

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.019

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.019

吴天宇,冯天骄,刘亚博,等.晋西黄土区典型人工林与天然林的植被属性对土壤水力特性的影响[J].水土保持学报,2025,39(4):148-157,167.

WU Tianyu, FENG Tianjiao, LIU Yabo, et al. Effects of vegetation attributes on soil hydraulic properties in typical plantations and natural forests in the loess region of western Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4):148-157,167.

晋西黄土区典型人工林与天然林的植被 属性对土壤水力特性的影响

吴天宇^{1,2}, 冯天骄^{1,2}, 刘亚博^{1,2}, 王 平^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 2.山西吉县森林生态系统

国家野外科学观测研究站,山西 吉县 042200)

摘 要: [目的] 长期植被恢复下土壤水力特性对于植被建设生态服务功能起着关键作用,为探究不同植被恢复类型下植被属性对土壤水力特性的影响机制。[方法] 选取晋西黄土区典型的 4 种人工林与天然林(油松人工林、侧柏人工林、刺槐人工林、天然次生林)为研究对象,测定林下植被多样性、植被属性及土壤持水性质,对比分析植被恢复方式对土壤水力特性的影响。[结果] 1)天然次生林在树高、枝下高和冠幅上显著高于人工林,天然林树高、枝下高和冠幅与刺槐人工林相比,分别提高 58.84%、254.4% 和 32.59%;而天然次生林 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数明显高于人工林。2)在土壤水力特性方面,天然次生林在生长季水分体积分数峰值、饱和水与田间持水量较高;人工林土壤水分体积分数,尤其是刺槐人工林始终低于天然次生林。3)土壤性质和植被属性对土壤水力特性均存在显著关系,天然林的全氮和树高相比刺槐人工林分别提高 52.67% 和 37.04%,其林地饱和水分比刺槐人工林提高 6.09%。[结论] 天然次生林在调节土壤水分平衡、改良土壤水力性质上优势明显,人工林则因植被结构单一等因素,在土壤水力性质改善上存在不足。因此,黄土高原植被恢复应重视多样性提升,充分发挥天然次生林优势并结合人工林,以实现可持续发展。

关键词: 黄土高原; 植被恢复; 多样性指数; 土壤水力特性

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0148-10

Effects of Vegetation Attributes on Soil Hydraulic Properties in Typical Plantations and Natural Forests in the Loess Region of Western Shanxi

WU Tianyu^{1,2}, FENG Tianjiao^{1,2}, LIU Yabo^{1,2}, WANG Ping^{1,2}

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.National Field Scientific

Observation and Research Station of Forest Ecosystem in Jixian County, Jixian, Shanxi 042200, China)

Abstract: [Objective] Soil hydraulic properties under long-term vegetation restoration play a critical role in the ecological service functions of vegetation construction. This study aimed to explore the mechanisms by which vegetation attributes influence soil hydraulic properties under different vegetation restoration types. [Methods] Four typical plantations and natural forests in the Loess Plateau region of western Shanxi, including *Pinus tabulaeformis* plantation, *Platycladus orientalis* plantation, *Robinia pseudoacacia* plantation, and one natural secondary forest, were selected as the research subjects. Understory vegetation diversity, vegetation attributes, and soil water retention properties were measured to compare and analyze the influence of vegetation restoration methods on soil hydraulic properties. [Results] 1) The natural secondary forest showed significantly higher tree height and branch height, and greater canopy width compared to the plantations. For instance, the values of tree height, branch

收稿日期: 2025-01-14

修回日期: 2025-03-21

录用日期: 2025-04-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-23

资助项目: 国家自然科学基金项目(42371114); 中央高校基本科研业务费专项(QNTD202303); 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室开放项目(VRMD2303)

第一作者: 吴天宇(2001—),男,硕士研究生,主要从事水土保持与植被恢复研究。E-mail: 15180300010@163.com

通信作者: 冯天骄(1991—),男,博士,博士生导师,主要从事生态水文学研究。E-mail: fengtianjiao1991@bjfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

height, and canopy width of the natural secondary forest were 58.84%, 254.4% and 32.59% higher, respectively, than those of the *R. pseudoacacia* plantation. Additionally, the Shannon-Wiener diversity index and Simpson's dominance index of the natural secondary forest were significantly higher than those of the plantations. 2) Regarding soil hydraulic properties, the natural secondary forest exhibited higher peak volumetric water content, saturated water content, and field capacity during the growing season. The soil volumetric water content in the plantations, especially in the *R. pseudoacacia* plantation, was consistently lower than that in the natural secondary forest. 3) Both soil properties and vegetation attributes had significant relationships with soil hydraulic properties. For instance, the total nitrogen content and tree height of the natural secondary forest were 52.67% and 37.04% higher, respectively, than those of the *R. pseudoacacia* plantation. The saturated water content of the natural secondary forest was 6.09% higher than that of the *R. pseudoacacia* plantation. [Conclusion] The natural secondary forest demonstrates clear advantages in regulating soil water balance and improving soil hydraulic properties. In contrast, the plantations, due to their simpler vegetation structure, shows deficiencies in improving soil hydraulic properties. Therefore, vegetation restoration on the Loess Plateau should emphasize biodiversity enhancement, fully utilize the advantages of natural secondary forests while integrating plantations to achieve sustainable development.

Keywords: the Loess Plateau; vegetation restoration; diversity indices; soil hydraulic properties

Received: 2025-01-14

Revised: 2025-03-21

Accepted: 2025-04-16

Online(www.cnki.net): 2025-05-23

随着黄河流域生态保护和高质量发展等国家战略实施,黄土高原的战略地位日渐突出,黄土高原的治理与发展,对黄河流域健康及高质量发展都有着极其重要的意义^[1]。几十年来,国家投入巨大的人力、物力和财力开展黄土高原生态治理工作。主要采用梯田、植树造林、植被自然恢复和修建淤地坝来控制黄土高原的水土流失,改善区域生态环境^[2-3]。大面积的植被建设使黄土高原生态环境得到明显改善^[4]。但同时大规模人工植被种植也导致土壤水分过度消耗,使植被生长与水分需求的矛盾逐渐增加,加重土壤干燥化^[5-7],成为当前黄土高原生态恢复的重要制约因素,威胁区域生态系统健康与稳定^[8]。所以,表征土壤持水能力的水力特性的深入研究,为科学可持续地生态建设和水资源管理提供理论参考。

近年来,关于黄土高原土壤水力特性的研究备受关注,特别在植被覆盖条件下水力性质的变化等研究方面。土壤是自然界的大水库,是森林进行水文调节的主要场所,对降水具有调节储蓄和渗透等作用,使其成为土壤贮水和地下径流,从而发挥森林涵养水源和保持水土功能^[9]。焦峰等^[10]研究黄土高原的植被覆盖度20 a的变化规律发现,植被能有效改良土壤结构,明显改善当地生态环境;刘卓昕^[11]研究指出,植被恢复显著改善土壤蓄水和持水等水文物理性质。其中,土壤颗粒组成发生显著变化,对土壤质地也产生一定影响;王紫薇等^[12]研究

发现,不同植被恢复方式影响土壤的持水能力,主要体现在土壤密度、土壤孔隙度、粒径组成及土壤有机质等土壤理化性质差异上;凤紫棋等^[13]研究表明,不同植被恢复方式对地表土壤理化性质的改变不同,对土壤持水能力的影响存在显著差异;葛俸池^[14]研究发现,黄土高原人工乔灌草植被层和枯落物层具有较大的持水能力,植被层与枯落物层持水能力受植被地上生物量和枯落物蓄积量的控制。

目前,植被恢复对土壤持水能力的影响机制仍有待深入探究。现有研究仅聚焦于退耕还林土壤的水分变化,或不同植被恢复类型下各土层深度的土壤持水能力,但其对水文过程、水力性质的影响机制研究尚不深入,无法系统阐明在天然植被恢复类型和人工植被恢复类型下,土壤物理性质对土壤持水能力的影响。研究晋西黄土区不同植被恢复类型下的植被建设对土壤水力特性的影响,有助于进一步了解黄土高原地区土壤水力性质。

本研究以位于黄土高原东南部具有区域代表性的山西省西南部临汾市吉县蔡家川流域作为研究区,选取典型的油松人工林、刺槐人工林、侧柏人工林和天然次生林为研究对象,探究不同植被恢复类型下的土壤水力特性、植被属性、多样性和土壤理化性质特征及其影响机制。通过分析不同植被恢复类型间土壤持水能力的差异性,从植被多样性与土壤理化性质等指标来综合评价该地区不同典型林分的生态效益,

为该区以后的植被恢复与重建提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域(110°27′~111°07′E, 35°53′~36°21′N)。该地区处于黄河中游黄土高原的东南部(图 1),属于半湿润气候区,具有典型的黄土高原地貌特征,包括残垣沟壑、梁式丘陵及沟壑区。研究区海拔为 900~1 560 m,地势起伏较大,地形复杂。该区域年平均气温约为 10℃,气候温和,降水量分布不均,年降水量约为 579.5 mm,年平均日照时间为 2 563.8 h。降水主要集中在夏季,年际变化较大,干湿季节明显。

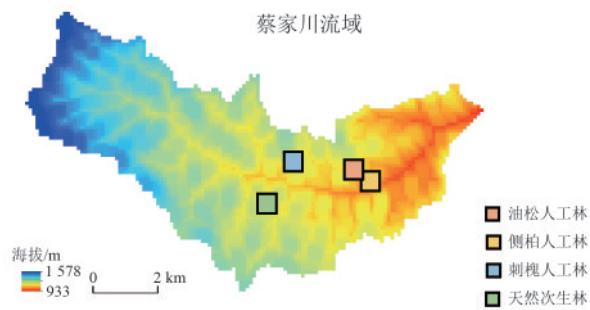


图 1 研究区概况
Fig. 1 Overview of the study area

土壤类型以褐土为主,黄土母质显著,呈碱性,土壤层次较深,部分区域表现为土壤侵蚀严重,坡度较陡。该地区的土壤水分特性受降水和植被覆盖的影响显著,水分保持能力和透水性较为复杂。研究区域植被种类丰富,涵盖人工林和天然林,主要的乔

木树种包括油松人工林(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏人工林(*Platycladus orientalis*)、刺槐人工林(*Robinia pseudoacacia*),而天然次生林以山杨(*Populus davidiana*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等为主。其中,油松人工林和侧柏人工林为该地区的重要造林树种,具有较强的抗旱性和生长适应性;刺槐人工林作为干旱地区的生态防护林,发挥着重要的土壤保持作用。天然次生林则具有较高的物种多样性,恢复部分区域的生态功能,是对比研究的天然参照林。且该研究区具备重要的生态与水文研究价值,通过剖析不同植被类型下的土壤水力特性,可揭示植被类型对土壤水分动态变化、土壤侵蚀及水分保持能力的影响,为黄土高原地区的生态恢复和水资源管理提供科学支撑。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设计 刺槐、油松和侧柏是晋西地区主要造林树种,在蔡家川流域中占到人工林总面积的 70%以上,种植时间长,效益较好。因此,在研究区内以代表性和典型性原则,选择蔡家川流域的油松人工林、侧柏人工林、刺槐人工林及天然次生林等 4 种典型植被恢复类型作为研究对象。不同植被恢复类型林分恢复年限及林龄相同,土质均为粉壤土,坡向坡度一致,地形等立地条件相近。每种林分选择 3 个 10 m×10 m 的乔木样方,记录每个样地的空间位置和地貌类型等信息。每块样方选择树种分布均匀,群落结构完整,层次分明、林分发育阶段比较统一,能够很好地代表人工林和天然次生林的典型样地。各样地的具体情况、植被状况、地理信息见表 1。

表 1 研究样地概况

Table 1 Basic information of the sample sites of the study

因子	林地类型			
	油松人工林	侧柏人工林	刺槐人工林	天然林
土质	粉壤土	粉壤土	粉壤土	粉壤土
经度(E)	110°45′33″	110°44′25″	110°44′24″	110°43′41″
纬度(N)	36°16′23″	36°16′31″	36°16′32″	36°15′59″
坡向	阳坡	阳坡	阳坡	阳坡
坡度/(°)	26	25	25	23
郁闭度/%	34	25	38	41
林分密度/ (株·hm ⁻²)	1 600	1 700	1 325	1 075
海拔/m	1 371	1 210	1 358	1 081
主要植被	油松人工林(<i>Pinus tabulaeformis</i>)、陕西莢蒾(<i>Viburnum schens-ianum</i> M)、黄刺玫(<i>Rosa xanthina</i>)等	侧柏人工林(<i>Platycladus orientalis</i>)、白刺花(<i>Sophora davidii</i>)、丁香(<i>Sgzygium aromaticum</i>)等	刺槐人工林(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、黄刺玫(<i>Rosa xanthina</i>)、金银木(<i>Lonicera maackii</i>)等	辽东栎(<i>Quercus wutaishanica</i>)、山杨(<i>Populus davidiana</i>)、沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)

1.2.2 样品采集 在2023年和2024年7月生长季选取地形均一、坡度坡向等立地条件相似的林分进行植被调查。植被调查主要采用嵌套的方法,首先,在油松人工林、侧柏人工林、刺槐人工林及天然次生林4种不同植被类型中设置3个10 m×10 m的乔木样方,选择树木生长情况良好、群落特征明显、剔除生长过剩的林木及枯木,以确保取样的完整性,采用卷尺和游标卡尺,测定乔木样方中每个乔木的胸径、树高、冠幅、基径等因子。其次,在每个乔木样方中按照“品”字划分出3个5 m×5 m的灌木样方,用卷尺准确记录其株高、冠幅、胸径、基径等因子。最后,在每个灌木样方中选择5个1 m×1 m的草本样方,在草本样方内,对草本植物的生长情况和分布状况进行调查,目视法估算样方植被盖度,并记录样方内草本植物种类、物种高度、株数、盖度等数据。

在2023年和2024年7月生长季进行取土采样,对角线法在每个乔木样方内挖掘5个重复的小规模土壤剖面,并且在0~200 cm设置8个土层,具体的土层分别为0~10、10~30、30~60、60~90、90~120、120~150、150~180、180~200 cm,每次取样后用取样袋带回实验室,自然风干后进行理化性质的测定。使用100 cm³的环刀在每层土壤的中部取原状土样,每个土层取5个样品,作为重复,用于测定土壤体积质量和水分特征曲线。

1.2.3 土壤理化性质测定 将野外取回的土壤样品自然风干后,用木棍等工具将土块轻轻碾碎,使其成为松散的颗粒状。接着将碾碎后的土壤过2 mm筛子,去除其中较大的石块、植物残体等杂质。对于过筛后的土壤,再取部分样品进一步研磨并通过0.15 mm筛子,以获取更细颗粒的土壤样品,用于后续对土壤理化性质更为精确的测定。其中,土壤pH采用电位法测定;使用激光粒度分析仪测定土壤机械组成;土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法测定;土壤全氮采用半微量凯氏法测定;土壤全磷采用HClO₄-H₂SO₄法测定;土壤全钾通过ICP分析测定;土壤体积分质量采用环刀法测定。

土壤水分采用ZL6设备测定,每个样地的土壤水分监测工作于2022年开始,布设0~10、10~30、30~60、60~90、90~120、120~150、150~180和180~200 cm相同的8个土层监测剖面。每个土层的土壤水分体积分数通过ZL6设备每15 min自动采集1次,该监测系统持续运行,并收集2023年和2024年全年的数据,用于分析不同植被恢复类型下的土壤水分变化趋势。

1.3 水分特征曲线测定与模型模拟

土壤水分特征曲线采用离心机法测定^[15]。van Genuchten模型为描述连续的土壤水分特征曲线,由van Genuchten在1980年提出。在土壤水分运动和水文学研究中,van Genuchten模型是常用的工具。该模型的优势在于其能够涵盖从饱和到干燥条件下的全范围土壤水分状态,对理解土壤水分的可利用性和运动至关重要。通过参数化的形式,考虑土壤孔隙的分布、曲线对称性及在不同压力条件下土壤水分的变化。使得van Genuchten模型在捕捉不同类型土壤的水分行为方面非常有效,因此,广泛应用于研究土壤水分体积分数与土壤吸力间的关系。其计算公式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ 体积含水率,cm³/cm³; h 为土壤吸力,cm; θ_r 和 θ_s 分别为残余含水率和饱和含水率,cm³/cm³; α 为与进气值相关的参数; m 和 n 为土壤水分特征曲线的形状系数,其中 n 代表曲线的陡缓情况; $m = 1 - 1/n$ 。

土壤饱和水分体积分数、毛管持水量、田间持水量和凋萎含水量分别以环刀土在离心实验0、10、33、1 500 kPa离心力下的土壤质量分数表示;重力水通过土壤饱和水分质量分数与田间持水量之间的差值计算所得。有效水为田间持水量与凋萎含水量之间的差值计算所得。速效水和迟效水分别为田间持水量与毛管持水量的差值,以及毛管持水量与凋萎水量间的差值。

1.4 多样性指数计算

为避免单一多样性指数出现结果偏差,选用物种丰富度 Marhalef 指数、香农维纳多样性 Shannon-Wiener 指数和辛普森优势度指数 Simpson index 及均匀度指数 Pielou 对不同植被恢复类型下的灌木层和草本层植被多样性进行合理分析和比较,从而对同植被恢复类型的植被多样性作出科学判断。

1)物种丰富度指数 Margalef 指数:

$$PI = \frac{(S - 1)}{\ln N} \quad (2)$$

2)香农维纳多样性 Shannon-Wiener 指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (3)$$

3)辛普森优势度指数 Simpson index:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (4)$$

4)均匀度指数 Pielou:

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (5)$$

式中: S 为每个样方的物种总数; N 为样方内全部种的个体总数; P_i 为第 i 个种的重要值; P 为 S 个物种的全部重要值之和。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2019 软件进行数据整理, SPSS 24.0 软件进行数据统计分析。采用 Retention Curve (RETC) 软件结合 Origin 2021 软件拟合土壤水分特征曲线并计算不同经验模型的拟合参数, 并利用 Origin 2021 软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复类型的树木结构指标

由表 2 可知, 不同植被恢复类型的树木结构指标

存在显著差异 ($p < 0.05$), 天然次生林的树高、枝下高及冠幅显著高于侧柏人工林、刺槐人工林和油松人工林, 分别为 (18.33 ± 4.01) 、 (13.29 ± 4.29) 、 (20.99 ± 14.58) m; 天然次生林胸径最小, 低于侧柏人工林、刺槐人工林和油松人工林, 仅 (12.24 ± 3.6) cm。侧柏人工林与油松人工林最为相似, 在胸径、枝下高和冠幅上无显著差异 ($p < 0.05$), 侧柏人工林的树高略小于油松人工林, 为 (3.37 ± 1.28) m, 油松人工林树高为 (5.65 ± 1.37) m。刺槐人工林在树高、枝下高和冠幅上显著高于侧柏人工林和油松人工林, 但低于天然次生林, 分别为 (11.54 ± 3.67) 、 (3.75 ± 1.40) 、 (15.83 ± 5.87) m; 但刺槐人工林在胸径上显著高于侧柏人工林、天然次生林和油松人工林, 为 (21.50 ± 4.97) cm。

表 2 不同植被恢复类型的树木结构指标比较

植被恢复类型	胸径/cm	树高/m	枝下高/m	冠幅/m
侧柏人工林	18.75±6.79b	3.73±1.28d	0.28±0.42c	6.20±4.14c
刺槐人工林	21.50±4.97a	11.54±3.67b	3.75±1.40b	15.83±5.87b
天然次生林	12.24±3.60c	18.33±4.01a	13.29±4.29a	20.99±14.58a
油松人工林	18.92±5.27b	5.65±1.37c	1.09±0.28c	5.80±7.03c

注: 表中数据为平均值±标准差; 不同小写字母表示不同植被恢复类型之间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2 不同植被恢复类型的林下植被群落多样性

不同植被恢复类型的植被群落多样性各不相同。由图 2 可知, 油松人工林、侧柏人工林、刺槐人工林和天然次生林对比, 在灌木层中, 天然次生林的 Simpson 优势度指数 (0.911)、Shannon-Wiener 多样性指数 (1.566) 和丰富度指数 (1.643) 均最高, Pielous 均匀度指数 (0.784),

略低于油松人工林和侧柏人工林。草本层中相反, 侧柏人工林 Simpson 多样性指数 (0.648)、Shannon-Wiener 多样性指数 (1.262) 和丰富度指数 (1.425) 在 4 种林地中最高, 天然次生林最低; 但天然次生林均匀度指数略大于刺槐人工林, 刺槐人工林的 4 种指数明显低于其他 3 种林地, 说明刺槐人工林的林下植被多样性最差。

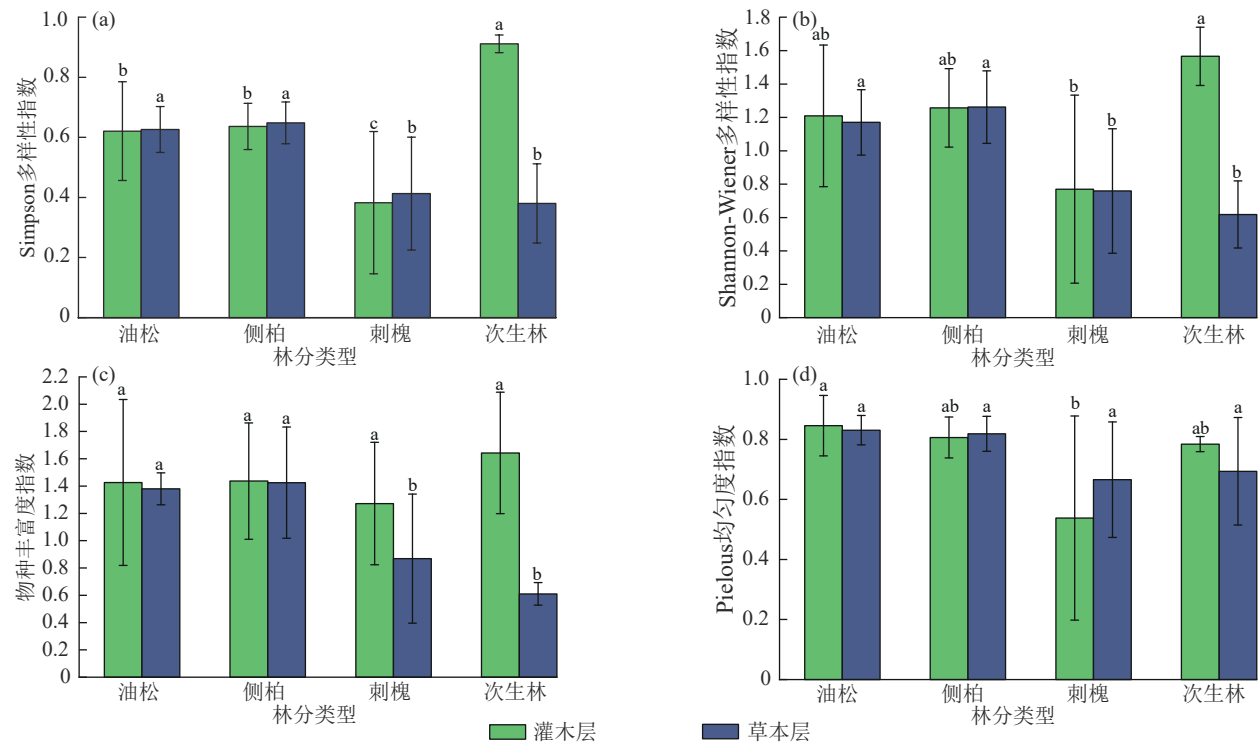


图 2 不同植被恢复类型的植被群落多样性

Fig. 2 Vegetation community diversity under different vegetation restoration types
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

2.3 不同植被恢复类型的土壤水分体积分数

由图 3 可知,不同植被恢复类型的土壤水分体积分数的变化受生长季降雨量影响。从总体来看,各林地的土壤水分体积分数均在 4 月或 5 月达到全年最高值,依次为天然次生林>侧柏人工林>刺槐人工林>油松人工林,天然次生林的土壤水分体积分数最高,达到 0.194 cm³/cm³,明显高于其他林地。不同林地的水分体积分数在 5 月后明显降低,刺槐人工林 7 月达到最低值,为 0.123 cm³/cm³,其他林地

则在 8 月达到最低值,而后保持相对稳定。油松人工林和刺槐人工林的土壤水分体积分数相接近,全年均低于天然次生林和侧柏人工林。不同植被类型在不同土层的土壤水分体积分数,在 0~50 cm 土层,天然次生林的土壤水分体积分数最高,达到 0.262 cm³/cm³,其次是侧柏、油松和刺槐。随着土层深度增加,所有植被类型的土壤水分体积分数均逐渐降低。在 150~200 cm 土层,土壤水分体积分数达到最低值。

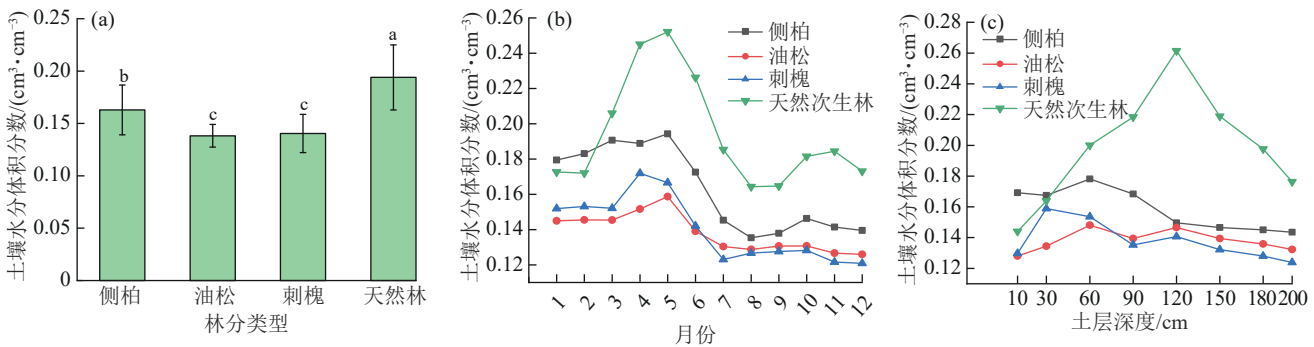


图 3 不同植被恢复类型的土壤水分体积分数

Fig. 3 Soil volumetric water content under different vegetation restoration types

2.4 不同植被恢复类型的水分特征

图 4 为刺槐人工林、油松人工林、侧柏人工林和天然次生林 4 种不同植被恢复类型的土壤水分特征曲线。在低基质吸力时,天然次生林的土壤水分体

积分通常较高。表明天然次生林在低吸力条件下,能够保持较多的土壤水分,天然次生林在长期自然演替过程中形成多样化的植物种类和根系网络,有助于土壤对水分的截留和保持。

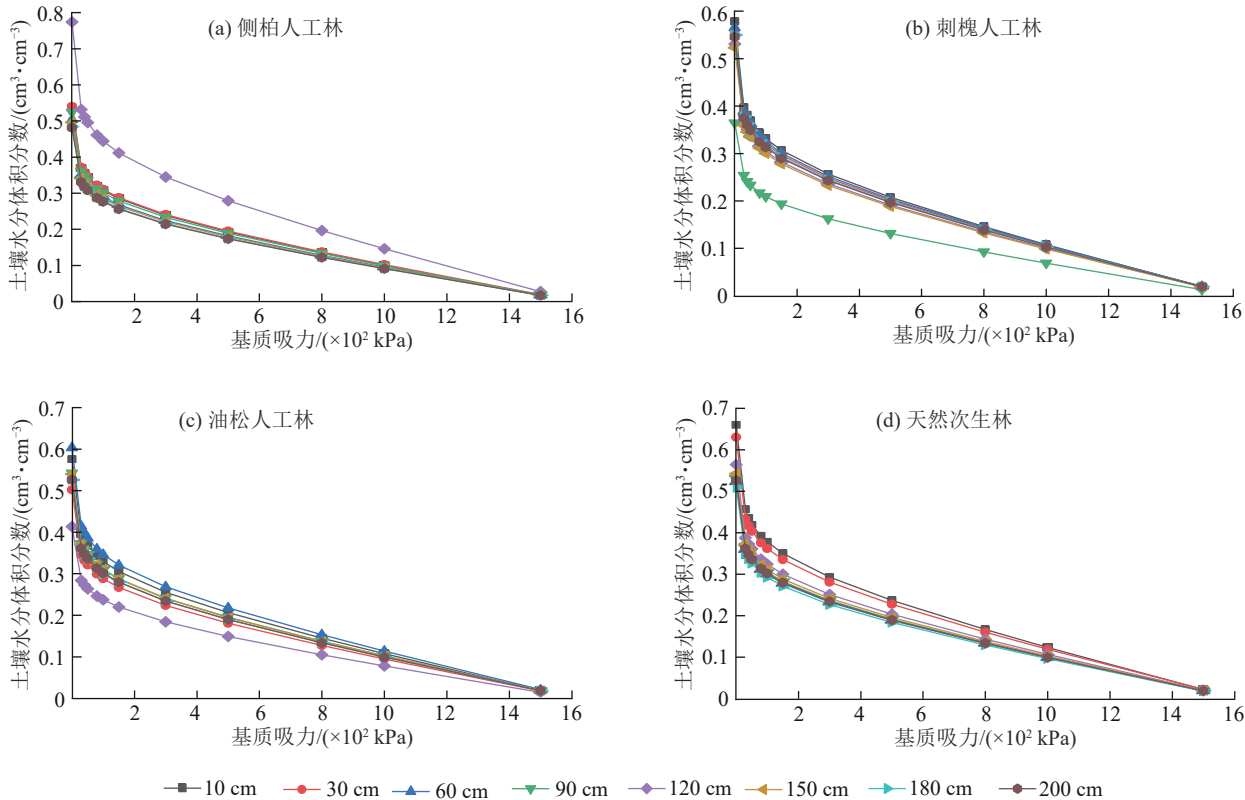


图 4 不同植被恢复类型下不同深度土层的水分特征

Fig. 4 Moisture characteristic curves of soil layers at different depths under different vegetation restoration types

2.5 不同植被恢复类型下 0~200 cm 土层土壤持水性

由图 5 可知 4 种不同植被恢复类型(侧柏、刺槐、天然林、油松)的土壤持水性。天然林在饱和质量含水量(0.561 cm³/cm³)、田间持水量(0.386 cm³/cm³)、重力水(0.175 cm³/cm³)、全有效水(0.366 cm³/cm³)和速效水(0.136 cm³/cm³)及迟效水(0.230 cm³/cm³)方面均为最高,体现出其林下土壤较强的保水和供水能力;刺槐在此类指标上几乎均为最低,表明其土壤保水和供水能力最弱;油松和侧柏在各项指标上表现相近,介于天然林和刺槐之间。不同植被恢复类型下土壤持水性依次天然林>油松>侧柏>刺槐。

2.6 不同植被恢复类型的土壤性质、树木结构指标和群落多样性对土壤水力特性的影响

图 6 为 0~200 cm 土层土壤性质、树木结构指标和群落多样性与土壤水力特性的关系。全氮和全磷及砂粒与饱和质量含水量、田间持水量、重力水、全有效水、速效水、迟效水、无效水呈显著正相关;粉粒和土

壤体质量与上述土壤持水性及毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度呈显著负相关($p<0.05$,图 6)。树高、枝下高与土壤水分体积分数呈显著正相关,但胸径与土壤水分体积分数呈负相关($p<0.05$)。相比土壤性质和树木结构指标,群落多样性和土壤水力特性关系相对较弱,表现为其指标间相关系数普遍较低($p>0.05$)。

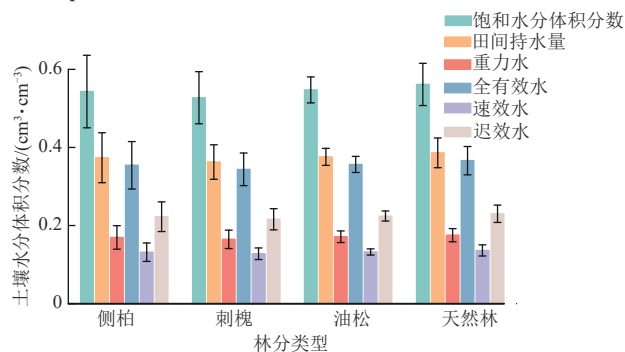


图 5 不同植被恢复类型下 0~200 cm 土层土壤持水性
Fig. 5 Soil water-holding properties of the soil layer from 0 to 200 cm under different vegetation restoration types

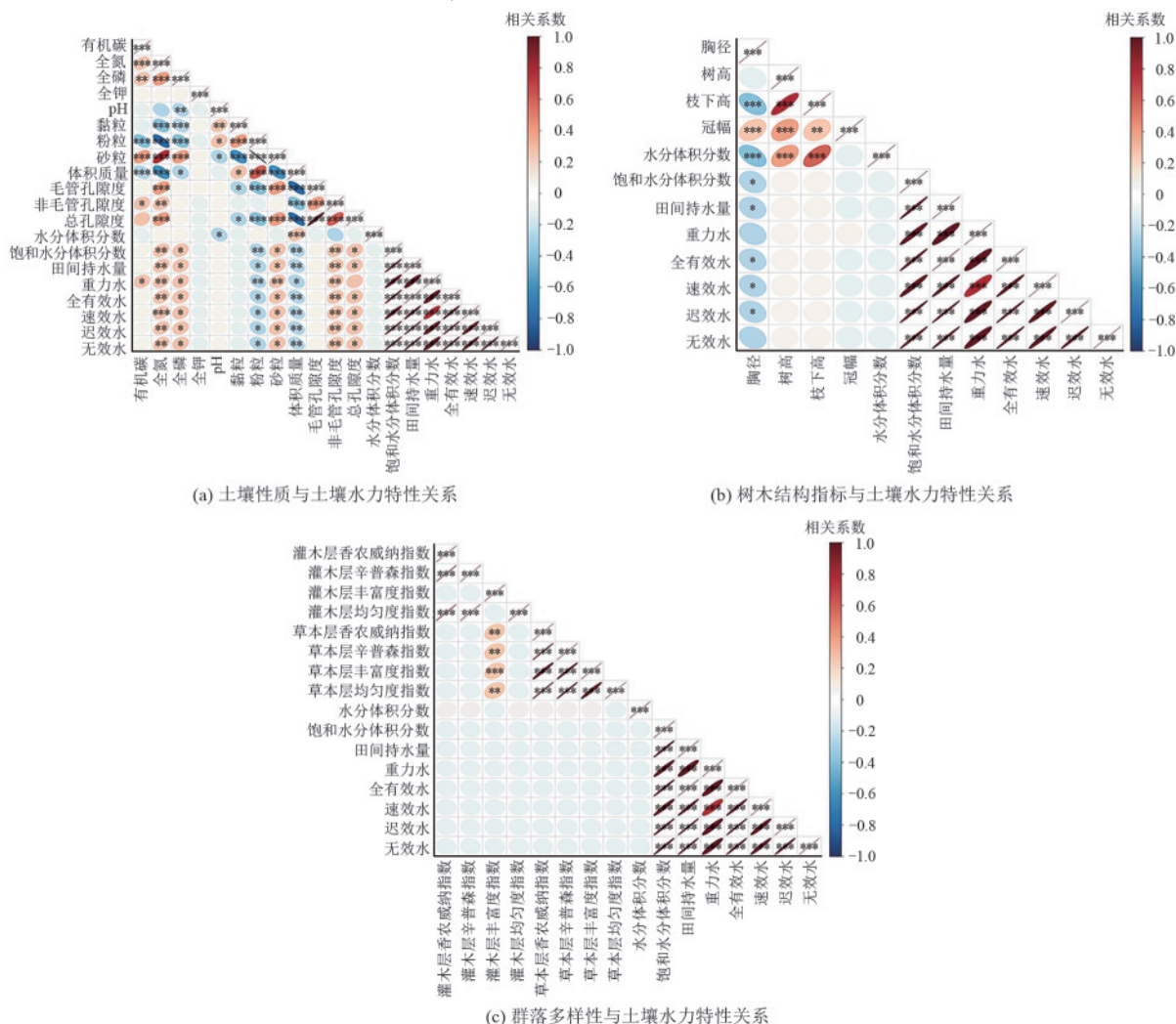
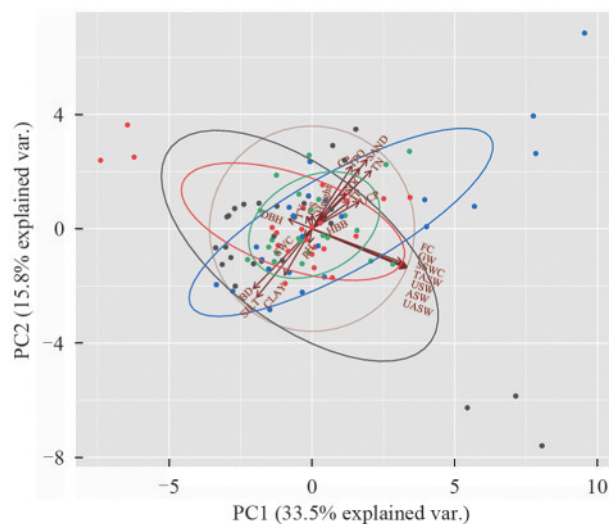


图 6 土壤性质、树木结构指标和群落多样性与土壤水力特性的关系矩阵

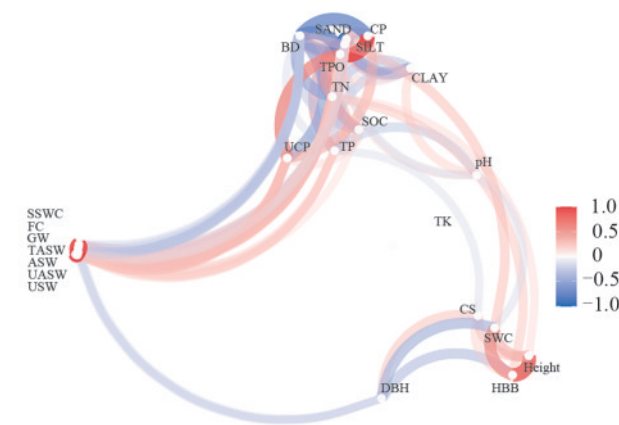
Fig. 6 The relationship matrix between soil properties, tree structure indices, community diversity and soil hydraulic properties
http://stbxb.alljournal.com.cn

采用主成分分析和网络关系,分析不同环境因子与土壤水力特性的相关性(图7),第1主成分占比为33.5%,第2主成分占比为15.8%,土壤水力特性与土壤有机碳、全氮、砂粒等环境因子均位于第1主成分的正值方向,表明土壤水力特性与环境因子间联系紧密。相关性网络图中的节点表示环境因子或土壤水力特性

性,节点与节点间的连线表示二者的相关性(红色为正相关,蓝色为负相关,颜色越深相关性越强)。土壤有机碳、全磷、全氮与田间持水量、饱和水分体积分数、速效水、全有效水呈正相关。全钾和黏粒与饱和水分体积分数、田间持水量、重力水、全有效水、速效水、迟效水、无效水呈负相关,但不显著。



(a) 土壤水力特性与环境因子的主成分分析



(b) 土壤水力特性与环境因子网络关系

注: SOC、TN、TP、TK、pH、CLAY、SILT、SAND、BD、CP、UCP、TPO、SWC、SSWC、FC、GW、TASW、ASW、UASW、USW、DBH、Height、HBB、CS分别为有机碳、全氮、全磷、全钾、酸碱度、黏粒、粉粒、砂粒、体积质量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度、水分体积分数、饱和体积含水量、田间持水量、重力水、全有效水、速效水、迟效水、无效水、胸径、树高、枝下高、冠幅。

图7 土壤水力特性与环境因子的主成分分析和网络关系

Fig. 7 Principal component analysis and network relationships between soil hydraulic properties and environmental factors

3 讨论

3.1 植被恢复类型对植被属性及林下植被多样性的影响

本研究表明,不同植被恢复类型对植被属性及林下植被多样性有显著影响。在植被属性方面,天然次生林树高、枝下高和冠幅均显著高于人工林,尤其在树高和冠幅上差异最为明显^[16]。可能与天然次生林的较长生长周期和较为稳定的生态环境条件有关^[17]。天然次生林具有较高的生物多样性和生态系统稳定性,能够提供更丰富的资源供植被生长^[18]。而人工林如油松、侧柏和刺槐人为种植和管理,生长条件相对较为单一,导致其植被属性显著低于天然次生林^[19]。

在林下植被多样性方面,天然次生林的灌木层和草本层多样性指数均显著高于人工林,尤其表现在Simpson多样性指数和Shannon-Wiener多样性指数^[20]。天然次生林的高树冠和丰富的底层植物提供更为多样的微生境,有利于更多物种的生长^[21-23]。相比之下,刺槐人工林的植被多样性最低,特别是在草本层的多样性显著较低^[24]。可能与刺槐的树冠较稀疏,且其根系生长较为强劲,导致林下的生物竞争较

为激烈,从而抑制草本植物的生长和多样性^[25]。

3.2 植被恢复类型对土壤水力性质差异的影响机制

本研究发现,植被恢复类型显著影响土壤水力性质。天然次生林的土壤水分体积分数在生长季节的峰值明显高于人工林(图2),表明天然次生林在水分保持和吸水能力上具有更强的优势^[26]。天然次生林根系分布更广,植被层较为复杂,能够更好地促进土壤水分的蓄积和补充。天然次生林的高导水率和渗透率与其深层根系和丰富的有机质输入密切相关^[27]。如辽东栎的深根系可形成垂直孔隙通道,显著提升饱和导水率,而凋落物分解增加的有机质通过改善团聚体稳定性,增强水分扩散率。相比之下,刺槐人工林因浅根系和单一植被结构,导致土壤孔隙连通性差,渗透率较低^[28]。除本研究关注的土壤性质、树木结构指标和群落多样性外,影响土壤水力特性的仍存在诸多其他因素,例如,导水率、土壤水分扩散率、渗透率等土壤水文过程指标,将显著影响土壤水文循环过程,从而影响土壤水力性质^[27-28]。

在土壤持水性方面,天然次生林的饱和质量含水量和田间持水量均较高(图5),表明其土壤保水能力强于其他类型人工林。相比之下,刺槐人工林

的土壤持水性能较差,可能与其根系对水分的过度消耗和土壤有机质质量分数较低相关。油松人工林和侧柏人工林的土壤持水性质较为接近,可能与其根系结构较为相似且对水分的需求较为稳定有关。另有研究^[29]表明,在整个生态系统的复杂运作中,植被自身所具备的独特属性无疑是对水分变化起着极为关键作用的重要因素,如通过树干径流或者冠层截留,此过程贯穿植被的整个生长周期,进而深刻改变着土壤水分在时间和空间上的动态变化状态。

本研究发现,乔灌木群落多样性与土壤水力特性间无显著相关性,可能反映植被结构属性和土壤理化性质对水力特性的主导作用。例如,天然次生林的高冠幅和复杂根系结构通过直接改善土壤孔隙度与水分入渗路径,可能掩盖群落多样性的间接效应。未来研究需结合多时间尺度分析,进一步揭示生物多样性与土壤水文功能的潜在协同机制。

3.3 植被属性与水力特性差异及其对黄土高原植被恢复的启示

本研究揭示植被属性和土壤水力性质间的密切关系,为黄土高原的植被恢复提供重要的启示。在黄土高原生态区域,植被恢复工作面临着诸多复杂的挑战与机遇^[30]。植被属性与土壤水力性质间的相互关系犹如生态系统中的关键链条,深刻影响着整个生态系统的结构与功能^[31]。本研究通过系统的调查与分析,揭示天然次生林与人工林在生态过程中的不同作用机制。天然次生林由于其长期自然演替形成的复杂植被结构和丰富的物种多样性,在土壤水分的动态平衡调节方面表现卓越,有效促进土壤水分的入参与保持,同时,对土壤水力性质如土壤导水率、持水性等产生积极的改良作用。自然形成的生态协同机制为黄土高原植被恢复提供理想的蓝本。相比之下,人工林尽管能够在短期内快速建立起植被覆盖,尤其是在极端干旱区域为生态系统提供一定程度的防护功能,但因其植被结构相对单一,根系分布与土壤的相互作用不够完善,导致土壤水力性质难以得到有效改善,甚至可能因过度消耗土壤水分而引发土壤干旱化等问题。因此,将人工林作为天然次生林的补充与辅助,充分发挥二者的优势,是实现黄土高原植被恢复长期可持续性的关键路径。

综上所述,黄土高原的植被恢复应强调多样性和生态系统功能的整体提升,重点考虑植被类型对水土保持、土壤水力特性及生物多样性的综合影响。在此基础上,合理规划植被恢复模式,将天然次生林的优势最大化,同时结合适当的人工林,以确保生态恢复的长期可持续性。

4 结 论

1)天然次生林通过复杂的植被结构,增强土壤孔隙连通性与有机质积累,从而提升饱和导水率、田间持水量等关键水力指标,形成更优的水分调控能力。

2)单一树种人工林(如刺槐)因根系分布浅、林下植被稀疏,导致土壤孔隙连通性差、有机质输入不足,加剧水分过度消耗与土壤干燥化,限制其水土保持功能的可持续性。

3)黄土高原植被恢复需优先保护天然次生林,同时,结合人工林构建多树种混交模式,通过提升植被多样性与结构复杂性,协同改善土壤水力特性,增强生态系统对于旱胁迫的适应能力。

参考文献:

- [1] 贾路,于坤霞,徐国策,等.基于耦合协调度的黄土高原地区NDVI与降水关系的变异诊断[J].生态学报,2021,41(18):7357-7366.
JIA L, YU K X, XU G C, et al. Diagnosis of the relationship between NDVI and precipitation based on the coupling coordination degree[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(18):7357-7366.
- [2] 李相儒,金钊,张信宝,等.黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J].地球环境学报,2015,6(4):248-254.
LI X R, JIN Z, ZHANG X B, et al. Analysis of ecosystem management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development[J]. Journal of Earth Environment, 2015,6(4):248-254.
- [3] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(20):7398-7409.
- [4] SONG X Z, PENG C H, ZHOU G M, et al. Chinese Grain for Green Program led to highly increased soil organic carbon levels: A meta-analysis [J]. Scientific Reports, 2014,4:e4460.
- [5] 张恒宇,安娟,吴元芝,等.黄土高原典型植被条件下土壤剖面水、碳分布季节变化研究[J].中国水土保持, 2024(3):39-45.
ZHANG H Y, AN J, WU Y Z, et al. Seasonal variation of water and carbon distribution in soil profile of typical vegetation conditions on the Loess Plateau [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(3):39-45.
- [6] JIA X X, SHAO M A, ZHU Y J, et al. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2017,546:113-122.
- [7] SHAO M A, WANG Y Q, XIA Y Q, et al. Soil drought and water carrying capacity for vegetation in the

- critical zone of the Loess Plateau: A review[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-8.
- [8] 杨磊, 张子豪, 李宗善. 黄土高原植被建设与土壤干燥化: 问题与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7382-7388. YANG L, ZHANG Z H, LI Z S. Effects of large-scale re-vegetation on soil desiccation in the Loess Plateau: Problems and perspectives [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7382-7388.
- [9] 刘忠玲, 刘建明, 胡伟, 等. 不同密度胡桃楸次生林枯落物和土壤持水特性的研究[J]. 森林工程, 2021, 37(3): 52-59. LIU Z L, LIU J M, HU W, et al. Water-holding characteristics of litter and soil of *Juglans mandshurica* natural secondary forest with different densities [J]. Forest Engineering, 2021, 37(3): 52-59.
- [10] 焦峰, 温仲明, 李锐. 黄土高原退耕还林(草)环境效应分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 26-29. JIAO F, WEN Z M, LI R. Analysis on environment effect of the returning farmland into forest and grassland on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 26-29, 78.
- [11] 刘卓昕. 植被恢复对黄土丘陵沟壑区土壤水文性质以及产流模式的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. LIU Z X. Effects of vegetation restoration on soil hydrological properties and runoff model in loess hilly and gully region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [12] 王紫薇, 黄来明, 邵明安, 等. 青海高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力及影响因素[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1722-1730. WANG Z W, HUANG L M, SHAO M A, et al. Soil water holding capacity under different land use patterns in the Qinghai alpine region [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1722-1730.
- [13] 凤紫棋, 孙文义, 穆兴民, 等. 黄土高原沟壑区植被恢复方式对小流域土壤水分的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(4): 1-10. FENG Z Q, SUN W Y, MU X M, et al. Effects of vegetation restoration methods on soil moisture in the small basins of Loess Plateau gully region [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4): 1-10.
- [14] 葛俸池. 黄土高原典型人工植被水源涵养功能研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023. GE F C. Study on water conservation function of typical artificial vegetation in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] 周卓丽, 张卓栋, 高晓飞, 等. 离心机与压力板仪测定土壤水分特征曲线比较[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(4): 101-108. ZHOU Z L, ZHANG Z D, GAO X F, et al. Comparison of centrifuge and pressure plate on soil water retention curve determination [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(4): 101-108.
- [16] 陈胤好. 林下植被和土壤酸碱度对桉楠林分生长及土壤特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2022. CHEN Y H. Effects of undergrowth vegetation and soil pH on stand growth and soil characteristics of *Phoebe zhennan* [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [17] 贾存, 郭明明, 王倩, 等. 华北落叶松人工林和天然林径向生长对气候变化的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(1): 120-128. JIA C, GUO M M, WANG Q, et al. Response of the radial growth of *Larix principis-rupprechtii* plantations and natural forests to climate change [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2022, 42(1): 120-128.
- [18] CHAMAGNE J, TANADINI M, FRANK D, et al. Forest diversity promotes individual tree growth in central European forest stands [J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(1): 71-79.
- [19] 刘茗, 曹林桦, 刘彩霞, 等. 亚热带4种典型森林植被土壤固碳细菌群落结构及数量特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 1028-1039. LIU M, CAO L H, LIU C X, et al. Characterization of population and community structure of carbon-sequestration bacteria in soils under four types of forest vegetations typical of subtropical zone [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 1028-1039.
- [20] ZHOU J, GAO Y, WANG Y, et al. The effect of different afforestation tree species on plant diversity after 50 years on mount Tai, China [J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2021, 19(6): 4515-4526.
- [21] ZHANG T, YAN Q L, WANG G G, et al. The effects of stump size and within-gap position on sprout non-structural carbohydrates concentrations and regeneration in forest gaps vary among species with different shade tolerances [J]. Ecological Processes, 2021, 10(1): e25.
- [22] SIROLI H, TORRELLA S A. The role of secondary forest in the survival and growth of native species: Tree planting field experiment in the delta of the Paraná River (Argentina) [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 546: e121329.
- [23] MARTINELLI L M, DE SOUZA REZENDE R. Time will tell: Taxonomic and functional diversity of monilophyte ferns in native forests and abandoned silviculture systems [J]. Austral Ecology, 2024, 49(2): e13471.
- [24] WANG N, BI H X, PENG R D, et al. Disparities in soil and water conservation functions among different forest types and implications for afforestation on the Loess Plateau [J]. Ecological Indicators, 2023, 155: e110935.

(下转第167页)