004.11.16 化学固沙区化学区的土壤水分为最高, 其次

为生物固沙区，后期由于风蚀的影响，化学区的土壤水分含量大幅度降低。

6)不同层次之间进行比较得出，不同层次均表明，在降雨季节，化学固沙区的生物区土壤水分含量大于其化学区，且也大于生物固沙区的土壤水分，说明降雨季节化学区有效的改变了降水的径流，增加了相应的生物区的土壤水分含量；提高土壤水分含量的效果要好于单纯的草栅格生物固沙区。

7)不同层次化学区比较分析，表层 0-10cm 及 10-30cm 两层，在 2004 年 8 月 4 日至 2004 年 10 月 16 日，化学区土壤水分变化平缓，0-10cm 变异系数为 0.38%，10-30cm 变异系数为 0.94%，而其他处理变异系数较大，如第一个模式变异系数分别为 7.62%、5.31%，30cm 以下化学区土壤含水量变化较激烈，30-40cm 化学区的变异系数为 2.69%。

4.3 沙丘中部不同处理土壤水分含量比较分析

沙丘中部不同处理的土壤水分比较分析与上部六种不同模式分析相同，分析数据为 2004 年 8 月至 2005 年 8 月一年的数据，在植被生长期 5 月至 9 月每 10 天测一次，在植被非生长期每 1 个月测一次。分析比较了几个不同层次上不同模式及不同处理之间的差异，以选出土壤水分含量高，防风固沙效果较好的模式。

4.3.1 沙丘中部不同层次化学固沙区不同模式生物区之间比较

本部分分析了 0-80cm 不同土层六种不同模式生物区土壤水分含量在时间序列上的变化规律如图 4.5 所示，及相同层次不同模式的比较。

由图 4.5 可以看出，六种不同模式在同一土层在时间序列上的变化规律一致，不同层次之间不尽相同，0-10 与 10-30cm 表层土壤水分六种模式时序变化规律一致，2004 年 8 月至 2005 年 4 月，无降雨过程，所以变化比较平缓，无明显的波峰与波谷，此时间各个模式的土壤水分含量呈下降趋势。2005 年 5 月至 2005 年 8 月，由于降雨的影响，六种模式变化均比较剧烈，在 2005 年 6 月 16 日及 2005 年 7 月 16 日出现了两个显著的波峰，而在 2005 年 5 月 16 日出现了一个波谷。

0-10cm 受外界因素干扰较大，受降雨影响变化剧烈。图 4.5 0-10cm 层次上不同模式比较可知，在整个时间序列上，六种不同模式生物区的土壤水分变化规律不一致。2004 年 8 月 4 日时间点上，第六个模式土壤水分含量最高，在此时间前几天有过降雨，表明第六个模式在降雨后土壤水分增加较大，2004 年 8 月至 2005 年 10 月水分呈下降趋势，第六种模式的土壤水分含量稍高于其他模式。2004 年 8 月至 2005 年 4 月此期间降雨较少，各个模式变化比较平缓。在 2005 年 4 月以后降雨季节六种模式变化规律一致，受降雨的影响，出现波峰和波谷，与降雨的季节变化分布一致。其中第二种模式在降雨期 5 月及 7 月出现了最高值，高于其他模式。但在整个时间序列上，及无降雨及大风季节里，第六个模式要好于其他模式。

10-30cm 层次上，在整个时间序列上，第六个模式均高于其他模式，第五个模式最低，其各个模式的整体变化规律与表层 0-10cm 相近。

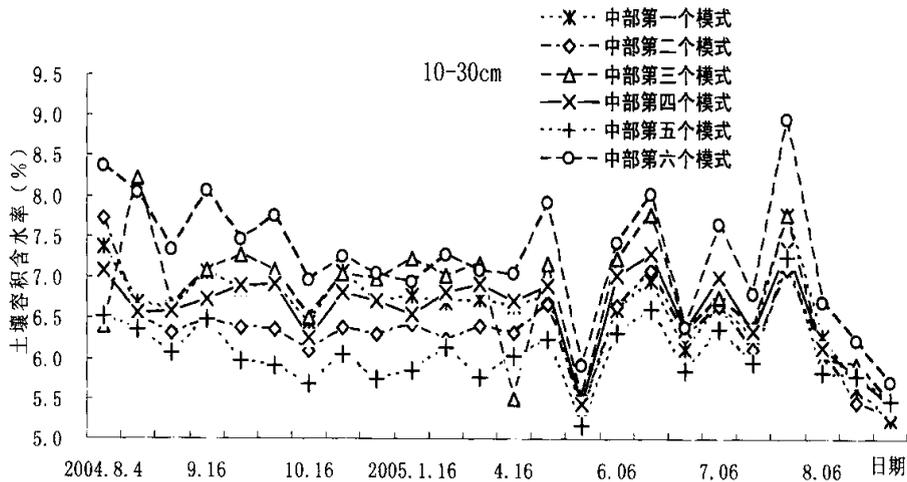
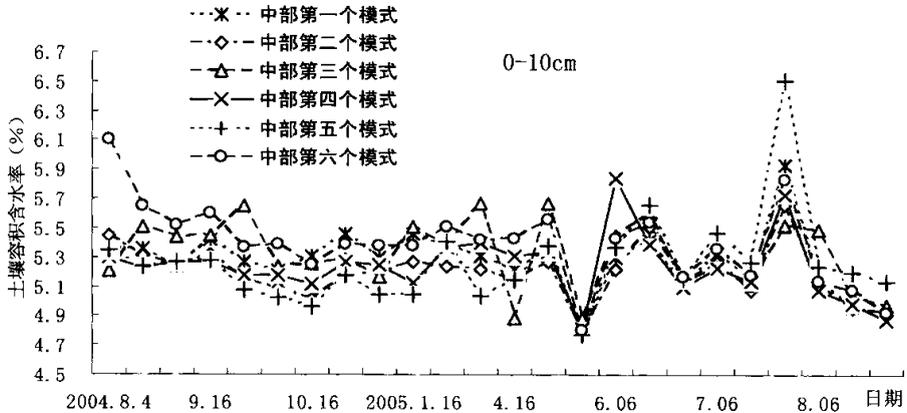
深层 30-40cm 及 40-60cm 两个土壤层次，各个模式在整个时间序列上的变化规律一致，在 2005 年 4 月以前第三个模式在两个层次上土壤水分含量较高，而之后受降雨及植被生长消耗

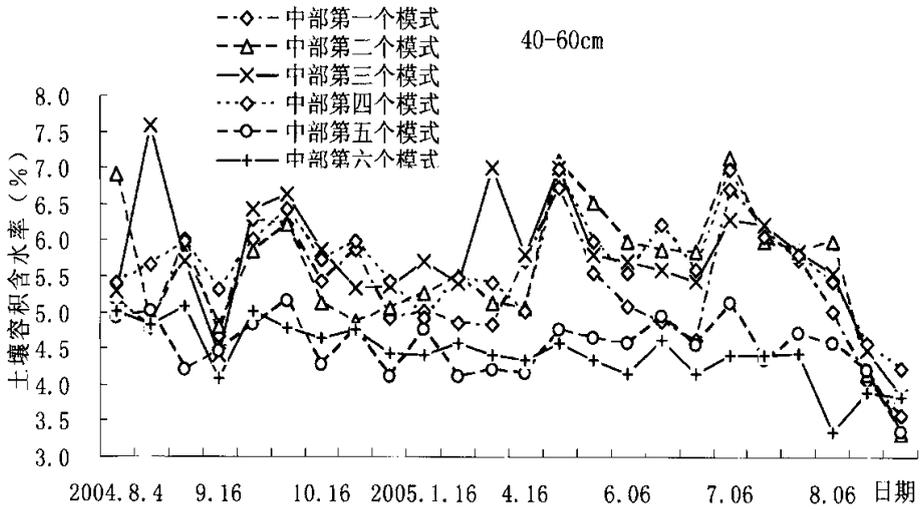
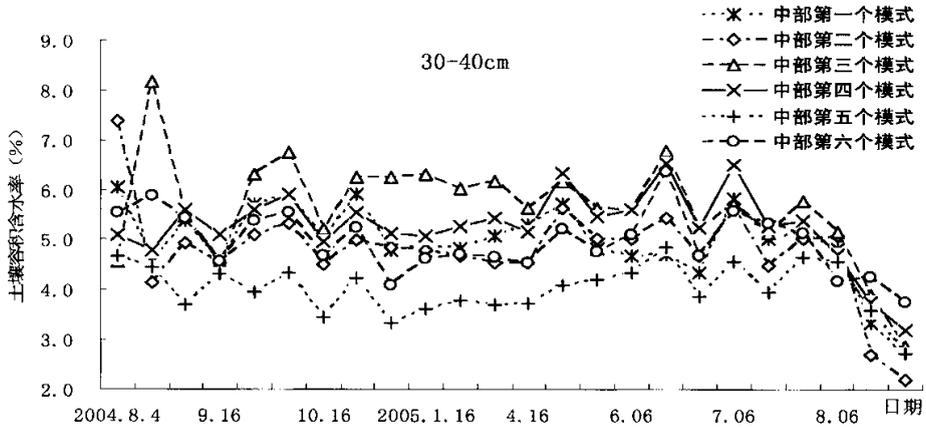
的双重影响，表现出较大的波动性。30-40cm 土层上，第五个模式水分含量最低，第三个模式在 2004 年 8 月至 2005 年 4 月期间，第三个模式水分含量较高，各种不同模式在 2005 年 6 月之后下降趋势明显。

60-80cm 层次上，各种不同模式变化一致，且与 30-40cm 及 40-60cm 两个层次变化趋势一致，受降雨及植被生长消耗的双重影响，其在整个时间序列上波动性很大。不同模式比较，在 60-80cm 层次，第四个模式土壤水分含量较高，而第六个模式水分含量最低。

深层次上第六个模式土壤水分含量较其他模式较低，且在 60-80cm 层次上，第六个模式在整个时间序列上变化比较平缓，表明在第六个模式表层水分较高，深层水分较少，且降雨及补充的水分下渗至 30cm，对第六个模式的深层水分无显著影响。

综上所述可得，沙丘中部化学固沙区六种不同模式，表层 0-30cm 第六个模式水分含量较高，而 30-80cm 深层次上，第四个模式水分含量较高。





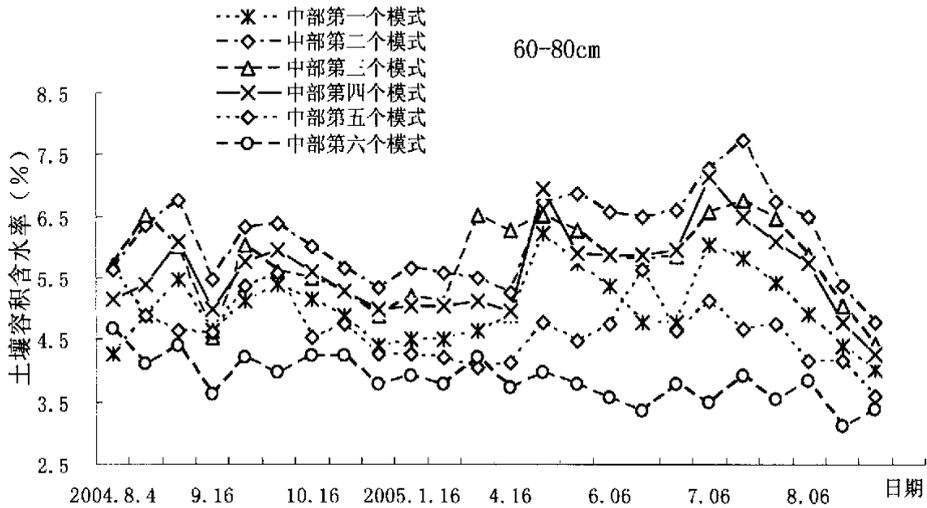


图 4.5 沙丘中部不同层次六种不同模式生物区比较

Fig.4.5 Different soil levels comparison of the six models plant district on middle dune

4.3.2 沙丘中部化学固沙区生物区与化学区、裸沙区、生物固沙区比较分析

在 2004 年 8 月至 2005 年 8 月时间段上,分析 0-80cm 不同层次化学固沙区六种不同的模式生物区与相应的化学区、生物固沙区及对照裸沙区的土壤水分含量,比较其不同处理及不同模式的固沙效果。本部分仅以六种模式中在表层水分含量最优的第六个模式为例,加以说明及分析。

化学固沙区第六个模式在 2004 年 8 月至 2005 年 8 月一年的时间序列上,在 0-10cm、10-30cm、30-40cm 及 40-60cm、60-80cm 五个不同的层次上土壤水分含量与对照裸沙区、生物固沙区及不同模式进行比较,结果如图 4.6 所示。

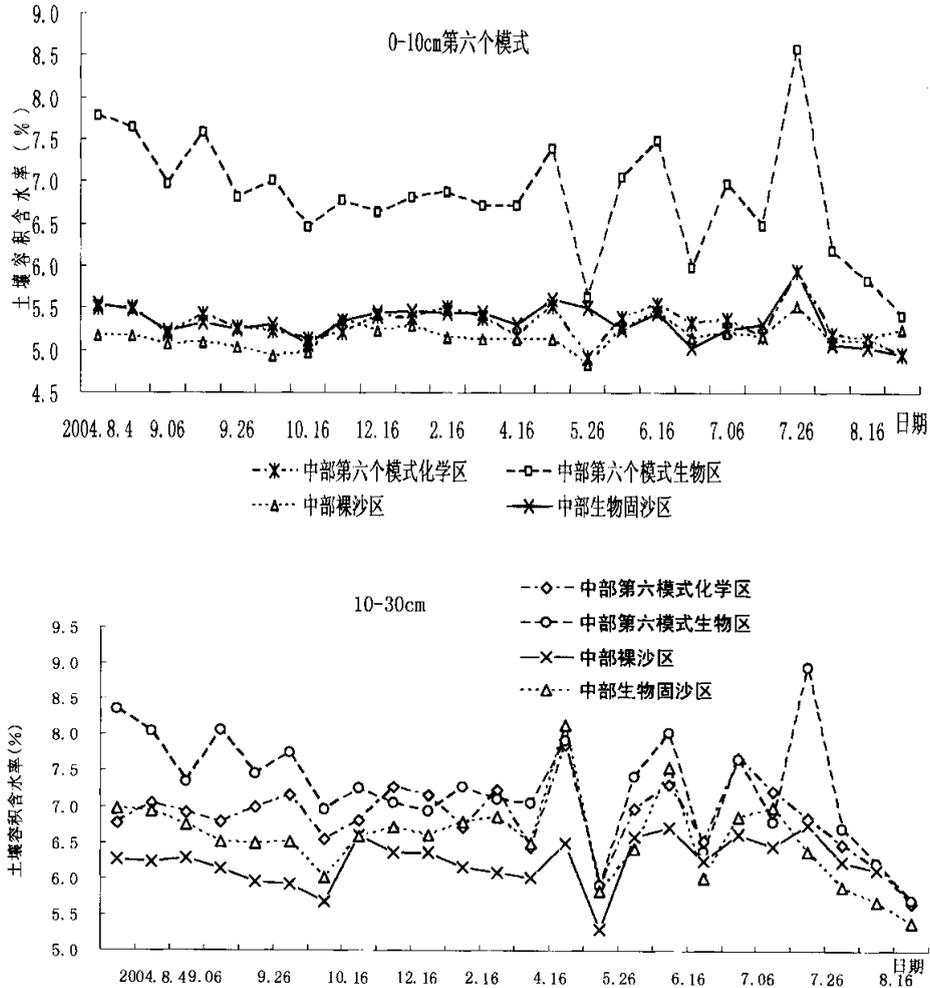
表层 0-10cm,中部第六个模式化学固沙区生物区土壤水分含量显著高于化学固沙区化学区,2004 年 8 月至 2005 年 4 月,变化比较平缓,无大的波峰与波谷出现,此时期为非降雨季节,故土壤水分变化不剧烈;2005 年 5 月至 2005 年 8 月,此期间为降雨降雨,化学固沙区生物区土壤水分出现大的波动,而生物固沙区有较小的,裸沙区与化学区波动比较平缓,证明化学区对降雨的截流补充了生物区的土壤水分。

10-30cm,在整个时间序列上,化学固沙区化学区土壤水分含量高于其他处理及其他模式,其次是化学固沙区的化学区,裸沙区的土壤水分含量最低,但在 2005 年 7 月 16 日至 2005 年 8 月 26 日,各个处理的土壤水分明显下降,其中,生物固沙区的土壤水分含量低于裸沙区。

30-40cm,各个处理变化较剧烈,在 2004 年 8 月 4 日与 2004 年 8 月 26 日,此期间为降雨季节,化学区、生物区、生物固沙区与裸沙对照区都为增长趋势,其中化学固沙生物区化学固沙生物区>生物区>裸沙对照区,表明此期降雨期间,化学固沙区化学区对降雨的截流有效的补充了生物区的水分含量;2004 年 11 月至 2005 年 4 月为多风季节,易发生风蚀,此

期间化学固沙区化学区水分最高。深层 40-60cm 与 60-80cm 化学固沙区化学区变化比较平缓，在 2004 年 8 月至 2005 年 4 月期间生物固沙区土壤水分最高，4 月至 8 月为裸沙区为最

综上所述分析图 4.6 沙丘中部不同层次不同处理土壤水分含量的比较得出，化学固沙区化学区与生物区在表层 0-30cm 高于生物固沙区，高于裸沙区，在降雨季节化学固沙区化学区有效的改变了降雨的径流，增加了生物区的水分含量；在风蚀季节，化学固沙区化学区的水分高于生物固沙区及其他处理，说明化学固沙区在固沙减少沙丘方面优于生物固沙。深层土层中，化学固沙区化学区水分较低。



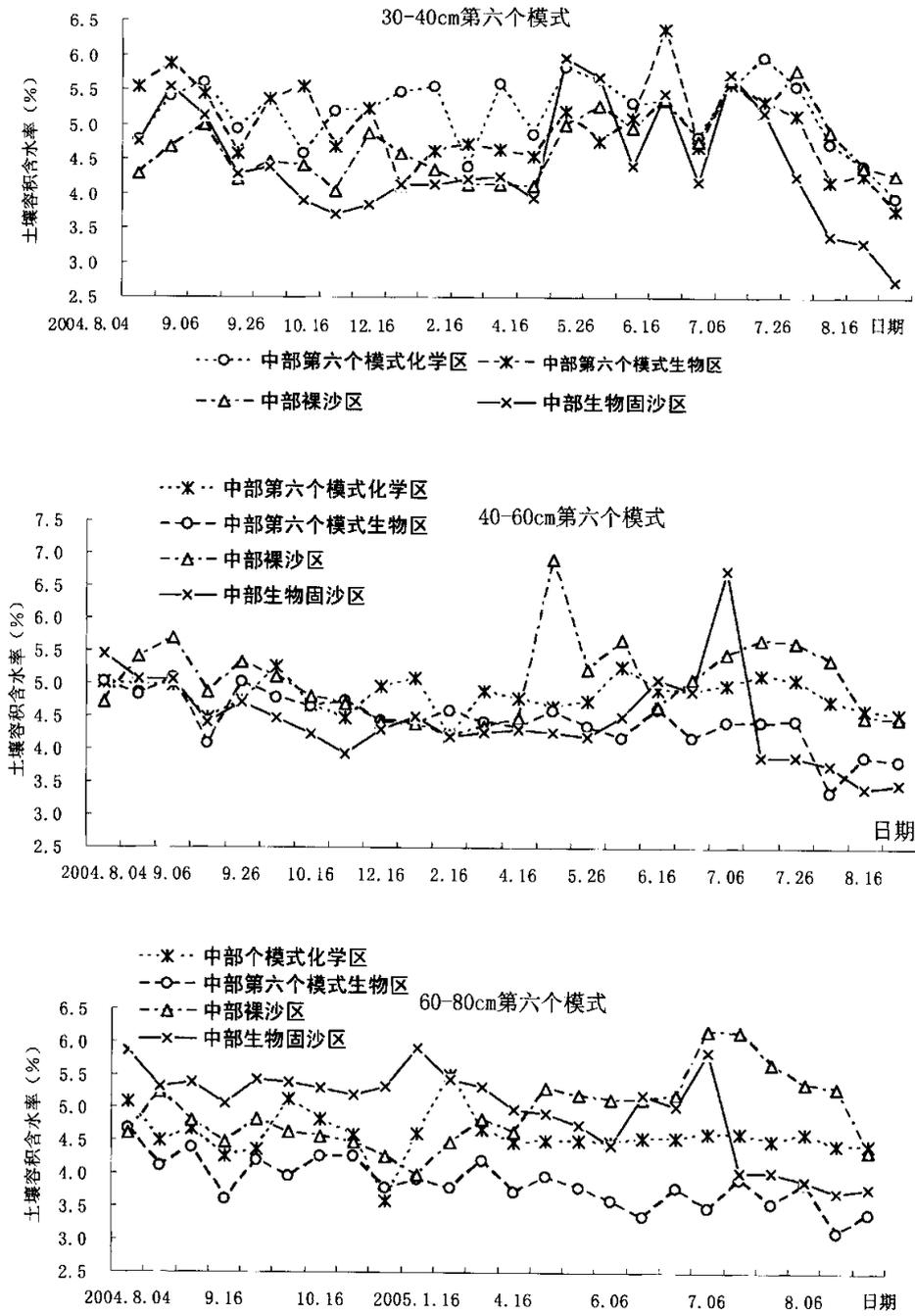


图 4.6 不同层次沙丘中部第六个模式生物区与其他处理比较
Fig4.6 Different soil levels comparison of the sixth model plant district with other disposes on middel dune

4.4 结论

1) 流动沙丘的土壤含水量主要受降雨季节的影响,其季节变化特点主要由降水的季节分布引起的,因此土壤含水量较高均出现在降水较多的7、8月份。

2) 流动沙丘沙土的渗透性强烈,保水保肥能力较差,故降雨对表层土壤水分影响时间效应很短。根据流动沙丘的土壤水分含量的垂直深度变化,可将土层分为分为0-30cm土壤水分剧烈增加层,30-40cm土壤水分骤减层,40-80cm土壤水分平缓层,80cm以下是深部水分稳定层,20-30cm为土壤水分含量最高层,深层土壤含水量明显下降。

3) 经过处理的流动沙丘土壤水分明显高于未处理,即本试验中土壤水分含量化学固沙区生物区与化学区及单纯的生物固沙区的土壤水分含量明显高于对照裸沙区。

4) 分析比较不同处理的土壤水分含量,在沙丘不同部位最优模式不同,不同土层深度最优模式亦不同。在沙丘上部0-30cm土壤表层,化学固沙区的不同模式中第一个模式(化学固沙化学固沙带宽为最大8m)的模式,土壤水分含量最高,而在30-80cm土层深度,为第四个模式(化学固沙化学固沙带宽为6m)的土壤水分含量最高;在沙丘中部0-30cm表层,化学固沙区的不同模式中为表层0-30cm为第六个模式(化学固沙区化学固沙带宽为2m)的土壤水分含量最高,而深层30-80cm为第四个模式(化学固沙区化学固沙带宽为6m)的土壤水分含量最高。因此,在实际运用中,沙丘不同部位应采取不同的固沙模式。

5) 沙丘底部为沙丘丘间地,在降雨季节积水,故地下水位较高,土壤水分在表层20-30cm处已达到饱和含水量,故此次分析中没有分析沙丘底部土壤水分。

第五章 土壤水分动态模拟预测模型

目前国内外治理沙化方面取得很多宝贵的经验,并且有很多成功模式,但是其长期效益低,在固沙后期出现了不稳定现象,归其原因是土壤水分含量较低,无法满足植被生长的需要,致使植被提早衰退。

在干旱半干旱地区,水分是影响环境变异的最重要因子。土壤水分的含量对植被的生长而言是最大的限制因子,且影响到遏制沙漠化及沙化土地植被恢复的最重要因素;因此,土壤水分运移及长期预测预报研究是固沙的重要依据,利用前期土壤水分含量数据预测后期土壤水分含量,及早发现土壤水分亏缺现象以采取措施补救,对沙化土地恢复的长期工作有重要的指导作用。本章节利用固沙初期化学固沙区植被区的一年的土壤水分含量数据,利用时间序列及神经网络不同模型对化学固沙区中部第六个模式的植被区土壤水分进行动态模拟,对其未来一段时间的土壤水分含量进行预测,并对不同模型方法进行比较分析,探讨模拟土壤水分较好的模型,以选出预测效果相对较好的模型。

5.1 时间序列模型

土壤水分含量受气候条件的影响,具有较大的随机性。时间序列分析主要是采用参数模型对所观测到的有序的随机数据进行分析与处理的一种方法,它所建立的模型是随机模型。目前,时间序列分析的方法主要应用在医学、金融及各种工程应用的领域。在土壤水分动态模拟方面,在北方气候条件下康绍忠对较厚土层用提取周期趋势的方法作了土壤水分动态的随机模拟研究,取得了一定的效果。

时间序列是指按时间顺序排列的一组数据,或一组有序列的随机数据。时间序列方法将所观测到的时序作为系统的一维或多维输出,将模型所描述的等价系统视为在与输出同维白噪声驱动下产生这一输出的系统。

研究时间序列的一个重要目的是预测。现实当中事物的发展都是有连续性的,事物过去的表现与现在的状态有关,现在的状态又与将来的可能表现有一定的联系。因此,可以从现有的数据入手通过构造某种计算方法实现对未来的预测。基于这种思想可以构造出丰富多彩的预测模型。

5.1.1 指数平滑模型

指数平滑法的基本思想是用序列过去值的加权平均数来预测未来的值,且通过权数的大小体现事物发展中不同时期与现实联系的紧密程度。其通过对权数的改进,使其在处理时简单易行,因而在实际中应用较为广泛,可带来较为理想的短期预测精度。

指数平滑法因权数选择和平滑方法的不同而分成多种模型形式,虽然不同的模型形式的基本思想一致,但是在具体实现上还有所差别,也有不同的适用场合。

本文根据所得试验数据的的时序、趋势、季节性等特点,对不同指数平滑模型方法进行比较分析,结果表明二次平滑法模型预测效果较好,最终选定二次指数平滑模型。

二次指数平滑也称双重指数平滑,是对一次指数平滑值再进行一次平滑。一次指数平滑

是直接利用平滑值作为预测值,而二次指数平滑则是利用平滑值对时间序列的线性趋势进行修正,进而建立线性平滑模型进行预测。

霍特双参数指数平滑是分别对原序列数据和序列的趋势进行平滑,模型的一般形式为:

$$f_{t+m} = S_t + b_t m \tag{5}$$

其中, S_t 和 b_t 是模型的两个参数,分别为数据的平滑值和趋势的平滑值,是相邻两个平滑值之差,而 γ 为模型初始参数。公式为:

$$S_t = \alpha y_t + (1-\alpha)(S_{t-1} + b_{t-1}) \tag{6}$$

$$b_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1} \tag{7}$$

本研究使用 SPSS11.5 建立指数平滑模型,建模过程包括:数据整理、建立模型、模型预测,模型检验。

土壤水分含量数据为沙丘中部化学+生物固沙区表层最优的第六个模式生物区,时间从 2004 年 8 月至 2006 年 3 月,取月平均值,采用中子水分仪测定,土层为 0-30m 表层的数据取平均进行模拟及预测。首先对原始数据取自然对数,使其平稳化。对平滑参数的选择采用格点(Grid Search)方法,以找出相对最优模型;对于初始值选择自动选择(Automatic)。

取 2004 年 8 月至 2005 年 10 月土壤水分含量数据建立模型,对剩余数据进行模型预测,误差分析结果见表 5.1,从图 5.1 土壤水分趋势拟合及预测结果可以看出,模型所得结果与实测值的拟合效果较好,从表中可以看出,指数平滑模型拟合的效果较好,其拟合值较接近于实测值;预测效果较好,除 3-2 的预测值与实测值相对误差较大为 12.5776%外,其余的预测值均较接近于实测值,模型效果较好。从模型可以看出,当月的土壤含水量仅与前两个月土壤含水量有关,其影响明显,这由于沙土本身的通透性强,较强的渗透性有关。

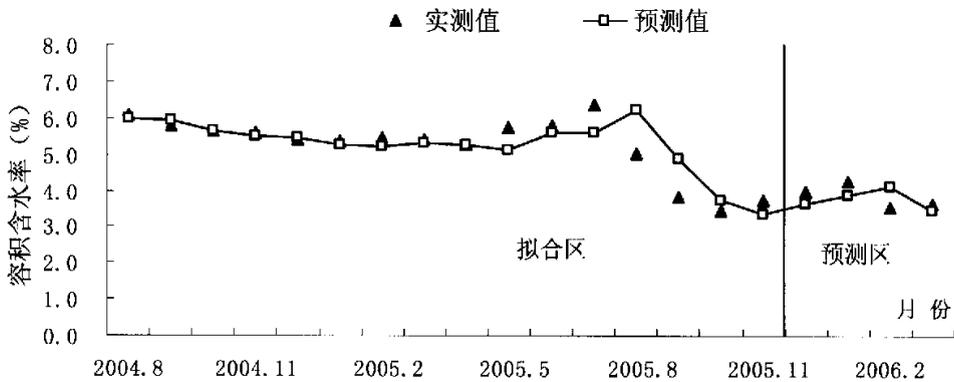


图 5.1 指数平滑法土壤水分趋势拟合及预测结果
Fig 5.1 The fitting and forecasting of the Exponential smoothing mode

表 5.1 土壤水分趋势预测结果误差分析
Table 5.1 The forecasting error analysis of the mode

月份	实测值 (%)	计算值 (%)	绝对误差 (%)	相对误差 (%)
1-8	6.0858	5.9660	-0.1198	-1.9685
1-9	5.7945	5.8848	0.0903	1.5584
1-10	5.6415	5.4548	-0.1867	-3.3101
1-11	5.5916	5.4012	-0.1904	-3.4052
1-12	5.4053	5.4089	0.0036	0.0667
2-1	5.3436	5.2113	-0.1323	-2.4752
2-2	5.4381	5.2196	-0.2185	-4.0177
2-3	5.3938	5.3576	-0.0362	-0.6709
2-4	5.2842	5.2644	-0.0198	-0.3738
2-5	5.7458	5.1547	-0.5911	-10.2874
2-6	5.7765	5.7455	-0.0310	-0.5365
2-7	6.3749	5.5812	-0.7937	-12.4503
2-8	5.0150	6.2721	1.2571	25.0663
2-9	3.8356	4.4119	0.5763	15.0255
2-10	3.4668	3.6145	0.1477	4.2595
2-11*	3.7287	3.6926	-0.0361	-0.9692
2-12*	3.9907	4.1609	0.1702	4.2649
3-1*	4.2526	4.5499	0.2973	6.9921
3-2*	3.5338	3.5903	0.0565	1.6001
3-3*	3.6205	4.0045	0.3840	10.6056

注：*表明为指数平滑模型预测值

5.1.2 自回归模型

在土壤水分动态模拟预测研究中，很多研究者采用自回归（AR）模型对土壤水分进行了动态模拟预测，其模拟精度较高，其预测效果较好，证明了使用 AR 模型进行土壤水分动态模拟预测的可行性，且其预测效果较好。本部分利用时间序列的 AR 模型进行了土壤水分的模拟预测。

设由等时段（或等间隔）的 n 个样本组成的平稳、正态、零均值时间序列 $x_t (t=1, 2, \dots, n)$ ，当 $k > p$ 时，若其偏相关函数 $\phi_k, k \approx 0$ ，则序列 x_t 符合自回归模型（Auto regression）

$$\phi(B)x_t = a_t \quad (8)$$

或

$$x_t - \phi_1 x_{t-1} - \phi_2 x_{t-2} - \dots - \phi_p x_{t-p} = a_t \quad (9)$$

式中 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ 为自回归系数， a_t 为残差。

AR 模型描述了变量 x 在 t 时刻的值与在 $t-1, t-2, t-3, \dots, t-p$ 时刻的值之间的统计关系，自回归系数直观的反映了变量 x 在 t 时刻的值与在 $t-1, t-2, t-3, \dots, t-p$ 时刻的值之间的依赖权重。

AR 模型的参数估计的前提是所获取的时间序列是平稳、正态分布的序列。对于不平稳、带有某些趋势的时间序列不能直接采用 AR 建模方法, 必须经过适当的变换去除其中的趋势变化, 获得平稳时间序列, 然后进行建模。

时间 AR 模型的参数估计, 就是选择合适的参数使得模型的残差 a_t 为白噪声。常用的有矩估计、极大似然估计、最小平方和估计及最小二乘估计等方法, 本研究采用最小二乘法估计模型参数。

本文使用残差的白噪声检验准则及 AIC 准则 (An Information Criterion) 进行 AR 模型的检验, AIC 准则又称为信息准则, 其计算公式为

$$AIC(p) = N \ln \sigma_a^2 + 2p \quad (10)$$

式中 p 为模型阶次, N 是时序 $\{x_t\}$ 的长度, 当 $\{x_t\}$ 是平稳、正态的时间序列时

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \alpha_t^2 \quad (11)$$

式中 N 为数据个数, α_t 为残差。参数估计是在给定阶次的情况下进行的, 由于事先无法判断模型的阶次, 因此在建模过程中先给定模型的阶次, 然后按照最小二乘法估计出 AR 模型的参数, 得到各阶模型, 最后取 AIC 值最小且同时标准误差最小的最优阶次, 且同时确定了 AR 模型。

本研究采用 SPSS11.5 建立 AR 模型。建模过程包括: 数据整理、建立模型、模型评价、模型预测。

土壤水分含量数据为化学+生物固沙取生物区, 时间从 2004 年 8 月至 2006 年 3 月, 取月平均值, 采用中子水分仪测定, 土层为 0-150cm 的数据取平均进行模拟及预测。首先对原始数据取进行标准化处理, 标准化公式

$$y_t = \frac{x_t - \mu}{v} \quad (12)$$

式中 x_t 为原始序列, μ 是时序列 $\{x_t\}$ 的均值, v 是时序 $\{x_t\}$ 方差。

首先建立 $\{y_t\}$ 的 AR 模型, 根据模型求出预测值, 然后再根据公式反变换求出序列 $\{x_t\}$, 将 $\{x_t\}$ 与实测值 $\{x_t\}$ 进行比较, 对模型预测结果进行评价, 检验模型预测效果。

取 2004 年 8 月至 2005 年 10 月土壤水分含量数据建立 AR 模型, 获取模型参数, 对剩余数据进行模型预测评价。

用最小二乘法估计 AR 模型的不同阶次, 选取相应的 AIC 值及标准差均最小的, 结果见表 5.2

表 5.2 模型阶次及其对应的 AIC 值及标准差

Table 5.2 AIC and standard error of the modes

阶次	AR (1)	AR (2)	AR (3)	AR (4)
AIC	30.97	29.80	31.84	33.63
标准差	0.56	0.53	0.54	0.56

从表中可以看出, AR (2) 模型的 AIC 值最小, 同时其标准差值最小, 所以考虑使用 AR (2) 建立模型, 模型的参数估计及方差分析见表 5.3

表 5.3 AR(2) 模型的方差分析及参数估计结果

Tabel5.3 Variance analysis and parameters estimate of the mode AR(2)

	B	SEB	T-RATIO	APPROX.PROB
AR1	1.1767569	0.22370437	5.2603213	0.00009603
AR2	-0.4343111	0.23456183	-1.8511583	0.0439

对剩余数据利用二阶自回归模型进行预测检验，经过相应的数据反变换得到土壤水分含量的趋势拟合、预测结果及 95% 的置信区间，如图 5.2 所示，从图中可以看出，二阶自回归模型的拟合及预测效果较好。

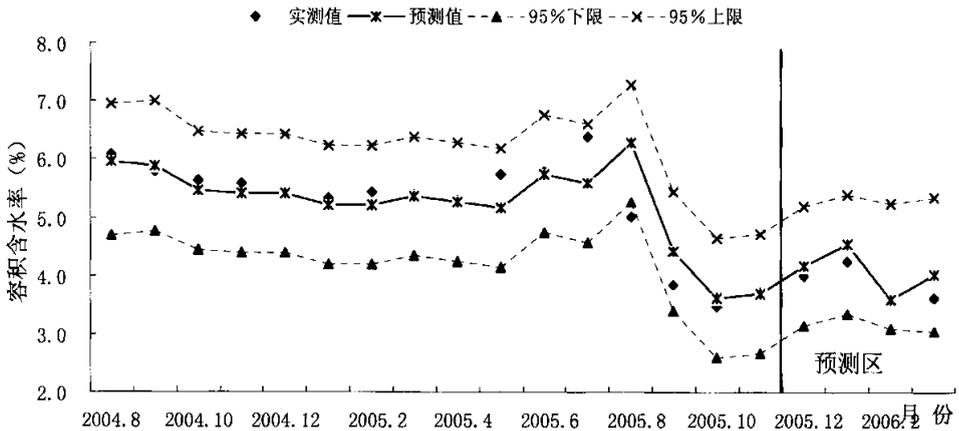


图 5.2 AR(2) 模型土壤水分趋势拟合及预测结果
Fig 5.2 The fitting and forecasting of AR(2) mode

本研究土壤水分含量的时间序列模型无论是二次指数平滑模型还是自回归模型分析得出，本试验区的土壤水分含量仅与前两个月水分含量强烈。同时证明指数平滑模型及自回归模型可以进行土壤水分动态的预测，且证明少量的且无季节性的土壤水分含量数据进行指数平滑及自回归模型建模预测效果较好。

5.2 BP 网络模型

土壤水分的预报研究，国内外已有很多。近年来人工神经网络（Artificial Neural Network，简称 ANN）中的 BP 网络（Back Propagation Network，反向传播算法）在相关工程领域得到了广泛的应用，同时在水科学中也有广泛应用。

进行时间序列预测的神经网络结构可分为两种，一种是单步预测网络，一种是多步预测网络。单步预测网络输出个数为 1 个，一次可计算一步的预测值。多步预测网络的输出个数为多个，每一次可计算出多步的预测值。在预测过程中，可将得到的预测值作为下一步预测的输入来计算出进一步的预测值，进行迭代的多步预测。

5.2.1 BP 网络概述

目前,在人工神经网络的实际应用中,绝大部分的神经网络模型是采用 BP 网络和它的变化形式,BP 神经网络是一种应用最为广泛的前向网络,是人工神经网络最精华的部分。BP 网络的模型为前向多层网络,由输入层、若干个隐含层及输出层组成,且每层都包含若干个神经元,同一层各神经元之间没有相互的连接,相邻层的神经元之间通过权连接。最基本及最常用的 BP 网络为三层的前馈网络,见图 5.3

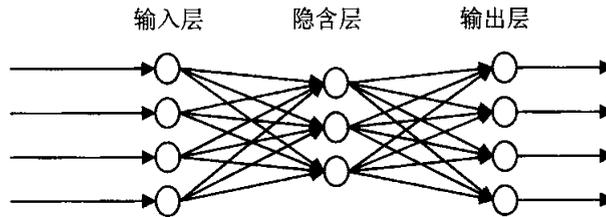


图 5.3 三层 BP 网络模型结构示意图

Fig5.3 Sketch of BP network structure

BP 算法实际上是前向式多层网络的实际输出与要求输出之间最小均方差的一种迭代梯度算法,即用网络的实际输出与目标之间的误差来修正其权值,使目标输出与目标期望值尽可能地接近,就是使网络输出地误差平方和达到最小。

BP 算法由两部分组成:即信息的正向传递和误差的反向传播。在正向传递过程中,输入信息从输入层经隐含层逐层计算传向输出层,每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果在输出层没有得到期望的输出,则计算输出层的误差变化值,然后转向反向传播,通过网络将误差信号沿原来的连接通路反向传播回来修改各层神经元的权值,直至达到期望目标。

5.2.2 BP 网络模型建立

很多研究者应用 BP 网络建立土壤水分模型,对土壤水分进行模拟预测,如范爱武等,以时间、土层为输入变量,土壤水分为输出变量建立了“2-3-1”的三层 BP 网络;周良臣等以平均气温、风速、日照、相对湿度、降雨量、蒸发量为输入变量,0-40cm 土层的平均土壤水分含量为输出变量,建立“6-8-1”的三层 BP 网络,等等,建立的模型对土壤水分的预测预报,精度较高,预测效果较好。

但是,前人建立模型输入变量多为土壤水分的影响因子,为时间序列上土壤水分与其影响因子的模型,对土壤水分的预报,需测定一直测定其影响因子的数值,并未减少工作量,本文仅以时间 t 为输入变量,以土壤水分含量 w 为输出变量,建立三层 BP 神经网络模型。

本研究根据网络训练情况和精度要求,比较得出隐含层神经元 $q=10$,最终确定网络结构 BP(1,10,1),输入层采用 tansig 函数,输出层为 purelin 函数。用 2004 年 8 月至 2005 年 10 月土壤水

分数据训练网络，利用训练后的网络对剩余数据进行土壤水分预测。

本研究采用 MATLAB 神经网络工具箱中的 `trainlm` 函数进行训练，设定误差指标为 0.001，经过 3888 次训练后，收敛误差达到设定标准，训练样本 $MSE=0.00093$ ，最终模型训练结果拟合及预测结果见图 5.4

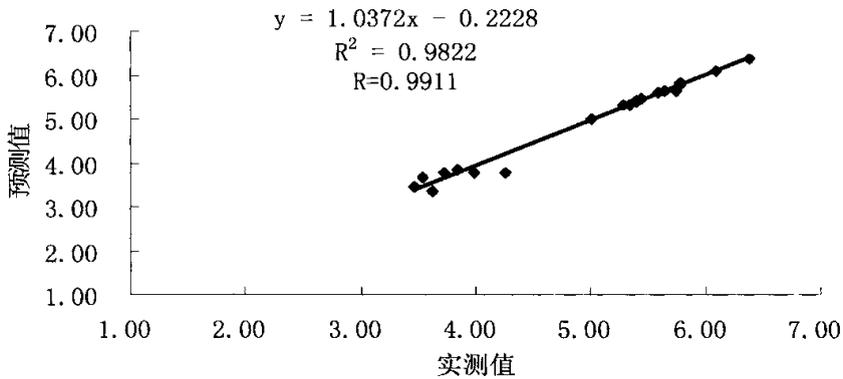


图 5.4 BP 网络土壤水分拟合及预测结果
Fig5.4 The fitting and forecasting of BP network mode

从图 5.4 可以看出，BP 网络土壤水分拟合及预测效果较好，拟合线的相关系数 $R=0.9911$ 。BP 网络模型拟合及预测结果与实测值对比见表 5.4。除 3-1 预测的误差较高（相对误差为 11.3954%）外，其他的误差均较好，模型预测精度较高，预报效果较好。

表 5.4 BP 网络模型拟合及预测结果与实测值对比

Fig 5.4 Contrast of the simulated values of BP network and the measured values

月份	实测值 (%)	计算值 (%)	绝对误差 (%)	相对误差 (%)
1-8	6.0858	6.0867	0.0009	0.0148
1-9	5.7945	5.7952	0.0007	0.0121
1-10	5.6415	5.6488	0.0073	0.1294
1-11	5.5916	5.5921	0.0005	0.0089
1-12	5.4053	5.4223	0.0170	0.3145
2-1	5.3436	5.3299	-0.0137	-0.2564
2-2	5.4381	5.4631	0.0250	0.4597
2-3	5.3938	5.3907	-0.0031	-0.0575
2-4	5.2842	5.3301	0.0459	0.8686
2-5	5.7458	5.6488	-0.0970	-1.6882
2-6	5.7765	5.8221	0.0456	0.7894
2-7	6.3749	6.3670	-0.0079	-0.1239
2-8	5.0150	5.0100	-0.0050	-0.0997
2-9	3.8356	3.8325	-0.0031	-0.0808
2-10	3.4668	3.4666	-0.0002	-0.0058
2-11*	3.7287	3.7785	0.0498	1.3356
2-12*	3.9907	3.7801	-0.2106	-5.2773
3-1*	4.2526	3.7680	-0.4846	-11.3954
3-2*	3.5338	3.6729	0.1391	3.9363
3-3*	3.6205	3.3504	-0.2701	-7.4603

注：*表明为 BP 网络模型预测值

5.3 不同模型方法比较分析

土壤水分运移建模及预测预报近年来一直是许多学者的研究热点，其中自回归模型及神经网络模型一直是运用较多的模型，如刘洪斌等就时间序列自回归模型及神经网络方法中径向基函数模型进行了比较得出，在数据量较多的情况下神经网络模型效果要好于自回归模型，而数据量较少的情况下自回归模型相对预测效果较好。

本文运用时间序列分析方法的指数平滑模型、自回归模型及神经网络 BP 网络模型分别建立模型，对土壤水分进行预测预报，预测预报精度均较高，三种方法模型拟合及预测比较结果见表

表 5.5 不同模型拟合及预测误差统计表

Fig5.5 Statistics of different modes fitting and forecasting

不同模型	绝对误差			相对误差			
	平均绝对误差	均方差	最大绝对误差	≤5%	≤10%	≤15%	≤20%
指数平滑模型	0.3348	0.2223	1.1942	55%	75%	85%	90%
AR 模型	0.2669	0.1672	1.2571	70%	75%	90%	95%
BP 网络模型	0.0714	0.0194	-0.4846	70%	95%	100%	100%

由表 5.5 可知,在对土壤水分预测预报中,使用 BP 网络模型可以获得比较精确的预测效果(平均绝对误差、均方差及相对误差均较低),与其他两种方法相比较效果明显较好。

本次研究中,对月平均土壤水分序列建立模型,数据量较少,但方法比较中,BP 神经网络模型效果精度较高于 AR 时间序列模型,其结论与刘洪斌的数据量较少情况下,AR 模型可以得到较好的预测效果的结论不同,探讨其原因可能是神经网络模型的使用方法不同,在函数逼近学习运算方法原理不同。本文使用 BP 网络学习算法,其在函数逼近时,权值的调整是用梯度下降法,而径向基函数是一种典型的局部逼近神经网络;另外可能是由于土壤水分的区域尺度问题,即土壤水分的区域之间的差异,及其在时间序列上的变化规律及变化趋势在不同区域之间不尽相同。

5.4 结论

(1) 运用指数平滑法对土壤水分进行建模预测时,几种方法比较得出,二次指数平滑(霍特双参数指数平滑)法效果最好,预测精度较好,其预测误差较低,但是后期预测土壤水分变化趋势有误差增大的趋势。

(2) 本文研究中,对月平均土壤水分序列建立 AR 模型时,所得到的 AR 模型的阶次为 2。因为根据 AIC 准则,所得到的 AR(2)的 AIC 值最小,且同时其标准差也为最小,所以使用 AR(2)建立土壤水分预测模型。

(3) 指数平滑及自回归模型均表明,本文月平均土壤水分含量,在时间序列上,当月土壤水分含量受前两个月的土壤水分含量影响显著,其它影响不显著;而本试验区土壤的土质为典型的风沙土,其土壤渗透性较强,保水持水能力较差,且本区域蒸发强烈,所以 AR(2)模型及二次指数平滑模型说明,通过采取化学固沙措施及生物固沙措施等有利的改善了土壤性质,一定程度上增加了土壤的保水持水能力。

(4) 前人曾以平均气温、风速、日照等土壤水分含量的影响因子为输入变量,土壤水分含量为输出变量建立了 BP 网络,每个地区的影响因子不同,且其影响因子较多,需要工作量较大,预测预报工作难度增加,其模型适应性较窄。本文尝试了仅以时间 t 为输入变量,以土壤水分含量为输出变量建立了 BP 网络模型,对土壤水分进行预测,预测效果较好,但是在数据量较少的情况下,其训练结果及函数逼近没有数据量大的情况下精度高。

(5) 三种不同模型方法进行比较分析,得出 BP 网络模型比指数平滑模型及自回归模型预测效果较好,模型计算值与实测值线性相关系数高达 0.9911,相对误差均小于 15%。

第六章 结论与讨论

6.1 研究结论

(一) 长期以来, 中子水分仪被广泛应用于长期定点监测土壤水分, 而对其流动沙丘上的应用及标定问题缺乏深入系统的研究, 本研究对中子水分仪在流动沙丘上测定土壤水分进行了尝试, 证明了其在流动沙丘上应用的可行性及可靠性。

(二) 中子水分仪的标定工作至关重要, 本研究对数据进行三点平滑及点聚图筛选处理, 综合利用多种标定方法, 将土壤层次分为浅层及深层分段标定, 浅层采用非线性标定, 深层再进行分层, 根据其每层的统计值及土壤特性合并为几条直线, 分别运用线性与非线性方程进行标定, 最深两层采用二项式回归, 此方法提高了标定方程的精度, 相对误差大大降低, 效果远远好于单纯使用一条标定直线。其标定方程达到高度相关 0.98 左右, 且相对误差较低, 在 5.0% 以下, 证明此方法具有一定的推广价值。

(三) 经过处理的流动沙丘的土壤水分明显高于未处理的, 即本试验中土壤水分含量化学固沙区生物区与化学区及草棚格生物固沙区的土壤水分含量明显高于对照裸沙区。

(四) 分析比较了不同处理的土壤水分含量, 整个流动沙丘上, 不同部位在沙丘上部 0-30cm 土壤表层, 化学固沙区的不同模式中第一个模式(化学固沙带宽为最大 8m, 种植植物为 1 行)的土壤水分含量最高, 而在 30-80cm 土层深度, 为第四个模式(化学固沙带宽为 6m)的土壤水分含量最高; 在沙丘中部 0-30cm 表层, 化学固沙区的不同模式中为表层 0-30cm 为第六个模式(化学固沙带宽为 2m)的土壤水分含量最高, 而深层 30-80cm 为第四个模式(化学固沙带宽为 6m)的土壤水分含量最高。

(五) 本文运用了指数平滑、自回归模型及 BP 神经网络方法对土壤水分进行时间序列分析, 并进行了动态模拟预测, 三种方法比较, BP 神经网络模型模拟预测效果最好, 预测精度较高, 肯定了前人就神经网络模型进行模拟土壤水分可行性及可靠性的结论。但是三种方法模型预测后期土壤水分误差都有增大趋势, 可能是数据量少, 建立模型精度有所欠缺。

(六) 本文研究中, 对月平均土壤水分序列建立 AR 模型时, 所得到的 AR 模型的阶次为 2。因为根据 AIC 准则, 所得到的 AR(2) 的 AIC 值最小, 且同时其标准差也为最小, 所以使用 AR(2) 建立土壤水分预测模型; 指数平滑模型为霍特双参数指数平滑模型, 两种模型均表明在时间序列上, 土壤含水量受前两个月影响显著, 而其他时期影响不显著; 根据本试验区土壤典型风沙土土壤渗透性较强, 且保水持水能力较差, 说明植被得恢复有利的改善了土壤性质, 一定程度上增加了土壤的保水持水能力。

(七) 前人曾以平均气温、风速、日照等土壤水分含量的影响因子为输入变量, 土壤水分含量为输出变量建立了 BP 网络, 因为每个地区的影响因子不同, 且其影响因子较多, 故此模型需要工作量较大, 预测预报工作难度增加, 适应性较窄。本文尝试了仅以时间 t 为输入变量, 以土壤水分含量为输出变量建立了 BP 网络模型, 对土壤水分进行预测, 预测效果较好, 但是在数据量较少的情况下, 其训练结果及函数逼近没有数据量大的情况下精度高。

6.2 讨论

土地的沙化每年造成不可计量的巨大损失；而沙化土地类型中，流动沙丘、固定沙丘及半固定沙丘占有很大的比例，其中流动沙丘面积最大。而其受风、降水等自然环境因素影响剧烈，固沙工作严峻。前人进行了很多的防风固沙工作研究，其中有很多成功的固沙模式，但是随着植被的生长及时间的推移，土壤水分供应不足，出现了植被的提早衰退现象，固沙模式的长期效益难以保证。土壤水分为植被生长的主要限制因子，同时成为固沙成功与否的主要制约因素，通过提高土壤水分含量，保证植被正常生长，对防风固沙工作尤为重要。本文利用固沙后一年的土壤水分数据，分析比较了固沙不同处理不同模式的土壤水分含量，在分析研究中发现仍有一些不足及需进一步讨论探讨的问题。

(一)中子水分仪的标定问题：土壤水分监测是进行土壤水分其他各方面分析的基础工作。中子水分仪是目前国内外测定土壤水分的常用技术，适于长期定点监测，鉴于其优点，本研究采用中子水分仪进行土壤水分的监测。但是准确的标定是使用中子水分仪中最为重要的一环，也是基础工作。本文综合前人很多的标定方法，进行中子水分仪的标定工作，得到误差较低，精度较高的标定方程，证实了中子水分仪在风沙土的应用可行性及可靠性，但是标定方法中分层较多，工作比较繁琐，且标定方程的实用性较窄；且表层土壤水分受外界因素影响比较强烈，标定方程精度不如深层高，且目前表层的标定方法较少。因此，探讨较为简捷且实用性较广的标定方程，以及精度较高的表层标定方法，是以后需要进一步研究的问题。

(二)流动沙丘的风蚀问题：经过处理的流动沙丘区域土壤水分含量高于未处理的，且化学固沙效果较好，固沙初期的土壤水分动态变化规律分析，化学固沙区中生物区及生物固沙的措施，处理后的区域土壤水分较裸沙对照区有明显的增加趋势，说明化学固沙及生物固沙对风沙土保水提高土壤水分量有一定的成效，但是风蚀现象仍然十分严重，其不同措施的长期固沙效益仍然无法保障。在以后的工作中，进一步加强防风固沙措施，及针对风蚀采取一定有效的措施，是需要进一步研究的问题。

(三)固沙的长期效益：前人的许多成功的固沙模式，前期均有很好的固沙效益，但是，随着时间的推移及植被的生长，由于土壤水分的亏缺，植被生长受到限制，其长期的生态效益很难得到保证，本试验的固沙模式，处理区域在增加土壤水分，固定流沙减少风蚀方面均有较好的效果，但是，其土壤水分有下降趋势，且风蚀现象仍有存在，因此，此固沙模式的长期效益有待于进一步考察研究。

参考文献

1. 张煜星, 荒漠化、沙漠化、风沙化和沙化概念之我见. 科技术语研究, 2000, 2(4): 22-23.
2. 全国荒漠化沙化土地知多少. 中国绿色时报, 2002, 1.
3. 国家林业局, 中国荒漠化和沙化状况公报. 中国绿色时报, 2005, 6.
4. 赵慧琴, 浅谈地下水与土地沙化的关系. 新疆地质, 2003, 12.
5. 王兴鹏, 张维江, 周丽娜, 风蚀沙化过渡地带沙地水分动态的研究进展, 农业科学研究, 2005, 26(1): 85-88.
6. 薛文辉, 谢晓丽, 21世纪中国沙化问题的思考与防沙治沙技术对策的探讨, 2005, 3(2): 73-74.
7. 金正道. 国外治沙技术, 国土绿化, 2002, 2.
8. 国家林业局科学技术司主编, 防沙治沙实用技术, 中国林业出版社.
9. 马履一, 国内外土壤水分研究现状与进展, 世界林业研究 1997, (5): 20-31.
10. 张超, 王会肖, 土壤水分研究进展及简要评述, 干旱地区农业研究, 2003, 12(4): 56-58.
11. 陆家驹, 张和平, 应用遥感技术连续监测地表土壤含水量, 水科学进展, 1997, 8(3): 281-287.
12. 高照阳, 张红梅, 常明勋, 等, 国内外土壤水分监测技术, 节水灌溉, 2004, 2: 102-106.
13. 时新玲, 王国栋, 土壤水分含水量测定方法研究进展, 中国农村水利水电, 2003, 10: 12-15.
14. 北京林学院主编, 土壤学(上), 中国林业出版社, 1982.
15. 庄季屏, 四十年来的中国土壤水分研究, 土壤学报, 1989, (3): 241-248.
16. 冯起, 高前兆, 沙地水分的研究进展, 中国沙漠, 1993, 13(2): 9-13.
17. 黄洪峰, 土壤-植物-大气, 北京: 气象出版社, 1997.
18. 张国胜, 徐围新, 董立新等, 青海省旱地土壤水分动态变化规律研究, 干旱区研究, 1996, 6(2): 19-22.
19. 赵松桥, 中国干旱区自然地理[M], 科学出版社, 1985.
20. 卢志光等, 应用遥感技术监测土壤湿度的研究(一), 遥感技术与应用, 1993, 2: 102-105.
21. 李新荣, 马风云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究, 中国沙漠, 2001, 21(3): 217-221.
22. 高照阳, 张红梅等, 国内外土壤水分监测技术, 节水灌溉, 2004, (2): 17-23.
23. 李保国, 农田土壤水的动态模型及应用[M], 北京: 科学出版社, 2000.
24. 冯起, 高前兆, 禹城沙地水分动态规律及其影响因子, 中国沙漠, 1995, 15(2): 151-157.
25. 冯起, 半湿润沙地水分状况及动态规律研究, 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 25-30.
26. 王新平, 张立平, 刘立超, 等, 干旱区沙区陆面蒸散量与土壤水分关系数值计算. 中国沙漠, 1996, 16(4): 388-391.
27. 伍维模, 吕双庆, 王冀平, 中子水分仪在棉田土壤上的标定研究, 干旱地区农业研究, 2002, 20(1): 84-87.
28. 郭洪飞, 熊运章. 中子法测定旱地土壤水分中标定方法的改进, 西北农业大学学报, 1991, 19(1): 39-42.
29. 张仁祖, 徐为根. 一种中子仪测定土壤湿度田间标定的新方法, 气象, 2003, 29(2): 26-28.
30. 简慰民, 周有芬, 杜筱玲, 等, 改善土壤浅层中子测湿精度的研究, 南京气象学院学

- 报,1997,20(1):80-84.
31. 康桂红,中子仪测定土壤湿度田间标定方法初探,气象,1996,22(10):42-43.
 32. 北京核子仪器公司,CNC503DR型中子水分仪使用说明书.
 33. 冯起.LAE-II型中子水分仪在半湿润沙地中的应用研究,核技术,1994,17(4):246-251.
 34. 胡顺军,田长彦,周宏飞.中子仪土壤墒情监测方法研究,干旱地区农业研究,2000,18(2):70-75.
 35. 李新荣,石庆辉,张景光,等,沙坡头地区人工植被演变过程中植物多样性的研究,中国沙漠,1998,18(增刊4):23-29.
 36. 赵兴梁.沙坡头地区植物固沙问题的探头[A],腾格里沙漠沙坡头地区流沙治理研究 2[C].银川:宁夏人民出版社,1991,27-57.
 37. 李新荣,张景光,王新平等.干旱沙漠区土壤微生物结皮及其对固沙植被的影响的研究,植物学报,2000,42(9):965-970.
 38. 张国盛,王林和,董智,等,毛乌素沙区风沙土机械组成及含水率的季节变化,中国沙漠,1999,19(2):145-150.
 39. 常兆丰,仲生年,韩福贵,降水在沙丘中的渗透过程研究,防护林科技,2002,12(4):5-8.
 40. 邱国玉,石庆辉,沙坡头人工固沙区沙地水分动态和植被演替[A],中国科学院沙坡头沙漠试验研究站年报[C],兰州:甘肃科学技术出版社,1993,120-127.
 41. 李新荣,马风云,等,沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究,中国沙漠,2001,21(3):217-222.
 42. 王兵,崔向慧,荒漠化地区土壤水分时空格局及其动态规律研究,林业科学研究,2002,19(1):27-31.
 43. 史绣华,张称意,沙柳林沙地水分动态研究,内蒙古林学院学报,1997,(1):16-21.
 44. 冯起,高前兆,禹城沙地水分动态规律及其影响因子,中国沙漠,1995,2:151-157.
 45. 冯起,程国程,我国沙地水分分布状况及其意义,土壤学报,1999,36(5):226-236.
 46. 蒋进,王雪琴,雷加强,古尔班通古特沙漠工程防护林体系内土壤水分变化规律,水土保持学报,2003,9(3):109-111.
 47. 巫东堂,焦晓燕,韩雄,旱地麦田土壤水分预测模型研究,土壤学报,1996,33(1):105-110.
 48. 刘发民,金燕,张小军,荒漠地区柽柳人工固沙林土壤水分动态研究,西北植物学报,2001,21(5):937-943.
 49. 安鸿志,时间序列分析[M],北京:科学出版社.
 50. 刘洪斌,王伟,魏朝富,等,A R模型在土壤水分动态模拟中的应用,山地学报,2004,1(1):121-125.
 51. 罗长寿,魏朝富,李瑞雪,时序模型在四川盆地土壤水分动态预报中的应用,西南农业大学学报,2002,10(5):464-466.
 52. 裴步祥,毛飞,吕厚全,我国北方春季土壤水分动态模拟预报模式的试验研究,北京农业大学学报,1990,16(增刊):116-122.
 53. 刘洪斌,王伟,魏朝富,基于神经网络的土壤水分预测建模研究,水土保持学报,2003,17(5):59-62.
 54. 闻新等, MATLAB神经网络仿真与应用[M],北京:科学出版社.
 55. 周良臣,康绍忠,贾云茂, BP神经网络方法在土壤墒情预测中的应用,干旱地区农业研究,

- 2005,23(5):98-102.
56. 范爱武, 刘伟, 龙妍, 基于 BP 网络的土壤水分预报研究, 华中科技大学学报(自然科学版), 2002,30(5):85-87.
 57. 刘洪斌, 王伟, 魏朝富, 等, 土壤水分预测神经网络模型和时间学列模型比较研究, 农业工程学报, 2003,19(4):33-36.
 58. 常兆丰, 仲生年, 韩富贵, 降水在沙丘中的渗透过程研究, 防护林科技, 2002,4:5-8.
 59. 周良臣, 土壤水分预测的 BP 神经网络方法及模型, 西北农业学报, 2004,13(4):130-133.
 60. 尚松浩, 土壤水分模拟与墒情预报模型研究进展, 沈阳农业大学学报, 2004,10,35(5-6):455-458.
 61. 李自珍, 黄子琛, 张利平, 治沙生态工程中植物固沙效益的综合评判, 兰州大学学报(社会科学版), 1997,25(4):40-47.
 62. 韩广, 张桂芳, 风成沙丘固定程度的定量分析, 生态学报, 2001,21(7):1057-1063.
 63. 李洪建, 王孟本, 柴宝峰, 晋西北人工林土壤水分特点与降水的关系研究, 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998,4(4):60-65.
 64. 李兴旺, 冯宝平, 基于 BP 神经网络神经网络土壤含水量预测, 水土保持学报, 2002,16(5):117-119.
 65. 康绍忠, 土壤水分动态的随机模拟研究, 土壤学报, 1990,27(1):17-24.
 66. 刘元波, 陈荷生等, 沙地降雨入渗水分动态, 中国沙漠学, 1995,15(1):143-150.
 67. 冯起, 高前兆, 沙地土壤水分动态模拟研究, 土壤通报, 1997, 50-51.
 68. 张继贤, 徐斌, 科尔沁草原南部不同类型沙丘水分研究, 中国沙漠, 1985,5(3):33-39.
 69. 陈有军, 董学军, 刘志茂, 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点—兼论老固定沙地上油蒿衰退原因, 植物生态学报, 2000,24(3):275-31
 70. Klute, A: Methods of soil analysis, Part I, Agronomy 9(1986).
 71. Panigrahi, B, Panda, Sudhindra N, field test of a soil water balance simulation model, Agricultural Water Management, 2003,58(3):223-241.
 72. Kustas W P, Norman J M, use of remote sensing for evapo-transpiration monitoring overland surfaces, Hydrological science, 1996,41(4):495-516.
 73. Zhang N, Fan G, Simultaneous Measurement of Soil Water Content and Salinity Using a Frequency-Response Method, Soil Science Society of America Journal, 2004,68(5):1515-1526.
 74. Blaine Hanson, Soil Moisture Instrument, Irrigation Journal, 1999,49(3):14-15.
 75. Daniel D Evans. Water in Desert Ecosystems[M], 1981.265-271.
 76. Qiu Guoyu, Shi Qinghui. The vegetation succession and soil water dynamics in Shapotou artificial sand-fixing vegetation area[A]. Annual Report of Shapotou Desert Research & Experiment Station, Chinese Academy of Sciences [C]. Lanzhou: Gansu Publishing House of Science & Technology, 1993,120-127.
 77. C.Valentin, J.M. dHerbes, Soil and water components of banded vegetation patterns, Catena 37(1999): 1-24
 78. Blaine Hanson, Soil Moisture Instruments, Irrigation Journal, 1999,49(3):14-15.
 79. Gardner W R, Kirkham D. Determination of soil moisture by neutron scattering, Soil Sci, 1952, 73:391-401.

80. W. Western ,R.B.Grayson , G.Bloschl et ,Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resources Research*,1999,35:797-810
81. RICHARDS J H,CALDWELL M M. Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentate* roots.*Oecologia*,1987,73:486-489.
82. Akinremi OO, McGinn SM, Barr AG. Simulation of moisture and other components of the hydrological cycle using a water budget approach,*Canadian Journal of Soil Science*,1996,76(2):133-142.
83. Elmalogou St, Malamos N. Simulation of soil moisture content of a prairie field with SWAP93, *Agricultural Water Management*, 2000,43:139-149.
84. Ghosh,RK:Estimation of soil moisture characteristics from mechanich properties of soils ,*Soil Science*,1980,130:60-63.
85. Proproato.Amilcare.Soil Water Balance and Ecosystem Response to Climate Change,*American Naturalist*,2004,164(5): 625-633.
86. R Murphy,GMLodge.Surface soil water dynamics in pastures in northen New South Wales.*Evapotranspiration,Auatralian Journal of Experimental Agriculture*,2004,44,571-583.

致 谢

光阴似箭，日月如梭，三年的研究生生活即将结束，回首这段已有人生经历中最重要的求学生涯，感慨最多的就是需要感谢太多的人，包括家人、老师、同学、朋友等，没有老师的指导，我不可能完成论文的写作；没用同学朋友的帮助，我不会快乐的度过三年的硕士时光；没有家人的呵护，没有我的今天。值此机会，向所有关心帮助我的人表示我最诚挚的谢意！

在三年的研究生期间，作者得到了导师徐斌研究员的悉心指导，徐老师治学严谨、学识渊博，为我营造了一种良好的学习研究氛围；而且徐老师严于律己、平易近人的人格和与人平等讨论问题的科研态度，更让我受益匪浅，让我不仅接受了全新的治学观念，领会掌握了基本的思想方式和研究方法，还明白了许多待人处事与为人处世的道理。除了学习知识科研方面作者在导师身上获益终身外，作者还深深感受了导师无微不至的人文关怀。为此，在此向我尊敬的导师徐斌研究员，致以最衷心的感谢和最诚挚的敬意！

第二要特别感谢的是师姐杨秀春博士后，杨师姐从论文的开提报告至论文的撰写过程中，不辞辛苦，谆谆教导，给予许多宝贵的意见和建议，对本人的帮助非常大！在此对杨师姐表示衷心的感谢！

论文的试验数据，均为阿鲁科尔沁旗畜牧局草原站的同志测得，他们不辞辛苦，克服恶劣的自然环境，按时准确的坚持到试验点去测量数据，在此对他们尤其是畜牧局的局长任青局长及草原站的高站长等，感谢他们对本试验给予的帮助及大力支持，衷心的感谢！

另外要感谢中国农科院农业资源与农业区划研究所的领导和老师们为学生提供的优越学习环境和服务，尤其是科研处的苏老师、孟老师、张老师及资料室的老师们等等，谢谢你们！

同时感谢本研究室的黄治平、袁平师兄，陶伟国师弟，同级同学李刚、韩颖、于建慧、石淑芹、段庆伟等，均对本人给予了大量友爱无私的帮助和关心，这份珍贵的友谊，令人难以忘却！

最后感谢生我养我的父母。感谢您们对我的养育之恩，您们含辛茹苦的把我养大成人，感谢之心一个谢字岂能表达！

郭守平
2006年6月

作者简介

姓名：郭守平

籍贯：山东省禹城市

教育经历：

2003.9-2006.7

中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所 攻读理学硕士

1999.9-2003.7

山东农业大学 农学院 农学学士