

生态学报

*Acta Ecologica Sinica*

ISSN 1000-0933, CN 11-2031/Q

## 《生态学报》网络首发论文

题目： 干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述  
作者： 赵思腾, 赵学勇, 李玉霖, 毛伟, 王宁, 陈云, 卢建男, 陈雪萍, 王瑞雄, 杨小菊  
收稿日期： 2021-10-23  
网络首发日期： 2022-07-27  
引用格式： 赵思腾, 赵学勇, 李玉霖, 毛伟, 王宁, 陈云, 卢建男, 陈雪萍, 王瑞雄, 杨小菊. 干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述 [J/OL]. 生态学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220726.1501.006.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.5846/stxb202111023081

赵思腾, 赵学勇, 李玉霖, 毛伟, 王宁, 陈云, 卢建男, 陈雪萍, 王瑞雄, 杨小菊. 干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述. 生态学报, 2022, 42(23).

Zhao S T, Zhao X Y, Li Y L, Mao W, Wang N, Chen Y, Lu J N, Chen X P, Wang R X, Yang X J. A review on the driving effect of groundwater depth on the evolution of sandy plant soil systems in arid and semi-arid region. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23).

## 干旱半干旱区地下水埋深对沙地植物土壤系统演变的驱动作用综述

赵思腾<sup>1,2</sup>, 赵学勇<sup>1,2,3,\*</sup>, 李玉霖<sup>1,2,3</sup>, 毛伟<sup>4</sup>, 王宁<sup>1,2</sup>, 陈云<sup>1,2</sup>, 卢建男<sup>1,2</sup>, 陈雪萍<sup>1,2</sup>, 王瑞雄<sup>1,2</sup>, 杨小菊<sup>1,2</sup>

1 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站, 通辽 028300

4 海南大学生态与环境学院, 海口 570228

**摘要:** 在干旱半干旱生态脆弱区, 地下水是限制植物种类组成、数量和生长发育的关键因素之一。近年来由于气候变化与土地利用强度的增加, 我国北方普遍出现以极端气候变化、地表水体萎缩和地下水位下降为特征的生态过程, 对区域生态系统安全和可持续发展构成严重威胁。而有关干旱半干旱区地下水埋深变化驱动退化植被恢复和稳定性维持方面的系统研究尚存不足。本文系统总结了地下水埋深变化分别对植物、土壤产生的影响及其三者间相互作用关系, 比较分析了前人的研究成果, 归纳总结了地下水埋深变化的驱动作用和影响因素, 以及干旱半干旱区地下水埋深变化对植物土壤系统影响的预测模型研究, 以为今后应对地下水埋深变化制定生态保护策略提供理论指导依据。最后对本研究方向做了展望。

**关键词:** 干旱半干旱区; 地下水埋深; 土壤水分; 土壤养分; 植被特征; 模型预测

## A review on the driving effect of groundwater depth on the evolution of sandy plant soil systems in arid and semi-arid region

ZHAO Siteng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xueyong<sup>1,2,3,\*</sup>, LI Yulin<sup>1,2,3</sup>, MAO Wei<sup>4</sup>, WANG Ning<sup>1,2</sup>, CHEN Yun<sup>1,2</sup>, LU Jiannan<sup>1,2</sup>, CHEN Xueping<sup>1,2</sup>, WANG Ruixiong<sup>1,2</sup>, YANG Xiaoju<sup>1,2</sup>

1 Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Tongliao 028300, China

4 College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China

**Abstract:** In arid and semi-arid ecologically fragile areas, groundwater is one of key factors restricting the composition, quantity and growth of plant species. In recent years, due to the increase in climate change and land use intensity, ecological processes characterized by extreme climate change, surface water shrinkage and groundwater level decline have generally appeared in northern China, posing a serious threat to the security and sustainable development of regional ecosystems. However, there are still insufficiently systematic studies on the restoration and stability maintenance of degraded vegetation driven by change in groundwater depth in arid and semi-arid regions. This article systematically summarized the

基金项目: 国家自然科学基金项目(42177456)

收稿日期: 2021-10-23;

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoxy@lzb.ac.cn

effects of groundwater depth change on plants and soil, and the interaction between them, compared and analyzed the previous research results, summarized the driving effect and influencing factors of the groundwater depth change, as well as research on the prediction model of the impact of groundwater depth changes on plant soil systems in semi-arid regions, in order to provide theoretical guidance for formulating ecological protection strategies in response to change of groundwater depth in the future. Finally, a prospect of the research direction is made.

**Key Words:** arid and semi-arid region; groundwater depth; soil water content; soil nutrients; vegetation characteristics; model prediction

地下水是全球水文循环的重要组成部分。地下水不仅是多种生态系统的稳定水源,在维系生态系统功能、保障物种生存条件等方面起关键作用<sup>[1]</sup>。在干旱半干旱生态环境脆弱区,水资源是限制植物种类、数量和生长的关键因素。由于该区年降雨量少且蒸发量大,较稳定的地下水资源成为植物生长依赖的重要且唯一的水分来源<sup>[2-4]</sup>。地下水水位主要受降雨和人类活动影响,区域尺度地形地貌变化也会影响地表到地下水的距离。地下水净流量的稳定取决于以下参数:植被分布,海拔,土壤类型,和土壤利用模式<sup>[5]</sup>。虽然该区地下水位的变化是自然发生的,但近年来由于人类的过度利用,加速了对地下水的开采,引起了土壤水分养分、植物功能性状、群落结构的变化等<sup>[6-7]</sup>。因此,干旱半干旱生态脆弱区生态系统恢复是实现我国社会经济可持续发展的必由之路,了解清楚地下水埋深变化对植物土壤特征的影响,在植被恢复、土地生产力维持和水资源调控方面具有重要理论和实践意义。

全球干旱、半干旱区主要分布在南北纬 15°—35°,并向内陆和极地延伸至南北纬 55°的地区,我国境内的干旱、半干旱区包括全部的西北地区以及华北地区北部、东北地区西部的部分地区。该区水资源的匮乏使得我国成为当今世界受沙化危害较为严重的国家之一,沙化类型多,分布范围广,制约了我国经济社会的可持续发展<sup>[8]</sup>。根据全国沙化土地监测结果显示,截至 2014 年我国沙化面积已达 1.7410<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,占国土总面积的 18.16%。与 2009 年全国沙化监测结果相比降低了 9.0×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>左右,沙化面积总体呈减少趋势<sup>[9]</sup>。从 1999 年至今,虽然我国沙化情况有明显改善,但局部地区仍在扩展<sup>[10-11]</sup>。

以科尔沁沙地为例,该区东邻东北平原,西连内蒙古高原,地势上属于从高原向平原过渡的地带<sup>[12-17]</sup>。由于科尔沁沙地气候干旱,人口密度高,城市化进程加快,社会经济发展迅速,土地承载压力大。同时,过度放牧和开垦等不合理人类活动的长期影响,也促进了严重的土地沙漠化、草地退化和土壤盐渍化。研究表明<sup>[18]</sup>,近几十年来,过度放牧和抽取地下水灌溉导致地下水位显著下降。在地下水位相关的模拟试验中发现,沙地植物生长需水的地下水供给量降低了 25%<sup>[19]</sup>。保护并合理开发科尔沁沙地地下水,既能稳定沙地植被,防止沙地面积扩增,同时可以促进周边城市的可持续发展。

因此,为深入理解我国干旱半干旱生态脆弱区对全球环境变化和人为活动的响应,重点针对干旱半干旱区的地下水埋深变化与沙地植物、土壤间的相互作用关系的研究进展进行总结,以期揭示干旱半干旱区地下水埋深变化对沙地植物土壤系统演变的驱动作用提供参考,促进干旱半干旱生态环境脆弱区生态系统保护与恢复研究的发展。

## 1 地下水埋深变化对土壤水分和土壤理化性质的影响

干旱半干旱区限制植被生长的主要因素是土壤水,地下水位埋深变化对土壤水含量大小起着决定性作用<sup>[20]</sup>。地下水、土壤水、植被作为该区关键生态要素,彼此间存在着复杂的动态平衡关系,而抽取地下水灌溉、植树造林等人类活动破坏原始土体结构、降低地下水位,打破了这种平衡,进而引起植被生长协同损伤。在干旱半干旱区降雨少且蒸发剧烈的脆弱生态条件下,地下水成为该区重要且唯一的水分来源,土壤水分的变化主要由地下水埋深决定,其动态变化被认为是控制该区整个生态系统最重要的驱动力<sup>[21-22]</sup>。前人通过对三种地下水埋深梯度下 1.2—1.4 m 土层的含水量进行测定分析发现,土壤含水量随着地下水埋深的增加

而显著下降,当地下水深度超过 1 m 时,20—80 cm 土层的土壤含水量提高了 29%;然而当地下水深度超过 6 m 时,1.2—1.4 m 土层的土壤水分与地下水深度无显著关系<sup>[23—24]</sup>。此外,较高的植被群落覆盖度可能会显著影响地下水埋深<sup>[5,25]</sup>,随着地下水埋深的增加,土壤内水汽传递能力逐渐减弱,土壤含水量及其分布特征主要受地下水深度及土壤毛细管输水能力所能上升的最大高度决定。干旱半干旱区地下水与土壤理化性质之间关系的研究表明,理化性质受地下水埋深变化的影响较大<sup>[26]</sup>。陈冠光在对疏勒河下游地下水埋深与土壤理化性质变化关系的研究中发现,随着地下水水位的下降土壤有机碳、总氮和总磷含量呈现先增加后减少的趋势,而土壤 pH 值相反,其中土壤有机碳和总氮含量在地下水埋深为 2.03 m 处达到最高,之后逐渐降低;土壤总磷含量在地下水埋深为 2.78 m 处达到最高后开始降低;土壤 pH 值在 2.03 m 处达到最低,之后开始升高<sup>[27]</sup>。也有研究显示土壤理化性质表现出与此结果相反的变化趋势,原因在于极端干旱区植物根系的水力提升作用将植被所需养分富集在土壤表层<sup>[28]</sup>。同时,地下水埋深变化也会影响土壤容重,随着地下水埋深增加,土壤容重变大,导致植被结构和功能恶化<sup>[29—31]</sup>。由此可见,地下水埋深的增加对土壤水分,土壤总碳,土壤总氮和土壤有效钾有显著的负面影响,而土壤容重随地下水埋深的增加而增加。此外,土壤中的碳含量有助于氮和磷的供应,良好的土壤结构有利于植物生长<sup>[32—34]</sup>。土壤盐渍化会明显降低土地生产力,直接影响植物的生长和植物多样性<sup>[28]</sup>。有研究表明<sup>[35]</sup>,土壤表层盐渍化和地下水矿化程度随着地下水水位的上升而增强,当地下水中的溶解盐上升到土壤表层并随着水分的蒸发而积累时,就会发生土壤盐渍化。当地下水埋深为 1—2 m 时,由于土壤毛细管水含量的增加,太阳辐射诱导土壤水蒸发作用加强,致使表土盐渍化加剧;当地下水埋深为 2—4 m 时,毛细管水水位下沉,地下水向大气的蒸发量减少,盐含量降低;当地下水埋深超过 4 m 时,地下水水位降低导致表层土壤毛细管水蒸发效应减弱,表土含盐量下降明显<sup>[23]</sup>。Hu 等的研究发现高强度的蒸发和低植被覆盖度促进了土壤表层的盐积累,通过脱盐交换和碱化过程进而导致土壤溶解盐含量降低和土壤 pH 值升高<sup>[36]</sup>。土壤电导率随着地下水埋深的增加先增加而后迅速下降,土壤 pH 值则呈现相反的过程<sup>[5]</sup>。

综上所述,已有大量关于地下水埋深变化对土壤水分及土壤理化性质影响方面的研究,总体可归纳为以下四方面:1) 土壤水分含量及其分布特征受地下水埋深变化及土壤毛细管输水能力的影响较大;2) 土壤容重与地下水埋深呈正相关关系;3) 不同生境下土壤理化性质随地下水埋深的变化趋势有显著差异,原因在于不同物种植物根系的水力提升作用;4) 土壤表层盐渍化程度随地下水水位的上升而增强,当地下水深度超过 4 m 表土含盐量明显下降。可见在不同生境条件下地下水水位过高或过低都会对土壤水及土壤理化性质产生负面影响,因此在生境的选择以及明晰最适地下水埋深方向的工作有待进一步探究。

## 2 地下水埋深变化对植被特征的影响

地下水也是植物生长发育过程中从土壤获取水分养分等物质的重要来源之一<sup>[37—38]</sup>。地下水水位较高则植被密度较大且生长旺盛,地下水水位过低则植被稀疏且长势较差<sup>[39—41]</sup>。有研究显示,在地下水埋深较浅的区域,胡杨根系与地下水的接触面积相对较大,水分较为充足,并且漫溢作用较强,植被长势较好,单位面积生物量较大;随着地下水埋深加大,植物根系与地下水的接触面积变小,植被长势逐渐衰弱,单位面积生物量降低<sup>[42—44]</sup>。地下水埋深的增加显著降低了物种丰富度,地上生物量,群落覆盖率,群落高度和叶面积指数<sup>[5]</sup>。但有研究表明,地下水水位上升会导致灌木植物的死亡,地下水水位下降会使灌木植物得以定植,而导致草本植物生存困难,进而导致该区物种多样性降低<sup>[41,45]</sup>。Carvajal 等<sup>[46]</sup>通过对阿塔卡马沙漠不同干旱胁迫梯度灌木抗旱策略差异性分析发现,物种多样性的下降是由于干旱地区内陆河流域的草本植物消失引起的,而物种丰富度的最佳地下水深度并不是最浅的地下水深度。张俊等通过对鄂尔多斯高原地下水埋深与浅埋区植被关系研究发现,地下水水位为 1.6 m 左右时是植被生长发育较为适宜范围,并将此水位埋深界定为生态交错带临界水位,是地下水资源开发过程中的生态敏感区;水位埋深低于 0.6 m 为湿生、盐生植被优势区,地下水水位深度超过 3.2 m 地带为旱生、沙生植被优势区<sup>[47]</sup>。本文论述的重点是沙地植被对地下水埋深变化的响应,由于沙

区降水少,蒸发强烈,地表水和地下水的含盐量通常较高<sup>[40]</sup>。Hao 等<sup>[48]</sup>研究发现即使塔里木河流域存在良好的水资源条件,高盐度也能抑制草本植物。该结果的潜在机制可能是高盐度生理压力限制了适应高 pH 物种的物种数和物种丰富度,同时群落覆盖度受地下水深度的影响较大,当地下水深度增加至特定值时受土壤盐碱的影响,群落覆盖度降低。Fu 等<sup>[21]</sup>指出,浅根植物和草本植物的结合可以提高水资源的利用效率,是恢复沙地植被的最佳物种组合,其中干旱区的沙地植被主要分布在地下水深度为 3 m 范围。由此可见,在地下水位较深等水资源受限的条件下,不同物种的根系分布范围不同,其水分利用策略也有差异<sup>[49]</sup>。例如浅根植物与深根植物在垂直生态位的共存方面存在互补现象<sup>[50]</sup>。同时,受生物过程的影响灌木下土壤会出现养分富集的现象,即“沃岛效应”<sup>[51]</sup>,从而给草本植物提供了适宜的生存条件,维系了该区植物群落物种丰富度与多样性。

考虑到不同植物物种独有的生物学特性,植物生理性状可以更准确的预测生态系统的功能,解决了由于“抽样”所导致的植物群落特征解释生态系统功能变化的局限性<sup>[52]</sup>。在群落水平上,植物应对环境变化的响应可以通过叶片功能性状值表达,即地下水位的下降使土壤含水量降低,进而可能导致叶片和茎水势降低,气孔闭合进而导致蒸腾作用减弱<sup>[39,53]</sup>。过高的地下水位可能会使植物根系区缺氧,植物根系转换为无氧代谢模式,导致植物死亡<sup>[54]</sup>,潮湿的生境也会减弱植物的水分利用效率和光合作用,同时会降低植物根、叶的组织密度<sup>[55]</sup>。同时,植物体内 N、P 含量的变化也可以反映植物个体或群体如何应对环境变化,前人研究发现,干旱区植物比湿润区植物的 N、P 的养分吸收率更高,地下水水位下降造成的干旱胁迫,会触发植物产生高浓度的脱落酸,进而削弱沙地植物代谢和养分转化的能力<sup>[56-58]</sup>。然而干旱区植物由于环境因素限制,土壤中的 N、P 营养元素较为匮乏,导致植物体内 N、P 含量维持在低水平状态,这可能是干旱地区植物应对贫瘠环境的一种生存策略<sup>[27,59]</sup>。由于沙地生态系统水分条件的限制,不同植物依靠其自身生理结构和抗盐策略促使他们在生长过程中获取水分和养分的能力也有差异<sup>[60]</sup>。盐生植物的枝叶同化形成了发达的储水组织和粘液细胞,可以增强细胞的吸水和持水能力,稀释其体内盐分并维持正常的养分吸收能力<sup>[61]</sup>;而对于沙地中的糖类植物,其从叶到根的“内部除盐”机制可以保持体内的低盐水平并减弱盐对植物吸收养分的干扰<sup>[62]</sup>。乔、灌木较草本植物在形态上表现出对水分胁迫更强的适应性。干旱区乔、灌木群落的比叶面积和叶片瞬时水分利用效率在环境适应方面比草本植物更有优势,多年生草本与一年生草本相比有较强的适应能力<sup>[63]</sup>。有研究表明<sup>[32]</sup>,一年生植物的比叶面积显著大于多年生植物,而且一年生植物和多年生植物间的叶干物质含量也存在一定的差异。胡杨在干旱条件下为了维持自身的新陈代谢能力,采取减小叶面积和比叶面积,增加叶片厚度、叶组织密度和叶干物质量的权衡策略以降低植物体内水分蒸腾散失、资源消耗和增强持水、抗逆及叶片养分的贮存能力<sup>[64]</sup>。随地下水埋深增加,小枝长度、叶面积、叶生物量的降低和小枝茎粗、叶厚的增加,表明旱区植物枝叶性状间存在明显的权衡关系与协同适应策略<sup>[65]</sup>,进而说明植物群落水平的表型功能性状对地下水水位下降导致干旱胁迫的响应程度不同,反映了植物群落应对环境胁迫的不同形态适应策略。

综上所述,植物为了适应地下水埋深的变化,植物群落特征、植物生理性状及植物根、茎、叶等形态结构均发生一定程度的适应性改变,通过深入了解植物特征对地下水埋深变化的适应策略,对研究植物面对未来气候变化所表现的抗旱性和适应性具有重要作用。

### 3 土壤理化性状、地形因素与植物群落关系研究

#### 3.1 土壤理化性状与植物群落关系

土壤在为植物生长提供物理支撑、调节养分和水分有效性、判定生产力等方面起着重要作用<sup>[34,66-69]</sup>。通过改善土壤物理质量(如降低土壤容重、增加孔隙度和团聚体稳定性)可以恢复植被,改善受干扰生态系统的完整性<sup>[70-72]</sup>。土壤水是干旱半干旱区植被生长的重要限制性因子,土壤水除了依赖降雨补给,地下水埋深的变化对土壤水分影响明显,土壤依靠毛细管拉力将地下水提到植物根系分布区供其利用,而土壤毛细管上升力因土壤质地有所差异,毛细水在沙土中的上升高度可以达到 73 cm,在壤土中的高度可以达到 100

cm<sup>[73]</sup>。有研究表明,土壤水分的增加会降低物种丰富度<sup>[74]</sup>,而大多数的研究结果显示土壤水分的增加会提高物种丰富度<sup>[75-76]</sup>,造成这种差异的原因可能是由于土壤水分增加使得植物长势好、密度大,加剧了种间竞争,进而导致物种丰富度的降低,而旱区植物种间竞争的影响较小<sup>[77]</sup>。同时,在降雨量变化较大的情况下,土壤酸碱度限制了细菌多样性并抑制了真菌菌根在植物根部定植的能力进而影响土壤碳储量<sup>[78]</sup>,加剧了植被斑块中土壤微生物群落的差异性,并随着土壤含水量的降低,淋溶作用减弱,差异更显著<sup>[79]</sup>,使土壤养分的空间变异性成为植物适应对策和植被分布模式的重要驱动因素。土壤养分的变化也会影响土壤真菌群落组成,进而影响植物物种多样性及叶片生理功能<sup>[80]</sup>。

此外,植被恢复也会影响土地生产力,植物物种的根系和凋落物改变其生物和非生物土壤环境,进而影响其自身或其后代演替。这种类型的反馈可能是负向的(导致土壤群落、化学和物理等土壤条件的变化对同一物种个体的净生长产生减少效应),中性的(净效应是土壤群落的所有影响为零),或正向的(同一物种的植物或后续个体的生长受到净土壤效应的促进作用)。负反馈效应可能导致植物的退化,也可能导致幼苗死亡<sup>[69]</sup>。然而,自然界中可能存在更积极的植物-土壤反馈作用,例如植物物种对土壤养分分解与吸收的特定策略,即一些植物物种所表现出的所谓的归属地优势效应,积极的植物-土壤反馈会促进优势发展。同时,为了解植物-土壤反馈效应如何影响植物群落动态,需要将直接反馈效应与间接反馈效应进行比较,不同的植物种类往往对土壤质量具有物种特异性影响<sup>[81-82]</sup>。前人研究黄土高原风水蚀区植被恢复对土壤物理性质的影响时发现次生天然草地表层(0—20 cm 土层)土壤物理性质(容重、平均粒径、大团聚体等)得到显著改善,而补植灌丛(柠条)效果不明显<sup>[83]</sup>。也有研究表明,由于灌木冠幅下土壤养分富集特性,为草本植物提供了适宜的生存条件,草本植物的生长也反馈到了土壤浅层区,使其具有更大的持水能力和孔隙度,促进了植被盖度和物种丰度<sup>[66,84-85]</sup>。

因此,生态系统的地上和地下过程决定了植物-土壤的互馈机制,并影响植物群落的组成和养分循环过程,进而影响生态系统功能,如植物和其他群落之间的相互作用,保护地下水资源和防止水土流失<sup>[69]</sup>。

### 3.2 地形因素与植物群落关系

归一化植被指数(NDVI)基于红色和近红外反射率监测植被数量和状况的时空变化,对许多植被群落特征响应敏感,例如由于叶片结构和功能不同而导致植被生物量和生理状态有差异,从而使植物冠层对太阳辐射的吸收和反射产生显著变化,并有助监测生态系统的稳定性<sup>[86-88]</sup>。实际上,不同植被的 NDVI 值取决于自然环境条件是否适合其自身生长,而植被的生长受环境因素(温度,水文条件和光照)的影响很大,小尺度区域的地下水埋深等环境因素主要取决于地形的变化。坡向通过影响太阳辐射、蒸散和降水的重新分布导致微环境的分化<sup>[89]</sup>;坡度、坡位通过重力影响土壤水分入渗,排水,而径流和日照强度对土壤含水量的变化起着重要的作用<sup>[90]</sup>;相对高度决定了土壤和植被的垂直地带性分布,并且对土壤水分的再分配具有重要影响<sup>[91]</sup>。相关研究表明,NDVI 受坡度的影响很大,但随纵横比变化的影响并不明显<sup>[92]</sup>。干旱半干旱区降水不均且地下水位较低,土壤含水量少且蒸发大,植被变化更依赖降水<sup>[88]</sup>。有研究发现,通过构建坡度和坡向的相互作用模型,了解到坡度和坡向间具有抑制作用,主要原因是随着降雨逐渐减少,导致坡度对 NDVI 的正效应随纵横比的增加而减小;相反,当坡度变大时,土壤水分在重力作用下相对较小,因此纵横比对 NDVI 的正效应随坡度的增加而降低。也有研究发现该结论适用于坡度与相对高度的相互作用,主要是因为坡度的增加使土壤水分相对较小,这导致高度对 NDVI 的正效应随坡度的增加而减小。但由于海拔的升高,受坡度影响的日照条件基本不变<sup>[92]</sup>。研究表明<sup>[93]</sup>,植被恢复的重点应该是在特定地形条件下不同植被类型的 NDVI 最大值或最小值范围,NDVI 值较大的区域具有更多的物质循环,能量流和信息交换,这是发挥生态功能和生态服务价值的核心区域;而 NDVI 值很小的区域,它比 NDVI 值大的区域不稳定,并且是生态保护的关键区域。通过阈值回归分析,发现地形因素必须在合理范围内才能使植物更好地生长<sup>[94]</sup>。

综上所述,植被恢复的区域应集中在相似地形,在地形因子达到最大值时增加此类植被的种植;当地形因子达到最小值时,保护原始植被群落的结构和数量,尽可能避免人为干扰和破坏;不适合耕种的区域应退还给

林草地或沙地,以使其符合生态系统的规律并发展为更健康稳定的生态系统<sup>[95]</sup>。

#### 4 地下水埋深对沙地土壤养分与植被特征协同演变的驱动作用

土壤理化性质和植被特征是决定干旱半干旱区生态系统结构和功能的重要因素,植物的生长可以改变土壤的结构、养分以及附近的微气候条件,土壤条件也会影响植物的生长发育过程,二者在生态系统生产力、地表能量平衡和水资源可利用性之间存在着紧密的耦合关系。水分是干旱半干旱区植被生长的重要限制性因子,地下水埋深的变化决定了土壤含水量,地下水也会与土壤容重、土壤 pH 相互作用,直接影响植物生长条件<sup>[5]</sup>。植被盖度和群落组成结构可能也会改变土壤条件,从而影响土壤养分的输入和循环<sup>[96]</sup>。这些结果证实,地下水—植物—土壤三者间的互馈作用会影响植物群落的结构和土壤特性(图 1)。以科尔沁沙地为例,科尔沁沙地地处农牧交错带,也是气候变化与农业发展的敏感地带。独特的气候加之人类对自然资源的过度利用造成了缺水以及养分匮乏的现状,植物为了融入自然适应自然逐渐形成了地下水依赖型的物种组成<sup>[14]</sup>。物种依靠地下水表面以上的毛细管水生存和生长,地下水水位的变化直接影响植物个体的生长和群落结构组成。近年来,由于人类对地下水资源的不合理利用和气候变化造成的地下水埋深增加,对该区植被生长生存构成严重威胁,且旱区较湿润区植物空间异质性高,植物对土壤养分的变化尤为敏感<sup>[28]</sup>。干旱区相关研究发现,地下水的埋深和矿化度是植被盖度变化的主要影响因素<sup>[5]</sup>。也有研究显示,地下水埋深对乔、灌木的影响要大于对草本的影响,这与物种水分利用策略有关<sup>[49]</sup>。同时,植物群落特征改善和物种组成优化会影响土壤化学成分,有助于植物土壤系统间养分循环<sup>[96]</sup>,植被组成结构的变化也会改变土壤物理结构,例如对土壤颗粒的组成产生影响,主要表现为沙质土含量降低,壤土含量上升<sup>[67]</sup>。例如乔、灌木植物由于沃岛效应明显改善了其附近土壤条件<sup>[51]</sup>。也有一些机会主义者,他们拥有相对宽广的小生境(如多枝怪柳和芦苇),通常具有较高的比叶面积和叶氮含量,可以在路边、盐沼和更干旱的地区生存<sup>[27]</sup>。在生理功能方面,物种间对土壤水分和养分的需求存在差异;在形态特征方面,不同物种根的形态不同,其对土壤水的吸收能力也不同。

因此,在研究地下水埋深变化对植物土壤系统发育驱动作用时,不但需要考虑环境因素,还需考虑到不同植物种群或群落的影响。

#### 5 基于地下水埋深数据和模型算法预测未来沙地植物土壤演替趋势

植物特征与环境因子之间的关系能够很好的解释植物群落和生态系统结构与功能变化,以及预测生态系统将如何应对未来地下水埋深变化。预测植被变化趋势是确定并解决未来环境发展动向问题的有效途径。地下水埋深变化对沙地生态环境可持续性发展具有深远的影响,综合环境因子对植被土壤进行预测和评价对现代生态环境保护和管理工作非常重要,也是恢复生态学走向科学修复、精准治沙的一个关键步骤<sup>[97]</sup>。综上所述,在理解地下水埋深对植物土壤系统演变的驱动作用基础上,应加强预测模型的研究,本文对前人研究方法作了归纳,并比较分析了模型方法的优势及局限性,仅供参考。

模型预测从研究方法进行分类,可分为确定性方法和随机方法。确定性方法有解析法、数值法、物理模拟法;非确定性方法包括回归分析法、频谱分析法、时间序列法、模糊方法、灰色聚类法、人工神经网络法以及根据研究区的实际情况将两种或两种以上的预测方法组合起来构成的新方法。例如时间序列法是应用比较广

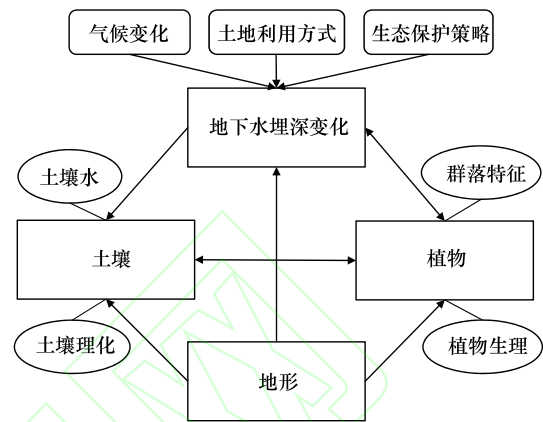


图 1 地下水埋深与土壤植物关系框架图

Fig.1 Relationship between groundwater depth and soil plants

泛的一种科学分析方法。现已广泛应用于地下水资源评价、预报和管理当中。自回归模型(AR)、滑动平均模型(MA)、自回归滑动平均模型(AR-MA)等模型常用于地下水位预报。这些模型的应用给大区域尺度地下水动态预报分析带来了极大的便利<sup>[98]</sup>。近年来,将传统生态学与模型算法等现代地理信息处理技术相结合,基于环境因子动态数据对沙地植被土壤进行模拟预测与结果验证成为了生态恢复研究中的热点<sup>[99-101]</sup>,国内外也积累了大量的研究成果。国内有学者通过采用传统经验模型对土壤水分特征曲线进行拟合分析,比较了不同模型的拟合效果<sup>[102]</sup>。也有研究显示,通过用AR时间序列分析方法预测了土壤水分动态变化趋势,经过验证得到了较好的结果<sup>[103]</sup>。葛翔宇等<sup>[104]</sup>将BP神经网络算法、随机森林算法、超限学习机算法与光谱数据相结合,建立了土壤养分反演预测模型,结果较好。国外也有大量相关研究,Soylu M E等<sup>[105]</sup>运用HYDRUS-1D模型量化了半干旱草原区0—250 cm地下水埋深对蒸散的影响,并得出土壤质地和地下水深度是影响蒸散性能关键参数的结论。也有研究通过计算植被指数与土壤水分含量之间的滞后秩相关来评估土壤含水量<sup>[106]</sup>。Araya-Lopez等<sup>[107]</sup>通过多时相Sentinel-2图像和支持向量机回归算法预测了安第斯草地土壤水的空间分布格局。

土壤植被预测领域积累了大量的研究成果,但是由于地下水-植被-土壤是一个复杂的耦合或复合系统,影响该系统的因素很多,目前的预测模型都只是尽可能的接近实际状况。鉴于此,模型与预测因子的选择还需从更多方面考虑,同时也要顾及预测因子间的相互作用。预测因子的选择上大多从专家打分或从相关性强弱入手进行权重评价,还无法做到绝对的客观,这有待进一步研究。通过对地下水埋深变化的精准分析,然后基于此分析结果进行建模和分析地下水埋深变化引起的土壤水分时空分布特征,并解析地下水埋深—土壤水分—植被特征三者关系,探索科学合理的植被土壤协同演变预测方法,为沙地生态系统防灾、减灾、受灾评估等提供一定的科学依据。

因此,今后相关研究应基于近年地下水埋深定点实测数据、气象数据、地形因素等多源数据,建立植被土壤数据库和预测因子数据库,并结合模型算法的相关分析技术对地下水埋深变化情境下的沙地植被土壤演变过程进行模拟预测,构建地下水埋深变化对植被和土壤协同演变的驱动模式、研究方法体系和定量研究途径。

## 6 展望

气候与土地利用方式变化将对未来生态系统变化产生更为深刻的影响。中国北方干旱半干旱区正在经历以地下水埋深增加、自然生态系统退化,人工生态系统维持更为依赖地下水资源的过程,迫切需要在植被、土壤、地下水埋深和未来可预期用水方式、规模之间建立科学、合理的关系。本文分析了干旱半干旱区地下水埋深变化所引起的土壤水分变化对沙地植物土壤系统造成潜在影响的研究进展,阐述了当地下水位处于不同范围时土壤植物特征的变化情况。总之,水资源匮乏对植物及土壤特征影响方面的研究较多,但对地下水埋深变化这一驱动因子所引起的土壤水分变化对植物土壤系统产生的潜在影响方面的研究还存在诸多不足,鉴于此,建议今后围绕以下几个方面强化研究的深度、广度和关系分析。

1) 加强干旱半干旱区地下水埋深变化对土壤水分状况的影响机制研究。选择不同气候条件(降雨量等)、土地利用方式(抽取地下水灌溉等)、生态保护策略(大面积造林等)等条件的地下水利用强度因子与土壤水分状况的变化进行同步监测,深入地下水埋深变化对土壤水分的影响机制。

2) 加强对干旱半干旱区地下水埋深变化所引起的土壤水分状况与土壤植被生理生态协同变化规律的研究。科学严谨的制定试验方案,通过集成野外植被跟踪调查、高精度植物生理监测、高空间分辨率无人机监测等技术,建立健全能够代表区域生态系统及其要素变化的定位监测样地系统,多尺度一体化探究地下水埋深与植物土壤特征的协同变化规律。

3) 加强干旱半干旱区复杂条件下的地下水埋深变化特征结合植物生理生态指示性因子进行综合分析,从静态到动态、从定性向定量、从单一学科向多学科交叉融合的方向发展。探究不同植物对干旱胁迫的适应策略,直击植物抗旱本质,进一步开展不同地下水埋深情况下植物抗旱能力的综合评价。



4)加强干旱半干旱区地下水埋深变化趋势对植物土壤特征影响的预测模型研究。在对本文前4部分进行深入研究的基础上,建立不同地下水埋深条件下土壤水分状况变化对植物土壤特征的影响评价与预测模型。

综合以上几点,提升未来生态情景预测、模拟与验证水平,为干旱半干旱区生态系统演变规律研究、趋势预测和可持续发展提供理论依据、技术支撑和数据服务。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 王思佳, 刘鹤, 赵文智, 李中恺. 干旱、半干旱区地下水可持续性研究评述. 地球科学进展, 2019, 34(2): 210-223.
- [ 2 ] Gries D, Zeng F, Foetzki A, Arndt S K, Bruelheide H, Thomas F M, Zhang X, Runge M. Growth and water relations of *Tamarix ramosissima* and *Populus euphratica* on Taklamakan desert dunes in relation to depth to a permanent water table. *Plant, Cell & Environment*, 2003, 26(5): 725-736.
- [ 3 ] Tamea S, Laio F, Ridolfi L, & Odorico P, Rodriguez-Iturbe I. Ecohydrology of groundwater-dependent ecosystems: 2. Stochastic soil moisture dynamics. *Water Resources Research*, 2009, 45(5): 1-13.
- [ 4 ] Huang F, Chunyu X Z, Zhang D R, Chen X, Ochoa C G. A framework to assess the impact of ecological water conveyance on groundwater-dependent terrestrial ecosystems in arid inland river basins. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136155.
- [ 5 ] Zhang X L, Guan T Y, Zhou J H, Cai W T, Gao N N, Du H, Jiang L H, Lai L M, Zheng Y R. Groundwater depth and soil properties are associated with variation in vegetation of a desert riparian ecosystem in an arid area of China. *Forests*, 2018, 9(1): 34.
- [ 6 ] Yuan Y X, Wang R D, Chang C P, Guo Z L, Li Q. Protective effect of cropland conversion with different years on soil in Bashang district, North China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(9): 84-89.
- [ 7 ] Lozano F J, Soriano M, Martínez S, Asensio C. The influence of blowing soil trapped by shrubs on fertility in tabernas district (se Spain). *Land Degradation & Development*, 2013, 24(6): 575-581.
- [ 8 ] 殷贺, 李正国, 王仰麟. 荒漠化评价研究进展. 植物生态学报, 2011, 35(3): 345-352.
- [ 9 ] 易凌. 中国荒漠化和沙化土地面积建国以来首次缩小. 草业科学, 2005, 22(7): 115.
- [ 10 ] 邵艳莹. 中国四大沙地植被动态变化及其对气候变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2018: 13-116.
- [ 11 ] 赵珍珍. 基于多源数据的科尔沁沙地生态环境变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017: 24-55.
- [ 12 ] 周磊. 改性膨润土对科尔沁沙地土壤改良效应及机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019: 3-8.
- [ 13 ] 李金亚. 科尔沁沙地草原沙化时空变化特征遥感监测及驱动力分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014: 17-55.
- [ 14 ] 段利民. 科尔沁沙地沙丘—草甸相间地区水文—土壤—植被动态响应关系研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011: 29-60.
- [ 15 ] 包慧娟. 沙漠化地区可持续发展研究——以科尔沁沙地奈曼旗地区为例[D]. 哈尔滨: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2004: 38-78.
- [ 16 ] Zhu W J, Gao Y, Zhang H B, Liu L L. Optimization of the land use pattern in Horqin Sandy Land by using the CLUMondo model and Bayesian belief network. *Science of the Total Environment*, 2020, 739: 139929.
- [ 17 ] Fan J Q, Wang L, Qin J X, Zhang F R, Xu Y. Evaluating cultivated land stability during the growing season based on precipitation in the Horqin Sandy Land, China. *Journal of Environmental Management*, 2020, 276: 111269.
- [ 18 ] Musa A L, Zhang Y H, Cao J, Wang Y C, Liu Y. Relationship between root distribution characteristics of Mongolian pine and the soil water content and groundwater table in Horqin Sandy Land, China. *Trees*, 2019, 33(4): 1203-1211.
- [ 19 ] Wu Y, Liu T X, Paredes P, Duan L M, Wang H Y, Wang T S, Pereira L S. Ecohydrology of groundwater-dependent grasslands of the semi-arid Horqin sandy land of Inner Mongolia focusing on evapotranspiration partition. *Ecohydrology*, 2016, 9(6): 1052-1067.
- [ 20 ] 张旭阳, 刘英, 龙林丽, 苏永东, 陈东兴, 陈孝杨. 干旱半干旱区采煤沉陷引起的土壤水分变化及对植物生理生态潜在影响分析综述. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2022(1): 1-12.
- [ 21 ] Fu A H, Chen Y N, Li W H. Water use strategies of the desert riparian forest plant community in the lower reaches of Heihe River Basin, China. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1293-1305.
- [ 22 ] Stirzaker R J, Passioura J B, Wilms Y. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and Soil*, 1996, 185(1): 151-162.
- [ 23 ] Maihemuti B, Simayi Z, Alifujiang Y, Aishan T, Abliz A, Aierken G. Development and evaluation of the soil water balance model in an inland arid delta oasis: implications for sustainable groundwater resource management. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 25: e01408.
- [ 24 ] Zhang Y C, Yu J J, Wang P, Fu G B. Vegetation responses to integrated water management in the Ejina Basin, northwest China. *Hydrological Processes*, 2011, 25(22): 3448-3461.
- [ 25 ] Rao D L N, Pathak H. Ameliorative influence of organic matter on biological activity of salt-affected soils. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1996, 10(4): 311-319.
- [ 26 ] Chen Y N, Chen Y P, Xu C C, Ye Z X, Li Z Q, Zhu C G, Ma X D. Effects of ecological water conveyance on groundwater dynamics and riparian vegetation in the lower reaches of Tarim River, China. *Hydrological Processes*, 2009: 170-177.

- [27] 陈冠光. 疏勒河下游地下水埋深与土壤理化性质变化对植物群落的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 35-64.
- [28] Prieto I, Armas C, Pugnaire F I. Hydraulic lift promotes selective root foraging in nutrient-rich soil patches. *Functional Plant Biology*, 2012, 39(9): 804.
- [29] Zhang X L, Zhou J H, Lai L M, Jiang L H, Zheng Y R, Shi L J. Spatial Characterization of Soil Water-salt and Nutrient in a Desert Riparian Area Along the Lower Reaches of Heihe River, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(9): 1739-1747.
- [30] Luo Q, Ning H, Chen Q. Relation between vegetation and soil of haloxylon ammodendron plantation in the process of sand-fixation. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(4): 780-790.
- [31] Lu R H, Zhou Z L, Yu J, Liang J Y, Ge L W, Wang X A. Physicochemical properties and enzymatic activities of different plant communities in the up reaches of Hotan River. *Forest Research*, 2016, 29(1): 117-123.
- [32] 李玉霖, 崔建垣, 苏永中. 不同沙丘生境主要植物比叶面积和叶干物质含量的比较. *生态学报*, 2005, 25(2): 304-311.
- [33] Zhan J, Li Y L, Han D, Yang H L. Biomass allocation and its ecological significance of three dominant sand-fixing shrubs in the semi-arid desert area. *Journal of Desert Research*, 2020, 40(5): 149-157.
- [34] Hou Z F, Lv G H, Jiang L M. Functional diversity can predict ecosystem functions better than dominant species: the case of desert plants in the ebinur lake basin. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2858.
- [35] Orellana F, Verma P, Loheide S P II, Daly E. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater-dependent ecosystems. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(3): 1-24.
- [36] Hu D, Lv G H, Qie Y D, Wang H F, Yang F, Jiang L M. Response of morphological characters and photosynthetic characteristics of *Haloxylon ammodendron* to water and salt stress. *Sustainability*, 2021, 13(1): 388.
- [37] Wright I J, Reich P B, Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology, structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. *Functional Ecology*, 2001, 15(4): 423-434.
- [38] Wang B, Zeng F J, Zhang B, Gao H H, Zhang L, Li M M, Luo H L, Li S M. Responses of leaf morphology and PS II chlorophyll fluorescence in leaves of *Alhagi sparsifolia* growing in soils with varying depths to the groundwater table. *Pratacultural Science*, 2018, 35(3): 606-613.
- [39] Martinetti S, Fatichi S, Floriancic M, Burlando P, Molnar P. Field evidence of riparian vegetation response to groundwater levels in a gravel-bed river. *Ecology*, 2021, 14(2): e2264.
- [40] Smith S D, Devitt D A, Sala A N, Cleverly J R, Busch D E. Water relations of riparian plants from warm desert regions. *Wetlands*, 1998, 18(4): 687-696.
- [41] 张琳, 杨劫, 呼格吉勒图, 宋炳煜, 丁越岩. 水位梯度对毛乌素沙地柳湾林群落特征影响. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1296-1300.
- [42] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 凌红波, 岳俊生. 基于生物量的塔里木河下游胡杨(*Populus euphratica*)生态服务价值评估. *生态学报*, 2019, 39(4): 1441-1451.
- [43] 董道瑞. 塔里木河下游胡杨、柽柳群落地上生物量遥感估测[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012: 17-56.
- [44] 牛婷. 塔里木河下游植被恢复遥感定量评估研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2014: 54-92.
- [45] Wilcox D A, Nichols S J. The effects of water-level fluctuations on vegetation in a Lake Huron wetland. *Wetlands*, 2008, 28(2): 487-501.
- [46] Carvajal D E, Loayza A P, Rios R S, Gianoli E, Squeo F A. Population variation in drought-resistance strategies in a desert shrub along an aridity gradient: Interplay between phenotypic plasticity and ecotypic differentiation. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2017, 29: 12-19.
- [47] 张俊, 赵振宏, 王冬, 马洪云, 郭莉. 鄂尔多斯高原地下水浅埋区植被与地下水埋深关系. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4): 141-145.
- [48] Hao X M, Li W H, Huang X, Zhu C G, Ma J X. Assessment of the groundwater threshold of desert riparian forest vegetation along the middle and lower reaches of the Tarim River, China. *Hydrological Processes*, 2009: 178-186.
- [49] 李文静, 吕光辉, 张磊, 王恒方, 李周康, 王金龙, 马辉英, 刘志东. 干旱区荒漠植物体内潜在水源差异及利用策略分析. *生态环境学报*, 2019, 28(8): 1557-1566.
- [50] Hoekstra N J, Finn J A, Hofer D, Lüscher A. The effect of drought and interspecific interactions on depth of water uptake in deep- and shallow-rooting grassland species as determined by  $\delta^{18}\text{O}$  natural abundance. *Biogeosciences*, 2014, 11(16): 4493-4506.
- [51] Xu W X, Liu W, Yang W K, Tang C W, Blank D. *Rhombomys opimus* contribution to the "fertile island" effect of tamarisk mounds in Junggar Basin. *Ecological Research*, 2012, 27(4): 775-781.
- [52] Milcu A, Allan E, Roscher C, Jenkins T, Meyer S T, Flynn D, Bessler H, Buscot F, Engels C, Gubsch M, König S, Lipowsky A, Loranger J, Renker C, Scherber C, Schmid B, Thébaud E, Wubet T, Weisser W W, Scheu S, Eisenhauer N. Functionally and phylogenetically diverse plant communities key to soil biota. *Ecology*, 2013, 94(8): 1878-1885.
- [53] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. *Ecological Applications*, 2001, 11(4): 1046-1059.
- [54] Naumburg E, Mata-Gonzalez R, Hunter R G, McLendon T, Martin D W. Phreatophytic vegetation and groundwater fluctuations: a review of current research and application of ecosystem response modeling with an emphasis on great basin vegetation. *Environmental Management*, 2005, 35(6): 726-740.
- [55] Pierick K, Leuschner C, Homeier J. Topography as a factor driving small-scale variation in tree fine root traits and root functional diversity in a species-rich tropical montane forest. *The New Phytologist*, 2021, 230(1): 129-138.

- [56] Luo Y, Chen Y, Peng Q W, Li K H, Mohammad A, Han W X. Nitrogen and phosphorus resorption of desert plants with various degree of propensity to salt in response to drought and saline stress. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107488.
- [57] Huang G, Su Y G, Mu X H, Li Y. Foliar nutrient resorption responses of three life-form plants to water and nitrogen additions in a temperate desert. *Plant and Soil*, 2018, 424(1/2): 479-489.
- [58] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 2008, 103(4): 551-560.
- [59] Chen G G, Yue D X, Zhou Y Y, Wang D, Wang H, Hui C, Guo J J. Driving factors of community-level plant functional traits and species distributions in the desert-wetland ecosystem of the Shule River Basin, China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(1): 323-337.
- [60] Wang L, Wang L, He W, An L, Xu S. Nutrient resorption or accumulation of desert plants with contrasting sodium regulation strategies. *Scientific Reports*, 2017, 7: 17035.
- [61] Prieto I, Querejeta J I. Simulated climate change decreases nutrient resorption from senescing leaves. *Global Change Biology*, 2020, 26(3): 1795-1807.
- [62] Ashraf M, Shahzad S M, Imtiaz M, Rizwan M S, Arif M S, Kausar R. Nitrogen nutrition and adaptation of glycophytes to saline environment: a review. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2018, 64(9): 1181-1206.
- [63] Preston K A, Cornwell W K, Denoyer J L. Wood density and vessel traits as distinct correlates of ecological strategy in 51 California coast range angiosperms. *The New Phytologist*, 2006, 170(4): 807-818.
- [64] He D, Yan E R. Size-dependent variations in individual traits and trait scaling relationships within a shade-tolerant evergreen tree species. *American Journal of Botany*, 2018, 105(7): 1165-1174.
- [65] 魏圆慧, 王志鑫, 梁文召, 马富龙, 韩路. 胡杨枝叶功能性状对地下水位梯度的响应与适应. *西北植物学报*, 2020, 40(6): 1043-1051.
- [66] Celentano D, Rousseau G X, Engel V L, Zelarayán M, Oliveira E C, Araujo A C M, Moura E G. Degradation of riparian forest affects soil properties and ecosystem services provision in eastern Amazon of Brazil. *Land Degradation & Development*, 2017, 28(2): 482-493.
- [67] Pei S F, Fu H, Wan C G. Changes in soil properties and vegetation following enclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 124(1/2): 33-39.
- [68] Kardol P, Bezemer T M, van der Putten W H. Temporal variation in plant-soil feedback controls succession. *Ecology Letters*, 2006, 9(9): 1080-1088.
- [69] van der Putten W H, Bardgett R D, Bever J D, Bezemer T M, Casper B B, Fukami T, Kardol P, Klironomos J N, Kulmatiski A, Schweitzer J A, Suding K N, van de Voorde T F J, Wardle D A. Plant-soil feedbacks: the past, the present and future challenges. *Journal of Ecology*, 2013, 101(2): 265-276.
- [70] Jia X X, Shao M G, Wei X R, Horton R, Li X Z. Estimating total net primary productivity of managed grasslands by a state-space modeling approach in a small catchment on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, 2011, 160(3/4): 281-291.
- [71] Gu C J, Mu X M, Gao P, Zhao G J, Sun W Y, Tatarok J, Tan X J. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(2): 716-728.
- [72] Han C, Liu Y J, Zhang C K, Li Y G, Zhou T R, Khan S, Chen N, Zhao C M. Effects of three coniferous plantation species on plant-soil feedbacks and soil physical and chemical properties in semi-arid mountain ecosystems. *Forest Ecosystems*, 2021, 8(1).
- [73] 冯起. 半湿润地区改良风沙土壤性质研究. *水土保持通报*, 1998, 18(4): 1-6.
- [74] Wu G L, Ren G H, Wang D, Shi Z H, Warrington D. Above- and below-ground response to soil water change in an alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 476: 120-127.
- [75] Deng L, Wang K B, Li J P, Zhao G W, Shangguan Z P. Effect of soil moisture and atmospheric humidity on both plant productivity and diversity of native grasslands across the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2016, 94: 525-531.
- [76] Ding J Y, Eldridge D J. Climate and plants regulate the spatial variation in soil multifunctionality across a climatic gradient. *CATENA*, 2021, 201: 105233.
- [77] Wu G L, Zhang Z N, Wang D, Shi Z H, Zhu Y J. Interactions of soil water content heterogeneity and species diversity patterns in semi-arid steppes on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1362-1367.
- [78] Aggangan N S, Dell B, Malajczuk N. Effects of soil pH on the ectomycorrhizal response of *Eucalyptus urophylla* seedlings. *New Phytologist*, 1996, 134(3): 539-546.
- [79] Ochoa-Hueso R, Eldridge D J, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Bowker M A, Gross N, Le Bagousse-Pinguet Y, Quero J L, García-Gómez M, Valencia E, Arredondo T, Beinticenco L, Bran D, Cea A, Coaguila D, Dougill A J, Espinosa C I, Gaitún J, Guuroh R T, Guzman E, Gutiérrez J R, Hernández R M, Huber-Sannwald E, Jeffries T, Linstädter A, Mau R L, Moneris J, Prina A, Pucheta E, Stavi I, Thomas A D, Zaady E, Singh B K, Maestre F T. Soil fungal abundance and plant functional traits drive fertile island formation in global drylands. *Journal of Ecology*, 2018, 106(1): 242-253.
- [80] Aponte C, García L V, Marañón T. Tree species effects on nutrient cycling and soil biota: a feedback mechanism favouring species coexistence. *Forest Ecology and Management*, 2013, 309: 36-46.
- [81] Ayres E, Steltzer H, Berg S, Wallenstein M D, Simmons B L, Wall D H. Tree species traits influence soil physical, chemical, and biological properties in high elevation forests. *PLoS One*, 2009, 4(6): e5964.

- [82] Qiao L L, Li Y Z, Song Y H, Zhai J Y, Wu Y, Chen W J, Liu G B, Xue S. Effects of vegetation restoration on the distribution of nutrients, glomalin-related soil protein, and enzyme activity in soil aggregates on the loess plateau, China. *Forests*, 2019, 10(9): 796.
- [83] Wang L, Mu Y, Zhang Q F, Zhikaun J. Effects of vegetation restoration on soil physical properties in the wind-water erosion region of the northern loess plateau of China. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2012, 40(1): 7-15.
- [84] Vincent John Martin Noah Linus Felde, Chamizo S, Felix-Henningsen P, Drahorad S L. What stabilizes biological soil crusts in the Negev Desert? *Plant and Soil*, 2018, 429(1/2): 9-18.
- [85] Ding J Y, Eldridge D J. Biotic and abiotic effects on biocrust cover vary with microsite along an extensive aridity gradient. *Plant and Soil*, 2020, 450(1/2): 429-441.
- [86] Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1/2): 195-213.
- [87] Huang K, Zhang Y J, Zhu J T, Liu Y J, Zu J X, Zhang J. The influences of climate change and human activities on vegetation dynamics in the Qinghai-Tibet plateau. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 876.
- [88] Li J J, Peng S Z, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 247: 260-270.
- [89] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Spatial variability of soil moisture content and its relation to environmental indices in a semi-arid gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2001, 49(4): 723-750.
- [90] Nyberg L. Spatial variability of soil water content in the covered catchment at Gårdsjön, Sweden. *Hydrological Processes*, 1996, 10(1): 89-103.
- [91] Florinsky I V, Kuryakova G A. Influence of topography on some vegetation cover properties. *CATENA*, 1996, 27(2): 123-141.
- [92] Li Q, Shi X Y, Wu Q Q. Exploring suitable topographical factor conditions for vegetation growth in Wanhuigou catchment on the Loess Plateau, China: a new perspective for ecological protection and restoration. *Ecological Engineering*, 2020, 158: 106053.
- [93] Chu H S, Venevsky S, Wu C, Wang M H. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2051-2062.
- [94] Hansen B E. Sample splitting and threshold estimation. *Econometrica*, 2000, 68(3): 575-603.
- [95] 任海, 王俊, 陆宏芳. 恢复生态学的理论与研究进展. *生态学报*, 2014, 34(15): 4117-4124.
- [96] Ross S M. Organic matter in tropical soils: current conditions, concerns and prospects for conservation. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1993, 17(3): 265-305.
- [97] Belgiu M, Drăguț L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.
- [98] 周俊. 鄂尔多斯陶利水源地地下水开采的植被生态风险研究[D]. 吉林大学, 2008: 21-70.
- [99] Altdorff D, Dietrich P. Combination of electromagnetic induction and gamma spectrometry using K-means clustering: a study for evaluation of site partitioning. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(3): 345-354.
- [100] 马小钦. 机器学习在农业物联网中的应用. *科学咨询: 科技·管理*, 2017(9): 45-46.
- [101] Khosravi V, Doulati Ardejani F, Yousefi S, Aryafar A. Monitoring soil lead and zinc contents via combination of spectroscopy with extreme learning machine and other data mining methods. *Geoderma*, 2018, 318: 29-41.
- [102] 赵雅琼. 非饱和带土壤水分特征曲线的测定与预测[D]. 西安: 长安大学, 2015: 20-50.
- [103] 刘洪斌, 王伟, 魏朝富, 谢德体. AR 模型在土壤水分动态模拟中的应用. *山地学报*, 2004, 22(1): 121-125.
- [104] 葛翔宇, 丁建丽, 王敬哲, 王飞, 蔡亮红, 孙慧兰. 基于竞争适应重加权采样算法耦合机器学习的土壤含水量估算. *光学学报*, 2018, 38(10): 393-400.
- [105] Soylu M E, Istanbuluoglu E, Lenters J D, Wang T. Quantifying the impact of groundwater depth on evapotranspiration in a semi-arid grassland region. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(3): 787-806.
- [106] Bolten J D, Crow W T. Improved prediction of quasi-global vegetation conditions using remotely-sensed surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19): 1-5.
- [107] Araya-López R A, Lopatin J, Fassnacht F E, Hernández H J. Monitoring Andean high altitude wetlands in central Chile with seasonal optical data: a comparison between Worldview-2 and Sentinel-2 imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 145: 213-224.