

黄土高原切沟汇水区植被恢复模式对 土壤饱和导水率的影响及机制

许银^{1,2}, 袁江^{1,2}, 符素华^{1,2}

(1.北京师范大学地表过程与水土风沙灾害风险防控全国重点实验室,北京 100875;

2.北京师范大学地理科学学部,北京 100875)

摘要: [目的] 土壤饱和导水率(K_s)是反映土壤水分和溶质运移能力的关键参数,对于理解和预测土壤水分运动和土壤侵蚀等过程至关重要。研究黄土高原切沟汇水区不同植被恢复模式下 K_s 的变化规律及影响因素,对区域水土流失改善具有重要意义。[方法] 选取纸坊沟小流域38个典型植被恢复样地(5个裸地、3个旱地、8个乔木林地、3个其他林地、5个灌木林地和14个其他草地)为研究对象,测定不同样地0~10 cm土层 K_s 、土壤理化性质和根系特征,利用Spearman相关性分析、偏最小二乘回归(PLSR)和多元逐步回归分析揭示植被恢复模式对 K_s 的影响机制,并建立 K_s 预测模型。[结果] 不同植被恢复模式下 K_s 差异显著($p<0.05$),平均 K_s 大小为灌木林地(1.46 mm/min)>其他林地(1.36 mm/min)>其他草地(1.23 mm/min)>乔木林地(1.04 mm/min)>旱地(0.65 mm/min)>裸地(0.15 mm/min)。Spearman相关性分析和PLSR模型表明,砂粒、黏粒、体积质量、最大持水量、非毛管孔隙度、根体积密度、根质量密度、1~2 mm径级根质量密度、0~1 mm径级根质量密度是影响 K_s 的重要因子。逐步线性回归显示,加入根系指标后,预测模型解释力得到显著提升,表明中等根系通过扩张孔隙网络与抵消压实效应显著优化 K_s 。[结论] 植被恢复通过根系与土壤相互作用,改善孔隙结构并显著提升 K_s 。研究结果为黄土高原生态恢复工程的配置优化及水文模型参数化提供科学依据。

关键词: 饱和导水率; 植被恢复; 偏最小二乘回归; 多元逐步回归; 切沟汇水区

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0138-09

Effects and Mechanisms of Vegetation Restoration Patterns on Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Gully Catchment Areas of Loess Plateau

XU Yin^{1,2}, YUAN Jiang^{1,2}, FU Suhua^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Hazards Risk Governance, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] Soil saturated hydraulic conductivity (K_s) is a critical parameter reflecting the transport capacity of water and solutes in soil, and is crucial for understanding and predicting processes such as soil water movement and soil erosion. Investigating the variation patterns and influencing factors of K_s under different vegetation restoration patterns in gully catchment areas of the Loess Plateau is of great significance for improving regional soil and water loss. [Methods] Thirty-eight typical vegetation restoration plots in the Zhifanggou small watershed (5 bare lands, 3 drylands, 8 arbor forests, 3 other forests, 5 shrub forests, and 14 other grasslands) were selected as the research objects. The K_s , soil physicochemical properties, and root characteristics of the 0–10 cm soil layer in different plots were measured. Spearman correlation analysis, partial least squares regression (PLSR), and multiple stepwise regression analysis were used to reveal the influencing mechanisms of vegetation restoration patterns on K_s , and the K_s prediction model was established. [Results] Significant differences in K_s were observed under different vegetation restoration patterns ($p<$

收稿日期: 2025-04-10

修回日期: 2025-05-16

录用日期: 2025-05-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-02

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42130701)

第一作者: 许银(2000—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 202421051022@mail.bnu.edu.cn

通信作者: 符素华(1973—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: suhua@bnu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

0.05)。The average K_s values were ranked as follows: shrub forests (1.46 mm/min) > other forests (1.36 mm/min) > other grasslands (1.23 mm/min) > arbor forests (1.04 mm/min) > drylands (0.65 mm/min) > bare lands (0.15 mm/min). Spearman analysis and the PLSR model indicated that sand content, clay content, bulk density, maximum water-holding capacity, non-capillary porosity, root volume density, root mass density, root mass density in 1–2 mm diameter classes, and root mass density in 0–1 mm diameter classes were important influencing factors on K_s . Stepwise linear regression showed that after adding root indicators, the explanatory capacity of the prediction model was significantly improved, indicating that intermediate roots significantly optimized K_s by expanding the pore network and offsetting compaction effects. [Conclusion] Vegetation restoration markedly enhances K_s by improving pore structure through root-soil interactions. The research results provide a scientific basis for optimizing ecological restoration project configurations and hydrological model parameterization in the Loess Plateau.

Keywords: saturated hydraulic conductivity; vegetation restoration; partial least squares regression; multiple stepwise regression; gully catchment areas

Received: 2025-04-10

Revised: 2025-05-16

Accepted: 2025-05-26

Online(www.cnki.net): 2025-07-02

土壤饱和导水率(K_s)是表征土壤水分和溶质运移能力的关键参数,其变化直接调控降水入渗效率、地表径流生成阈值及土壤侵蚀动力学过程^[1-2]。作为水文模型的核心输入参数, K_s 的精确量化对解析陆地-大气界面水热交换及包气带溶质迁移规律具有决定性作用^[3-4]。 K_s 受多种因素影响,已有研究表明土壤体积质量^[5]、质地^[6]、孔隙度^[7]和有机质^[8]等土壤理化性质对饱和导水率有影响,并已构建相应的 K_s 预测模型^[9-12]。然而关于根系对饱和导水率的影响却仍然存在争论。有研究^[8,13]表明,根系对土壤的挤压作用导致土壤体积质量升高,土壤孔隙度降低,丰富的根系生长可能堵塞大孔隙并暂时降低饱和导水率。也有研究^[14-15]发现,植物根系和土壤颗粒之间的相互作用可以通过创造优先流通道和增强土壤孔隙之间的连通性来增加 K_s 。目前关于根系影响土壤水力特性的作用机制仍存在认知不足,尤其是在与根系特征和土壤理化性质等参数建立定量关联方面缺乏系统性表征^[16-17]。

黄土高原是全球土壤侵蚀最为严重的生态脆弱区之一,在特殊的地貌结构、强烈的降雨冲刷及长期不合理的土地利用作用下,切沟侵蚀已成为该区域最强烈的侵蚀形态^[18]。切沟汇水区是切沟侵蚀发生与演化的直接产流单元,承担着汇集地表径流与动能传递的核心功能,其水文过程与土壤退化问题长期制约着区域生态安全^[19]。与非切沟汇水区相比,切沟汇水区具有更强的汇流特征和水动力强度,在降雨过程中易形成集中径流,导致地表扰动剧烈、土壤结构破坏显著,从而表现出更高的水文响应敏感性与侵蚀风险^[20]。在此背景下,实施科学合理的植被恢复措施,不仅有助于削弱地表径流动能、稳定土壤结构、抑制沟蚀发展过程,还能够提升区域水文调节能力与生态系统服务功能,

对黄土高原水土保持与生态修复具有重要意义。

植被通过截留降水、提升土壤入渗性能、降低径流侵蚀动力等方式显著影响切沟发育^[21]。自1999年实施“退耕还林(草)”工程以来,大规模植被恢复工程通过改变地表覆盖结构和土壤性质,显著影响土壤水分运移机制^[22]。QIU等^[23]研究发现,与农田相比,灌木 K_s 增加155%,林地增加91%,草地增加23%;ZHAO等^[10]研究表明, K_s 平均值遵循草地>农田>林地的递减顺序;PAN等^[24]研究表明,植被恢复后 K_s 平均值为林地>灌木>草地。表明植被恢复对 K_s 的改善效应呈显著的空间异质性,而针对切沟汇水区的植被恢复模式与 K_s 协同机制仍缺乏系统认知。基于此,本研究以黄土高原切沟汇水区为研究对象,探究不同植被模式下的 K_s 及其影响因素,揭示植被恢复对 K_s 的作用机制,以为黄土高原植被恢复的成效评价及优化配置提供理论依据,也为区域生态水文模型和土壤侵蚀模型的参数化提供重要支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安塞区纸坊沟小流域(36°43′28″~36°46′42″N, 109°13′46″~109°16′03″E)地处黄土高原中部,属典型的黄土丘陵沟壑区,流域面积8.27 km²,海拔1 100~1 400 m。该流域受半干旱大陆性季风气候影响,年降水量为505 mm,降雨时空分布不均,主要集中在夏季。年平均气温8.8℃,平均无霜期159 d。流域内主要土壤类型为黄绵土。目前流域内的主要乔木类型主要有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、旱柳(*Salix matsudana*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)和国槐(*Sophora japonica*)等;灌木类型主要有柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘

(*Hippophae rhamnoides*)、白刺花(*Sophora davidii*)和黄刺玫(*Rosa xanthina*)等;草本类型主要有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、白莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)和大披针苔草(*Carex lanceolata*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 基于2024年6月针对安塞区纸坊沟小流域切沟汇水区的实地调查,本研究选取38个典型植被恢复样地^[25-26],包括5个裸地、3个旱地、8个乔木林地、3个其他林地、5个灌木林地及14个其他草地(图1)。其中,其他林地的植被恢复时长约为2 a,除旱地外其余样地均已撂荒或处于恢复状态约25 a。所有样地植被恢复前土地利用类型均为旱地,选择的这些样地具有相似的坡度和以往的耕作模式。在每个样地内,通过开挖土壤剖面采集0~10 cm土层的土壤样品。使用自封袋收集扰动土,用于测定土壤质地和有机质;采用铝盒和容积为100 cm³的环刀采集原状土,用于测定土壤物理性质,每个样地重复采集3次。使用直径11 cm、高8 cm的PVC管采集原状土,用于测定土壤饱和导水率及根系相关指标,每个样地重复采集5次。

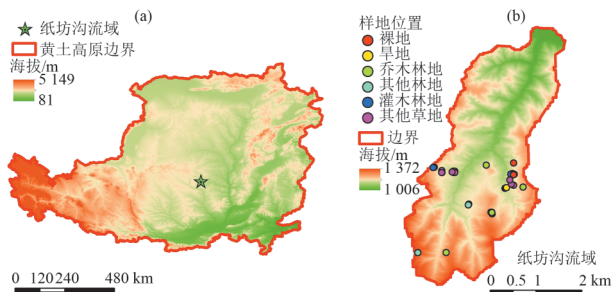


图1 研究区位置及采样点

Fig. 1 Location of study area and sampling sites

1.2.2 室内分析 采集的扰动土经室内风干、研磨后过2、0.25 mm筛,采用重铬酸钾热容量法测定有机质,采用马尔文激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)测定其颗粒组成、黏粒直径(<0.002 mm)、粉粒直径(0.002~0.05 mm)和砂粒直径(0.05~2 mm)。使用铝盒采集的原状土用Yoder湿筛法测定土壤水稳性团聚体,振筛机30 r/min运行10 min,团聚体分级为>5、5~2、2~1、1~0.5、0.5~0.25 mm。团聚体平均重量直径(MWD,mm)计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

式中: X_i 为每一级团聚体的平均直径,mm; W_i 为第 X_i 级团聚体重量百分数,%。

采集的原状土用环刀法^[26]测定土壤体积质量、最大持水量、田间持水量、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。PVC管采集的原状土,采用定水头法^[26]测定

K_s 。测定完成后,将土体中的根系小心洗出,利用Canon3扫描仪对根系进行扫描(DPI=600),借助WinRHIZO软件计算根长、根体积及根表面积等参数。完成扫描的根系,按照≤1、1~2、2~5、>5 mm的径级,分别装入信封袋,在65℃条件下烘干至恒重,得到不同径级的根系生物量。最后,依据采集的土样体积,分别计算得出根长密度(RLD,cm/cm³)、根体积密度(RVD,cm³/cm³)、根表面积密度(RSD,cm²/cm³)及根质量密度(RMD,kg/m³)。

饱和导水率的计算公式为:

$$K_T = \frac{QL}{AtH} \quad (2)$$

式中: K_T 为 T 温度下的饱和导水率,mm/min; Q 为环刀下方出水量,cm³; L 为原状土高度,cm; A 为原状土横截面面积,cm²; t 为时间,min; H 为水头高度,cm。

为消除水温对饱和导水率的影响,将不同水温下测量的 K_T 转换为10℃温度下的值,计算公式为:

$$K_s = \frac{K_T}{0.7 + 0.03T} \quad (3)$$

式中: K_s 为10℃水温下土壤饱和导水率,mm/min; T 为试验期间的水温,℃。

根系指标计算公式为:

$$RMD = \frac{M}{V} \quad (4)$$

$$RLD = \frac{RL}{V} \quad (5)$$

$$RSD = \frac{RSA}{V} \quad (6)$$

$$RVD = \frac{RV}{V} \quad (7)$$

式中: M 为根系干重,g; RL 为根系总长度,cm; RSA 为根系总表面积,cm²; RV 为根系总体积,cm³; V 为取样体积,cm³。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式的土壤理化性质

不同植被恢复模式的土壤性质差异较大(表1)。土壤剖面平均体积质量为1.06~1.28 g/cm³,平均最大持水量和田间持水量分别为38.51%~53.18%、34.75%~44.16%,平均非毛管孔隙度、毛管孔隙度分别为3.02%~7.19%、46.00%~50.61%。平均有机质和团粒平均重量直径分别为5.29~15.89 g/kg、0.58~4.07 mm,平均黏粒、粉粒、砂粒体积分数分别为16.86%~25.60%、60.07%~63.45%和14.32%~21.33%。裸地的体积质量和黏粒体积分数显著高于旱地和其他植被恢复模式($p<0.05$),而最大持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、有机质、粉粒和砂砾及团粒平均重量直径则显著低于旱地和其他植被恢

复模式($p<0.05$)。旱地的毛管孔隙度、粉粒和砂砾与不同植被恢复模式无显著差异($p>0.05$),土壤体积质量、最大持水量和非毛管孔隙度与乔木林地有显著差异,但与其他林地、灌木林地和其他草地无显著差异($p>0.05$)。旱地体积质量明显大于乔木林地($p<0.05$),但与灌木林地、其他林地和其他草地无显著差异($p>0.05$);旱地最大持水量和非毛管孔隙度明显低于乔木林地,但与灌木林地、其他林地和其他

草地无显著差异($p>0.05$);土壤有机质明显低于其他草地($p<0.05$),与乔木林地、灌木林地和其他林地无显著差异($p>0.05$);黏粒明显高于灌木林地和其他林地($p<0.05$),但与乔木林地和其他草地无显著差异($p>0.05$);团粒平均重量直径明显小于灌木林地和其他草地($p<0.05$),与乔木林地和其他林地无显著差异($p>0.05$)。可见,在不同理化指标上,不同植被恢复模式相对于旱地表现出不同差异。

表 1 不同植被恢复模式的土壤理化性质

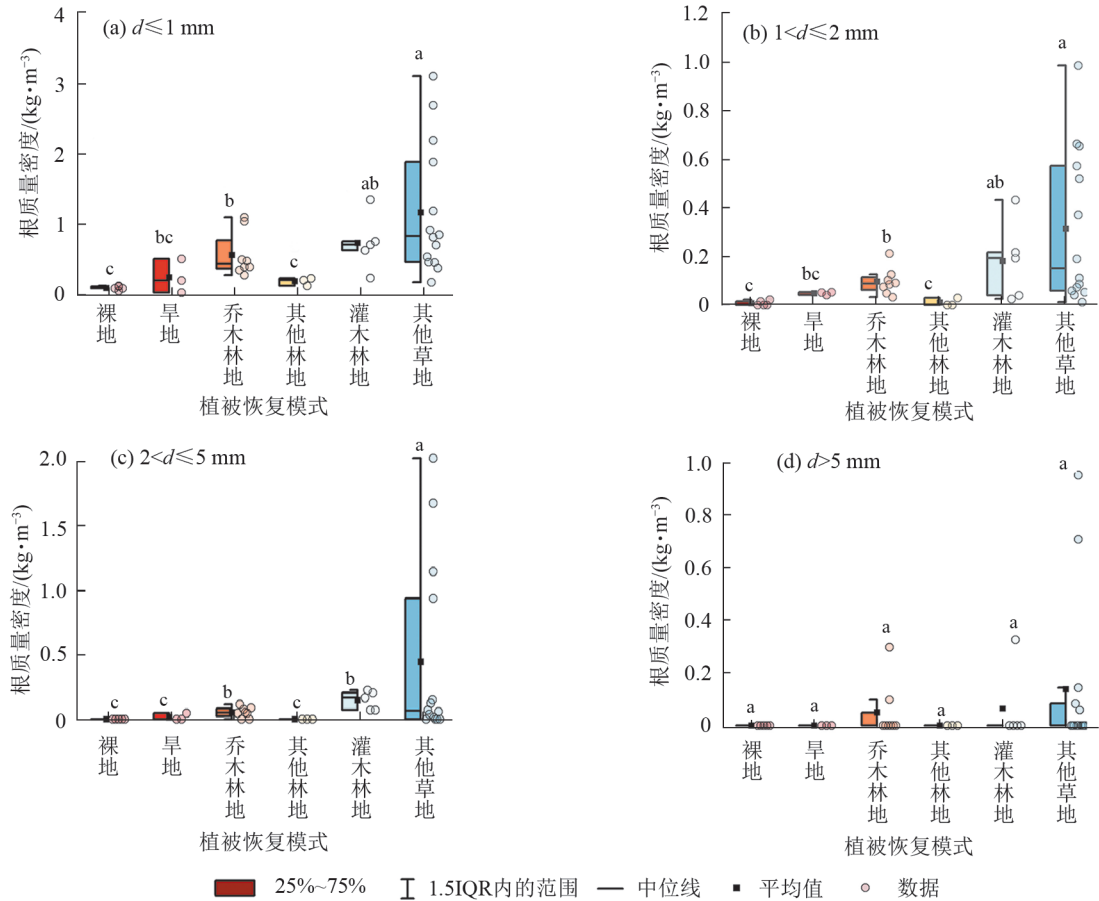
Table 1 Soil physicochemical properties under different vegetation restoration patterns										
植被恢复模式	体积质量/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	最大持水量/%	田间持水量/%	非毛管孔隙度/%	毛管孔隙度/%	有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	团粒平均重量直径/mm
裸地	1.28a	38.51c	34.75c	3.02c	46.00b	5.29d	25.60a	60.07b	14.32b	0.58d
旱地	1.15b	46.94b	40.19ab	4.03bc	50.02a	10.79bc	20.43b	62.04ab	17.54ab	1.39cd
乔木林地	1.06c	53.18a	44.16a	7.19a	48.77a	9.1abc	17.66bc	63.45a	18.89a	2.37bc
其他林地	1.15b	48.25ab	39.11b	4.74bc	50.61a	7.13cd	17.12c	61.55ab	21.33a	2.36bc
灌木林地	1.12bc	49.60ab	44.07a	5.22b	50.07a	12.99ab	16.86c	62.02ab	21.12a	4.07a
其他草地	1.10bc	50.86ab	41.94ab	5.35b	48.36a	15.89a	19.34bc	61.50ab	19.85a	3.17ab

注:表中同列不同小写字母表示不同植被恢复模式间差异性显著($p<0.05$)。

2.2 不同植被模式的根系特征

不同径级根系的根质量密度在不同土地利用类型中分布趋势不同(图 2)。

直径 $\leq 1\text{ mm}$ 的根系在不同植被类型中均有分布,裸地和其他林地中未出现直径 $>2\text{ mm}$ 的根系,旱地中未出现直径 $>5\text{ mm}$ 的根系。



注:图中不同小写字母表示不同植被恢复模式间差异性显著($p<0.05$); d 为根系直径。下同。

图 2 不同径级根系的根质量密度

Fig. 2 Root mass densities in different root diameter classes
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

当根系直径 ≤ 2 mm时,乔木林地、灌木林地、其他草地的根质量密度显著大于裸地和其他林地($p < 0.05$),旱地、乔木林地和灌木林地间无显著性差异($p > 0.05$)。根长密度、根体积密度、根表面积密度和根质量密度在不同土地利用类型中分布趋势基本一致(图3),表现为其他草地>灌木林地>乔木林地>其他林地>裸地和旱地。不同植被恢复模式的根长

密度、根体积密度、根表面积密度分别为 $0.34 \sim 3.51$ 、 $0.95 \times 10^{-3} \sim 9.10 \times 10^{-3}$ 、 $0.06 \sim 0.56 \text{ cm}^2/\text{cm}^3$,灌木林地和其他草地显著大于裸地、旱地和其他林地($p < 0.05$)。不同植被恢复模式的根质量密度为 $0.09 \sim 2.09 \text{ kg}/\text{m}^3$,乔木林地、灌木林地和其他草地显著大于裸地、旱地和其他林地($p < 0.05$),乔木林地、灌木林地和其他草地间无显著性差异($p > 0.05$)。

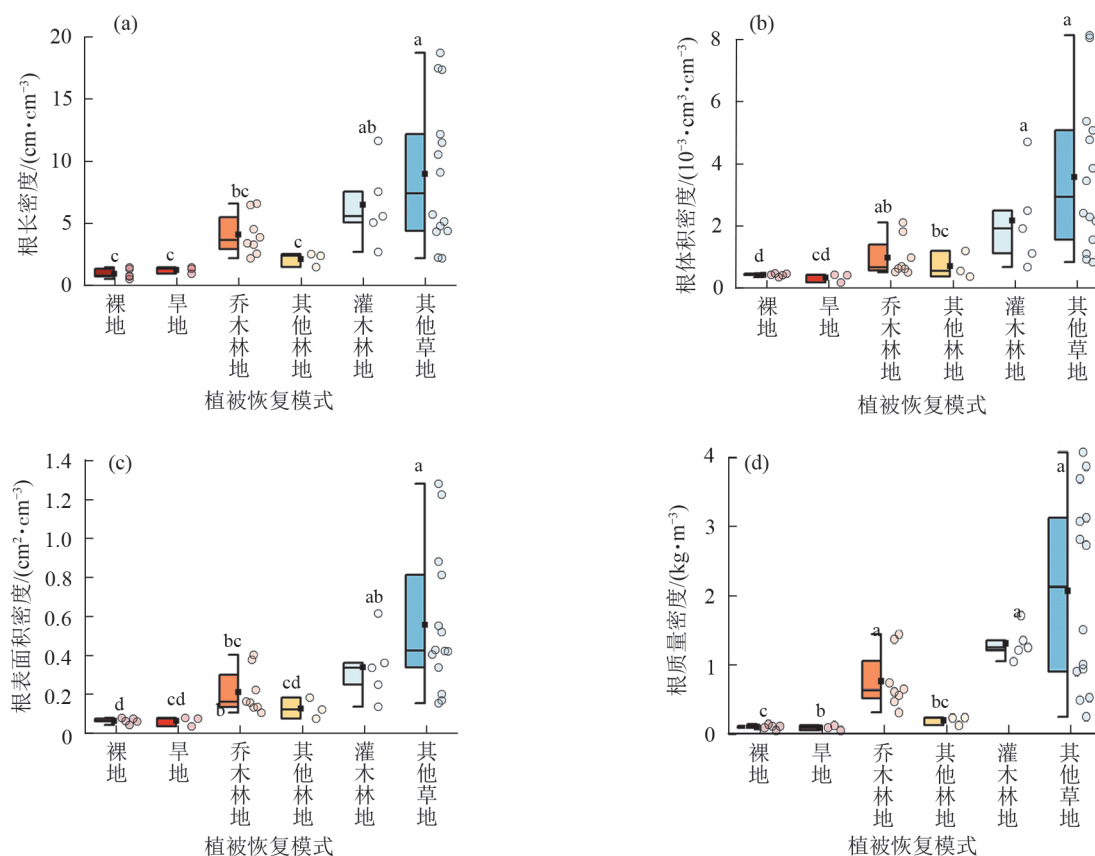


图3 不同植被恢复模式的根系特征

Fig. 3 Root characteristics under different vegetation restoration patterns

2.3 不同植被恢复模式的土壤饱和导水率

从图4可以看出,不同土地利用类型 K_s 为 $0.15 \sim 1.46 \text{ mm}/\text{min}$,平均 K_s 大小为灌木林地($1.46 \text{ mm}/\text{min}$)>其他林地($1.36 \text{ mm}/\text{min}$)>其他草地($1.23 \text{ mm}/\text{min}$)>乔木林地($1.04 \text{ mm}/\text{min}$)>旱地($0.65 \text{ mm}/\text{min}$)>裸地($0.15 \text{ mm}/\text{min}$)。其中灌木林地、其他林地、乔木林地和其他草地的 K_s 显著大于裸地和旱地($p < 0.05$),乔木林地、其他林地和其他草地的 K_s 无显著性差异($p > 0.05$)。相较于裸地,灌木林地的 K_s 提升871%,其他林地提升802%,其他草地提升716%,乔木林地提升594%,旱地提升335%。灌木林地的 K_s 分别是其他林地的107%,其他草地的119%,乔木林地的140%,旱地的225%,裸地的973%。裸地的 K_s 变异系数最大(52%),灌木林地的 K_s 变异系数最小(16%)。

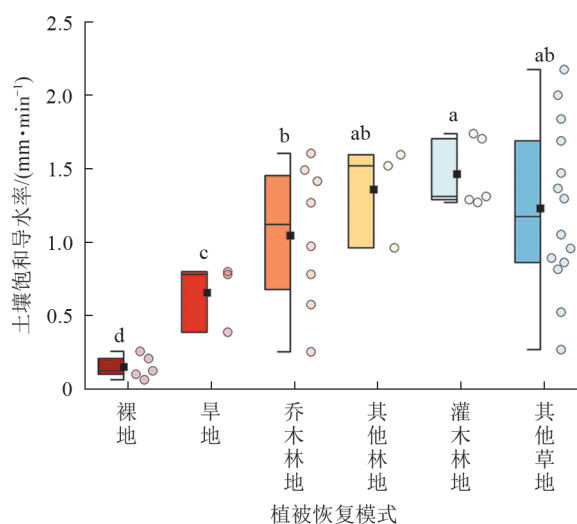
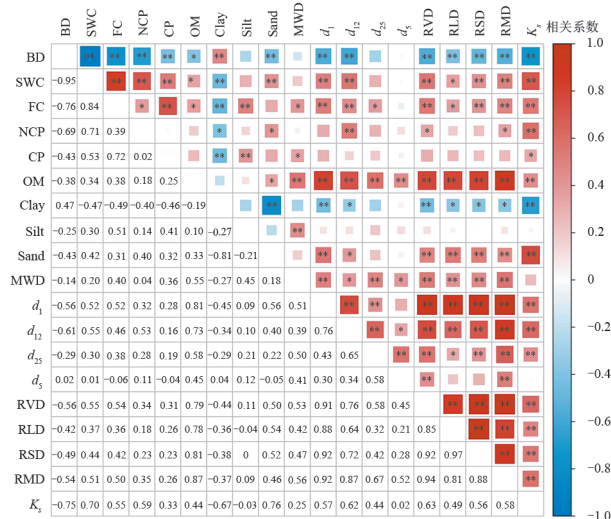


图4 不同植被恢复模式的饱和土壤导水率

Fig. 4 Soil saturated hydraulic conductivity under different vegetation restoration patterns

2.4 土壤饱和和导水率影响因子分析

将土壤理化性质和根系特征与 K_s 进行 Spearman 相关性分析(图 5)表明,与 K_s 具有显著相关性的因子中,土壤因子的相关系数绝对值由大到小分别为 Sand(0.76)、BD(-0.75)、SWC(0.7)、Clay(-0.67)、NCP(0.59)、FC(0.55)、OM(0.44)、CP(0.33);根系因子的相关系数绝对值由大到小分别为 RVD(0.63)、 d_{12} (0.62)、RMD(0.58)、 d_1 (0.57)、RSD(0.56)、RLD(0.49)、 d_{25} (0.44)。其中 K_s 与 BD、Clay 呈负相关,与其他因子呈正相关。 K_s 与 Silt、MWD、 d_5 无显著相关性($p>0.05$)。



注:BD 为土壤体积质量;SWC 为最大持水量;FC 为田间持水量;NCP 为非毛管孔隙度;CP 为毛管孔隙度;TP 为总孔隙度;OM 为有机质;Clay 为黏粒;Silt 为粉粒;Sand 为砂粒;MWD 为团聚体平均重量直径; d_1 为根系直径 ≤ 1 mm 的根质量密度; d_{12} 为根系直径为 1~2 mm 的根质量密度; d_{25} 为根系直径为 2~5 mm 的根质量密度; d_5 为根系直径 > 5 mm 的根质量密度;RVD 为根体积密度;RLD 为根长密度;RSD 为根表面积密度;RMD 为根质量密度; K_s 为饱和导水率。下同。*、** 分别表示在 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 水平上显著相关。

图 5 土壤理化性质和根系特征与饱和导水率的 Spearman 相关性

Fig. 5 Spearman correlations between soil physicochemical properties, root characteristics, and saturated hydraulic conductivity

依据相关性分析结果(图 5)可知,土壤饱和和导水率的影响因子之间也存在显著的相关性。为确定影响土壤饱和和导水率的核心驱动因子,本研究构建了偏最小二乘回归(PLSR)模型($R^2=0.83$)。在 PLSR 模型框架下,以变量重要性投影(VIP)作为关键评估指标。当某一变量的 VIP 值 > 1 时,该变量被认定为对 K_s 具有关键影响的重要变量。从 VIP 值(图 6)可以看出,影响 K_s 变化的主要因子为 Sand(1.51)、Clay(1.38)、BD(1.30)、SWC(1.30)、NCP(1.07)、RVD(1.05)、RMD(1.05)、 d_{12} (1.04)、 d_1 (1.00)。这些因子均与 K_s 显著相关($p<0.05$)。

为进一步探究 K_s 的动态变化机制,本研究选取 PLSR 模型中 VIP 值 > 1 的土壤理化指标(Sand、Clay、BD、SWC、NCP)构建线性逐步回归模型。分析表明,BD 与 Sand 构成最优的预测组合见公式(8),模型调整后 R^2 达 0.78,表明土壤物理结构对 K_s 具有显著解释力。在物理模型基础上,引入 PLSR 筛选的根系因子(RVD、RMD、 d_1 、 d_{12})进行模型优化。引入 d_{12} 的复合模型[公式(9)]调整后 R^2 提升至 0.85,模型解释力显著提升($\Delta R^2=0.07$, $F=15.43$, $p=0.002$)。表明土壤物理属性(BD、Sand)决定导水率的基线,而植被根系可能通过生物扰动和孔隙改造提供额外增益。

$$K_s = 2.171 - 2.58BD + 0.095Sand \quad R^2 = 0.78(8)$$

$$K_s = 1.397 - 1.952BD + 0.94 \ln(d_{12} + 1) + 0.092Sand \quad R^2 = 0.85 \quad (9)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率,mm/min;BD 为土壤体积质量,g/cm³; d_{12} 为 1~2 mm 径级的根质量密度,kg/m³;Sand 为砂粒体积分数,%。

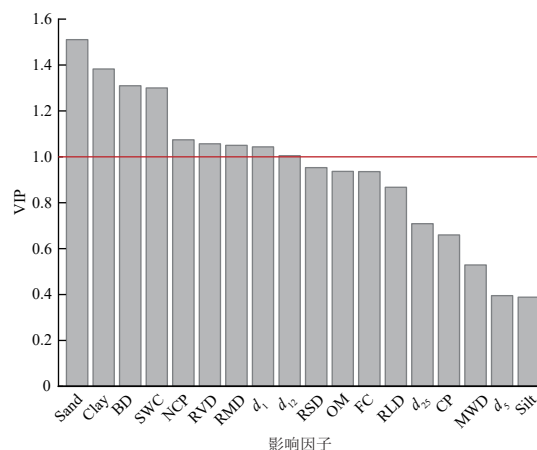


图 6 PLSR 模型影响因子 VIP 值

Fig. 6 VIP values of influencing factors in PLSR model

3 讨论

3.1 不同植被恢复模式的饱和导水率

中国黄土高原大规模的植被恢复工程旨在减轻严重的水土流失和稳定区域生态系统^[18]。本研究,切沟汇水区不同植被恢复模式下的 K_s 均呈显著提升趋势(图 4),与前人^[23,26]研究结果一致,印证植被恢复在调控土壤水分动态中的关键作用。数据显示,切沟汇水区林地(乔木林地、灌木林地、其他林地)和草地(其他草地)的 K_s 显著大于耕地和裸地,主要归因于林草植被的根系通过促进有机质积累、增强土壤团聚体稳定性、改善土壤孔隙结构等途径,有效降低土壤体积质量,增加非毛管孔隙比例,进而提升大孔隙连通性^[14-15]。本研究发现,耕地的 K_s 显著高于裸地,主要归因于农业耕作措施对土壤结构的改良作用^[27]。而裸地因缺乏植被覆盖,土壤易受降雨

侵蚀和径流压实,导致土壤体积质量升高、孔隙堵塞^[8,20],进而饱和和导水率显著降低。本研究中其他林地的 K_s 显著高于裸地和旱地,但其根系指标却无显著差异。进一步分析表明,可能与研究区土壤质地特征密切相关,其他林地因恢复年限较短,表层根系发育尚未成熟,此时土壤原生质地成为主导因素^[28],揭示植被恢复初期土壤物理性质的演变规律,即在此阶段土壤质地对 K_s 的影响权重高于植被根系发育程度。

在本研究中,切沟汇水区不同植被恢复模式下灌木林地的 K_s 提升最大,与裸地相比增加 871%,与旱地相比增加 125%。QIU 等^[29]对黄土高原的研究结果表明,不同植被模式下 K_s 依次为灌丛>草地>林地,灌丛较早地增加 87%,与本研究结果一致。而 YANG 等^[30]、ZHAO 等^[10]研究指出,草地的 K_s 提升效果最好,分别较早地增加 40% 和 60%,与本研究结论存在差异。主要原因在于黄土高原切沟汇水区独特的地貌水文条件,该区域在降雨过程中极易形成集中径流,造成剧烈的地表扰动和土壤结构破坏,导致表层土壤易大量流失,下层致密黏土层裸露,最终造成天然导水率显著降低^[20]。灌木林地因灌木根系强大的穿透能力与固土功能,协同林下草本植物形成的复合植被系统,相较于单一草地系统更能改善土壤孔隙结构,有效抑制土壤流失,从而显著提升 K_s ^[31];而该区域乔木林地因根系主要分布于深层土壤,林下植被较少,对表层土壤的固持与改良作用相对有限。因此在切沟汇水区特殊的侵蚀环境下,灌木恢复模式对 K_s 的提升效果更为显著,凸显灌木植被在该类区域水土保持中的关键作用。

3.2 土壤饱和和导水率的主要影响因素

土壤理化特性对 K_s 的调控作用是土壤水文过程研究的核心科学问题^[28],PLSR 模型发现,砂粒、黏粒、体积质量、饱和持水量、非毛管孔隙度等是影响 K_s 重要的理化特性因子。其中,砂粒通过其粗颗粒特性形成稳定的大孔隙网络,改善孔隙连通性并降低水流阻力,从而显著提高 K_s ^[32],与 ZHANG 等^[12]关于砂粒对导水性能促进作用的研究结论一致。黏粒则通过表面电荷吸附作用和胶结效应形成微孔隙结构,其吸水膨胀特性(如蒙脱石矿物)易导致孔隙堵塞,同时增加孔隙的曲折度,进一步降低 K_s ^[27]。ZHU 等^[33]研究表明,土壤质地越细,土壤颗粒的比表面积越大,土壤水分吸附能力越强。土壤体积质量通过压缩土体大孔隙空间,减少总孔隙度尤其是非毛管孔隙占比,并增加孔隙系统的迂曲程度,最终导致导水性能下降,与毛娜等^[6]在黄土高原的研究结果一致,即当土壤体积质量降低时,疏松的土体结构能有效维持高孔隙度和良好的导水通

道。非毛管孔隙是重力水传输的主要路径,对 K_s 具有决定性作用。PAN 等^[34]的研究表明,非毛管孔隙度与土壤体积质量共同解释 K_s 变异的 97.3%,印证大孔隙系统在导水过程中的主导地位。

根系系统通过直接构建生物孔隙网络与间接改良土壤物理化学性质,对 K_s 产生显著调控作用^[31,33]。本研究中根体积密度、根质量密度、0~1 mm 径级的根质量密度和 1~2 mm 径级的根质量密度是影响 K_s 的重要根系特征因子。根体积密度直接反映根系在土壤中的空间占据情况。高密度的根系通过穿透和扩张土壤颗粒,形成更多连通孔隙,从而提高 K_s 。CUI 等^[8]研究指出,细根(0~1 mm)的体积比例与土壤渗透速率呈显著正相关,而粗根(>4.5 mm)因可能堵塞孔隙或压实土壤而呈负相关。根质量密度与根系生物量呈正相关,其通过根系周转和分泌物促进土壤团聚体形成。研究^[17]表明,根系分泌的有机质可通过胶结作用增强微团聚体稳定性,进而提升大孔隙比例,与 WU 等^[35]研究结果相一致,即根系生物量通过增加土壤有机碳质量分数,间接提升孔隙系统的导水效能。

3.3 不同饱和和导水率预测模型机制分析

本研究采用分阶段建模系统揭示 K_s 的多尺度驱动机制。第 1 阶段基于土壤理化性质构建预测模型(公式 8),逐步回归分析表明,BD 和 Sand 可解释 K_s 变异的 78%,其中 BD 的标准化系数(-0.62)显著高于 Sand(0.34),印证土壤压实过程通过降低孔隙连通性对导水性能产生主导性抑制作用。第 2 阶段通过整合根系形态指标实现模型优化[公式(9)],引入 1~2 mm 径级根质量密度后,模型解释力显著提升($\Delta R^2=0.07$, $F=15.43$, $p=0.002$)。ZHU 等^[26]在引入根系质量密度后也得到相似的结果。值得注意的是, d_{12} 以对数形式进入方程,反映其与 K_s 的非线性响应关系。将 d_{12} 引入模型后,BD 系数绝对值从 2.580 降至 1.952,表明中等直径根系(1~2 mm)不仅能够通过物理扩张形成有效的导水通道,而且在抵消土壤压实的负面效应时,避免像粗根那样引起土壤的二次压实^[17]。

4 结 论

1)黄土高原切沟汇水区不同植被恢复下 K_s 差异显著,与裸地相比,灌木林地、其他林地、其他草地、乔木林地和旱地的 K_s 分别提升 871%、802%、716%、594% 和 335%,表明植被恢复能够显著改善土壤的水力特性。切沟汇水区较强的汇流特征和水动力强度,使灌木恢复模式对 K_s 的提升效果更为显著。

2)土壤理化性质和根系特征是影响 K_s 的关键因素。Sand、Clay、BD、SWC、NCP 等土壤理化因子通过影响土壤孔隙结构和连通性进而调控 K_s ; RVD、

RMD、 d_1 、 d_{12} 等根系特征因子通过构建生物孔隙网络和改良土壤物理化学性质对 K_s 产生显著影响。

3)本研究构建的多元逐步回归模型在引入根系指标后,解释力显著提升($\Delta R^2=0.07, p=0.002$)。优化后的模型 $K_s=1.397-1.952BD+0.94\ln(d_{12}+1)+0.092Sand$,弥补了传统研究中只关注细根或总根生物量的局限性,为生态水文模型中的根系参数化提供理论依据,也为黄土高原生态水文模型和土壤侵蚀模型的参数优化提供重要支撑。

参考文献:

- [1] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 13-23.
- [2] BUTTLE J M, HOUSE D A. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin [J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 203(1/2/3/4): 127-142.
- [3] LIU S Z, WANG Y Q, AN Z S, et al. Watershed spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity as affected by landscape unit in the critical zone [J]. *Catena*, 2021, 203: e105322.
- [4] TAN M L, GASSMAN P W, YANG X Y, et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 143: e103662.
- [5] 李永宁,王忠禹,王兵,等.黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 176-181, 189.
LI Y N, WANG Z Y, WANG B, et al. Differences in soil physical properties of typical vegetation in loess hilly region and effects on water conductivity [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 176-181, 189.
- [6] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 381-389.
MAO N, HUANG L M, SHAO M A. Profile distribution of soil saturated hydraulic conductivity and controlling factors under different vegetations on slope in loess region [J]. *Soils*, 2019, 51(2): 381-389.
- [7] 杨震,黄莹,余冬立.晋西北黄土丘陵区土壤饱和导水率的空间分布特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 178-184.
YANG Z, HUANG X, SHE D L. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in the loess hilly region of north-western Shanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 178-184.
- [8] CUI Z, WU G L, HUANG Z, et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: e124023.
- [9] ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X, et al. Using pedo-transfer functions to estimate soil hydraulic conductivity in the Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2016, 143: 1-6.
- [10] ZHAO W, WANG M H, CHEN C B, et al. Variations, controls and predictions of soil saturated hydraulic conductivity under different land use types in the alpine region of Tibet, China [J]. *Geoderma Regional*, 2023, 35: e00723.
- [11] TREJO-ALONSO J, FUENTES C, CHÁVEZ C, et al. Saturated hydraulic conductivity estimation using artificial neural networks [J]. *Water*, 2021, 13(5): e705.
- [12] ZHANG Y G, SCHAAP M G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 575: 1011-1030.
- [13] LEUNG A K, GARG A, COO J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(15): 3342-3354.
- [14] CUI L X, CHENG Q, SO P S, et al. Relationship between root characteristics and saturated hydraulic conductivity in a grassed clayey soil [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 645: e132231.
- [15] WEBB B, ROBINSON D A, MARSHALL M R, et al. Variation in root morphology amongst tree species influences soil hydraulic conductivity and macroporosity [J]. *Geoderma*, 2022, 425: e116057.
- [16] XIAO T, LI P, FEI W B, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: e167524.
- [17] LU J R, ZHANG Q, WERNER A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties: A review [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: e125203.
- [18] CHEN L D, WEI W, FU B J, et al. Soil and water conservation on the Loess Plateau in China: Review and perspective [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, 31(4): 389-403.
- [19] 张光辉.切沟侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 1-13.
ZHANG G H. Advances and prospects for gully erosion researches [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 1-13.
- [20] 张光辉,杨扬,符素华,等.切沟侵蚀预报研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2022, 37(6): 551-562.
ZHANG G H, YANG Y, FU S H, et al. Advances and prospects of gully erosion prediction [J]. *Advances in Earth Science*, 2022, 37(6): 551-562.

- [21] QIU D X, XU R R, GAO P, et al. Effect of vegetation restoration type and topography on soil water storage and infiltration capacity in the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2024, 241: e108079.
- [22] GUAN N, BI H X, SONG Y L, et al. Vegetation restoration is affecting the characteristics and patterns of infiltration in the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2024, 243: e108190.
- [23] QIU D X, XU R R, WU C X, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltrability and preferential flow in hilly gully areas of the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2023, 221: e106770.
- [24] PAN H L, RAN Q H, HONG Y Y, et al. Long-term impacts of ecosystem restoration on saturated hydraulic conductivity in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: e129337.
- [25] 李盼盼. 黄土区纸坊沟小流域生态恢复中土壤功能变化与评价 [D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- LI P P. Dynamics and assessment of soil functions driven by ecological restoration in Zhifanggou small watershed, loess hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [26] ZHU P Z, ZHANG G H, ZHANG B J. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2022, 412: e115717.
- [27] CUI Z, HUANG Z, WANG Y B, et al. Soil water deficit was effectively alleviated by higher water infiltration after the short-term forestland-to-farmland conversion in semi-arid area [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: e127893.
- [28] REN Z P, ZHU L J, WANG B, et al. Soil hydraulic conductivity as affected by vegetation restoration age on the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(4): 546-555.
- [29] QIU D X, XU R R, WU C X, et al. Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 609: e127730.
- [30] YANG J, XU X L, LIU M X, et al. Effects of "Grain for Green" program on soil hydrologic functions in karst landscapes, southwestern China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 247: 120-129.
- [31] MA J Y, LI Z B, LI P, et al. Effect of mixed plant roots on saturated hydraulic conductivity and saturated water content of soil in the loess region [J]. *Agricultural Water Management*, 2024, 295: e108784.
- [32] LUO Y W, WEN T D, LIN X, et al. Quantitative analysis of pore-size influence on granite residual soil permeability using CT scanning [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 645: e132133.
- [33] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG C S, et al. Variation in soil infiltration properties under different land use/cover in the black soil region of northeast China [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2024, 12(2): 379-387.
- [34] PAN T, HOU S, WU S H, et al. Variation of soil hydraulic properties with alpine grassland degradation in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 2249-2261.
- [35] WU W J, CHEN G J, MENG T F, et al. Effect of different vegetation restoration on soil properties in the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2023, 220: e106630.
- (上接第 137 页)
- [28] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 等. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征 [J]. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.
- CHEN H S, YANG J, FU W, et al. Characteristics of slope runoff and sediment yield on karst hill-slope with different land-use types in northwest Guangxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(16): 121-126.
- [29] 李雍, 蒙胧晨曦, 陈路瑶, 等. 退化喀斯特森林不同自然恢复阶段土壤养分和酶活性特征 [J]. *内蒙古大学学报 (自然科学版)*, 2023, 54(6): 629-639.
- LI Y, MENG L C X, CHEN L Y, et al. Variations in soil nutrient and enzyme activities along a natural restoration in degraded karst forests [J]. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2023, 54(6): 629-639.
- [30] 马耀华, 刘虹冰, 李雨欣, 等. 不同恢复模式亚热带森林土壤贮水量和养分储量的差异 [J]. *北京林业大学学报*, 2023, 45(5): 97-105.
- MA Y H, LIU H B, LI Y X, et al. Differences in soil water and nutrient storage in subtropical forests under different restoration modes [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2023, 45(5): 97-105.
- [31] ZHANG W, ZHAO J, PAN F J, et al. Changes in nitrogen and phosphorus limitation during secondary succession in a karst region in southwest China [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1): 77-91.
- [32] CELY M V T, DE OLIVEIRA A G, DE FREITAS V F, et al. Inoculant of arbuscular mycorrhizal fungi (*rhizophagus clarus*) increase yield of soybean and cotton under field conditions [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: e720.
- [33] ZHENG Q, HU Y T, ZHANG S S, et al. Soil multifunctionality is affected by the soil environment and by microbial community composition and diversity [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136: e107521.
- [34] MARGALEF O, SARDANS J, MASPONS J, et al. The effect of global change on soil phosphatase activity [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27: 5989-6003.