

独创性声明

本人声明所提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，也不包含为获得宁夏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。

研究生签名：陈晶

时间：2015年6月2日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解宁夏大学有关保留、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。同意宁夏大学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)

研究生签名：陈晶

时间：2015年6月2日

导师签名：



时间： 年 月 日



项目资助

林业公益性行业科研专项(项目编号: 201304311)

摘要

植被恢复是防治土地沙漠化扩张、缓解沙尘暴危害的关键，一直是生态学研究领域的焦点问题，尤其是干旱风沙区，其土地退化和荒漠化已成为全球性的重大生态环境问题，因此适宜的植被恢复模式对荒漠草原生态恢复和维持具有重要意义。本研究是在宁夏盐池县高沙窝镇二步坑行政村荒漠草原，选择封育草地、柠条补播草地、沙打旺补播草地三种恢复模式和未封育草地为对照，研究分析了三种恢复模式对植被、土壤、水分和地表气候方面的影响，运用灰色关联分析法来综合评价三种恢复模式的生态效应，并筛选出最适宜该区的恢复模式，以期对干旱风沙区草地生物多样性理论、管理实践和植被恢复等提供相关依据，为更好的选择适合当地情况的恢复模式奠定基础。主要研究结果与结论如下：

(1) 6—9月封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地植物群落的高度、密度、频度、盖度和地上生物量均高于未封育草地；物种丰富度指数、Shannon-Wiener多样性指数和Pielou均匀度指数为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，而生态优势度则呈相反的趋势；不同植被恢复模式植物群落稳定性从大到小依次为：沙打旺补播草地、封育草地、柠条补播草地和未封育草地，其中，沙打旺补播草地植物群落稳定性最好，但总体来看，三种植被恢复模式和未封育草地的植物群落均不稳定。

(2) 三种植被恢复模式均可降低土壤容重，有效改善草地土壤结构，增加土壤保水持水能力，尤其以沙打旺补播草地效果最好。0—40cm土层土壤有机质含量和速效钾含量为：封育草地>柠条补播草地>沙打旺补播草地>未封育草地，土壤全氮和速效氮含量为：沙打旺补播草地>柠条补播草地>封育草地>未封育草地，土壤速效磷含量为：封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地，土壤全盐含量和pH值以未封育草地最高。

(3) 不同植被恢复模式草地气温从高到低依次为：未封育草地、柠条补播草地、封育草地和沙打旺补播草地，14:00达到峰值，呈单峰曲线；相对湿度变化为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，自8:00-20:00呈“V”型变化曲线；地表和地下0—5cm、5—10cm、10—15cm和15—20cm土壤温度变化一致，均为：未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地，最高值出现的时间以地表最早。

(4) 不同植被恢复模式草地5—12月土壤含水量为：未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地，随降水的变化浅层土壤水分波动较大；随土层深度的增加，不同恢复模式草地土壤含水量变异系数逐渐减小；封育草地和沙打旺补播草地随土层加深，土壤含水量增加，柠条补播草地深层土壤的含水量则相对较低。5—7月和11—12月，三种植被恢复模式草地和未封育草地的土壤水分均形成了负平衡，8—10月，土壤水分均为正平衡，且均以未封育草地正、负平衡最为明显。

(5) 不同植被恢复模式草地的关联度大小为：封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地，从各结构指标和功能指标分析，封育模式和沙打旺补播模式对植被的恢复改善作用效果较好，是干旱风沙区值得推广的植被恢复措施。

关键词：植被恢复，草地植物群落，土壤理化性质，水分平衡，生态效应

Abstract

Revegetation is the key to combating land desertification expansion, easing sandstorm damage, which has been the focus of research in the ecology field, especially in arid sand areas, land degradation and desertification has become a major global environmental problem, hence appropriate revegetation mode is important to desert steppe ecosystem restoration and maintenance. This study was conducted in desert steppe in Er bukeng administrative village of Gao Shawo Town, Yanchi County, Ningxia, selecting enclosed grassland, caragana reseeding grassland, adsurgens reseeding grassland and unenclosed grassland, analyzing the impact of three vegetation restoration patterns on vegetation, soil, moisture and micro-climate aspects, using gray correlation analysis method to evaluate the ecological effects of three vegetation restoration patterns synthetically, and filter out the most suitable vegetation restoration pattern for this area, to provide the theories basis on grassland biological diversity, management practices and revegetation in arid sandy area, and lay the foundation for choosing the vegetation restoration pattern which suit to local conditions best. The main results and conclusions are as follows:

(1) The height, density, frequency, coverage and aboveground biomass of grassland communities in June to September of enclosed grassland, caragana reseeding grassland and adsurgens reseeding were higher than unenclosed grassland. The richness index, Shannon-Wiener diversity index and Pielou index were: adsurgens reseeding grassland> enclosed grassland> caragana reseeding grassland> unenclosed grassland, and ecological dominance is just the opposite. Stability of plant community under different vegetation restoration patterns in descending order was: adsurgens reseeding grassland, enclosed grassland, caragana reseeding grassland and unenclosed grassland, among all, stability of plant community of adsurgens reseeding grassland was the best, but overall, plant community of three vegetation restoration patterns and unenclosed grassland were unstable.

(2) Three vegetation recovery patterns reduced the soil bulk density, improved the soil structure effectively, increased the water retention and holding capacity of soil, especially adsurgens reseeding grassland was the best. 0-40cm soil organic matter and available potassium content were: enclosed grassland> caragana reseeding grassland> adsurgens reseeding grassland>unenclosed grassland, soil total nitrogen and available nitrogen content were: adsurgens reseeding grassland> caragana reseeding grassland> enclosed grassland> unenclosed grassland, soil available phosphorus was: enclosed grassland> adsurgens reseeding grassland> caragana reseeding grassland> unenclosed grassland, soil total salt content and pH value of unenclosed grassland was the highest.

(3) The changes of air temperature of different vegetation recovery patterns in decreasing order was unenclosed grassland, caragana reseeding grassland, enclosed grassland and adsurgens reseeding grassland, reached peak value at 14:00, showed a single peak curve; the changes of relative humidity was: adsurgens reseeding grassland> enclosed grassland> caragana reseeding

grassland> unenclosed grassland, showed "V" type change curve from 8:00-20:00; the changes of surface temperature and underground 0-5cm, 5-10cm, 10-15cm and 15-20cm soil temperature were the same as: unenclosed grassland> caragana reseeding grassland> enclosed grassland> adsurgen reseeding grassland, the maximum point of surface temperature appeared earliest.

(4) Soil moisture of different recovery patterns grassland in May to December was: unenclosed grassland> caragana reseeding grassland> enclosed grassland> adsurgen reseeding grassland, the fluctuation of topsoil was obvious with the changes of precipitation; with the increased of soil depth, the soil moisture variation coefficient of different recovery patterns grassland gradually decreased; with the increased of soil depth, the soil moisture of enclosed grassland and adsurgen reseeding grassland increased, the soil moisture in deep soil layers of caragana reseeding grassland relatively lower. Soil moisture of three vegetation recovery patterns grassland and unenclosed grassland in May to July and November to December were formed negative balance, in August to October were formed positive balance, and the positive balance and negative balance of unclosed grassland were most obvious.

(5) The degree of association of different vegetation restoration patterns grassland in descending order was: enclosed grassland> adsurgen reseeding grassland> caragana reseeding grassland> unenclosed grassland, hence the analysis from the various structural and functional indicators, the improvement effect of enclosed and adsurgen reseeding patterns were better, which are worth of popularizing vegetation restoration measurement in arid sandy area.

Key words: Vegetation restoration, grassland plant communities, soil properties, water balance, ecological benefits

目 录

第一章 引言.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 文献综述.....	2
1.3 研究内容.....	6
第二章 研究方法.....	8
2.1 研究区概况.....	8
2.2 研究方法.....	8
第三章 结果与分析.....	13
3.1 不同植被恢复模式对草地植物群落的影响.....	13
3.2 不同植被恢复模式对草地土壤理化性质的影响.....	16
3.3 不同植被恢复模式对草地地表气候的影响.....	22
3.4 不同植被恢复模式对草地土壤水分动态和平衡的影响.....	24
3.5 不同植被恢复模式草地生态功能效应评价.....	29
第四章 讨论.....	31
4.1 不同恢复模式对草地植物群落变化的影响.....	31
4.2 不同恢复模式对草地土壤理化性质的影响.....	31
4.3 不同恢复模式对草地地表气候的影响.....	32
4.4 不同恢复模式对草地土壤水分平衡的影响.....	32
4.5 不同恢复模式草地生态效应评价.....	33
第五章 结论.....	34
参考文献.....	35
附录.....	50
致谢.....	51
个人简介.....	52

第一章 引言

1.1 研究背景及意义

生态环境是由地质、地貌、水文、气候、土壤和微生物等共同组成的环境综合体,是人类共有的生存与发展的自然基础^[1]。随着经济的发展,自然环境因素和人为干扰因素的相互作用,导致水土流失,森林资源减少,水资源短缺,生态环境严重退化,尤其是干旱、半干旱地区,土地退化和荒漠化已成为人类面临的重大生态环境问题^[2-3]。

干旱区是指降水小于 200mm,以风沙或荒漠地貌为主,水资源短缺且植被稀疏的地区,约占陆地面积的 30%,主要分布于纬度 15°—35°SN 之间的副热带和纬度 35°—50°N 之间的温带、暖温带大陆内部,遍布世界 60 多个国家和地区。我国干旱区主要分布于西北地区,占国土面积的 30.8%,是我国生态环境最脆弱的地区之一。近年来,受自然因素(全球气候变化等)人为干扰因素(过度放牧等)影响,干旱区植被破坏和水土流失严重^[4-6],加之人口密度提高,全球气候变化及不合理的土地利用方式等加速了环境的恶化,使得草地生态系统严重退化^[7-9],严重威胁我国的生态安全 and 经济发展,因此草地生态系统恢复引起了众多学者的关注^[10-11]。

植被是生态系统中物质循环与能量流动的中枢,是干旱风沙区生态环境的综合反映,植被的恢复是恢复生态学研究的首要任务,几乎所有自然生态系统的恢复都是以植被的恢复为前提,研究中也常常利用植被生态特征来评价草地恢复状况^[12-16]。土壤是沙漠化发生发展的物质基础,也是制约沙地生态系统稳定性的关键因素,土壤养分的丰缺程度直接决定着土壤肥力状况,研究植被恢复过程中土壤性质的改变可以更好地认识植被恢复的生态效应,同时也是筛选最佳植被恢复模式的重要指标之一^[17-21]。生态恢复过程中,小气候能影响植被的生长发育,进而影响草地植被群落的结构和发展进程,是评价不同恢复模式生态效益和衡量生态恢复进程的重要指标^[22-24]。水分因子是干旱风沙区生态格局和过程的驱动力,是决定生态系统结构与功能的关键因子,土壤水分是生态系统水热平衡中的一个重要分量,对整个生态系统的水热平衡起着关键性的作用,同时对土壤理化性质、植物生长发育状况有着重要影响,并对植被恢复具有极大的限制性^[25-28]。土壤—植被—水分的互动效应决定土壤、植被与水分在不断的演化与发展中相互影响,植被恢复过程中土壤养分等含量得以提高,植被组成和结构的变化改变了生态系统水分的利用,与此同时,土壤养分和水分的改善又对植被的进一步恢复产生显著的反馈作用,促进植被更好的恢复^[29-30]。此外,气候与土壤—植被—水分也一直处于一种动态平衡中,一旦气候发生变化,植被必然会随之发生响应,土壤养分和水分也会随之变化。

通过实施不同植被恢复模式,能增加植被盖度,丰富植被生物多样性,改良土壤结构和理化性质,涵养水源,减少水土流失,使干旱风沙区的生态环境得到改善^[31-38],此外,还可进一步提高草场生产力,增加农民收入。因此,本研究以不同恢复模式的荒漠草原为研究对象,以生态效应为核心,通过野外调查和室内分析系统研究不同恢复模式荒漠草原植被、土壤理化性质、地表气候和土壤水分平衡的变化,并采用灰色关联法评价不同恢复模式草地的生态效应,旨在为干旱风沙区植被恢复与重建提供科学依据,对宁夏生态环境建设具有重要

意义。

1.2 文献综述

1.2.1 不同植被恢复模式对草地植物群落的影响

1.2.1.1 不同植被恢复模式对草地植物群落数量特征的影响

草地群落数量特征的测定是群落定量分析的基础^[39]，一直是草地生态学研究的重点内容之一，主要包括植物的高度、盖度、频度、密度和地上生物量，是植被特征重要的量化指标，反映了草地植物群落的生长和产量状况及抵御风沙灾害的能力，植被盖度越高，其保护地表、抵御风沙的能力越强。

放牧活动是人类干扰草地生态系统的直接方式，家畜采食、踏卧和排泄等行为直接作用于草地植被，使草地生物量减少。由于不科学的放牧方式和管理的缺失，过渡放牧行为使草地逐渐退化，草地面积锐减。禁牧封育是一种简单有效的恢复方法，可以大大提高植物幼芽的存活率，改变了草地植物群落的组成比例，提高了植物群落的高度、密度、盖度和地上生物量，植物群落结构趋于稳定，从而促进了草地生态系统的恢复。近年来诸多研究均指出封育后草地植被高度、盖度、密度和生物量显著增加^[40-46]，孙宗玖等对干旱区封育后草地植被和土壤养分的变化研究表明，封育后草地群落的盖度和地上生物量分别比对照提高了 11.0% 和 $51.6\text{g}/\text{m}^2$ ^[47]。陈芳等对干旱荒漠区植被恢复的研究发现，在人工封育的植被恢复模式下，研究区植被盖度由原来的 15.50% 增加到 24.98%^[14]。蒋德明等研究发现封育 6 年后植被密度和盖度分别提高了 108.0% 和 261.6%^[48]。但也有研究发现，封育一定年限后，草地植物的高度、密度、盖度和地上生物量不再增加，反而减少，说明封育并不能无限制地提高草地生产力，封育时间过长并不利于植被的恢复^[49-50]。

补播主要是通过草地植物群落中播种一些适应当地条件的优良牧草或当地原生牧草品种，来改变草地植物群落的组分，从而增加植被的盖度和生物量等以达到草地的恢复和改善^[51]。大量研究表明对天然草地进行补播能够大幅提高草地的盖度、地上生物量等群落数量指标，是提高草地植被生产力水平的有效措施^[52-57]。退化草地补播后植被覆盖度及产草量显著增加，植物群落结构明显改善^[58-65]。总的来说，禁牧封育和补播等植被恢复方式可以改善草地植物群落中植物种类组成和比例，增加植物高度、盖度、密度和生物量，有效改善草地植物群落结构。

1.2.1.2 不同植被恢复模式对草地植物群落多样性的影响

植物物种多样性涵盖了较多复杂的生态学信息，为生态系统功能的运行和维持提供种源基础和支撑，较好的度量了植物群落结构和功能的复杂性^[66-71]。丰富度指数反映了植物物种的丰富程度，是分析物种多样性的基础^[72-74]。

封育可使草地植物在一定时期内得以繁衍，从而增加植物群落多样性，达到植被恢复的效果^[45]。退化草地禁牧封育后植物群落多样性和物种丰富度可显著增加^[75-76]。赵哈林等对科尔沁沙质放牧草地植被研究表明，封育可以增加草地植物群落生物多样性^[77]。杨晓辉和李红艳等对盐池封育草地植被研究结果表明封育可增加草地植物群落的物种种类和多样性，但 Simpson 生态优势度指数则大大减小^[78-79]。随着封育年限的增、草地植物群落物种多样性、

丰富度和均匀度不断增加,从而使群落结构逐渐改善^[66,80]。但也有研究指出封育增加了群落优势种的竞争,削弱了稀有种的生长,从而使生境趋于均一化,导致草地植物群落生物多样性降低^[81-83]。还有诸多研究指出,封育对草地植物物种多样性指数、丰富度指数、均匀度指数和优势度指数影响均不显著^[72,84-87]。

补播是退化草地植被恢复与重建的主要措施之一,补播可有效地改善草地植物群落结构,增加草地植物群落的物种多样性,提高其丰富度和均匀度^[88-89]。陈子萱等对玛曲高寒沙化草地补播草地早熟禾等禾草的研究发现,退化草地补播当年物种丰富度增加,但第二年又有所下降^[64]。冯忠心等研究表明补播可显著增加草地物种多样性指数^[90]。但也有不少研究表明,补播可使草地植物多样性指数减小^[54-56],如郑华平等研究表明补播可以明显减小 Pielou 均匀度、Simpson 生态优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数,而对物种丰富度影响不显著^[63]。

1.2.1.3 不同植被恢复模式对草地植物群落稳定性变化的影响

植物群落稳定性是反映植物群落结构和功能的一个综合指标,反映了植物群落系统受到外部干扰后对初始状态的一种反馈能力,即抵抗偏离初始状态和恢复初始状态的能力,主要包括抵抗力稳定性和恢复力稳定性。因此,草地植物群落稳定性是评价植被恢复的重要标志,在理论研究和实践中均有重要的意义^[91-98]。干旱区降雨量少、水资源匮乏,影响了植物生长繁殖和草地生产能力,因而,干旱条件下植被的稳定性较早地受到学者们的关注^[99-100]。王燕研究表明封育可以明显增加草地植物群落结构稳定性^[42]。

植被群落的稳定性的影响因素包括群落的组成、功能和一切干扰因素,研究植被群落稳定性可以较为直接地了解植被群落本身的特征和变化规律,为天然植被的保护利用和建立稳定的人工植被提供科学依据^[18,101],尤其在干旱、半干旱地区的植被恢复与重建过程中,稳定性的研究将为植被配置的合理方式提供依据^[102-103]。

1.2.2 不同植被恢复模式对草地土壤理化性质的影响

1.2.2.1 不同植被恢复模式对草地土壤物理性质的影响

土壤物理性质是衡量土壤水分供应状况和评价土壤水源涵养能力的重要指标,包括土壤颗粒组成、容重、孔隙度等特征,土壤颗粒组成直接影响土壤的保水性、通透性、粘结性和紧实度等,且影响土壤其他物理性质、养分和植被的发育^[104-108]。土壤容重是衡量土壤紧实状况的指标之一,与土壤含水量、土壤通气性等有关^[109-111],土壤容重小表明土壤疏松多孔,渗透性和通气状况良好,反之则土壤渗透性和通气性较差。土壤孔隙是衡量土壤结构的指标之一,是土壤养分、水分和空气三者进行迁移的通道,其大小与土壤容重密切相关^[112-113]。目前,植被恢复对土壤环境效应的诸多研究表明:植被恢复后土壤的理化性质得到明显的改善^[114-119]。

禁牧封育消除了家畜采食、践踏和排泄对草地植被及土壤的干扰,在提高和改善土壤物理性质方面有积极作用。草地封育后土壤粉粒含量增加,砂粒含量减少,土壤颗粒组成明显改善^[120]。苏永中等研究表明封育可以改变土壤颗粒组成,粉粒和粘粒的含量比对照分别增加了 11.1%和 32.5%,但只作用于表层土壤^[21];王蕙等研究表明封育可显著降低 0—20cm 土层土壤容重和砂粒含量^[46]。封育后土壤容重减小使表层土质疏松、通透性强,田间持水

量和总孔隙度增加^[122-125]。赵勇钢等研究发现封育可以有效改善土壤容重、孔隙度等物理性质从而提高土壤的持水能力^[126]。

补播在改善土壤结构和物理性质方面也起到一定的作用。人工补播影响了退化草地原有的结构,使其土壤表层容重和硬度下降、孔隙度增大、土壤持水性能增强,从而提高了贮水能力^[127-128]。熊平生等对红壤丘陵区土壤生态效应的研究指出,封育草地的土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度显著高于对照裸地^[129]。补播柠条可以增加土壤粉粒和黏粒含量,降低土壤容重,改善土壤结构和孔隙状况,具有重要的生态保护作用^[130-133]。张飞等研究了黄土丘陵半干旱区柠条林对土壤物理性质的影响,结果表明:除 50a 柠条林外,随着柠条林龄的增加,土壤粉粒和黏粒含量增加,土壤容重降低^[134]。

1.2.2.2 不同植被恢复模式对草地土壤化学性质的影响

土壤速效养分含量和动态变化受土壤水分、温度、孔隙度等的影响^[135-136]。土壤植被恢复与土壤理化性质的改善相辅相成^[62],植被恢复过程中增加了土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾的含量,土壤养分含量的增加有促进了植物的生长,使得草地植物与土壤形成良性循环发展的态势^[137-141]。

大多研究指出,封育可以提高土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾等养分的含量,降低 pH 值,有效改善土壤养分状况,从而增加土壤的保肥性能^[46-47,120,127,142-144]。苏永中等研究表明封育后土壤有机质、全氮等含量显著增加,表层富集明显。樊华等研究了防护林带和封育对草地土壤理化性质的影响,结果表明防护林带和封育可以显著提高沙化草土壤养分含量^[120]。

在以禾本科牧草为主的天然草地上补播豆科牧草,豆科牧草与根瘤菌共生固氮,可增加土壤氮素含量。安渊等研究表明补播可增加土壤速效氮和速效磷的含量,而对全氮含量影响不大^[60]。张伟华等研究指出补播可以增加土壤有机质含量^[127]。蒋德明等对科尔沁碱化草地的研究指出,补播提高了土壤肥力,增加了土壤有机质和速效养分含量,降低了土壤 pH 值和全盐含量^[128]。高盛香等研究柠条带间补播优良牧草的研究表明,柠条地土壤含氮量比未种植柠条的草地高 35%,有机质含量高 26%^[145]。陈云云等研究表明柠条林可以改善土壤养分含量,且明显高于自然恢复草地^[146]。张晋爱等对柠条林土壤质量的研究表明,柠条林可增加土壤有机质和速效养分的含量^[133]。

1.2.3 不同植被恢复模式对草地地表气候的影响

环境因子又称小气候,是指在相同大气候范围内,由于地形、土壤、植被等差异引起水热变化收支不同,从而形成的近地层的特殊气候,其会影响生态系统的结构和功能^[147-151]。小气候的形成是生态系统内植被、土壤等生物因子与其发生耦合作用的结果,是该区域生态环境质量的综合反映,也是评价生态系统在植被恢复过程中恢复效能的主要指标之一^[152]。

植被恢复与小气候变化协同进行并相互影响,植被恢复能明显改善草地局部小气候,与此同时小气候又反作用于植被,为草地群落演替提供良好的生境。相关研究表明,植被与小气候相互作用的规律有利于改善区域的生态环境的条件^[153-154]。人工恢复能加速植被的演替进程,增加植物多样性,使草地植物群落结构得到更好的优化,并且朝着更加稳定的方向发展。

李宗峰等对岷江上游退化植被的研究表明,地表温度和气温及其变动幅度随植被恢复年限的增加而逐渐减小,自然恢复群落的气温比人工恢复群落的高,但相对湿度低^[153]。王平等研究了不同退耕模式对小气候的影响,结果表明退耕降低了大气温度、土壤温度和光照强度,并增加了大气湿度^[155]。徐丽萍等研究表明与裸露农地相比,人工植被区气温、风速明显下降,空气相对湿度增大,起到了降温、增湿和阻风的效果^[156]。

1.2.4 不同植被恢复模式对草地土壤水分动态和平衡的影响

1.2.4.1 不同植被恢复模式对草地土壤水分有效性的影响

土壤水分有效性包括土壤中能存储的有效水量和供水能力,即植物利用土壤水分的量和被利用的难易程度^[157-158],是研究水量平衡和水分供需平衡的理论基础。土壤有效水的概念与土壤田间持水量和凋萎系数密切相关,普遍认为有效水量包括田间持水量和凋萎系数,亦称为最大有效水量^[159]。土壤水分有效性是影响植物生长发育的重要因素之一,植物生长要求土壤水分含量处于凋萎系数和田间持水量之间,否则将不利于植物的生长发育,低于凋萎系数或高于田间持水量都会对植物的生长发育造成不同程度的危害^[160-162]。

1.2.4.2 不同植被恢复模式对草地土壤水分动态的影响

土壤水分含量是影响植物生长和分布的重要因素,其动态变化和运动规律直接影响根系对养分和水分的吸收^[163-165],控制植被的组成和结构,反映区域水量的动态循环平衡机制,是调控土壤养分有效性、植被群落结构的关键控制因子。土壤水分的空间分布在植被恢复过程中发挥着重要作用,尤其是在干旱风沙区水分对植被恢复有极大的限制性,土壤水分含量的变化与植被的生长之间存在着直接的关系,是土壤、植物和气候三者间相互作用的综合效应的反映,是影响植被恢复与重建的首要因素^[166-173]。

土壤水分受气候、地形、地下水、植被等影响^[174-176]。在干旱地区,土壤水分以垂直方向的水量交换为主,且因地下水埋藏较深,深层渗漏忽略不计,地下水补给量几乎为零,因此降水是干旱区土壤水分的唯一补给源。土壤水分支出主要通过土壤蒸发和植物蒸腾,无论从土壤水分的垂直分布,还是从水平延续时间来看,都加剧了土壤水分的亏缺,使植物自身生长的水分生态环境越加恶劣^[177]。土壤水分的季节动态变化反映了土壤水分在年周期内随深度和时间而变化的情况^[178]。通过研究不同恢复模式下植被耗水、蒸腾和地面蒸发等因素的不同表现,总结不同土壤水分季节动态和垂直变化,揭示出不同恢复模式下,土壤水分的存储和消耗规律。

近年来,诸多研究结果表明植被恢复会不同程度的增加土壤含水量,尤其对土壤表层的含水量影响显著,从而提高土壤保水能力。张伟华等和傅华等研究均表明封育措施可明显增加土壤水分含量^[127,179]。闫志坚等对内蒙古半干旱草原区大针茅+羊草退化草地改良技术的研究结果表明,补播可使土壤含水量增加,其中0—10cm土层土壤水分提高了10.89%^[180]。孙栋元等研究表明自然恢复群落土壤保水能力优于人工恢复群落^[181]。

1.2.4.3 不同植被恢复模式对草地土壤水分平衡的影响

土壤水分循环平衡是降雨入渗、地表蒸发和植物蒸腾三者循环变化的过程^[182],即以土壤水分收支平衡为基础,大气降水经入渗后汇集于土壤中,与此同时植物通过蒸腾吸收消耗土壤水分,在二者的动态变化过程中,如果贮存大于消耗,土壤表现为水分盈余,反之亏缺。

从土壤水分平衡的角度分析植被恢复, 为人工植被恢复及其发展提供了理论依据。

干旱区水分平衡主要取决于降水与植被蒸散的相互作用, 气候条件越干旱, 植物蒸腾效益越低, 可见生态系统中水分循环的规模直接影响草原的生产力。土壤贮水量是提供植物维持水分平衡的部分^[183-185], 许多研究证明, 植物生物量的增长与生长关键期内降水量基本上成正比, 与土壤贮水量的变化趋势一致^[186-189]。

1.2.5 不同植被恢复模式草地生态效应评价

生态效应是人类活动引发的生态系统的结构、功能变化和响应。退化生态系统的恢复与重建, 是在良好的水热条件下, 引入合适的植物种, 使植被通过光合作用不断积累生物量, 从而逐渐改善生态环境^[190-193]。此外, 退化生态系统恢复过程中, 先锋种群的生长发育可以为物种自然入侵、定居和种群扩大创造条件, 从而改变群落的生态环境, 促进植物多样性得以发展^[194-195]。生态系统的恢复通过植被群落结构、土壤性质的变化、养分循环和生物学的相互作用等反映出来, 利用植被的群落特征、物种多样性和土壤理化性质等评价恢复状况是较有效的方法^[68,196-198]。

卢晓杰等对不同荒漠化治理措施的研究指出, 人工封育和退耕还林措施对植被恢复效果较好, 较适合当地的情况, 综合考虑投入和操作, 人工封育是值得提倡的一种治理措施^[199]。蒋德明等研究封育对科尔沁沙地植被恢复的研究中指出, 采用空间序列代替时间序列的方法分析, 封育措施对沙地植被恢复起到明显的促进作用^[48]。但也有研究表明, 封育模式的植被恢复效果并不显著且缺乏经济效益, 同时封育年限过长将影响生态效益。曹永翔等对宁夏盐池县人工封育区的研究表明, 封育对植被恢复有一定的效果, 但不显著^[72]。熊平生等对红壤丘陵区土壤生态效应的研究中指出, 封育模式虽然对改良土壤有很好的效果, 但缺乏经济效益^[129]。刘小丹等运用重要值、Levins 生态位宽度指数和 Pianka 生态位重叠指数对宁夏盐池封育 5、10、20 年的沙化草地的植被恢复效果进行分析, 得出封育年限短(5 年和 10 年) 植被恢复有显著效果, 而封育 20 年则出现群落数量特征值下降的状况^[200]。补播同样被诸多研究者认为是一种很好的植被恢复模式, 刘欣等对不同方式改良荒漠草地的效果研究发现补播的改良效果最明显^[201]。陈子萱等对玛曲高寒沙化草地的研究表明补播可作为沙化草地植被恢复的有效措施^[202]。此外, 柠条带间补播优良牧草, 能够实现草地生态系统良性循环的生态效益, 也是自然植被恢复的有效途径^[145]。

1.3 研究内容

基于植物——土壤——大气水分循环系统(SPAC)理论与水量平衡理论(考虑土壤水分承载能力), 在宁夏盐池县高沙窝镇二步坑自然村, 选择封育草地、柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地为研究对象, 主要开展以下研究:

(1) 不同植被恢复模式对草地植物群落的影响: 通过野外植被调查, 分析草地植物群落特征、多样性和稳定性的变化;

(2) 不同植被恢复模式对草地土壤理化性状的影响: 通过野外和室内分析相结合的方法, 研究了各模式对草地土壤颗粒组成、容重、孔隙度、持水性及养分含量的影响;

(3) 不同植被恢复模式对草地小气候的影响：通过野外实测，研究了土壤温度、空气温度、湿度、风速对不同植被恢复模式的响应；

(4) 不同植被恢复模式对土壤水分动态和循环平衡的影响：比较了四种模式下土壤水分有效性、土壤水分的时间动态、剖面分布及土壤水分平衡情况；

(5) 不同恢复模式的草地生态效应评价：采用灰色关联度分析法对不同恢复模式草地生态效应进行评价，比较不同模式草地的生态恢复效果。

第二章 研究方法

2.1 研究区概况

试验地位于宁夏盐池县高沙窝镇二步坑行政村(图1),东经 $107^{\circ}2'49.18''$ — $107^{\circ}2'57.38''$, 北纬 $38^{\circ}4'45.85''$ — $38^{\circ}4'54.97''$, 地貌为缓坡丘陵, 海拔 1460m 左右。试验区属于典型中温带大陆性气候, 干旱少雨、风大沙多、蒸发强烈、日照充足。多年平均降水量 289.4 mm, 7—9 月降水量约占全年降水量的 60%—70%, 冬春少雨雪, 年蒸发量 2131.8 mm, 年均气温 7.7°C , 1 月平均气温 -8.9°C , 7 月平均气温 22.5°C , $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的年积温 3430.3°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 2949.9°C , 无霜期 162 d 左右。地带性土壤以灰钙土为主, 地带性植被为荒漠草原, 主要分布有短花针茅(*Stipa breviflora*)、赖草(*Leymus secalinus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、小画眉草(*Eragrostis poeaioides*) 等植物(见附录)。



图 1 试验区位置图

Fig.1 The location of the experiment area

2.2 研究方法

2.2.1 样地的选择

试验地设在宁夏盐池县高沙窝镇二步坑行政村, 分别选取封育草地(FP)、柠条补播草地(NP)、沙打旺补播草地(BP)和未封育草地(CK)为研究样地, 其中封育草地选取封育三年的草地, 柠条补播草地选取条带补播三年的草地, 行距 1m, 沙打旺补播草地选取条带补播三年的草地, 行距 30cm, 三种植被恢复模式和未封育草地的原有植被有: 中亚白草(*Pennisetum*

centrasiaticum)、赖草(*Leymus secalinus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)等。

表 1 研究区不同样地位置及生境条件

Tab.1 Location and habitat conditions of experiment sites

样地编号	样地纬度 N	样地经度 E	样地海拔高度/m
封育草地 FP	38°4'50.50"	107°2'49.85"	1466
柠条补播草地 NP	38°4'54.97"	107°2'57.38"	1469
沙打旺补播草地 BP	38°4'46.45"	107°2'50.80"	1457
未封育草地 CK	38°4'45.85"	107°2'49.18"	1456

2.2.2 野外调查和取样

野外调查于 2014 年 5 月开始, 至 2014 年 12 月结束, 在每个样地, 沿对角线设置 5 个样区, 在每个样区随机设置 3 个 1m×1m 的样方。

2.2.2.1 植被调查

于 2014 年 6 月至 9 月每月中旬调查各样地植物群落的物种种类、盖度、高度、密度、频度和地上生物量。

2.2.2.2 土壤取样

采用多点混合法按 0—10cm、10—20cm、20—30cm、30—40cm 分层采集原状土壤, 用于测定土壤颗粒组成、土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷、速效钾、全盐和 pH 值。在 4 月中旬和 10 月中旬分 0—20cm, 20—40cm, 40—60cm, 60—80cm 和 80—100cm 五层取样, 土样保存在环刀中并加盖带回实验室测定土壤容重和孔隙度。

2.2.2.3 土壤水分监测

采用 TRIME-PICO IPH/T3 土壤水分仪测定 0—20cm, 20—40cm, 40—60cm, 60—80cm 和 80—100cm 土层土壤含水量。于 2014 年 5—12 月每月 15 日、30 日各测定一次, 此外, 每次降水 1 天, 3 天, 7 天后各加测一次。

2.2.2.4 土壤裸间蒸发和植物蒸腾监测

土壤裸间蒸发采用自制的小型裸间蒸发器在 6—9 月每月测定数天^[203]; 植物蒸腾速率采用离体快速称重法测定, 测定时间与土壤裸间蒸发同步。

2.2.2.5 地表气候监测

降水采用试验点附近的气象站资料, 气温、地温、土壤温度和空气湿度在试验样地内进行观测。6—9 月测定数天, 测定时间为早 8:00 至晚 20:00, 具体观测方法如下:

地表温度: 采用地温计测定土壤地表温度。

土壤温度: 在各样地内分别埋设曲管地温计, 分 0—5cm, 5—10cm, 10—15cm 和 15—20cm 四层, 进行连续的日变化观测, 时间从早晨 8:00 开始, 到晚上 20:00 结束, 每隔 2h 记录一次。

气温和空气湿度: 用 DT-615 空气温湿度计测定。

2.2.3 土壤样品测定项目及方法

(1) 土壤理化性质的测定

土壤颗粒组成采用 Microtrac S3500 激光粒度分析仪测定；有机质含量采用重铬酸钾容量法测定；土壤全氮采用半微量开氏法测定；土壤水解氮采用碱解扩散法测定；土壤速效钾采用 NH_4OAc 浸提，火焰光度计法测定；土壤有效磷采用 NaHCO_3 浸提，紫外分光光度计法测定；土壤全盐用电导法测定；土壤 pH 值用 pH 计测定。

(2) 土壤容重和孔隙度的测定

揭去环刀上盖，仅留垫有滤纸的带网眼的底盖，放入水盆中，保持盆中水层的高度与环刀上沿齐平，使其吸水 12 h 后立即称重(A)。将称量(A)后的环刀去掉底盖，放置在干沙上达 2 h 后立即称重(B)。再将称量(B)后的环刀继续放置在干沙上 24 h 后称重，并将土壤烘干，称量土壤干重。根据以下公式计算土样容重和孔隙度：

土壤容重(g/cm^3)=环刀内干土重/环刀体积

饱和持水量(最大持水量, %)=(浸润 12h 后环刀内湿土重-环刀内干土重)/环刀内干土重 $\times 100\%$

毛管持水量(%)=(搁置 2h 后环刀内湿土重-环刀内干土重)/环刀内干土重 $\times 100\%$

田间持水量(最小持水量, %)=(搁置 24h 后环刀内湿土重-环刀内干土重)/环刀内干土重 $\times 100\%$

非毛管孔隙(%)=[最大持水量(%) - 毛管持水量(%)] \times 土壤容重

毛管孔隙(%)=毛管持水量(%) \times 土壤容重

总孔隙度(%)=非毛管孔隙(%) + 毛管孔隙(%)

(3) 土壤最大吸湿水系数和凋萎系数的测定

土壤最大吸湿水系数采用饱和硫酸钾来测定，该方法用 15g 硫酸钾(K_2SO_4)溶解于 100ml 水中，在 20℃ 的温度下形成的相对湿度为 98%。具体步骤如下：

称取过 2mm 筛孔的风干土样 15g，放入已知质量的称量瓶中，平铺于瓶底。将称量瓶放入干燥器中有孔瓷板上，打开瓶盖，勿使其贴近器壁。干燥器下部盛有饱和硫酸钾溶液(每 1g 土样放入 3ml 饱和硫酸钾溶液)。将干燥器盖好后，放置在恒温箱中保持 20℃ 恒温。在土壤开始吸湿后一周左右，将称量瓶加盖从干燥器中取出，立即在天平上称量，然后重新放入干燥器中继续吸水，以后每隔 2—3 天按前面的方法称量一次，直至达到恒定质量或前后两次质量之差不超过 0.005g 为止，计算时取其最大值。将最大吸湿水达到恒定质量的土样，置于 105℃ 的烘箱中烘干至恒定质量，按计算土壤含水量的方法，计算土壤最大吸湿水。公式如下：

最大吸湿水(%)=($m_2 - m_1$)/ $m \times 100$

式中： m_2 —98%相对湿度饱和后的湿土质量，g； m_1 —干土质量，g。

利用土壤最大吸湿水系数来计算凋萎系数，取最大吸湿水系数的 1.35 倍来计算^[204]。

2.2.4 数据分析

(1) 物种多样性

物种多样性选用丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和生态优势度。

丰富度指数: $R=S$;

Shannon-Wiener 多样性指数: $H = 3.3219(\lg N - 1/N \sum_{i=1}^s n_i \lg n_i)$;

Pielou 均匀度指数: $E = -\sum_{i=1}^s P_i \ln P_i / \ln S$;

生态优势度: $C = \sum_{i=1}^s (n_i/N)^2$

上述各式中: S 为样地植物种数, n_i 为物种 i 的个体数, N 为物种总个体数, P_i 为物种 i 的重要值。

(2) 群落稳定性

Gordon 稳定性测定方法需要对所研究的植物群落中所有种类的植物数量和其对应的频度进行计算^[205-207]。具体方法如下: 将研究中各模式下草地植物群落中所有种类的数量和频度进行计算, 将群落中不同植物的频度测定值由大到小排列, 再把对应的频度换算成相对频度, 按相对频度由大到小累积加起来; 然后将整个群落内植物种类的总和取倒数, 按植物种类排列的顺序累积加起来。将植物种类百分数同累积相对频度一一对应, 画出散点图, 并用一条平滑的曲线将各点连接起来, 在两个坐标轴的 100 处连一条直线, 与曲线的交点即为所求点。

(3) 土壤变异系数

用变异系数 C_v 表示土壤水分垂直变化情况, 利用测定期 5—12 月土壤剖面水分的平均值和标准差来计算其变异系数, 公式如下:

$$C_v = S/X$$

$$S = \sqrt{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (X_i - X)^2}$$

式中: X —样本(土壤水分观测值)的平均值; n —样本总个数; X_i —样本的第 i 个观测值。

(4) 土壤水分平衡

考虑到不同恢复模式土壤水分“源”与“汇”的转换关系, 建立如下土壤水分平衡方程:

$$ET = P + W_c - \Delta W - R - D$$

式中: ET —蒸散量, mm; P —大气降水量, mm; ΔW —土壤贮水量变化量, mm; W_c —土壤毛管上升水的补给量, mm; R —地表径流量, mm; D —渗漏量, mm。

由于降水量少、地势平缓、土壤下渗深度浅和地下水补给强度低, 故地表径流、垂直渗漏量和地下水补给少, 可忽略不计, 因此, 土壤水分平衡方程为:

$$\Delta W = P - ET,$$

其中,

$$\Delta W = W_2 - W_1$$

式中: W_1 —测定初期土壤储水量, mm, W_2 —测定末期土壤储水量, mm。

(5) 草地生态功能效益评价

采用灰色关联分析法进行干旱风沙区不同植被恢复模式的生态功能效益评价时, 首先依据经验性结论, 综合定性与定量因素确定最能反映各方面的典型指标来进行评价, 然后将各项指标的最优值组成参考模式(ZY), 三种植被恢复模式和未封育草地(FP、NP、BP 和 CK)

和参考模式(ZY)关联度越大,则该模式的生态功能效益越好。参考模式(ZY)的各单项指标组成的数列为参考数列,记为 $X_0(k)$ (k 为指标序号),各试验模式各单项指标所组成的数列为比较数列,记为 $X_i(k)$ (i 为植被恢复模式名称)。比较 $X_0(k)$ 和 $X_i(k)$ 曲线间的几何形状的关联程度,即可评价四种植被恢复模式的生态功能效益。曲线关联系数的计算公式为:

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\text{Min}[\text{Min}\Delta_i(k)] + \rho\text{Max}[\text{Max}\Delta_i(k)]}{\{\Delta_i(k) + \rho\text{Max}[\text{Max}\Delta_i(k)]\}}$$

$$\Delta_i(k) = |X_{0i}(k) - X_i(k)|$$

其中, ρ 为分辨系数,取值区间为 $[0,1]$, ρ 越小,分辨率越大,一般取 0.5; $\varepsilon_i(k)$ 为 $X_0(k)$ 和 $X_i(k)$ 的第 k 个指标的关联系数。 r_i 为比较数列 X_i 和参考数列 X_0 之间的关联性,其计算公式为: $r_i = \frac{1}{N} \times \sum \varepsilon_i(k)$

(6)应用 Excel 2007、SAS V8 和 Spss13.0 软件处理数据并对数据进行方差分析,OriginPro 7.5 作图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异(LSD)比较不同数据组间的差异。

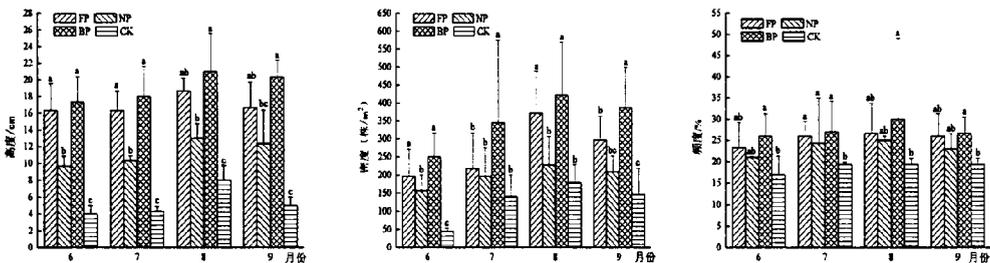
第三章 结果与分析

3.1 不同植被恢复模式对草地植物群落的影响

3.1.1 不同植被恢复模式对草地植物群落数量特征的影响

草地植物群落数量特征反映了群落的生长状况，是衡量群落生产力的重要指标^[208-210]。6—9月不同植被恢复模式草地植物群落的高度、密度、频度、盖度和地上生物量均高于未封育草地(图2)。其中草地植物群落的高度、密度、频度和地上生物量为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，盖度大小依次为：封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地。各处理草地的高度、密度、频度、盖度和地上生物量从6月开始逐渐增加，到8月达到最高点，9月又有所降低。

6—9月不同植被恢复模式的植物高度均以沙打旺补播草地最高，且显著高于柠条补播草地和未封育草地($P<0.05$)；6月和8月沙打旺补播草地和封育草地的植物密度显著高于柠条补播草地和未封育草地($P<0.05$)，而沙打旺补播草地和封育草人间差异不显著($P>0.05$)，7月和9月沙打旺补播草地的植物密度显著高于封育草地、柠条补播草地和未封育草地($P<0.05$)，分别为 $345 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $387 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ ；6、8和9月沙打旺补播草地的植物频度分别为 26%、30%和 26.67%，均显著高于未封育草地($P<0.05$)，柠条补播草地、封育草地及未封育草地之间差异不显著($P>0.05$)，7月未封育草地的植物频度显著低于其它三种恢复模式草地($P<0.05$)；6月封育草地和沙打旺补播草地的植物盖度显著高于未封育草地($P<0.05$)，柠条补播草地和未封育草人间差异不显著($P>0.05$)，7月封育草地的植物盖度为 47.33%，显著高于柠条补播草地和未封育草地($P<0.05$)，8月和9月封育草地植物盖度显著高于柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地($P<0.05$)；6月和8月沙打旺补播草地的植物地上生物量分别为 $132.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $164.23 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，显著高于封育草地、柠条补播草地和未封育草地 ($P<0.05$)，7月和9月未封育草地的植物地上生物量分别为 $24.54 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $25.86 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ，显著低于封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地 ($P<0.05$)。



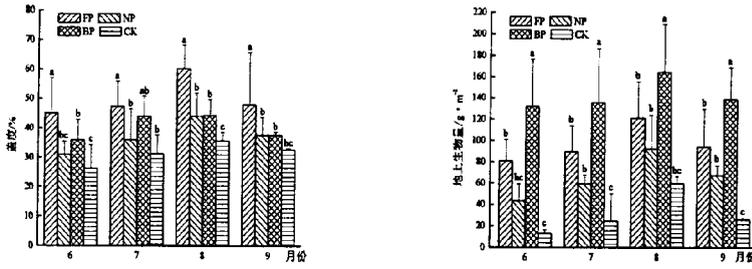


图 2 不同植被恢复模式草地植物群落特征动态

Fig.2 Variations of plant community characters under different vegetation restoration patterns

3.1.2 不同植被恢复模式对草地植物群落物种多样性的影响

群落物种多样性作为生物多样性的重要组成部分，不仅是反映生态系统内物种组成、结构多样性和复杂化程度的客观指标，还是生态系统内生物群落对生物和非生物环境综合作用的外在反映，物种多样性的恢复是生态系统恢复与重建的重要内容^[211-212]。

不同植被恢复模式草地丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数表现为沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，生态优势度则呈相反的趋势(图 3)。不同植被恢复模式草地的丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和生态优势度自 6—9 月均呈先上升后下降趋势，8 月达最高，9 月降至最低。

6—9 月不同植被恢复模式的丰富度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均以未封育草地的最低，显著低于封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地($P < 0.05$)；6—9 月不同植被恢复模式的 Pielou 均匀度指数以沙打旺补播草地最高，显著高于未封育草地($P < 0.05$)，但与封育草地和柠条补播草地间差异不显著($P > 0.05$)；6—9 月不同植被恢复模式的生态优势度以未封育草地最高，显著高于封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地($P < 0.05$)，而封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地间差异不显著($P > 0.05$)。

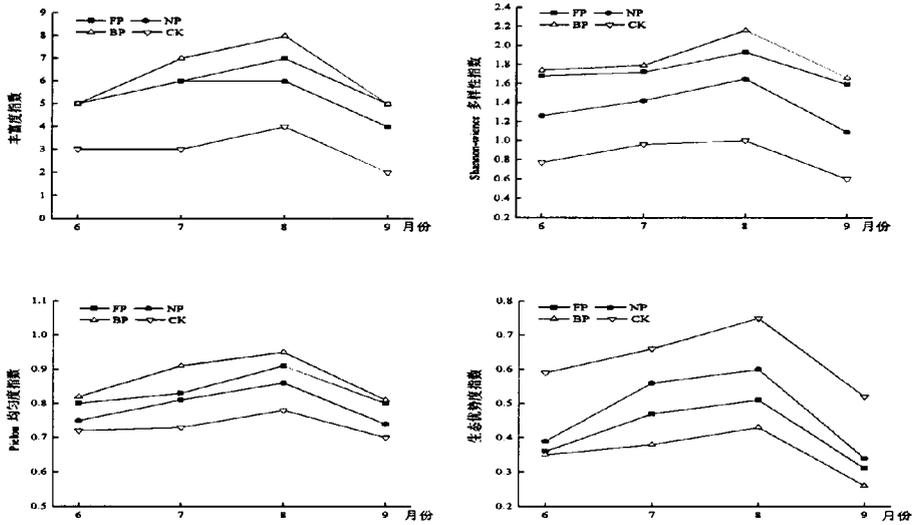


图 3 不同植被恢复模式物种多样性动态

Fig.3 Variations of diversity of species under different vegetation restoration patterns

3.1.3 不同植被恢复模式对草地植物群落稳定性的影响

不同恢复模式草地群落种数和累积频度之间的相关性大小依次为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地(表 2)，沙打旺补播草地、封育草地和柠条补播草地的相关系数较高，分别达 0.9855、0.9520 和 0.9238。不同植被恢复模式草地的种总数倒数累积分数和累积相对频度的交点坐标分别为：30.04/71.39，30.85/70.13，28.61/72.25 和 32.26/68.85，其稳定性从高到低依次为：沙打旺补播草地、封育草地、柠条补播草地和未封育草地，其中，沙打旺补播草地的交点坐标最趋近于 20/80，说明其植被群落稳定性最好。总体看，三种植被恢复模式草地和未封育草地群落均不稳定。

表 2 不同植被恢复模式草地植物群落稳定性分析结果

Tab.2 Results of stability of plant community under different vegetation restoration patterns

恢复模式	曲线方程	相关系数 R ²	交点坐标	结果
Recovery pattern	Curvilinear equation	Correlation index R ²	Intersection coordinate	Result
FP	$y=-0.0186x^2+2.5711x+11.122$	0.9520	30.04/71.39	不稳定
NP	$y=-0.0082x^2+1.533x+30.431$	0.9238	30.85/70.13	不稳定
BP	$y=-0.0155x^2+2.2041x+19.719$	0.9855	28.61/72.25	不稳定
CK	$y=-0.0012x^2+0.4849x+52.961$	0.7217	32.26/68.85	不稳定

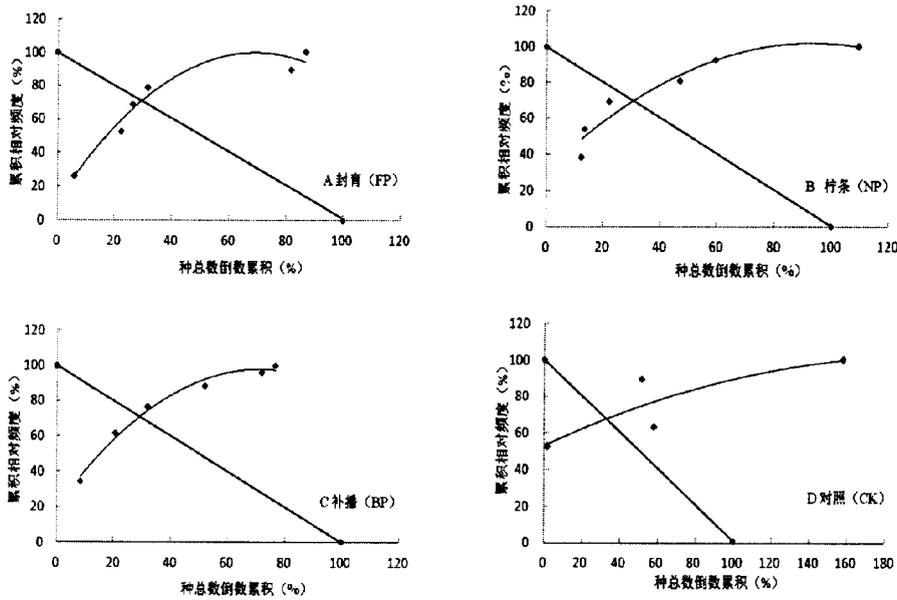


图 4 不同植被恢复模式草地植物群落稳定性图解

Fig.4 Stability graph for plant community under different vegetation restoration patterns

3.2 不同植被恢复模式对草地土壤理化性质的影响

3.2.1 不同植被恢复模式对草地土壤物理性质的影响

3.2.1.1 不同植被恢复模式对草地土壤颗粒组成的影响

不同植被恢复模式草地土壤颗粒组成见图 5，总体看，各恢复模式草地 0—100cm 土层颗粒组成以砂粒为主，占 70%以上，尤其是 0—20cm 表层土壤砂粒含量达 85%以上。其中，在 0—20cm 土层，封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地的粉粒含量分别是未封育草地的 18.8、4.2 和 15.7 倍，均显著高于未封育草地($P < 0.05$)；在 20—60cm 土层，粉粒含量为：封育草地>沙打旺补播草地>未封育草地>柠条补播草地，其中，封育草地及沙打旺补播草地的粉粒含量分别为 27.89%和 25.43%，显著高于未封育草地和柠条补播草地($P < 0.05$)；在 60—80cm 土层，粉粒含量以未封育草地的最高，为 19.24%，显著高于柠条补播草地和沙打旺补播草地($P < 0.05$)，分别是二者的 1.67 和 1.85 倍，但与封育草地点间差异不显著($P > 0.05$)；在 80—100cm 土层，粉粒含量以柠条补播草地最高，但与其与沙打旺补播草地之间差异不显著($P > 0.05$)，封育草地最低，仅为 7.73%，显著低于沙打旺补播草地、柠条补播草地及未封育草地($P < 0.05$)。

不同土层封育草地和沙打旺补播草地的粉粒含量均以 20—40cm 最高，分别为 27.89%和 25.16%；柠条补播草地随土层的加深粉粒含量逐渐增加，以 80—100cm 最高，为 18.29%；未封育草地土壤粉粒含量以 60—80cm 土层最高，为 19.24%。

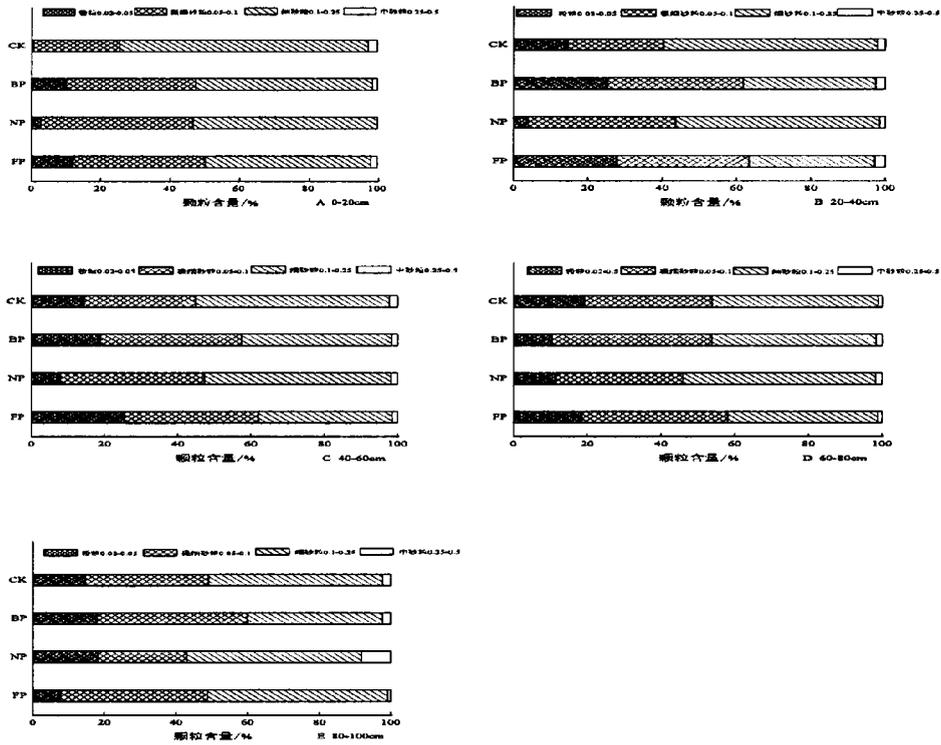


图 5 不同植被恢复模式土壤颗粒组成

Fig.5 Soil particle compositions under different vegetation restoration patterns

3.2.1.2 不同植被恢复模式对草地土壤容重的影响

土壤容重综合反映了土壤颗粒、土壤紧密度和土壤肥力等,是表征土壤质量的重要参数,与土壤孔隙度密切相关,对土壤的透气性、入渗和持水性能有很大的影响^[213-218]。与未封育草地相比,封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地各土层的土壤容重均降低(图 6)。0—20cm 和 40—60cm 土层,为封育草地的土壤容重分别为 1.61g·cm⁻³和 1.52g·cm⁻³,显著高于沙打旺补播草地($P < 0.05$),但与封育草地和柠条补播草地差异不显著($P > 0.05$); 20—40cm 和 60—80cm 土层土壤容重从大到小依次为:未封育草地、柠条补播草地、封育草地和沙打旺补播草地,未封育草地和柠条补播草地的土壤容重显著高于沙打旺补播草地和封育草地($P < 0.05$); 80—100cm 土层,未封育草地的土壤容重为 1.59 g·cm⁻³,显著高于封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地($P < 0.05$)。

有研究表明^[219],一般土壤容重在 1.0—1.5 g·cm⁻³之间,介于 1.25—1.35 g·cm⁻³之间的土壤结构协调。除封育草地 0—20cm 土层和柠条补播草地 0—40cm 土层外,封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地其他各层的土壤容重均在 1.0—1.5 g·cm⁻³之间,但均未在 1.25—1.35 g·cm⁻³之间;未封育草地 0—100cm 土层的土壤容重均大于 1.5 g·cm⁻³,说明封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地的土壤容重虽较未封育草地的有所降低,但其土壤结构仍不尽协调。

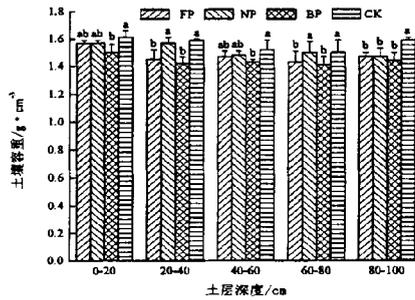


图6 不同植被恢复模式土壤容重

Fig.6 The soil bulk density under different vegetation restoration patterns

3.2.1.3 不同植被恢复模式对草地土壤孔隙度的影响

土壤孔隙及其组成是表征土壤结构的重要指标之一，综合反映了土壤的通气、透水、持水能力和水分保持等^[220-221]。土壤毛管孔隙度是将其中的水供植物根系的吸收利用和土壤的蒸发，可长时间保存在土壤中，反映了土壤的保水能力。0—60cm 土层毛管孔隙度均以未封育草地最低，其中，0—20 cm 土层封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地的毛管孔隙度均显著高于未封育草地($P < 0.05$)，分别是未封育草地的 1.19、1.14 和 1.19 倍；20—40cm 土层以沙打旺补播草地的毛管孔隙度最高，为 36.94%，封育草地和柠条补播草地的次之，且均显著高于未封育草地($P < 0.05$)；40—60cm 土层各恢复模式草地之间毛管孔隙度差异不显著($P > 0.05$)。60—80cm 及 80—100cm 土层均以柠条补播草地的毛管孔隙度最低，分别为 30.05%和 27.09%，明显低于封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地 ($P < 0.05$)。

土壤非毛管孔隙中的水可及时排空，有利于水分的下渗吸收，反映了土壤拦蓄降水的的能力^[222-223]。0—20cm 土层非毛管孔隙度以封育草地最高，为 8.79%，显著高于未封育草地及其他两种恢复模式草地($P < 0.05$)，柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地之间差异不显著($P > 0.05$)；20—40cm 及 40—60cm 土层非毛管孔隙度以沙打旺补播草地最高，分别为 7.31%和 9.89%，但与其他恢复模式草地及未封育草地之间差异不显著($P > 0.05$)；60—80cm 及 80—100cm 土层非毛管孔隙度为柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地>未封育草地，但封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地之间差异不显著($P > 0.05$)。

土壤总孔隙度是土壤所能容纳的极限贮水量，反映了植被潜在的蓄水和调节能力。0—20cm 土层封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地之间土壤总孔隙度差异不显著，且均显著高于未封育草地($P < 0.05$)；不同恢复模式草地及未封育草地 20—80cm 各土层土壤总孔隙度差异均不显著($P > 0.05$)；80—100cm 土层土壤总孔隙度以封育草地最高，为 48.69%，显著高于柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地 ($P < 0.05$)。

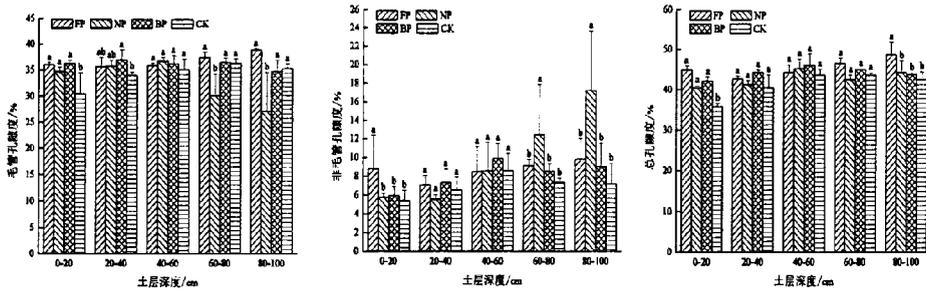


图 7 不同植被恢复模式土壤孔隙状况

Fig.7 The status of soil porosity under different vegetation restoration patterns

3.2.1.4 不同植被恢复模式对草地土壤持水性的影响

饱和持水量反映了土体内可以贮存水分的最大值，在土壤内存留时间短暂，与土壤的孔隙状况密切相关。0—20cm 和 20—40cm 土层饱和持水量为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，其中，沙打旺补播草地显著高于未封育草地及柠条补播草地($P < 0.05$)；40—60cm 土层饱和持水量以沙打旺补播草地的最高，为 32.25%，显著高于未封育草地($P < 0.05$)；60—80cm 土层饱和持水量从大到小为，封育草地、沙打旺补播草地、未封育草地和柠条补播草地，封育草地显著高于柠条补播草地($P < 0.05$)，但与沙打旺补播草地和未封育草地间差异均不显著($P > 0.05$)；80—100cm 封育草地、柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地间差异均不显著($P > 0.05$)。

毛管持水量是毛管上升水达到最大数量时的含水量，与地下水有直接关系。0—20cm 和 20—40cm 土层毛管持水量依次为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，其中，沙打旺补播草地显著高于未封育草地($P < 0.05$)；40—60cm 土层各恢复模式草地及未封育草地之间差异均不显著($P > 0.05$)。60—80cm 和 80—100 cm 土层毛管持水量均以柠条补播草地最低，显著低于封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地 ($P < 0.05$)。

田间持水量是毛管悬着水达到最大数量的含水量，其值反映了土壤保水能力的大小。0—60cm 各土层田间持水量均为沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，其中，0—20cm 土层封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地的田间持水量均显著高于未封育草地($P < 0.05$)；20—60cm 土层封育草地和沙打旺补播草地的田间持水量显著高于未封育草地($P < 0.05$)，柠条补播草地和未封育草地间差异不显著($P > 0.05$)。60—80cm 和 80—100cm 土层均以柠条补播草地的田间持水量最低，分别为 16.59%和 15.08%，显著低于封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地($P < 0.05$)。

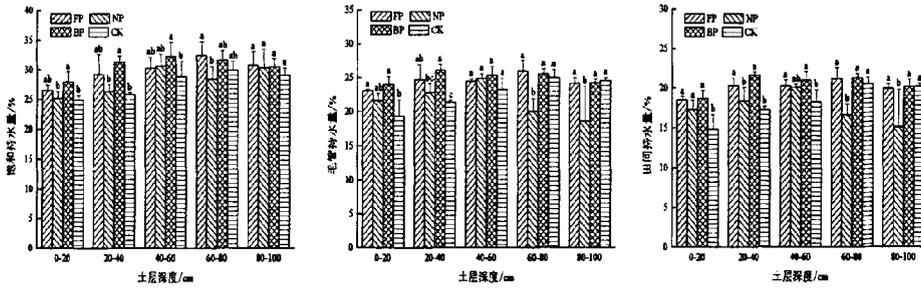


图 8 不同植被恢复模式土壤持水状况

Fig.8 The status of soil moisture-holding capacity under different vegetation restoration patterns

3.2.2 不同植被恢复模式对草地土壤化学性质的影响

3.2.2.1 不同植被恢复模式对草地土壤有机质的影响

土壤有机质是形成土壤理化性状的基础,其数量与质量的变化最明显的反映了土壤的肥力和环境质量状况^[224-225]。0—40cm 土壤有机质含量大小依次为: 封育草地>柠条补播草地>沙打旺补播草地>未封育草地(图 9), 其中, 封育草地和柠条补播草地显著高于沙打旺补播草地和未封育草地($P<0.05$)。随土层的加深, 不同植被恢复模式草地土壤有机质含量均呈先增加后降低的趋势, 且以 10—20cm 土层最高。

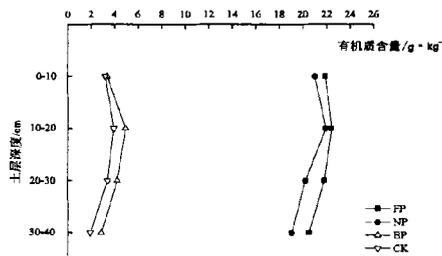


图 9 不同植被恢复模式土壤有机质的变化

Fig.9 Changes of soil organic matter under different vegetation restoration patterns

3.2.2.2 不同植被恢复模式对草地土壤全氮和速效氮的影响

土壤全氮分为两种形式, 即有机态和无机态^[226]; 土壤速效氮是植物氮素营养的主要来源, 作为能直接被植物根系吸收利用的土壤氮素, 其含量高低能够较好地反映出土壤的供氮水平、强度和氮素释放速率, 是表征土壤供氮能力和土壤肥力质量的主要指标之一^[227-230]。0—40cm 各土层土壤全氮和速效氮含量由高到低的顺序均为: 沙打旺补播草地、柠条补播草地、封育草地和未封育草地(图 10)。从垂直分布看, 沙打旺补播草地和柠条补播草地的土壤全氮和速效氮含量均随土层加深呈先降低后升高的趋势, 以 30—40cm 土层含量最高, 分别为 $0.84\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.82\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $21.45\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $15.79\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 封育草地和未封育草地的土壤全氮和速效氮含量随土层加深逐渐降低, 均以表层 0—10cm 土壤全氮和速效氮含量最高,

分别为 $0.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $8.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

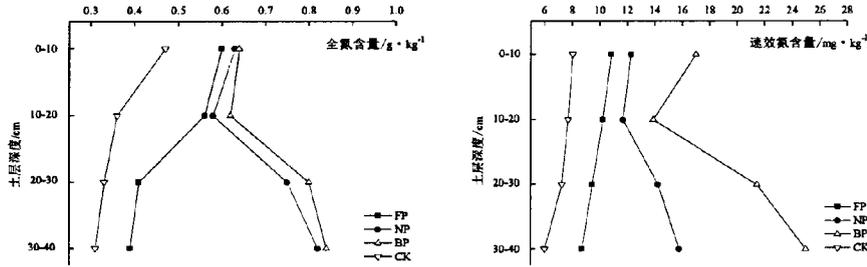


图 10 不同植被恢复模式土壤全氮和速效氮的变化

Fig.10 Changes of soil total nitrogen and available nitrogen under different vegetation restoration patterns

3.2.2.3 不同植被恢复模式对草地土壤速效磷和速效钾的影响

土壤速效磷含量反映了土壤的供磷水平，土壤速效钾含量反映了土壤钾素的现实供应状况，是表征土壤肥力质量的主要指标^[231]。0—40cm 各土层土壤速效磷含量均为：封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地(图 11)，而速效钾含量从高到低为：封育草地、柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地。随着土层深度的增加，不同植被恢复模式草地的土壤速效磷和速效钾含量均逐渐降低，且表层 0—10cm 含量显著高于其他各土层($P < 0.05$)。

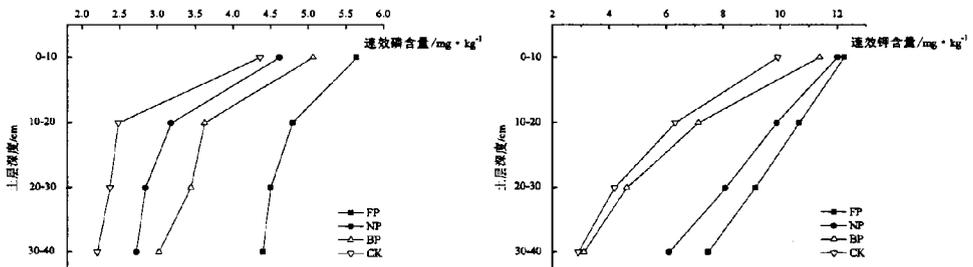


图 11 不同植被恢复模式土壤速效磷和速效钾的变化

Fig.11 Changes of soil available phosphorus and available potassium under different vegetation restoration patterns

3.2.2.4 不同植被恢复模式对土壤全盐和 pH 值的影响

土壤盐分对植物的生长危害取决于盐分的含量和组成，土壤全盐是评价土壤生产性能的主要指标之一^[232]。土壤 pH 值是重要的土壤性质，影响化学物质在土壤中的行为、土壤养分有效性和其存在形态等，主要通过土壤有机质的分解、矿质元素的有效状态等因素来影响土壤肥力^[233-235]。0—40cm 各土层土壤全盐含量从大到小依次为：未封育草地、沙打旺补播草地、封育草地和柠条补播草地(图 12)，随着土层深度的增加，不同植被恢复模式的土壤全盐含量呈降低趋势，表层 0—10cm 土壤全盐含量高于其他各层。

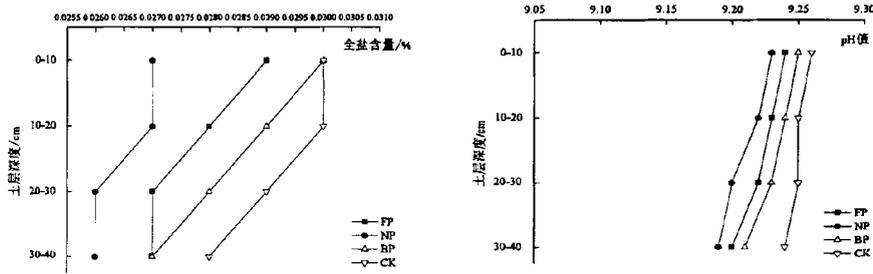


图 12 不同植被恢复模式土壤全盐和 pH 值的变化

Fig.12 Changes of soil total salt and pH value under different vegetation restoration patterns

3.3 不同植被恢复模式对草地地表气候的影响

3.3.1 不同植被恢复模式对草地地表温度、气温和空气湿度的影响

不同植被恢复模式草地的地表温度自 8:00 开始快速上升, 至 14:00 达最高, 尤其 8:00-12:00, 地表温度上升速度极快, 且不同恢复模式草地之间差异不显著($P>0.05$); 14:00-20:00 各恢复模式草地地表温度均缓慢下降, 此阶段未封育草地地表温度显著高于其它三种恢复模式草地($P<0.05$)。

气温是影响植物种类组成、土壤养分循环和土壤水分平衡的一个重要因子。不同植被恢复模式一天内气温变化从大到小依次为: 未封育草地、柠条补播草地、封育草地和沙打旺补播草地(图 13)。不同植被恢复模式的气温自 8:00 开始逐渐上升, 至 14:00 达最高, 此阶段气温上升速度极快; 14:00-20:00 各恢复模式草地气温均开始逐渐下降, 晚 20:00 降至最低, 且下降速度极快; 8:00-20:00 各恢复模式草地气温总体呈单峰曲线变化, 且未封育草地的气温显著高于封育草地和沙打旺补播草地($P<0.05$), 而与柠条补播草地间差异不显著($P>0.05$)。

不同植被恢复模式一天内相对湿度变化大小依次为: 沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地(图 13), 其变化与一天内的气温变化恰恰相反。各恢复模式草地相对湿度自 8:00 开始随着光照和气温的升高而逐渐下降, 至 14:00 达最低, 此阶段相对湿度下降速度极快, 且沙打旺补播草地和封育草地显著高于柠条补播草地和未封育草地($P<0.05$); 14:00-20:00 各恢复模式草地相对湿度均开始逐渐回升, 此阶段沙打旺补播草地和封育草地显著高于未封育草地($P<0.05$), 而与柠条补播草地间差异不显著($P>0.05$)。

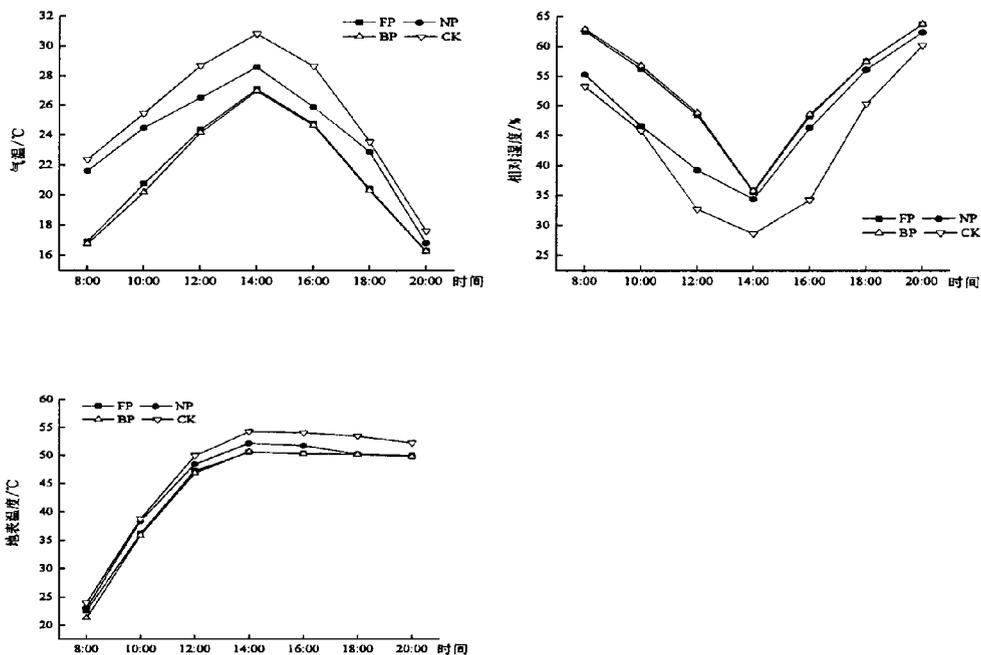
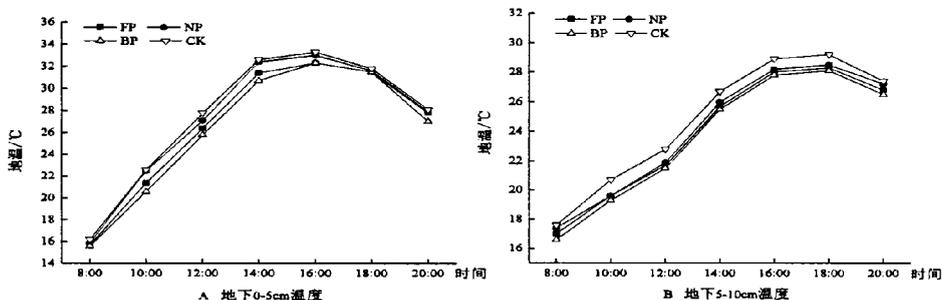


图 13 不同植被恢复模式地表温度、气温和空气湿度的变化

Fig.13 Changes of surface temperature, air temperature and humidity under different vegetation restoration patterns

3.3.2 不同植被恢复模式对土壤温度的影响

土壤温度是影响土壤水分的一个重要因子。不同植被恢复模式土壤 0—5cm、5—10cm、10—15cm 和 15—20cm 温度变化为: 未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地 (图 14)。其中, 0—5cm、5—10cm 和 10—15cm 土壤温度从 8:00 到 20:00 呈先上升后下降的趋势, 但一天中的温度最高点不同, 0—5cm 土壤温度以 16:00 最高, 5—10cm 和 10—15cm 以 18:00 最高, 15—20cm 土壤温度自 8:00 到 20:00, 逐渐上升, 20:00 达最高。



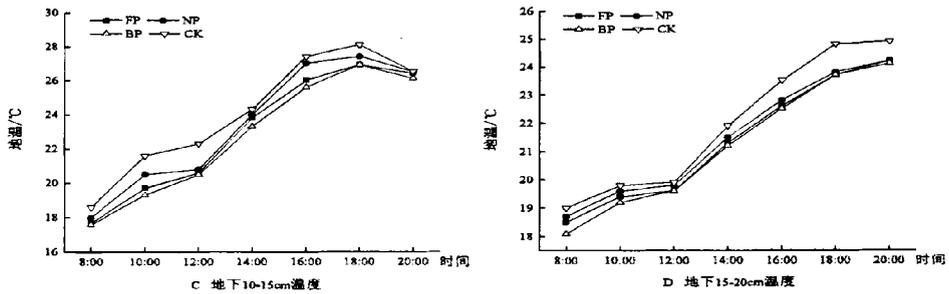


图 14 不同植被恢复模式土壤温度的变化

Fig.14 Changes of soil temperature under different vegetation restoration patterns

3.4 不同植被恢复模式对草地土壤水分动态和平衡的影响

3.4.1 不同植被恢复模式对草地土壤水分有效性的影响

土壤所含水以重力水、有效水和无效水三种形式存在。田间持水量是有效水的上限，亦即重力水和有效水的分界点，可表示土壤持水能力高低，而凋萎系数为土壤有效水的下限 [236-238]。

不同恢复模式草地土壤水分有效性见表 3。封育草地、柠条补播草地、沙打旺补播草地和未封育草地各土层的凋萎系数均比较接近；封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地的田间持水量均高于未封育草地；不同植被恢复模式土壤平均含水率均为有效水，封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地 0—20cm 土层的最低含水率为无效水，20—100cm 各土层的最低含水率均为有效水，未封育草地 0—100cm 各土层最低含水率均为有效水。0—20cm 土层未封育草地的有效水显著低于封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地 ($P < 0.05$)；20—40cm 土层未封育草地和柠条补播草地的有效水显著低于封育草地和沙打旺补播草地 ($P < 0.05$)；40—60cm 土层各恢复模式草地间有效水差异均不显著 ($P > 0.05$)；60—80cm 和 80—100cm 土层柠条补播草地有效水显著低于封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地 ($P < 0.05$)。

表 3 不同植被恢复模式土壤水分有效性

Tab.3 Soil moisture availability under different vegetation restoration patterns

恢复模式	土层深度	最大吸湿水	凋萎系数	田间持水量	有效水	土壤平均含水率	土壤最低含水量
Recovery pattern	Soil depth/cm	Maximum hygroscopic moisture/%	Wilting coefficient/%	Field capacity/%	Available water/%	Soil average moisture/%	Soil minimum moisture/%
FP	0-20	1.97	2.23	18.52	2.23-18.52	5.60	1.12
	20-40	3.31	4.47	20.29	4.47-20.29	7.94	4.35
	40-60	3.04	4.10	20.20	4.10-20.20	8.33	6.43
	60-80	3.40	4.59	21.15	4.59-21.15	9.80	8.13
	80-100	2.00	2.70	19.88	2.70-19.88	9.29	8.02
NP	0-20	1.65	2.66	17.29	2.66-17.29	7.54	1.65
	20-40	1.58	2.13	18.36	2.13-18.36	12.28	7.74
	40-60	1.97	2.66	20.05	2.66-20.05	14.34	9.80
	60-80	2.21	2.98	16.59	2.98-16.59	10.49	7.05
	80-100	1.68	2.27	15.08	2.27-15.08	9.10	7.03
BP	0-20	1.97	2.65	18.69	2.65-18.69	5.41	1.87
	20-40	3.38	4.56	21.67	4.56-21.67	8.32	6.25
	40-60	2.60	3.50	20.90	3.50-20.90	8.20	7.57
	60-80	2.03	2.74	21.25	2.74-21.25	6.81	6.01
	80-100	3.43	4.63	20.13	4.63-20.13	7.65	7.12
CK	0-20	1.26	1.70	14.29	1.70-14.29	6.96	2.88
	20-40	1.60	2.16	17.24	2.16-17.24	15.31	10.54
	40-60	2.10	2.83	18.19	2.83-18.19	12.91	9.45
	60-80	2.49	3.36	20.48	3.36-20.48	10.27	8.38
	80-100	2.62	3.54	20.17	3.54-20.17	10.03	8.95

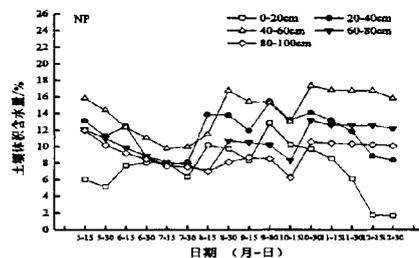
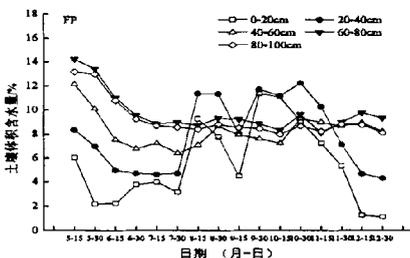
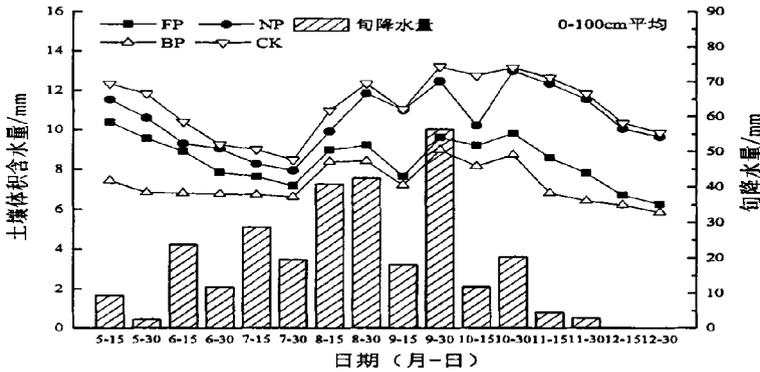
3.4.2 不同植被恢复模式对草地土壤水分动态的影响

3.4.2.1 不同植被恢复模式对土壤水分动态的影响

图 15 为不同恢复模式草地土壤水分季节变化, 5—12 月土壤含水量为未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地。不同植被恢复模式草地土壤水分的季节变化呈现出较一致的趋势, 且随着降雨的变化发生相应的波动。从 5 月中旬到 7 月下旬, 由于地温和气温回升, 植被开始生长, 地表蒸发和植物蒸腾的作用增强, 不同植被恢复模式草地的土壤水分不断散失, 土壤含水量缓慢下降, 虽然 7 月中旬的降水量较大, 但由于外界气温高, 蒸发

蒸腾作用强烈，土壤水分仍保持下降的趋势，到7月底土壤水分下降至最低，总的来说，7月前土壤水分以消耗为主。8月中旬到下旬，植物进入生长盛期，蒸腾耗水量增加，但此时降雨显著增多，达到83.4mm，降雨入渗使得土壤水分得到有效地补给，土壤含水量开始逐渐上升。9月中旬，由于降水量的减少，土壤水分不能持续的得到补给，土壤水分含量有所下降，中旬以后，气温逐渐下降，植物生长开始衰退，对土壤水分的消耗也相应的减少，加之9月下旬又有一次56.4mm的强降水补给过程，使得各恢复模式草地土壤含水量开始回升。10月中旬，由于降水的减少，土壤含水量有所下降，但由于此时蒸发较弱，土壤含水量开始进入缓慢失水与补充期，因此土壤含水量下降幅度不大，10月下旬由于降水的补给，土壤含水量再次回升。11月上旬到12月下旬，土壤含水量逐渐下降。

根据土壤含水量的季节变化特征，结合5—12月降水量和蒸发量的变化规律，将试验期间的土壤水分变化分为三个阶段：5月上旬—7月下旬，为土壤水分弱失水消耗阶段，此阶段由于环境温度持续升高，植物蒸腾和地面蒸发作用较强，加之降水量较少，造成土壤水分消耗损失；8月上旬—10月下旬，为土壤水分蓄积阶段，此阶段由于降水频繁，导致土壤水分含量呈波动性增加，土壤积蓄水分；11月上旬—12月下旬，为土壤水分缓慢恢复阶段，此阶段由于环境温度降低，土壤水分蒸发消耗减弱。随土层深度的增加，封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地的土壤水分变化较一致，其中，0—40cm土层土壤水分受降水影响较大，60—100cm深层土壤水分基本不受降水影响，变化相对稳定；柠条补播草地0—100cm各土层土壤水分均受降水影响呈现波动变化，但60—100cm深层土壤水分波动幅度较小。



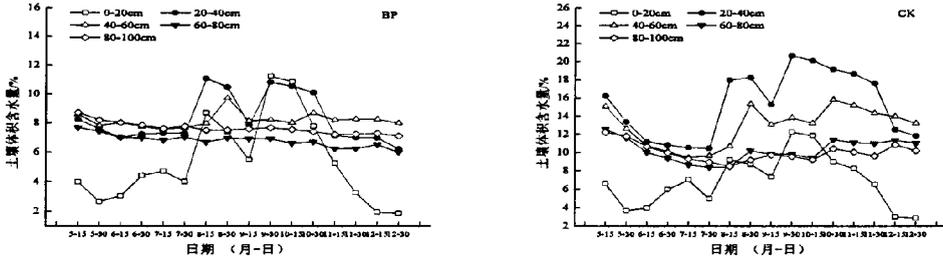


图 15 不同植被恢复模式土壤水分季节变化

Fig.15 Temporal variation of soil moisture under different vegetation restoration patterns

3.4.2.2 不同植被恢复模式对土壤水分垂直剖面分布的影响

土壤水分垂直分布是土壤水分动态研究的重要组成部分^[239-241]，根据王孟本等（1995）^[242]的土壤含水量标准差（ S_D ）判别法划分出的三个层次（活跃层 $S_D > 1.5$ 、次活跃层 $S_D 1-1.5$ 和相对稳定层 $S_D < 1$ ），不同植被恢复模式草地的土壤水分垂直变化不同，封育草地 0—80cm 土层为活跃层，80—100cm 土层为次活跃层；柠条补播草地 0—100cm 土层均为活跃层；沙打旺补播草地 0—40cm 土层为活跃层，40—100cm 为相对稳定层；未封育草地 0—60cm 土层为活跃层，60—80cm 为次活跃层，80—100cm 为相对稳定层。

不同植被恢复模式 0—100cm 土层土壤水分变异系数变化不同，0—20cm 土层不同植被恢复模式的土壤水分变异系数为：封育草地>沙打旺补播草地>未封育草地>柠条补播草地；20—40cm 和 80—100cm 土层土壤水分变异系数为封育草地>柠条补播草地>未封育草地>沙打旺补播草地；40—60cm 和 60—80cm 土层土壤水分变异系数从大到小依次为，柠条补播草地、封育草地、未封育草地和沙打旺补播草地。总的看来，不同植被恢复模式土壤水分的变异系数均呈现出随土层深度的增加变异系数逐渐降低的趋势。

0—20cm 和 40—80cm 各土层土壤含水量为：柠条补播草地>未封育草地>封育草地>沙打旺补播草地，20—40cm 土壤含水量由高到低为：未封育草地、柠条补播草地、沙打旺补播草地和封育草地，80—100cm 土壤含水量为：未封育草地>封育草地>柠条补播草地>沙打旺补播草地。随土层深度的加深，封育草地的土壤含水量呈现逐渐增加的趋势；柠条补播草地和未封育草地的土壤含水量均呈现先增加后降低的趋势，但柠条补播草地在 40—60cm 土层达最大值，未封育草地则以 20—40cm 土层最高；沙打旺补播草地的土壤含水量随深度的增加呈“增加—降低—增加”的趋势。

表 4 不同植被恢复模式土壤水分特征值

Tab.4 Characteristic values of soil moisture under different vegetation restoration patterns

恢复模式 Recovery pattern	指标 index	土层深度 Soil depth/cm				
		0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
FP	平均含水量/%	5.602	7.941	8.325	9.292	9.798
	标准差 S	3.393	3.038	1.441	1.611	1.719
	变异系数 C_v	0.606	0.382	0.175	0.173	0.173
NP	平均含水量/%	7.538	12.281	14.340	10.489	9.097
	标准差 S	2.997	3.692	2.637	1.989	1.553
	变异系数 C_v	0.398	0.301	0.190	0.184	0.171
BP	平均含水量/%	5.412	8.320	8.199	6.805	7.654
	标准差 S	2.968	1.666	0.511	0.425	0.407
	变异系数 C_v	0.548	0.200	0.062	0.062	0.053
CK	平均含水量/%	6.958	15.306	12.908	10.267	10.031
	标准差 S	2.864	3.712	2.144	1.233	0.996
	变异系数 C_v	0.412	0.242	0.166	0.120	0.099

3.4.3 不同植被恢复模式对草地土壤水分平衡的影响

土壤贮水量变化反映了土壤水分的平衡状态^[28,243-244]。利用土壤水分消耗法,由初期储水量和末期储水量计算了不同植被恢复模式草地不同时间段的土壤水分平衡状况(表 5)。由表 5 可以看出,5—7 月和 11—12 月,不同植被恢复模式的土壤水分均形成了负平衡,且以未封育草的负平衡最为明显,说明 5—7 月和 11—12 月未封育草地水分循环强度高于封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地;8—10 月,不同植被恢复模式的土壤水分均为正平衡,且以未封育草地的正平衡最为明显,说明不同植被恢复模式的土壤水分均得到了短期的恢复。

表 5 不同植被恢复模式土壤水分平衡

Tab.5 Balance of soil moisture under different vegetation restoration patterns

时间	恢复模式	初期储水量	末期储水量	土壤水分增减	降雨量	蒸散量
Time	Recovery pattern	Prime moisture storage capacity/mm	Last moisture storage capacity/mm	Soil moisture regulation/mm	Precipitation rainfall capacity/mm	Evapotranspiration/m
	FP	99.8	74.2	-25.6	95.8	121.4
5-7月	NP	110.8	81.1	-29.7	95.8	125.5
	BP	71.5	66.8	-4.7	95.8	100.5
	CK	120.9	87.4	-33.5	95.8	129.3
	FP	91.0	95.1	4.1	190.1	186.0
8-10月	NP	109.0	116.1	7.1	190.1	183.0
	BP	84.1	84.5	0.4	190.1	189.7
	CK	116.7	129.7	13.0	190.1	177.1
	FP	82.1	64.8	-17.3	7.5	24.8
11-12月	NP	119.6	98.5	-21.1	7.5	28.6
	BP	66.2	60.3	-5.9	7.5	13.4
	CK	122.6	101.0	-21.6	7.5	29.1

3.5 不同植被恢复模式草地生态功能效应评价

3.5.1 不同植被恢复模式草地生态功能评价指标的选择

上述测定结果从植被、土壤、水分和地表气候四个方面反映了干旱风沙区不同植被恢复模式对植物物种多样性、稳定性、土壤结构、养分状况和水分条件等的影响,由于涵盖的指标较多,我们筛选了最能反映草地生态功能的一些指标并对数据进行无量纲处理,得到一个新的数列,将其均值化(表 6)。

表 6 不同植被恢复模式生态功能指标均值化结果

Tab.6 Ecological function index equalization results under different vegetation restoration patterns

功能指标	植被恢复模式			
	FP	NP	BP	TP
植被指标				
植被盖度/%	2.09	1.61	1.39	1.55
地上生物量/ $g \cdot m^{-2}$	3.81	3.37	5.15	2.59
Shannon-wiener 多样性指数	0.06	0.06	0.07	0.04
Pielou 均与度指数	0.03	0.03	0.03	0.03
丰富度指数	0.22	0.22	0.25	0.17
<0.1mm 颗粒含量/%	1.78	1.65	1.76	1.85
土壤容重/ $g \cdot cm^{-3}$	0.05	0.06	0.05	0.07
土壤指标				
总孔隙度/%	1.43	1.56	1.39	1.79
有机质含量/ $g \cdot kg^{-1}$	0.68	0.75	0.12	0.14
土壤含水量/%	0.29	0.40	0.26	0.51
环境指标				
气温/ $^{\circ}C$	0.66	0.87	0.67	1.10
相对湿度/%	1.67	1.77	1.68	1.89
地表温度/ $^{\circ}C$	1.38	1.64	1.37	2.03
0-5cm 土壤温度/ $^{\circ}C$	0.84	0.99	0.82	1.19

3.5.2 不同植被恢复模式草地生态功能评价结果

在各评价指标同等重要的情况下,不同植被恢复模式与参考模式的关联度为:封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地(表 7)。其中,封育模式及沙打旺补播模式与参考模式的关联度接近,分别为 0.8679 和 0.8623,说明封育草地和沙打旺补播草地的生态功能效应较好,是干旱风沙区草地植被恢复较为理想的模式。

表 7 不同植被恢复模式草地生态效应

Tab.7 Ecological effect under different vegetation restoration patterns

恢复模式	关联度	排序
FP	0.8679	1
NP	0.8248	3
BP	0.8623	2
CK	0.7564	4

第四章 讨论

4.1 不同恢复模式对草地植物群落变化的影响

温度、光照和水分等环境因子是植物赖以生存的条件,这些因子随季节的变化而变化,因此,植物的生长和群落特征也会相应的发生明显变化。自 6—8 月,不同植被恢复模式草地植物生长加快,植物的高度、密度、频度、盖度和地上生物量开始逐渐增加,8 月达高峰期,9 月植物逐渐进入枯黄期,其高度、密度、频度、盖度和地上生物量也开始下降,在生长期植物遵循 S 型增长规律,这和彭红春等试验结果一致^[179,245-246]。可见,7、8 月份是草地植物生长最快,地上生物量积累最旺盛的时期。不同植被恢复模式的丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均以 8 月最高,9 月最低,这与郭健康等研究结果一致^[247-250]。8 月降水量较高可能是该月植物丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和生态优势度高的主要原因。9 月植物多样性下降至最低的原因可能是,此时一些一年生草本植物已经完成生活史,草本植物个体间的生长竞争导致植物的自然稀疏。

4.2 不同恢复模式对草地土壤理化性质的影响

有研究指出粘粉粒和极细砂可以显著地促进土壤紧实度和土壤持水能力的提高,其质量分数每提高 1%,相当于使土壤饱和和持水质量分数分别提高 0.18%和 0.32%,而细砂和中砂则会显著地降低土壤的紧实度。总的看来,相比未封育草地而言,封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地土壤表层(0—20cm)粉粒和极细砂粒的质量分数均有所提高,细砂粒和中砂粒的质量分数均有所降低,而深层土壤粉粒、极细砂粒、细砂粒和中砂粒的质量分数变化不明显,这与诸多研究者的结果相一致^[179,251-252]。说明封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地可以显著改善土壤表层的颗粒组成,使得表层土壤中粉粒和极细砂粒的含量增加,增强土壤的吸附能力,从而提高土壤的肥力,而对土壤深层的颗粒组成影响并不显著。造成这种差异的原因主要是表层土壤处于土壤—植物—大气的交互作用面,因此其颗粒组成更易受植被和大气的影^[253]。封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地的植被盖度增加,削弱了近地面风速,使得空中微尘降落到土壤表层,植物的枯枝落叶增加,成土作用增强,土壤粉粒和极细砂粒沉降作用明显,因而土壤表层的粉粒和极细砂粒含量明显提高,细砂粒和中砂粒的含量明显减少。

不同植被恢复模式草地的土壤有机质、全氮、速效氮、速效磷和速效钾含量均以未封育草地最低,说明封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地均有利于增加土壤有机质、全氮和速效养分含量。土壤有机质、速效磷和速效钾含量均以封育草地的最高,可能是由于封育消除了放牧和家畜的践踏作用,使其植被得以恢复,植被盖度的增加减轻了风蚀的作用,大量枯落物留存,使有机质含量增加。此外,植被盖度增大,使空气中的尘埃及细粒物质逐渐沉积,加之在水热条件的作用下,枯落物等有机物逐渐形成结皮,所以土壤速效钾和速效磷的含量较高。土壤全氮和速效氮含量均以沙打旺补播草地最高,土壤中全氮含量会随着土壤有机质含量的增加而增加,但是由于土壤中有有机质类型和腐殖化程度的不同,其含量也不尽相同,这与一些研究的结果相一致^[254]。

不同植被恢复模式的土壤有机质、速效磷和速效钾含量均呈现出明显的“表聚”现象，其表层 0—10cm 土层含量明显高于深层，这可能与土壤的表层富积作用有关^[255-257]，地表枯枝落叶等有机物质的积累与分解、植物根系的代谢对表层土壤产生了积极影响^[258-260]，植被的截存作用与根系、土壤间的物质交换作用，植被对降尘和风蚀细粒物质的作用有利于有机质在表层聚集，此外一些草本植物的根系主要集中分布于土壤表层(0—10cm)，根系与土壤的物质交换作用促进了土壤有机质的形成和积累，加之表层土壤较好的通气性促进微生物的活动，这种植物—土壤—微生物有效循环利用的环境更有利于养分的积累，而下层土壤不利于凋落物和根的分解，因而相对表层其形成的有机质较少^[261-265]。此外，上层土壤速效磷含量高可能与磷素本身在土壤中的移动性和挥发性较小有关，磷在土壤中主要借助扩散方式迁移，一般主要集中在土壤表层，因而造成表层磷过多，中下部土层磷耗竭，难以得到补充的状态，即磷素含量一般随土壤层次的加深而降低^[266-273]。

不同植被恢复模式的土壤全盐含量和 pH 值均以未封育草地最高，封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地均降低了土壤全盐含量和 pH 值，其中柠条补播草地对降低土壤 pH 值最有效。这可能与该草地植被生长发育良好有关，盖度较高的植被降低了近地面气温和风速，减少了蒸发量，抑制了盐分随毛管水上升和集聚，从而使土壤全盐含量和 pH 值降低。随土层深度加深，不同植被恢复模式的全盐含量和 pH 值均呈现出逐渐降低的趋势，土壤全盐含量表层 0—10cm 较高，土壤盐分的表聚性较强，说明土壤表层的积盐作用明显，这可能是由于降水少、蒸发量大，土壤盐分随着水分的蒸发留在土壤表层，这一结论与曹立国等在民勤绿洲对天然胡杨林土壤全盐含量的研究结果一致^[274]，李凤霞等其他人也得出相同的结果^[275-276]。

4.3 不同恢复模式对草地地表气候的影响

不同植被恢复模式的气温、土壤温度以未封育草地最高，而相对湿度则以未封育草地最低，与气温和土壤温度呈现相反的趋势，说明封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地均能起到降低气温和土壤温度，增加大气湿度的效果，主要是由于未封育草地的植被种类少，盖度低，接收的太阳辐射相对较多，使得地表土壤温度在日出之后逐渐升高，在大气湍流作用的影响下，气温也随之升高，从而引起近地面蒸腾作用的增强，相对湿度因此降低^[277-279]。这与王平等对安塞县不同退耕模式小气候的试验中得出的不同退耕模式均可起到降低大气温度和土壤温度，增加大气湿度，有效改善小气候的结果一致^[155]，徐丽萍等和周晨霓也得出相同的研究结果^[156,280]。此外，不同土层土壤温度最高值出现在 14:00 至 20:00 之间，随土层深度的增加，土壤温度最大值出现时间滞后，这可能是因为土层越深其对外界温度、太阳辐射的感应越不明显，此外温度的传递需要一个过程，因此深层土壤温度到达最高值的时间越晚。

4.4 不同恢复模式对草地土壤水分平衡的影响

土壤含水量随着降雨情况的变化发生相应的波动变化，说明降雨对土壤水分的补给作用明显。5—12 月土壤含水量为未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地，未封育草地的土

壤含水量最高,主要是由于未封育草地植被稀疏,群落结构简单,植物耗水相对较少,这与诸多研究结果相一致^[178,181,243,281-286]。随着土层深度的增加,封育草地、沙打旺补播草地和未封育草地的土壤含水量波动幅度逐渐减小,说明浅层土壤受降雨、土壤蒸发和植物蒸腾等外界的影响较大^[169-170,287],这可能是因为降雨入渗、再分布和土壤蒸发向深层传递的过程中具有一定的滞后性,这与诸多学者的研究结果一致^[104,288-289]。柠条补播草地 0—100cm 土层土壤水分受降水影响均呈现波动变化,可能是因为柠条根系延伸比其他植物深,蒸腾耗水引起根际土壤水分的波动较强烈,导致深层土壤水分的季节变化明显^[242]。不同植被恢复模式草地水分含量的变异系数随着土层深度的增加而逐渐减小,这与胡江波等对渭北旱塬丘陵沟壑区不同植被恢复模式土壤水分变化的研究结果一致^[290],产生这种现象的原因主要是由于降水首先渗入表层土壤,使其含水量迅速增加,之后因为植被耗水、地表蒸发和在重力作用表层水分向深层运动,含水量随之降低,从而使表层土壤含水量的波动较大^[291-294]。

4.5 不同恢复模式草地生态效应评价

生态效应评价可以为干旱风沙区植被恢复与重建提供基础数据,有利于区域生态系统的平衡与稳定,实现区域可持续发展。不同植被恢复模式对草地植被、土壤理化性质、环境因子均起到了改善提高的作用,在各评价指标同等重要的情况下,不同植被恢复模式与参考模式的关联度从大到小依次为:封育草地、沙打旺补播草地、柠条补播草地和未封育草地,因此从各结构指标和功能指标分析,封育模式对植被的恢复改善作用效果较好,比较适合当地实际情况,且人工封育措施操作简单易行,是干旱风沙区值得提倡的一种植被恢复治理模式。这与蒋德明等采用空间序列代替时间序列的方法分析封育对科尔沁沙地植被恢复的研究中得出的结果一致^[48]。此外补播沙打旺也是一种较好的植被恢复模式,虽然沙打旺对土壤水分的消耗较大,但并没有引起土壤水分明显亏缺,达到了最优调控和充分利用水土资源、恢复植被的目的,为农业的持续发展创造了良好的水土资源环境条件。

第五章 结论

(1) 6—9 月封育草地、柠条补播草地和沙打旺补播草地植物群落的高度、密度、频度、盖度和地上生物量均高于未封育草地，且均自 6 月开始逐渐增加，8 月达最高，9 月又有所降低；物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，而生态优势度则呈相反的趋势，各指数均以 8 月最高，9 月最低；不同植被恢复模式植物群落稳定性从大到小依次为：沙打旺补播草地、封育草地、柠条补播草地和未封育草地，其中，沙打旺补播草地植物群落稳定性最好，但总体来看，三种植被恢复模式和未封育草地的植物群落均不稳定。

(2) 与未封育草地相比，三种植被恢复模式草地 0—20cm 土层粉粒和极细砂粒的质量分数均有所提高，细砂粒和中砂粒的质量分数均有所降低；而深层土壤粉粒、极细砂粒、细砂粒和中砂粒的质量分数变化不明显。三种植被恢复模式均可降低土壤容重，有效改善草地土壤结构，增加土壤保水持水能力，尤其以沙打旺补播草地效果最好。

(3) 0—40cm 土层土壤有机质含量和速效钾含量为：封育草地>柠条补播草地>沙打旺补播草地>未封育草地，土壤全氮和速效氮含量为：沙打旺补播草地>柠条补播草地>封育草地>未封育草地，土壤速效磷含量为：封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地，土壤全盐含量和 pH 值以未封育草地最高。土壤养分剖面分布表现为：土壤有机质含量以 0—20cm 土层最高；沙打旺补播草地和柠条补播草地的土壤全氮和速效氮含量以 30—40cm 土层最高；封育草地和未封育草地的土壤全氮和速效氮含量以表层 0—10cm 土层最高；土壤速效磷、速效钾、全盐含量和 pH 值均呈以 0—10cm 土层最高。

(4) 不同恢复模式草地气温从高到低依次为：未封育草地、柠条补播草地、封育草地、沙打旺补播草地，14:00 达到峰值，呈单峰曲线；相对湿度变化为：沙打旺补播草地>封育草地>柠条补播草地>未封育草地，自 8:00-20:00 呈“V”型变化曲线；地表和地下 0—5cm、5—10cm、10—15cm 和 15—20cm 土壤温度变化一致，均为：未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地，最高值出现的时间以地表最早。

(5) 不同恢复模式草地 5—12 月土壤含水量为：未封育草地>柠条补播草地>封育草地>沙打旺补播草地，随降水的变化浅层土壤水分波动较大；随土层深度的增加，不同恢复模式草地土壤含水量变异系数逐渐减小；封育草地和沙打旺补播草地随土层加深，土壤含水量增加，柠条补播草地深层土壤的含水量则相对较低。5—7 月和 11—12 月，三种植被恢复模式草地和未封育草地土壤水分均形成了负平衡，8—10 月，土壤水分均为正平衡，且均以未封育草地正、负平衡最为明显。

(6) 不同恢复模式草地的关联度大小为：封育草地>沙打旺补播草地>柠条补播草地>未封育草地，从各结构指标和功能指标分析，封育和沙打旺补播模式对植被的恢复改善作用效果较好，是干旱风沙区值得推广的植被恢复措施。

参考文献

- [1] 李志熙,白岗栓,彭珂珊.西部生态环境建设中的问题与解决方案[J].水土保持研究, 2004, 11(2): 145-149.
- [2] 许新忠,许冬梅.宁夏荒漠草原自然恢复演替过程中生态效应的评价[J].安徽农业科学, 2012, 40(23): 11781-11783.
- [3] 陈廉杰.森林类型与水土流失关系的探讨[J].贵州林业科技, 1994, 22(1): 53-57.
- [4] 裘国旺,赵艳霞,王石立,等.气候变化对我国北方农牧交错带及其气候生产力的影响[J].干旱区研究, 2001, 18(1): 24-28.
- [5] 高素华,郭建平,刘玲,等.中国北方地区植被覆盖度的遥感解译及水土保持作用系数推算研究[J].水土保持学报, 2001, 15(3): 65-67.
- [6] 韩念勇,蒋高明,李文军,等.锡林郭勒生物圈保护区退化生态系统管理[M].北京:清华大学出版社, 2002: 1-12.
- [7] 程积民,井赵斌,金晶炜,等.黄土高原半干旱区退化草地恢复与利用过程研究[J].中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 267-279.
- [8] Zhang J T, Ru W M, Li B. Relationships between vegetation and climate on the Loess Plateau in China [J]. Folia Geobotanica, 2006, 41(2): 151-163.
- [9] Slimani H, Aidoud A, Roze F. 30 years of protection and monitoring of a steppic rangeland undergoing desertification. [J]. Journal of Arid Environment, 2010, 74: 685-691.
- [10] Simmons M T, Venhaus H C, Windhager S. Exploiting the attributes of regional ecosystems for landscape design: the role of ecological restoration in ecological engineering. [J]. Ecological Engineering, 2007, 30: 201-205.
- [11] Wang X H, Yu J B, Zhou D, et al. Vegetative ecological characteristics of restored reed(*Phragmites australis*) wetlands in the Yellow River Delta, China. [J]. Environment Management, 2012, 49: 325-333.
- [12] 中国植被编辑委员会[M].中国植被.北京:科学出版社, 1995, 1-8.
- [13] 孙保平,关文彬,赵廷宁,等.21 世纪中国荒漠化预防及治理技术研究展望[J].中国农业科技导报, 2000, 2(1): 54-57.
- [14] 陈芳,马全林,张德魁,等.干旱荒漠区植被恢复动态遥感监测[J].草业科学, 2011, 28(6): 1075-1078.
- [15] Wang X H, Yu J B, Zhou D, et al. Vegetative ecological characteristics of restored reed(*Phragmites australis*) wetlands in the Yellow River Delta, China. [J]. Environment Management, 2012, 49: 325-333.
- [16] Gattie D K, Smith M C, Tollner E W, et al. The emergence of ecological engineering as a discipline [J]. Ecological Engineering, 2003, 20: 409-420.
- [17] 张继义,赵哈林.退化沙质草地恢复过程土壤颗粒组成变化对土壤—植被系统稳定性的影响[J].生态环境学报, 2009, 18(4): 1395-1401.
- [18] 张继义,赵哈林.植被(植物群落)稳定性研究评述[J].生态学杂志, 2003, 22(4): 42-48.

- [19] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000:67-68.
- [20] Paniagua A, Kammerbayuer J, Avedillo M, et al. Relationship of soil characteristics to vegetation successions on a sequence of degraded and rehabilitated soils in Honduras [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1999, 72: 215-255.
- [21] 王健胜,刘沛松,杨雨华,等.低山丘陵区不同植被修复模式下土壤养分特征分析[J].*江苏农业科学*, 2013, 41(11): 358-360.
- [22] 段文军,王金叶,李海防.华南退化生态系统三种典型生态恢复模式的小气候效应研究[J].*生态环境学报*, 2014, 23(6): 911-916.
- [23] 王平平,杨改河,梁爱华,等.安塞县几种典型退耕模式小气候效应研究[J].*西北农业学报*, 2010, 19(10): 107-111,115.
- [24] 林永标,申卫军,彭少麟,等.南亚热带鹤山三种人工林小气候效应对比[J].*生态学报*, 2003, 23(8): 1657-1666.
- [25] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartley A E, et al. On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. [J]. *Ecology*, 1996, 77: 364-374.
- [26] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: a case study in Hexi Corridor, Northwest China. [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 117-124.
- [27] 刘发民,张应华,仵彦卿,等.黑河流域荒漠地区梭梭人工林地土壤水分动态研究[J].*干旱区研究*, 2002, 19(1): 27-31.
- [28] 王兵,崔向慧.民勤绿洲—荒漠过渡区水量平衡研究[J].*生态学报*, 2004, 24(2): 235-240.
- [29] 张俊华,常庆瑞,贾科利,等.黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J].*水土保持学报*, 2003, 17(4): 38-41.
- [30] Fan H, Pan X D, Li Y Y et al. Evaluation of soil environment after saline soil reclamation of Xinjiang Oasis, China [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(3): 471-476.
- [31] 向师庆.灌草丛根系保持土壤资源的研究[J].*北京林业大学学报*, 1988, 10(4): 23-29.
- [32] 关君蔚.水土保持原理[M].北京:北京林业大学出版社, 1986, 55-60.
- [33] 黄利江,于卫平,张广才,等.盐池沙地水分与植被恢复关系的研究[J].*林业科学研究*, 2004, 17(增刊): 148-151.
- [34] 新荣,石庆辉,张景光,等.沙坡头地区人工植被演变中植物多样性研究[J].*中国沙漠*, 1998, 18(增刊): 23-29.
- [35] 张国盛,王林和,董智,等.毛乌素沙地主要固沙灌(乔)木林地水分平衡研究[J].*内蒙古农业大学学报*, 2002, 23(3): 1-9.
- [36] 陈有君,关世英,李绍良,等.内蒙古浑善达克沙地土壤水分状况的分析[J].*干旱区资源与环境*, 2000, 14(1): 80-85.
- [37] Schindler, D.W. Recent advances in the understanding and management of eutropication [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 405:140-152.
- [38] Kirmer A, Mahn E G. Spontaneous and initiated succession on unvegetated slope sites in the abandoned lignite-mining area of Goitsche, Gemany [J]. *Applied Vegetation Science*, 2001,

- 4: 19-28.
- [39] 苏日娜.谈牧草补播机械化技术的应用[J].农村牧区机械化, 2002(4): 72-73.
- [40] 李永宏.内蒙古典型草原地带退化草原的恢复动态[J].生物多样性, 1995, 3(3): 125-130.
- [41] 刘欣,李青云,英陶.封育、灌溉、补播改良荒漠草地的效果[J].青海畜牧兽医杂志, 1995, 25(3): 14-16.
- [42] 王燕.封育模式对干旱区沙地植被恢复影响研究[D].兰州:甘肃农业大学, 2009.
- [43] 李军保,朱进忠,吐尔逊娜依·热依木江,等.围栏封育对昭苏马场春秋草场植被恢复的影响[J].草原与草坪, 2007, 125(6): 45-48.
- [44] 王海瑞.典型草原退化群落不同恢复演替阶段土壤物理性质及渗水性能的研究[J].呼和浩特: 内蒙古大学, 2011.
- [45] 姜世成,周道玮.过牧、深翻及封育三种方式对退化羊草草地的影响[J].中国草地, 2002, 24(5): 5-9.
- [46] 王蕙,王辉,黄蓉,等.不同封育管理对沙质草地土壤与植被特征的影响[J].草业学报, 2012, 21(6): 15-22.
- [47] 孙宗玖,安沙舟,段娇娇. 围栏封育对新疆蒿类荒漠草地植被及土壤养分的影响[J].干旱区研究, 2009, 26(6): 877-882.
- [48] 蒋德明,苗仁辉,押田敏雄,等.封育对科尔沁沙地植被恢复和土壤特性的影响[J].生态环境学报, 2013, 22(1): 40-46.
- [49] 康博文,刘建军,侯琳,等.蒙古克氏针茅草原生物量围栏封育效应研究[J].西北植物学报, 2006, 26(12): 2540-2546.
- [50] 闫志坚,孙红.不同改良措施对典型草原退化草地植物群落影响的研究[J].四川草原草地生态, 2005, 114(5): 54-57.
- [51] 王吉云,孙宗玖,安沙舟,等.补播对天然割草场植被恢复效果的初步研究[J].新疆农业科学, 2011, 48(4): 690-695.
- [52] 杨春华,李向林,张新全,等.秋季补播多花黑麦草对扁穗牛鞭草草地产量、质量和植物组成的影响[J].草业学报, 2004(6): 80-86.
- [53] Wang W Y, Wang Q J, Wang H C. The effect of land management on plant community composition, species diversity, and productivity of alpine *Kobersia* steppe meadow[J].Ecological Research, 2006(21): 181-187.
- [54] 张云,武高林,任国华,等.封育后补播“高寒 1 号”生态草对玛曲退化高寒草甸生产力的影响[J].草业科学, 2009, 26(7): 99-104.
- [55] 舒思敏,杨春华,陈灵鸫.补播豆科牧草对扁穗牛鞭草草地的影响[J].草业科学, 2011, 28(6): 1041-1043.
- [56] 张永超,牛得草,韩潼,等.补播对高寒草甸生产力和植物多样性的影响[J].草业学报, 2012, 21(2): 305-309.
- [57] 李良臣,柯建武,呼和.盐碱化草牧场改良试验报告[J].内蒙古草业, 2003(4): 36-37.
- [58] 王建军,董宽虎,杨桂英,等.条带式改良陡坡草地的研究[J].中国草地, 1994(2): 49-52.
- [59] 卜繁超,姚文军.天然草地机械化补播改良技术及配套机具[J].新疆农机化, 2002(5):

- 10-12.
- [60] 安渊,王育青,陈敏等.沙地草场补播技术及其生态效益研究[J].草地学报, 1997, 5(1): 33-41.
- [61] 陈亚明.退化嵩草型高山草地补播豆科牧草的研究[J].草业学报, 1999, 8(2): 71-75.
- [62] 凌侠,董智,孙保平,等.盐池沙地退化草场植被恢复与流沙防治效果分析[J].内蒙古农业大学学报, 2004, 25(4): 38-42.
- [63] 郑华平,陈子萱,牛俊义,等.补播禾草对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响[J].草业学报, 2009, 18(3): 28-33.
- [64] 陈子萱,田福平,时永杰,等.补播对玛曲高寒沙化草地物种丰富度和生物量的影响[J].南方农业学报, 2011, 42(6): 635-638.
- [65] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, Hu T M, Chen J M. Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland [J]. Plant Soil, 333: 469-479.
- [66] 张继义,赵哈林,张铜会,等.科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J].植物生态学报, 2004, 28(1): 86-92.
- [67] 白文娟,焦菊英.黄土丘陵区退耕地主要自然恢复植物群落的多样性分析[J].水土保持研究, 2006, 13(3): 140-142,145.
- [68] 刘小丹,李瑞,张克斌,等.半干旱区人工封育草场植物群落物种多样性与复杂性研究[J].生态环境学报, 2014, 23(7): 1093-1101.
- [69] 卜耀军,张雄,艾海舰,等.榆林风沙草滩区物种多样性研究[J].水土保持通报, 2008, 28(4): 80-85.
- [70] 王震洪.基于植物多样性的生态系统恢复动力学原理[J].应用生态学报, 2007, 19(9): 1965-1971.
- [71] 张继义,赵哈林.短期极端干旱事件干扰下退化沙质草地群落抵抗力稳定性的测度与比较[J].生态学报, 2010, 30(20): 5456-5465.
- [72] 曹永翔,张克斌,王海星,等.不同封育年限对盐池县植被多样性及生物量的影响研究[J].林业调查规划, 2009, 34(4): 8-11,18.
- [73] 於方,周昊,许申来.生态恢复的环境效应评价研究进展[J].生态环境学报, 2009, 18(1): 374-379.
- [74] Kindscher K, Tieszen L L. Floristic and soil organic matter changes after five and thirty-five years of native tall grass prairie restoration [J]. Restoration Ecology, 1998, 6: 181-196.
- [75] 边振,张克斌,李瑞等.封育措施对宁夏盐池半干旱沙地草场植被恢复的影响研究[J].水土保持研究,2008,15(5):68-70.
- [76] 吴建波,包晓影,李洁,等.不同围封年限对典型草原群落及大针茅种群特征的影响[J].草地学报, 2010, 18(4): 490-495.
- [77] 赵哈林,张铜会,常学礼,等.科尔沁沙质放牧草地植物多样性及生态位的分异规律研究[J].中国沙漠, 1999, 19(1): 35-39.
- [78] 杨晓晖,张克斌,侯瑞萍等.半干旱沙地封育草场的植被变化及其与土壤因子间的关系[J].

- 生态学报, 2005, 25(12): 3212-3219.
- [79] 李红艳,杨晓辉,黄选瑞,等.盐池封育草场土壤种子库特征及其与植被的关系[J].生态环境, 2007, 16(2): 533-537.
- [80] 吕世海,冯长松,高吉喜,等.呼伦贝尔沙化草地围封效应及生物多样性变化研究[J].草地学报, 2008, 16(5): 442-447.
- [81] Petraitis P S, Latham R E, Niesenbaum R A. The maintenance of species diversity by disturbance [J]. *Quarterly Review of Biology*, 1989, 64: 393-418.
- [82] 闫玉春,唐海萍,辛晓平,等.围封对草地的影响研究进展[J].生态学报, 2009, 29(9): 5039-5046.
- [83] 刘凤婵,李红丽,董智,等.封育对退化草原植被恢复及土壤理化性质影响的研究进展[J].中国水土保持科学, 2012, 10(5): 116-122.
- [84] 孙宗玖,安沙舟,马金昌.围栏封育对草原植被及多样性的影响[J].干旱区研究, 2007, 24(5): 669-674.
- [85] 张勇娟.围栏封育下蒿类草地群落的变化及其适应性的研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学, 2010.
- [86] 宝音陶格涛,陈敏.退化草原封育改良过程中植物种的多样性变化的研究[J].内蒙古大学学报: 自然科学版, 1997, 28(1): 87-91.
- [87] 闫玉春,唐海萍.围栏禁牧对内蒙古典型草原群落特征的影响[J].西北植物学报, 2007, 27(6): 1225-1232.
- [88] Foster B L, Timan D. Seed limitation and the regulation of community structure in oak savanna grassland [J]. *Journal of Ecology*, 2003, 91: 999-1007.
- [89] 包宗武,苗玉华.补播在草地植被恢复中的作用及其研究进展[J].安徽农学通报, 2008, 14(5): 71-72.
- [90] 冯忠心,周娟娟,王欣荣,等.补播和划破草皮对退化亚高山草甸植被恢复的影响[J].草业科学, 2013, 30(9): 1313-1319.
- [91] 徐坤,谢应忠,郑国琴.植被稳定性研究进展[J].宁夏农学院学报, 2004, 25(4): 58-61,66.
- [92] 王国宏.再论生物多样性与生态系统的稳定性.生物多样性, 2002, 10(1): 126-134.
- [93] McGrady-Steed J, Morin P J. Biodiversity, density compensation, and the dynamics of populations and functional groups [J]. *Ecology*, 2000, 81(2): 361-373.
- [94] Stephen H R. Stability and coexistence in a lawn community: experimental assessment of the stability of the actual community [J]. *Oikos*, 2000(88): 409-423.
- [95] David A W. Stability of ecosystem properties in response to above-ground functional group richness and composition [J]. *Oikos*, 2000(89): 409-423.
- [96] 草成有,朱丽辉,蒋得明,等.固沙植物群落稳定性机制的探讨[J].中国沙漠, 2004, 24(3): 274-278.
- [97] 草成有,蒋得明,骆永明,等.小叶锦鸡儿防风固沙林稳定性研究[J].生态学报, 2004, 24(6): 1178-1185.
- [98] 冶民生,吴斌,关文彬,等.岷江上游植物群落稳定性研究[J].水土保持研究, 2009, 16(1):

- 259-263.
- [99] Frank D A, McNaughton S J. Stability increases with diversity in plant communities: empirical evidence from the 1988 Yellowstone drought [J]. *Oikos*, 1991, 62(3): 360-362.
- [100] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability [J]. *Ecology*, 1996, 77(2): 350-363.
- [101] 王永健,陶建平,彭月.陆地植物群落物种多样性研究进展[J].*广西植物*, 2006, 26(4): 406-441.
- [102] 王鲜鲜,张克斌,王晓,等.宁夏盐池四儿滩湿地一干草原植被群落稳定性研究[J].*生态环境学报*, 2013, 22(5): 743-747.
- [103] 吕光辉,杜昕,杨建军,等.阜康绿洲—荒漠化交错带荒漠植被群落稳定性[J].*干旱区地理*, 2007, 30(5): 660-665.
- [104] 马红彬.宁夏黄土高原丘陵区长芒草典型草原土壤和植被对不同土地干扰的响应[D].宁夏:宁夏大学, 2007.
- [105] 曲国辉,郭继勋.松嫩平原不同演替阶段植物群落和土壤特性的关系[J].*草业学报*, 2003, 12(1): 18-22.
- [106] 左小安,赵学勇,赵哈林.沙地退化植被恢复过程中灌木发育对草本植物和土壤的影响[J].*生态环境学报*, 2009, 18(2): 643-647.
- [107] 席承藩.植被与土壤在生态系统中休戚相关.姜恕.植被生态学研究-纪念生态学家侯学煜教授[M].北京:科学出版社, 1994, 75-80.
- [108] 王伯荪,彭少麟.植被生态学[M].北京:环境科学出版社, 1997, 20-28.
- [109] 徐凤兰,魏坦,刘爱琴.杉木泡桐混交林地土壤的物理性质[J].*浙江林学院学报*, 2000, 17(3): 85-288.
- [110] 欧阳学军,黄忠良,周国逸,等.鼎湖山南亚热带森林群落演替对土壤化学性质的累积效应研究[J].*水土保持学报*, 2003, 17(4): 51-54.
- [111] 宋日,吴春胜,牟金明,等.深松土对玉米根系生长发育的影响[J].*吉林农业大学学报*, 2000, 22(4): 73-75.
- [112] 王秀兰.土地利用变化研究方法探讨[J].*地球科学进展*, 1999, 18(1): 81-86.
- [113] 李志洪,王淑华.土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响[J].*土壤通报*, 2000, 31(2): 55-58.
- [114] Chen L D, Wei W, Fu B J. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective[J]. *Progress in Physical Geography*, 2007, 31(4): 389-403.
- [115] Fu X L, Shao M A, Wei X R, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China [J]. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31-35.
- [116] Zhou Z Z, Shangguan Z P, Zhao D L. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China[J].*Ecological Modelling*, 2006, 198(1/2): 263-268.
- [117] Zhang X P, Zhang L, Mcvicar T R, et al. Modelling the impact of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(12):1996-2004.

- [118] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报, 2011, 27(6): 36-41.
- [119] 薛萋,刘国彬,戴全厚,等.不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响[J].自然资源学报, 2007, 22(1): 20-27.
- [120] 樊华,杨志国,丛志军,等.防护林带和封育对沙化草场土壤理化性质的影响[J].中国水土保持科学, 2007, 5(6): 43-46.
- [121] 苏永中,赵哈林,文海燕.退化沙质草地开垦和封育对土壤理化性状的影响[J].水土保持学报, 2002, 16(4): 5-8,126.
- [122] 赵彩霞,郑大玮,何文清,等.不同围栏年限冷蒿草原群落特征与土壤特性变化的研究[J].草业科学, 2006, 23(12): 89-92.
- [123] 单贵莲,徐柱,宁发,等.围封年限对典型草原植被与土壤特征的影响[J].草业学报, 2009, 18(2): 3-10.
- [124] 邵新庆,石永红,韩建国,等.典型草原自然演替过程中土壤理化性质动态变化[J].草地学报, 2008, 16(6): 567-571.
- [125] 文海燕,赵哈林,傅华.开垦和封育年限对退化沙质草地土壤性状的影响[J].草业学报, 2005, 14(6): 3-4.
- [126] 赵勇钢,赵世伟,曹丽花,等.典型草原区退耕及封育草地土壤水分物理性质研究[J].水土保持通报, 2007, 27(6): 41-45.
- [127] 张伟华,关世英,李跃进,等.不同恢复措施对退化草地土壤水分和养分的影响[J].内蒙古农业大学学报, 2000, 21(4): 31-35.
- [128] 蒋德明,贺山峰,曹成有,等.翻耙补播对科尔沁碱化草地土壤理化性质和生物活性的影响[J].中国草地学报, 2006, 28(4): 18-23.
- [129] 熊平生,王鹏.红壤丘陵区不同生态恢复模式的土壤生态效益[J].水土保持报, 2014, 34(2): 30-33.
- [130] 牛西午.柠条的栽培和利用[M].太原:山西科学教育出版社, 1988.
- [131] 牛西午,张强,杨治平,等.柠条人工林对晋西北土壤理化性质变化的影响研究[J].西北植物学报, 2003, 23(4): 628-632.
- [132] 安韶山,黄懿梅.黄土丘陵区柠条林改良土壤作用的研究[J].林业科学, 2006, 42(1): 70-73.
- [133] 张晋爱,张兴昌,邱丽萍,等.黄土丘陵区不同年限柠条林地土壤质量变化[J].农业环境科学学报, 2007, 26: 136-140.
- [134] 张飞,陈云明,王耀凤,等.黄土丘陵区半干旱区柠条林对土壤物理性质及有机质的影响[J].水土保持研究, 2010, 17(3): 105-109.
- [135] 张勇,庞学勇,包维楷,等.土壤有机质及其研究方法综述[J].世界科技研究与发展, 2005, 27(5): 72-78.
- [136] 徐秋芳,姜培坤,董敦义,等.毛竹林地土壤养分动态研究[J].竹子研究汇刊, 2000, 25(增刊): 67-68.
- [137] FUB J, WANG J, CHEN L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the

- Danangou catchment of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2003, 54 (1-2): 197-213.
- [138] Stolte J, Van V, Zhang B G, et al. Landuse induced spatial heterogeneity of soil hydraulic properties on the Loess Plateau in China [J]. *Catena*, 2003, 54 (1-2): 59-75.
- [139] An S S, Huang Y M, Zheng F L. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41: 286-292.
- [140] 游秀花,蒋尔可.不同森林类型土壤化学性质的比较研究[J].江西农业大学学报, 2005, 27(3): 357-360.
- [141] 彭文英,张科利,陈瑶,等.黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J].自然资源学报, 2005, 20 (2): 272-278.
- [142] 郑云玲.封育对典型草原牧草及土壤养分的恢复效应[J].呼和浩特:内蒙古大学, 2008.
- [143] 王国良,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J].水土保持通报, 2002, 22(11): 1-5.
- [144] 王永昌,张金池.封育补植恢复森林植被的土壤改良效应[J].林业科技开发, 2007, 21(4): 25-28.
- [145] 高盛香.柠条带间补播优良牧草是黄土高原丘陵山地及沙地自然植被恢复的有效途径——内蒙古自治区东胜市灌草结合型人工草地建设的考察报告[J].内蒙古教育学院学报, 1995(2-3): 193-195.
- [146] 陈云云,潘占军,王占军,等.宁夏干旱风沙区人工柠条林内植被恢复的研究[J].宁夏农林科技, 2004(3): 4-8.
- [147] 张远彬,王开运,鲜骏仁,等.川西亚高山白桦林小气候的时空动态特征[J].应用与环境生物学报, 2006, 12(3): 297-303.
- [148] 毛丹,唐玉贵,黎建雄,等.桂东丘陵地区人工林小气候效应对比[J].广西林业科学, 2009, 38(3): 158-162.
- [149] 陈宏志,胡庭兴,龚伟,等.我国森林小气候的研究现状[J].四川林业科技, 2007, 28(2): 29-32.
- [150] 闫文德,田大伦.樟树人工林小气候特征研究[J].西北林学院学报, 2006, 21(2): 30-34.
- [151] Wales B A. Climate, microclimate, and vegetation relationships on north and south forest boundaries[J]. *Hutcheson Memorial Forest Bulletin*, 1967(2): 1-60.
- [152] 周璋.海南尖峰岭热带山地雨林小气候特征研究[D].北京:中国林业科学研究院, 2009.
- [153] 李宗峰,陶建平,王微,等.岷江上游退化植被不同恢复阶段群落小气候特征研究[J].生态学杂志, 2005, 24(4): 364-367.
- [154] 李岚岚,赵东,赵勇,等.黄河小浪底库区不同恢复阶段群落小气候特征研究[J].河南农业大学学报, 2007, 41(1): 42-46.
- [155] 王平平,杨改河,梁爱华,等.安塞县几种典型退耕模式小气候效应研究[J].西北农业学报, 2010, 19(10): 107-111,115.
- [156] 徐丽萍,杨改河,冯永忠,等.黄土高原人工植被对局地小气候影响的效应研究[J].水土保持研究, 2010, 17(4): 170-179.

- [157] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社, 2006: 278-287.
- [158] 邵孝侯,王宇,毕利东,等.基于最优分割理论的土壤水分有效性评价[J].农业工程学报, 2010, 26(3): 106-111.
- [159] 吴元芝.黄土区土壤水分对典型作物有效性的研究[D].北京:中国科学院研究生院, 2010.
- [160] 潘英华,雷廷武,张晴雯,等.土壤结构改良剂影响下的土壤水分有效性的研究[J].灌溉排水学报, 2007, 26(5): 63-67.
- [161] 赵秀兰,邹立尧,沈能展,等.黑龙江省农田土壤蓄水量盈亏状况的垂直变化规律研究[J].东北农业大学学报, 2002, 33(2): 147-151.
- [162] 寇俊卿,张海涛,王跃明,等.农业优化灌溉中灌溉时间和灌溉量的确定[J].洛阳工学院学报, 2002, 23(3): 4-6.
- [163] 李新荣,张志山,王新平,等.干旱区土壤—植被系统恢复的生态水文学研究进展[J].中国沙漠, 2009, 29(5): 845-852.
- [164] 姜俊桥,段昌群,杨树华,等.植物生态学[M].北京:高等教育出版社, 2004.
- [165] 崔向慧.干旱半干旱沙区人工植被与土壤水分环境相互作用关系研究进展[J].世界林业研究, 2010, 23(6): 50-54.
- [166] 陈林,王磊,张庆霞,等.风沙区不同土地利用类型的土壤水分灰色关联分析[J].干旱区研究, 2009, 26(6): 840-845.
- [167] 崔国发.固沙林水分平衡与植被建设可适度探讨[J].北京林业大学学报, 1998, 20(6): 89-94.
- [168] 高阳,高甲荣,温存,等.宁夏盐池沙地土壤水分条件与植被分布格局[J].西北林学院学报, 2006, 21(6): 1-4.
- [169] 黄磊,张志山,陈永乐.干旱人工固沙植被区土壤水分动态随机模拟[J].中国沙漠, 2013, 33(2): 568-573.
- [170] 何芳兰,李治元,赵明,等.民勤绿洲盐碱化退耕地植被自然演替及土壤水分垂直变化研究[J].中国沙漠, 2010, 30(6): 1374-1380.
- [171] Simmons M T, Archer S R, Teague W R, et al. Tree (*Prosopis glandulosa*) effects on grass growth: An experimental assessment of above-and belowground interactions in a temperate savanna [J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, 72(4): 314-325.
- [172] 梁少民,张希明,曾凡江,等.沙漠腹地乔木状沙拐枣对灌水量的生理生态响应[J].中国沙漠, 2010, 30(6): 1348-1353.
- [173] 高天鹏,王春燕,张勇,等.播种深度和土壤水分对黄花补血草种子萌发的影响[J].中国沙漠, 2009, 29(3): 529-535.
- [174] 刘孝勇,宋乃平,何秀珍,等.北方农牧交错带草地建植模式及效益比较研究——以宁夏盐池县马儿庄为例[J].草业科学, 2011, 28(5): 813-818.
- [175] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱区坡地土壤水分、养分及生产力空间变异[J].应用生态学报, 2004, 15(11): 2061-2066.
- [176] 紫檀,潘志华,安萍莉,等.北方农牧交错带不同退耕方式下土壤水分变化特征[J].中国农

- 业大学学报, 2008, 13(6): 6-10.
- [177] 王治国,张云龙,刘徐师,等.林业生态工程学[M].北京:中国林业出版社, 2000.
- [178] 胡小龙,张文军,樊文颖,等.毛乌素沙地不同盖度油蒿群落土壤水分特征研究[J].内蒙古林业科技, 1996(3/4): 32-37.
- [179] 傅华,陈亚明,周志宇,等.阿拉善荒漠草地恢复初期植被与土壤环境的变化[J].中国沙漠, 2003, 23(6): 661-664.
- [180] 闫志坚,陈敏,安渊,等.大针茅+羊草退化草场改良技术的研究[J].中国草地, 2002, 24(3): 7-11.
- [181] 孙栋元.封育沙地土壤水分生态特征研究[D].兰州:甘肃农业大学, 2007.
- [182] 张雷明,上官周平.黄土高原土壤水分与植被生产力的关系[J].干旱区研究, 2002, 19(4): 59-62.
- [183] 陈云云,谢应忠.退化草地恢复过程中植被与环境动态特征研究[J].宁夏农学院学报, 2004, 25(1): 21-24,39.
- [184] 王晓江,章中,赵文义.荒漠草原土壤水分动态研究[J].内蒙古林业科技, 1994(3): 15-20.
- [185] Walter H. Grassland, Savanne, vonden Busch der ariden Teile Afrikas in ihrer okologischen Bedingtheit [J]. Jahrbuecher fuer Wissenschaftliche Botanik, 1984(87): 750-860.
- [186] 穆兴民.黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J].农业工程学报, 2000, 16(2): 41-45.
- [187] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水文循环的影响[J].生态学报, 1983, 3(2): 91-101.
- [188] 张建军,李慧敏,徐佳佳.黄土高原水土保持林对土壤水分的影响[J].生态学报, 2011, 31(23): 7056-7066.
- [189] 陈洪松,邵明安,王克林.黄土区深层土壤干燥化与土壤水分循环特征[J].生态学报, 2005, 25(10): 2491-2498.
- [190] 中国大百科全书总编辑委员会.中国大百科全书环境科学[M].北京:中国大百科全书出版社, 1993.
- [191] 刘杰,杨志峰,崔保山,等.人为干扰下的生态负效应研究综述[J].生态学杂志, 2005, 24(11): 1317-1322.
- [192] 刘文耀,盛才余,刘伦辉.云南南涧干热退化山地植被恢复重建及其效益初析[J].广西植物, 1993, 19(3): 215-220.
- [193] 彭少麟.中国亚热带退化生态系统的恢复及其生态效应[J].应用与环境生物学报, 1995, 1(4): 403-414.
- [194] 温远光,黄棉.大明山中山植被恢复过程植物物种多样性的变化[J].物生态学报, 8, 22(1): 33-40.
- [195] 高贤明,黄建辉,万师强,等.秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究Ⅱ演替系列的群落多样性特征[J].生态学报, 1997, 17(6): 619-625.
- [196] 胡婵娟,郭雷.植被恢复的生态效应研究进展[J].生态环境学报, 2012, 21(9): 1640-1646.
- [197] 彭红春,李海英,沈振西.国内生态恢复研究进展[J].草地生态, 2003(3): 1-4.

- [198] 肖辉杰,丁国栋,贾瑞燕,等. 京郊荒滩生态恢复初期植被与土壤环境的变化——以延庆县为例[J]. 干旱区农业研究, 2005, 23(5): 202-207.
- [199] 卢晓杰,李瑞,张克斌. 宁夏盐池县不同荒漠化治理措施植物群落稳定性分析[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 100-106.
- [200] 刘小丹,张克斌,王黎黎,等. 封育对干旱风沙区沙化草地群落特征的影响[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(2): 48-54.
- [201] 刘欣,李青云,英陶. 封育、灌溉、补播改良荒漠草地的效果[J]. 青海畜牧兽医杂志, 1995(3): 14-16.
- [202] 陈子萱,田福平,武高林,等. 补播禾草对玛曲高寒沙化草地各经济类群地上生物量的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(4): 58-62.
- [203] 陈四龙,陈素英,孙宏勇,等. 耕作方式对冬小麦棵间蒸发及水分利用效率的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 817-818.
- [204] 杨文治,邵明安编著. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京:科学出版社, 2000, 40-160.
- [205] Godron M. Some aspects of heterogeneity in grasslands of Cantal [J]. *Statistical Ecology*, 1972(3): 397-415.
- [206] 郝智如,张克斌,王冠琪. 不同荒漠化防治措施对植物群落稳定性的影响——以宁夏回族自治区盐池县为例[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49(4): 99-104.
- [207] 王黎黎,张克斌,程中秋,等. 围栏封育对半干旱区植物群落稳定性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(5): 86-90.
- [208] Whittaker R H. Net production relation of shrubs in the Great Smoky Mountains [J]. *Ecology*, 1962, 43: 357-377.
- [209] 李景文. 森林生态学[M]. 北京:中国林业出版社, 1994, 100-103.
- [210] 张峰,上官铁梁,李素珍. 关于灌木生物量建模方法的改进[J]. 生态学杂志, 1993, 12(6): 67-69.
- [211] 侯扶江,南志标,肖金玉,等. 重牧退化草地的植被、土壤及其耦合特征[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 915-922.
- [212] 李裕元,邵明安. 子午岭植被自然恢复过程中植物多样性的变化[J]. 生态学报, 2004, 24(2): 252-260.
- [213] 张笑培,杨改河,胡江波,等. 不同植被恢复模式对黄土高原区丘陵沟壑区土壤水分生态效应的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(4): 635-642.
- [214] Acosta Martinez V, Reicher Z, Bischoff M, et al. The role of tree leafmulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality [J]. *Biological Fert Soils*, 1999, 29: 55-61.
- [215] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction [J]. *Soil Till Restoration*, 1995, 35: 53-68.
- [216] Hernandez T, Garcia C, Reinhardt I. Short-term effect of wild fire on the chemical biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soil [J]. *Biological Forest Soils*, 1997, 25: 109-116.
- [217] Lowery B, Swan J. Physical properties of selected soils by erosion class [J]. *Soil Water*

- Conserve, 1995, 50: 306-311.
- [218] 郑纪勇,邵明安,张兴昌,黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报, 2004, 18(3): 53-56.
- [219] 王丽,梦丽,张金池,等.不同植被恢复模式下矿区废弃地土壤水分物理性质研究[J].中国水土保持, 2010(3): 54-58.
- [220] 王占军,蒋齐,潘占兵,等.宁夏毛乌素沙地不同密度柠条林对土壤结构及植物群落特征的影响[J].水土保持研究, 2005, 12(6): 123-125.
- [221] 王昭艳,左长清,曹文洪,等.红壤丘陵区不同植被恢复模式土壤理化性质相关分析[J].土壤学报, 2011, 48(4): 715-724.
- [222] 王占军,蒋齐,刘华,等.宁夏干旱风沙区林药间作生态恢复措施与土壤环境效应响应的研究[J].水土保持学报, 2007, 21(4): 90-93.
- [223] 李德生,张萍,张水龙,等.黄前库区森林地表径流水移动规律的研究[J].水土保持学报, 2004, 18(1): 78-81.
- [224] 李生宝,王占军,王月玲,等.宁南山区不同生态恢复措施对土壤环境效应影响的研究[J].水土保持学报, 2006, 20(4): 20-22.
- [225] 陈立新著.人工林土壤质量演变与调控[M].北京:科学出版社, 2004.
- [226] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 1999.
- [227] 崔晓阳.东北森林氮素营养的生态学[M].哈尔滨:东北林业大学出版社, 1998.
- [228] 山仑,徐炳成.黄土高原半干旱地区建设稳定人工草地的探讨[J].草业学报, 2009, 18(2): 1-2.
- [229] 袁春明,郎南军,孟广涛,等.长江上游云南松林水土保持生态效益的研究[J].水土保持学报, 2002, 16(2): 87-90.
- [230] 王思成,王月玲,许浩,蔡进军.半干旱黄土丘陵区不同植被恢复方式下土壤理化特性及相关分析[J].西北农业学报, 2009, 18(1): 295-299.
- [231] 李学垣.土壤化学[M].北京:高等教育出版社, 2001.
- [232] 吕国红,周莉,贾庆宇,等.辽河三角洲主要植被类型土壤水盐含量研究[J].气象与环境学报, 2010, 26(6): 65-70.
- [233] 魏孝荣,邵明安.黄土沟壑区小流域土壤 PH 值的空间分布及条件模拟[J].农业工程学报, 2009, 25(5): 61-67.
- [234] 董环,刘慧颖,韩琰祚,等.不同施氮方式对壤质草甸土土壤 PH 值及全氮磷钾含量的影响[J].玉米科学, 2012, 20(1): 115-118, 127.
- [235] 牛辉,庄嘉,胡冬冬,等.广西凤山县退耕还林土壤效应及生态效益评价研究[J].安徽农业科学, 2013, 41(5): 2054-2057.
- [236] 乔照华.土壤凋萎系数的影响因素研究[J].水资源与水工程学报, 2008, 19(2): 82-84.
- [237] 赵世伟,周印东,吴金水.子午岭次生植被下土壤蓄水性能及有效性研究[J].西北植物学报, 2003, 23(8): 1389-1392.
- [238] 孙中峰,张学培,刘卉芳,等.晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究[J].干旱区研究, 2004, 21(4): 343-347.

- [239] 陈林,张庆霞,宋乃平,等.风沙区灌溉与非灌溉紫花苜蓿地土壤水分时空变化分析[J].干旱区资源与环境, 2010, 24(1): 158-162.
- [240] 孙中峰,张学培,张晓明,等.晋西黄土区林地坡面土壤水分异质性研究[J].干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 81-86.
- [241] 张波,张建军,李铁涛,等.黄土区刺槐林地土壤水分剖面的垂直分层[J].中国水土保持科学, 2010, 8(4): 39-44.
- [242] 王孟本,李洪建.晋西北黄土区人工林土壤水分动态的定量研究[J].生态学报, 1995, 15(2): 178-184.
- [243] 莫保儒,蔡国军,杨磊,等.半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征[J].生态学报, 2013, 33(3): 4011-4020.
- [244] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [245] 彭红春,李海英,沈振西,等.利用人工种草改良柴达木盆地弃耕盐碱地[J].草业学报, 2003, 12(5): 26-30.
- [246] 常学礼,李胜功.科尔沁沙地草场植物组成及生物量动态的研究[J].草业科学, 1994, 11(6): 48-51.
- [247] 郭健康,赵敏杰,陶季,等.内蒙古奈曼地区沙地植物多样性及其季节变化研究[J].中央民族大学学报(自然科学版), 2008, 17: 121-125.
- [248] Whittaker R H. Evolution of measurement of species diversity [J]. Taxon, 1972, 21: 213-251.
- [249] 王倩,艾应伟,裴娟,等.遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征[J].生态学报, 2010, 30(24): 6892-6900.
- [250] Harris J A, Birch P, Palmer J. Reclamation of damaged land of nature conservation. HMSO: London, 1996.
- [251] 韩建国,戎郁萍.华北农牧交错带提高草地生产力综合技术[A].21 世纪草业科学展望——国际草业(草地)学术大会论文集[C].中国农学会、中国草原学会, 2001. 7.
- [252] 吕贻忠,赵玉萍,夏荣基.内蒙古锡林河流域栗钙土腐殖质特性的研究.I.围栏封育与自由放牧条件下土壤腐殖质特性的变化[C].中国科学院内蒙古草原生态系统定位站.草原生态系统研究第 4 集[C].北京:科学出版社, 1992: 171-179.
- [253] 王翔宇,张进虎,丁国栋,等.沙地土壤水分特征及水分时空动态分析[J].水土保持学报, 2008, 22(6): 222-227.
- [254] 王占军,蒋齐,潘占军,等.宁夏干旱风沙区不同密度人工柠条林营建对土壤环境质量的影响[J].西北农业学报, 2012, 21(12): 153-157.
- [255] 李晓东,魏龙,张永超,等.土地利用方式对陇中黄土高原土壤理化性状的影响[J].草业学报, 2009, 18(4): 103-110.
- [256] 董文斌,马玉寿,董全民,等.退耕还(林)草多年生栽培草地土壤养分特征研究[J].草业科学, 2010, 27(4): 46-50.
- [257] 隋媛媛,杜峰,张兴昌.黄土丘陵区撂荒群落土壤速效养分空间变异性研究[J].草业学报,

- 2011, 20(2): 76-84.
- [258] 许中旗,李文华,许晴,等.禁牧对锡林郭勒典型草原物种多样性的影响[J].生态学杂志, 2008, 27(8): 1307-1312.
- [259] 杨越,哈斯,孙保平,等.毛乌素沙地南缘不同植被恢复类型的土壤养分效应[J].中国农学通报, 2012, 28(10): 37-42.
- [260] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等.黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J].水土保持学报, 2005, 19(1): 93-96.
- [261] 张永亮,范富,高凯,等.苜蓿、无芒雀麦单播与混播对土壤有机质和速效养分的影响[J].草地学报, 2009, 17(1): 22-26.
- [262] 范国艳,张静妮,张永生,等.放牧对贝加尔针茅草原植被根系分布和土壤理化性质的影响[J].生态学杂志, 2010, 29(9): 1715-1721.
- [263] 贾倩民,陈彦云,刘秉儒,等.干旱区盐碱地不同栽培草地土壤理化性质及微生物数量[J].草业科学, 2014, 31(7): 1218-1225.
- [264] Lu D, Moran E, Mausel P. Linking Amazon secondary succession forest growth to soil properties[J].Land Degradation & Development, 2002, 13(4): 331-343.
- [265] 温仲明,焦峰,赫晓慧,等.黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J].草业学报, 2007, 16(1): 16-23.
- [266] 郭艳玲,韩建国,赵守强,等.种植多年生禾本科牧草对土壤物理性状的影响[J].草业科学, 2006, 23(10): 14-18.
- [267] 黄绍文.农田土壤养分平衡状况及其评价的试点研究[J].土壤肥料, 2000(6): 14-19.
- [268] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等.粮田土壤磷、钾养分的垂直分布特征[J].土壤肥料, 2001(4): 8-12.
- [269] 刘丽丹,谢应忠,邱开阳,等.宁夏盐池沙地 3 种植物群落土壤表层养分的空间异质性[J].中国沙漠, 2013, 33(3): 782-787.
- [270] 陆欣.土壤肥科学[M].北京:中国农业大学出版社, 2002: 224 -227.
- [271] 林治安,谢承陶,张振山,等.石灰性土壤无机磷形态、转化及其有效性研究[J].土壤通报, 1997, 28(6): 274-276.
- [272] 黄玉芬,姜益娟,郑德明,等.新疆棉田膜下滴灌条件下土壤速效磷空间分布规律研究[J].土壤通报, 2009, 40(5): 1115-1118.
- [273] 王轶浩,王彦辉,谢双喜,等.六盘山小流域地形、植被特征与土壤水文物理性质的关系[J].生态学杂志, 2012, 31(1): 145-151.
- [274] 曹立国,刘普幸,王洪岩,等.民勤绿洲天然胡杨林生长季土壤盐分动态研究[J].中国农学通报, 2012, 28(1): 49-55.
- [275] 杨劲松,姚荣江,刘广明,等.黄河三角洲地区土壤盐分的空间变异性及其 CoKriging 估值[J].干旱区研究, 2006, 23(3): 439-445.
- [276] 李凤霞,王雪琴,郭永忠,等.宁夏引黄灌溉区盐化土壤微生物区系及其指示意义[J].干旱区研究, 2013, 30(3): 491-496.
- [277] Wagenaar M M, Corwin J, Strobel G, et al. Three new cytochalasins produced by an

- endophytic fungus in the genus *Rhinochlaidiella* [J]. *J Nat Prod*, 2000, 63(12): 1692-1695.
- [278] 谢平,李燕.海岸沙地防护林的小气候效应[J].中国沙漠, 2001, 21(1): 93-96.
- [279] 付为国,李萍萍,吴沿友等.镇江内江湿地不同演替阶段植物群落小气候日动态[J].应用生态学报, 2006, 17(9): 1699-1704.
- [280] 周晨霓.重庆南川石漠化区不同生态恢复治理模式的效益研究[D].西南大学生命科学学院, 2010.
- [281] 郭庆荣,张秉刚,钟继洪.南亚热带丘陵土壤水分循环及其有效性的研究[J].热带亚热带土壤科学, 1998, 7(2): 138-142.
- [282] 郭柯.毛乌素沙地油蒿群落的循环演替[J].植物生态学报, 2000, 24(2): 243-247.
- [283] 张军红.毛乌素沙地油蒿群落土壤水分分布与动态[D].北京:中国林业科学研究院, 2013.
- [284] 郭柯,董学军,刘志茂.毛乌素沙地沙丘土壤含水率特点—兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J].植物生态学报, 2000, 24(3): 275-279.
- [285] 张军,黄永梅,焦会景,等.毛乌素沙地油蒿群落演替的生理生态学机制[J].中国沙漠, 2007, 27(6): 977-983.
- [286] 王庆锁,董学军,陈旭东,等.油蒿群落不同演替阶段某些群落特征研究[J].植物生态学报, 1997, 21(6): 531-538.
- [287] 张凯,冯起,吕永清,等.民勤绿洲荒漠带土壤水分的空间分异研究[J].中国沙漠, 2011, 31(5): 1149-1155.
- [288] 潘艳霞,王新平,苏延桂,等.荒漠人工固沙植被区浅层土壤水分动态的时间稳定性特征[J].中国沙漠, 2009, 29(1): 81-86.
- [289] 刘冰,赵文智,常学向,等.黑河流域荒漠区土壤水分对降水脉动响应[J].中国沙漠, 2011, 31(3): 716-722.
- [290] 胡江波,杨改河,贺桂芹,等.不同植被恢复模式土壤水分生态效应研究[J].中国水土保持, 2007(10): 29-31.
- [291] 余新晓.土壤动力水文学及其应用[M].北京:中国林业出版社, 1995.
- [292] 张信保,安芷生.黄土高原植被建设的建议[J].科学时报, 2002, 12.
- [293] 程积民,万惠娥,王静,等.黄土丘陵区沙打旺草地土壤水分过耗与恢复[J].生态学报, 2004, 24(12): 2979-2983.
- [294] 王孟本.黄土区土壤水分循环水平研究[J].水土保持学报, 1995, 9(4): 106-108.

附录

附表 研究区植物名录

Schedule Category record of plant in the experiment area

序号	植物名称	拉丁名	序号	植物名称	拉丁名
1	阿尔泰狗娃花	<i>Heteropappus altaicus</i>	11	地锦	<i>Euphorbia humifusa</i>
2	狗尾草	<i>Setaria viridis</i>	12	猪毛蒿	<i>Artemisia scoparia</i>
3	赖草	<i>Leymus secalinus</i>	13	叉枝鸦葱	<i>Scorzonera divaricata</i>
4	糙隐子草	<i>Cleistogenes squarrosa</i>	14	乳浆大戟	<i>Euphorbia esula</i>
5	中亚白草	<i>Pennisetum centrasiaticum</i>	15	远志	<i>Polygala tenuifolia</i>
6	短花针茅	<i>Stipabreviflora</i>	16	棉蓬	<i>Corispermum puberulum</i>
7	砂珍棘豆	<i>Oxytropis glacialima</i>	17	小画眉草	<i>Eragrostis poeoides</i>
8	牛枝子	<i>Lespedeza potaninii</i>	18	银灰旋花	<i>Convolvulus ammannii</i>
9	老瓜头	<i>Cynanchum komarovii</i>	19	丝叶山苦荬	<i>Ixeris graminifolia</i>
10	草木樨状黄芪	<i>Astragalus melilotoides</i>	20	瘤果虫实	<i>Corispermum orientale Lam</i>

致谢

本论文从选题到研究撰写过程中得到了导师谢应忠教授和许冬梅教授的悉心指导。谨此向我的两位尊敬的导师致以我最崇高的谢意和敬意！感谢他们对我试验研究给予过得细致而又深入的指导，每当我在试验研究中遇到困难时，他们都会第一时间帮我开拓思路，指点迷津。同时两位导师严谨的治学态度、一丝不苟的工作作风和渊博的学科知识使我受益匪浅。

在研究生学习的三年时间里，不仅有导师为我创造的优越科研条件和学习环境，还有草业学科点的各位老师给予的各种指导与帮助。在此，我要向马红彬老师，兰剑老师，沈艳老师，伏兵哲老师，李晓伟老师，张桂杰老师等表达我最真诚的感谢，从他们身上我同样学到了很多知识，收获了宝贵的财富。

此外，我还要感谢已经毕业的李侠和李潮师兄，他们在校期间曾多次帮助我进行野外试验和室内试验的开展，并对我的论文提供了宝贵的经验指导；还有同级的俞鸿千、岳淑芳、陈丽佳、常春燕、何晨、孙烈荣、胡懿君以及我的师弟王俊杰和汤洋，在野外试验和室内试验的过程中给予了我极大的帮助，并在我论文数据处理的过程中提供了热情的帮助，使我的试验和论文撰写如期顺利的完成。感谢盐池县农牧科学研究所彭文栋所长，在野外试验过程中的帮助。感谢四墩子实验基地的赵叔叔、孙阿姨以及野外试验取样中帮助过我的叔叔们。感谢我的父母和亲朋好友对我的关心、支持和理解。

最后，感谢本论文所引用的参考文献的各位学者们，感谢他们的研究成果给予我的帮助和启发。更要衷心地感谢在百忙之中抽出时间审阅本论文的各位老师和教授们，衷心的感谢您！

陈晶
二零一五年四月

个人简介

陈晶，女，回族，1989年01月出生，宁夏银川人。

2011年6月毕业于天津城建大学园林专业，获得工学学位。

2012年9月考入宁夏大学农学院草业科学专业，攻读农学硕士学位，师从谢应忠教授。

读研期间，参加林业公益性专业专项（201304311）试验研究，已发表两篇中文核心论文。并积极参加学院各项活动中，曾担任院研究生会党建部部长和副主席，并连续两年被评为农学院“优秀学生干部”。

论文发表情况：

（1）陈晶,兰剑,俞鸿千.气候因子对宁夏干旱、半干旱区天然草地第一性生产力的影响[J].广东农业科学,2014,41(6):45-49.

（2）陈晶,王峰,谢应忠,等.沙芦草+胡枝子混播草地的生物量及土壤速效养分[J].草业科学,2015,32(4):492-500.