

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.002; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.002.

马雅莉, 冯娜, 齐昆, 等. 陕北白于山区土壤水力特性对植被恢复类型和坡位的响应特征[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):165-173, 183.

Ma Yali, Feng Na, Qi Kun, et al. Response characteristics of soil hydraulic properties to vegetation restoration types and slope positions in Baiyu Mountain area, Northern Shaanxi, China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):165-173, 183.

# 陕北白于山区土壤水力特性对植被恢复类型和坡位的响应特征

马雅莉<sup>1</sup>, 冯娜<sup>1</sup>, 齐昆<sup>1</sup>, 张晨晨<sup>1</sup>, 曹庆喜<sup>1</sup>, 乔江波<sup>2</sup>, 石长春<sup>1</sup>

(1.陕西省林业科学院, 西安 710082; 2.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 揭示白于山区土壤水力特性对植被恢复类型和坡位的响应特征, 理解不同立地条件下土壤水力特性空间变异特征, 为白于山区水循环研究提供数据支撑。[方法] 以白于山区不同植被类型乔木(杏树、小叶杨和油松)和灌木(柠条)为研究对象, 荒地(CK)作为对照。通过野外采样和室内试验测定不同植被类型坡底、坡中和坡顶0—100 cm的土壤水力特性(饱和导水率( $K_s$ )、容重(BD)、饱和含水量( $\theta_s$ )和田间持水量( $\theta_f$ )), 并使用描述性统计、相关性分析和随机森林模型揭示0—100 cm土壤水力特性的垂直变异特征及影响因素, 借助多元逐步线性回归模型建立适用于该地区的土壤水力特性传递函数。[结果] (1) 对于不同植被类型, 乔木的 $K_s$ 均值最高, 灌木次之, 荒地最低; 荒地和灌木的BD均值最大, 乔木最低;  $\theta_s$ 和 $\theta_f$ 趋势一致, 即乔木最高, 灌木次之, 荒地最差。(2) 对于不同坡位, 不同水力特性从坡顶到坡底无明显规律。(3) 相关性分析和随机森林模型表明: 粉粒和BD是 $K_s$ 的主要影响因素; 砂粒和深度是BD的主要影响因素; BD是 $\theta_s$ 和 $\theta_f$ 的主要影响因素。[结论] 基于线性回归建立的水力特性传递函数 $K_s$ 最低, 为0.45,  $\theta_s$ 最高, 达到了0.82, 整体具有较好的精度, 能够用于白于山区土壤水力特性的预测。

**关键词:** 白于山区; 水力特性; 空间变异; 传递函数; 线性回归模型

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)01-0165-09

## Response characteristics of soil hydraulic properties to vegetation restoration types and slope positions in Baiyu Mountain area, Northern Shaanxi, China

Ma Yali<sup>1</sup>, Feng Na<sup>1</sup>, Qi Kun<sup>1</sup>, Zhang Chenchen<sup>1</sup>, Cao Qingxi<sup>1</sup>, Qiao Jiangbo<sup>2</sup>, Shi Changchun<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to elucidate the response characteristics of soil hydraulic properties to vegetation restoration types and slope positions in the Baiyu Mountain area, understand the spatial variability characteristics of soil hydraulic properties under different site conditions, and provide data support for research on water cycle in this area. [Methods] This study took different vegetation types in the Baiyu Mountain area, including trees (*Armeniaca vulgaris* Lam., *Populus simonii*, and *Pinus tabulaeformis*) and shrubs (*Caragana korshinskii*), as the research objects, with wasteland (CK) as the control. Through field sampling and laboratory experiments, the soil hydraulic properties [saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ), bulk density (BD), saturated water content ( $\theta_s$ ), and field capacity ( $\theta_f$ )] at depths of 0—100 cm were measured at the bottom, middle, and top

收稿日期: 2025-02-17

修回日期: 2025-05-13

接受日期: 2025-05-19

资助项目: 国家林业和草原局揭榜挂帅项目“三北工程攻坚战关键技术研发”(202401-04); 榆林市委、市政府专项([2021]47); “三北”工程攻坚战共性基础理论研究“基于水平衡的毛乌素沙地植被重建模式与示范项目”([2024]126); 陕西林业科技创新青年人才培养专项(SXLK2023-06-6); 陕西林业科技创新专项(SXLK2021-0104, SXLK2024-0203)

第一作者: 马雅莉(1995—), 女, 山西长治人, 工程师, 硕士, 主要从事森林培育研究。E-mail: mayalisary@163.com

通信作者: 石长春(1974—), 男, 陕西榆林人, 正高级工程师, 主要从事荒漠化防治研究。E-mail: jiangboqiao815@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

of slopes under different vegetation types. Descriptive statistics, correlation analysis, and random forest model were used to reveal the vertical variation characteristics and influencing factors of the soil hydraulic properties at depths of 0—100 cm. Furthermore, pedotransfer functions for soil hydraulic properties applicable to this area were established using a multiple stepwise linear regression model. [Results] (1) Among different vegetation types, the mean  $K_s$  was highest in trees, followed by shrubs, and lowest in wasteland. The mean BD was highest in wasteland and shrubs, and lowest in trees.  $\theta_s$  and  $\theta_f$  followed the same trend, with trees showing the highest values, followed by shrubs, while wasteland had the lowest values. (2) Across different slope positions, no obvious patterns were observed in the different hydraulic properties from the top to the bottom of the slope. (3) Correlation analysis and random forest model showed that silt content and BD were the main influencing factors of  $K_s$ , sand content and depth were the main influencing factors of BD, and BD was the main influencing factor of  $\theta_s$  and  $\theta_f$ . [Conclusion] The pedotransfer functions for hydraulic properties established based on linear regression exhibit the lowest  $K_s$  of 0.45 and the highest  $\theta_s$  of 0.82. Overall, they demonstrate good accuracy and can be used to predict soil hydraulic properties in the Baiyu Mountain area.

**Keywords:** Baiyu Mountain area; hydraulic properties; spatial variation; pedotransfer functions; linear regression model

土壤水力特性是影响水文过程的各种土壤物理和化学性质,它主要包括饱和导水率( $K_s$ )、田间持水量( $\theta_f$ )、饱和含水量( $\theta_s$ )和容重(BD)等,它们对土壤水热交换、碳氮循环过程、溶质运移等具有重要影响<sup>[1-3]</sup>。如饱和导水率是研究水分运动和人文模型的一个重要参数,能够在一定程度上反映土壤的入渗性质<sup>[4-5]</sup>。土壤容重是土壤的基本物理性质之一,不仅可以反映土壤质量和生产力水平,还是土壤碳氮储量估算的重要参数<sup>[6-7]</sup>。准确揭示土壤水力特性的空间变异特征及影响因素对于土壤水循环研究及碳氮储量的估算具有重要意义。

黄土高原生态环境异常脆弱,自然灾害频发,且对气候变化和人类活动极其敏感<sup>[8-9]</sup>。为了恢复黄土高原生态环境,国家实施了一系列生态和水土保持治理工程,尤其是1999年的退耕还林还草工程,成效显著,该地区水土流失明显减少,植被覆盖显著增加<sup>[10]</sup>。在植被恢复的同时,土壤水力特性也显著发生变化,目前关于植被恢复对土壤水力特性的影响进行了大量研究,且取得了重要进展<sup>[11-13]</sup>。如赵亚丽等<sup>[14]</sup>以黄土高原治沟造地生态工程为研究对象,发现容重(BD)在不同季节均呈弱变异,而 $K_s$ 呈现强变异,治沟造地对水力参数的影响受到土壤和环境因素的共同影响。朱溢远等<sup>[15]</sup>以黄土高原沟壑区典型植被为研究对象,得出植被恢复18 a后,油松、油松+刺槐样地0—40 cm土层土壤BD显著降低,油松、油松+刺槐、油松+沙棘样地0—40 cm土壤持水性改善效果最好;油松+刺槐样地0—40 cm  $K_s$ 提高效果最好。王子龙等<sup>[16]</sup>以退耕典型草地为研究对象,发

现退耕过程有助于提高 $K_s$ ,土壤水稳性大团聚体和有机质是影响 $K_s$ 的主要因素。综上所述,不同区域由于土壤、气候、人类活动等因素不同,水文属性对植被恢复的响应特征不同,需对特定区域进行特定分析。此外,以往研究主要针对不同的植被类型,较少考虑不同的立地条件,且大部分集中在0—40 cm浅层,针对40 cm以下研究较少<sup>[17]</sup>。

白于山区水土流失严重,生态环境脆弱,是陕北屋脊,也是陕北重要河流(无定河、延河及北洛河)的发源地。此外,白于山地处水蚀风蚀交错区,土壤类型多样,立地条件复杂。阐明该地区植被恢复对土壤水力特性的影响对于理解复杂立地条件下土壤水力特性的变化及黄土高原区域水循环研究具有重要意义。基于此,本研究选取白于山区不同植被恢复类型不同坡位(坡底、坡中和坡顶)0—100 cm土壤水力特性( $K_s$ 、BD、 $\theta_s$ 和 $\theta_f$ )作为研究对象,旨在分析(1)不同植被类型下不同坡位土壤水力特性垂直分布规律及影响因素;(2)建立该区域不同水力特性的传递函数。研究结果一方面对于黄土高原北部区域水循环研究具有重要意义,另一方面可加深对山地水文属性变异机理的认知。

## 1 试验与方法

### 1.1 研究区概况

白于山,也称白玉山,横山等,主梁呈东西走向,主脉东西长363.77 km,南北最宽183.41 km、最窄76.89 km,海拔1 270~1 907 m。主要包括陕北延安与榆林西部接壤地带,以及与宁夏盐池县南部、甘肃

环线、华池的接壤地带内蒙古乌审旗南部,位于由黄土高原向毛乌素沙漠过渡、森林草原向典型干旱草原过渡的中间地带(图 1)。气候类型为暖温带大陆性季风气候,冬春季干冷多风,夏季温暖湿润,降雨稀少,年均降雨量约 349 mm,年内降雨分布不均,7—9 月降雨量占全年降雨量的 60% 以上,且多以暴雨为主。土壤类型以黄绵土、坝地淤积土和风沙土为主。主要的人工林有樟子松(*P. sylvestris.*)、油松(*Pinus tabulaformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)等。

### 1.2 样品采集与室内分析

2023 年 2 月 15 日到 3 月 1 日,在考察了白于山区地形、地貌和植被类型后,选取典型人工林作为研究对象,主要包括乔木油松、杏树和小叶杨,灌木柠条,荒草地作为对照,所选坡位坡向均一致,详细信息见表 1。在不同植被类型的不同坡位(坡顶、坡中和坡

底),利用人工挖剖面的方法采集不同深度土壤样品,剖面深度为 1 m,采样间隔 10 cm,每层 3 个重复。利用环刀获取原状土,同时利用塑料袋获取扰动土。

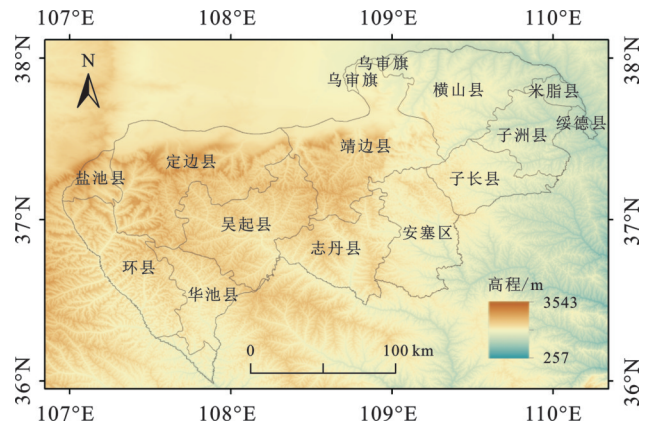


图 1 白于山地区高程图

Fig. 1 Elevation map of Baiyu Mountain area

表 1 不同样地植被类型基本信息

Table 1 Basic information of vegetation types in different sample plots

植被类型	海拔/m	坡度/(°)	树高/m	林龄/a	纬度(N)	经度(E)	其他植被
油松	1109	18	9.81	20	37°52'51"	109°17'5"	针茅草、蒙古菰
柠条	1201	20	1.59	20	37°52'35"	109°18'31"	针茅草、狗尾草
杏树	1558	21	5.55	18	37°24'6"	108°38'2"	针茅草、黄花蒿
小叶杨	1561	17	14.05	20	37°9'19"	108°48'19"	黄刺玫
荒草地	1462	—	—	—	37°25'55"	108°40'29"	针茅草、黄花蒿

扰动土壤样品带回实验室自然风干后,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定土壤理化性质。土壤颗粒组成用激光粒度仪测定,土壤化学性质的测定参照鲍士旦<sup>[18]</sup>的方法进行。土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,土壤 pH 用电位法(水:土=2.5:1)测定,土壤全磷(Soil Total Phosphorus, STP)采用钼锑抗分光光度法测定。原状土用于测定土壤饱和导水率(Soil Saturated Hydraulic Conductivity,  $K_s$ )、田间持水量(Field Capacity,  $\theta_f$ )、饱和含水量(Soil Saturated Water Content,  $\theta_s$ )和容重(Bulk Density, BD)。 $K_s$ 用定水头法测定, $\theta_f$ 和 $\theta_s$ 参照《森林土壤水分-物理性质的测定》(LY/T1215-1999)<sup>[19]</sup>,土壤 BD 用环刀法测定。

### 1.3 随机森林建模

随机森林(Random Forest, RF)是一种典型的袋装集成算法。它不仅能够对连续和离散数据进行处理,而且能够有效融合有序和定性预测的需求。此外,它无需对数据进行正态性假设,从而大大拓宽了其使用范围。本研究将数据按照 7:3 的比例随机划分训练集和测试集,通过交叉验证进行参数调参,进而选择最优参数作为最终模型结果,随后进行预测。为了评估 RF 模型的预测性能,选取均方根误差

(Root Mean Square Error, RMSE)和决定系数(Coefficient of Determination,  $R^2$ )2 个指标评价模型预测精度。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析、相关性分析和多元逐步线性回归,采用 Matlab 进行随机森林分析,采用 Origin 10.0 进行软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水力特性描述性统计特征

图 2 和表 2 为不同植被类型下不同坡位土壤水力特性描述性统计特征。不同植被类型的  $K_s$  平均值大小依次为杏树(3.76 cm/h) > 小叶杨(3.56 cm/h) > 油松(3.23 cm/h) > 荒地(2.94 cm/h) > 柠条(2.66 cm/h) ( $p < 0.05$ ) (图 2),整体上呈现乔木  $K_s$  显著高于灌木和草地,这与其他研究结果一致,主要是由于乔木根系丰富,形成大量孔隙,导致土壤  $K_s$  增大。此外,不同植被类型从坡顶到坡底  $K_s$  均值无明显规律,其中油松和荒地呈现先增加后减少趋势,杏树呈现增加趋势,小叶杨呈现降低的趋势,柠条呈现先降低后增加趋势。BD 的平均值大小依次为柠条(1.37 g/cm<sup>3</sup>) > 荒地(1.36 g/cm<sup>3</sup>) > 杏树(1.34 g/cm<sup>3</sup>) > 油松(1.34

$\text{g}/\text{cm}^3$ ) > 小叶杨 ( $1.25 \text{ g}/\text{cm}^3$ ) ( $p < 0.05$ )。除柠条外,不同植被类型从坡顶到坡底呈现先降低后增加的趋势。 $\theta_f$ 的大小依次为小叶杨 ( $0.27 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) > 杏树 ( $0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) > 油松 ( $0.24 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) = 柠条 ( $0.24$

$\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) > 荒地 ( $0.23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) ( $p > 0.05$ )。 $\theta_s$ 的平均值为小叶杨 ( $0.43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) > 杏树 ( $0.38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) > 柠条 ( $0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) = 荒地 ( $0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) = 油松 ( $0.36 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) ( $p < 0.05$ )。 $\theta_f$ 和 $\theta_s$ 从坡顶到坡底均无明显规律。

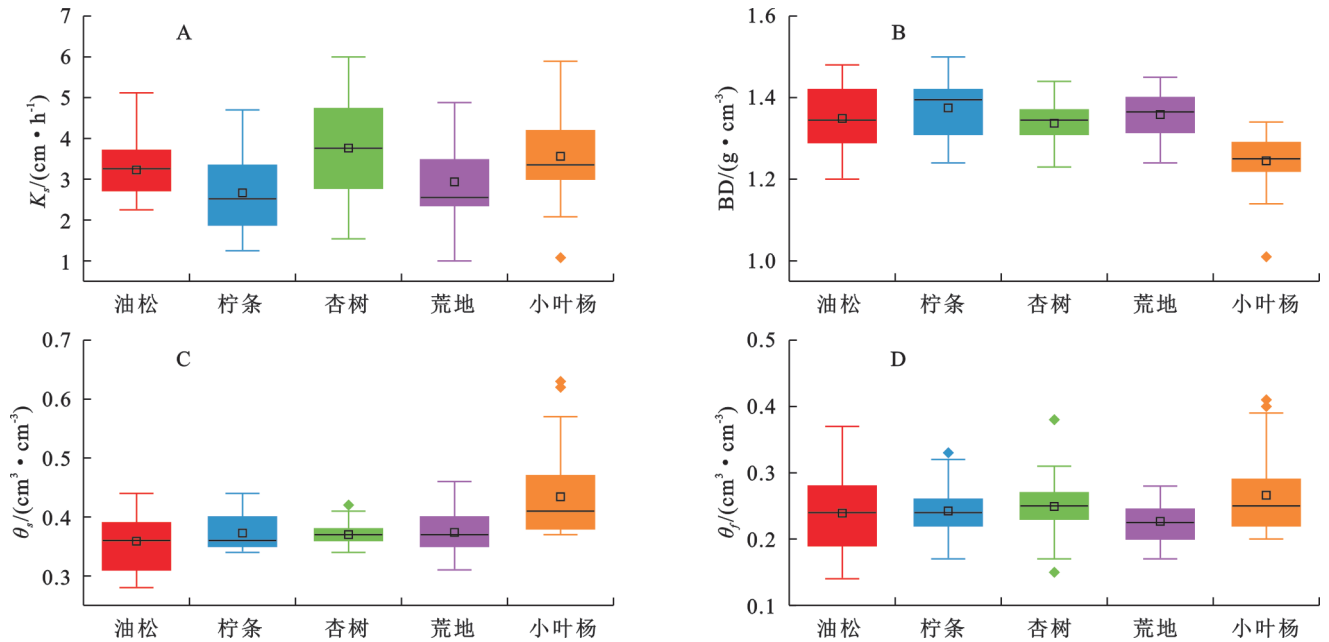


图 2 不同植被类型土壤水力特性分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of soil hydraulic properties under different vegetation types

变异系数(Coefficient of variation, CV)是衡量数据离散程度的一个变量。由表 2 可知,不同植被类型  $K_s$  的 CV 均值顺序为油松 (57%) > 柠条 (53%) > 杏树 (51%) > 小叶杨 (35%) > 荒地 (34%), 均属于中等变异。BD 的 CV 均值顺序为油松 (9%) > 小叶杨 (9%) > 荒地 (6%) > 柠条 (5%) > 杏树 (4%), 均属于弱变异。

$\theta_f$  的 CV 大小顺序为油松 (26%) > 小叶杨 (21%) > 杏树 (19%) > 柠条 (19%) > 荒地 (13%), 均属于中等变异。饱和和含水量的大小顺序为小叶杨 (16%) > 油松 (13%) > 荒地 (9%) > 柠条 (8%) > 杏树 (6%)。除小叶杨和油松外,其余均属于弱变异。整体上  $K_s$  的变异系数最大,而 BD 的变异系数最小,这与其他结果一致<sup>[14,20]</sup>。

表 2 不同植被类型下不同坡位土壤水力参数描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistics of soil hydraulic parameters at different slope positions under different vegetation types

植被类型	水力参数	坡位	min	max	mean	SD	K	S
油松	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡顶	0.71	8.12	2.19a	2.34	2.17	4.84
		坡中	3.24	6.64	4.44b	1.03	1.08	1.02
		坡底	1.72	3.81	2.64a	0.62	0.85	0.50
	BD/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	坡顶	1.22	1.58	1.47a	0.13	-1.27	0.23
		坡中	1.20	1.42	1.29b	0.06	0.36	0.73
		坡底	1.25	1.60	1.44a	0.10	-0.46	1.13
	$\theta_f/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.14	0.25	0.20a	0.04	-0.03	-1.76
		坡中	0.25	0.37	0.31b	0.04	-0.07	-1.36
		坡底	0.16	0.28	0.22a	0.04	0.33	-0.77
$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.28	0.42	0.33a	0.05	1.44	0.77	
	坡中	0.31	0.44	0.39b	0.04	-1.26	2.83	
	坡底	0.31	0.44	0.36ab	0.04	1.38	2.92	

续表 2

植被类型	水力参数	坡位	min	max	mean	SD	K	S
荒地	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡顶	1.90	5.23	3.27a	1.09	0.45	-0.66
		坡中	2.19	4.88	3.26a	0.90	0.61	-0.56
		坡底	1.00	5.49	4.11b	1.41	-1.40	1.58
	$BD / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	1.20	1.32	1.25a	0.04	0.81	-0.30
		坡中	1.24	1.45	1.36b	0.06	-0.40	-0.10
		坡底	1.15	1.39	1.28a	0.07	-0.32	0.63
	$\theta_f / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.22	0.27	0.24a	0.01	0.36	-0.15
		坡中	0.16	0.25	0.21a	0.03	-0.30	-1.11
		坡底	0.19	0.27	0.23a	0.03	-0.14	-1.23
	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.33	0.41	0.37a	0.03	0.46	-1.34
		坡中	0.31	0.41	0.36a	0.03	0.04	-0.67
		坡底	0.35	0.46	0.39a	0.03	0.87	0.50
杏树	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡顶	1.75	3.79	2.88a	0.72	-0.07	-1.41
		坡中	1.54	10.10	5.17b	3.10	0.38	-1.51
		坡底	2.90	7.04	4.56ab	1.18	0.97	1.21
	$BD / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	1.31	1.38	1.35a	0.02	-0.44	-1.01
		坡中	1.25	1.44	1.33a	0.06	0.63	-0.62
		坡底	1.23	1.40	1.34a	0.05	-1.10	0.75
	$\theta_f / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.18	0.27	0.24a	0.03	-1.19	0.54
		坡中	0.15	0.31	0.23a	0.05	0.13	-0.01
		坡底	0.23	0.38	0.29b	0.04	1.15	2.40
	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.36	0.38	0.37a	0.01	-0.41	-1.07
		坡中	0.31	0.39	0.35b	0.03	-0.02	-1.67
		坡底	0.34	0.41	0.36ab	0.02	1.37	1.64
柠条	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡顶	1.84	7.44	4.33a	1.91	0.66	-0.63
		坡中	1.25	2.70	1.96b	0.54	0.08	-1.56
		坡底	1.52	4.99	2.80b	1.01	0.94	1.41
	$BD / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	1.24	1.42	1.32a	0.06	0.29	-1.35
		坡中	1.31	1.42	1.38b	0.04	-1.24	0.11
		坡底	1.29	1.50	1.42b	0.07	-1.01	-0.33
	$\theta_f / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.23	0.33	0.29a	0.04	-0.56	-1.18
		坡中	0.22	0.29	0.26a	0.02	-0.30	-0.25
		坡底	0.17	0.33	0.22b	0.05	1.30	0.62
	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.35	0.44	0.40a	0.03	-0.16	-1.61
		坡中	0.34	0.40	0.36b	0.02	1.19	0.22
		坡底	0.34	0.40	0.36b	0.02	1.31	0.59
小叶杨	$K_s / (\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$	坡顶	2.08	5.89	3.67a	1.23	0.43	-0.29
		坡中	1.71	4.19	2.90a	0.75	-0.26	0.16
		坡底	1.08	3.86	2.60b	0.97	-0.43	-1.19
	$BD / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	1.01	1.35	1.24a	0.10	-1.38	2.18
		坡中	1.14	1.38	1.28a	0.08	-0.62	-0.53
		坡底	0.91	1.35	1.21a	0.13	-1.36	2.12
	$\theta_f / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.20	0.40	0.26a	0.05	2.06	5.33
		坡中	0.22	0.33	0.25a	0.04	1.26	1.39
		坡底	0.21	0.41	0.28a	0.07	0.73	-0.65
	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	坡顶	0.38	0.62	0.44a	0.07	2.20	5.14
		坡中	0.37	0.51	0.41a	0.05	1.38	0.44
		坡底	0.38	0.63	0.46a	0.08	1.30	0.78

注:小写字母表示不同坡位差异显著( $p < 0.05$ )。

随着深度的增加,除个别坡位外,不同植被类型不同坡位  $K_s$  整体上呈现降低的趋势(图 3),这与其他研究结果类似<sup>[12,17]</sup>,这主要是由于植被浅层受到植被

根系、动物活动等的影响,浅层孔隙增大,导致  $K_s$  增加。此外,不同植被类型不同坡位 BD 整体上呈现增加的趋势,而  $\theta_s$  和  $\theta_r$  呈现降低的趋势。

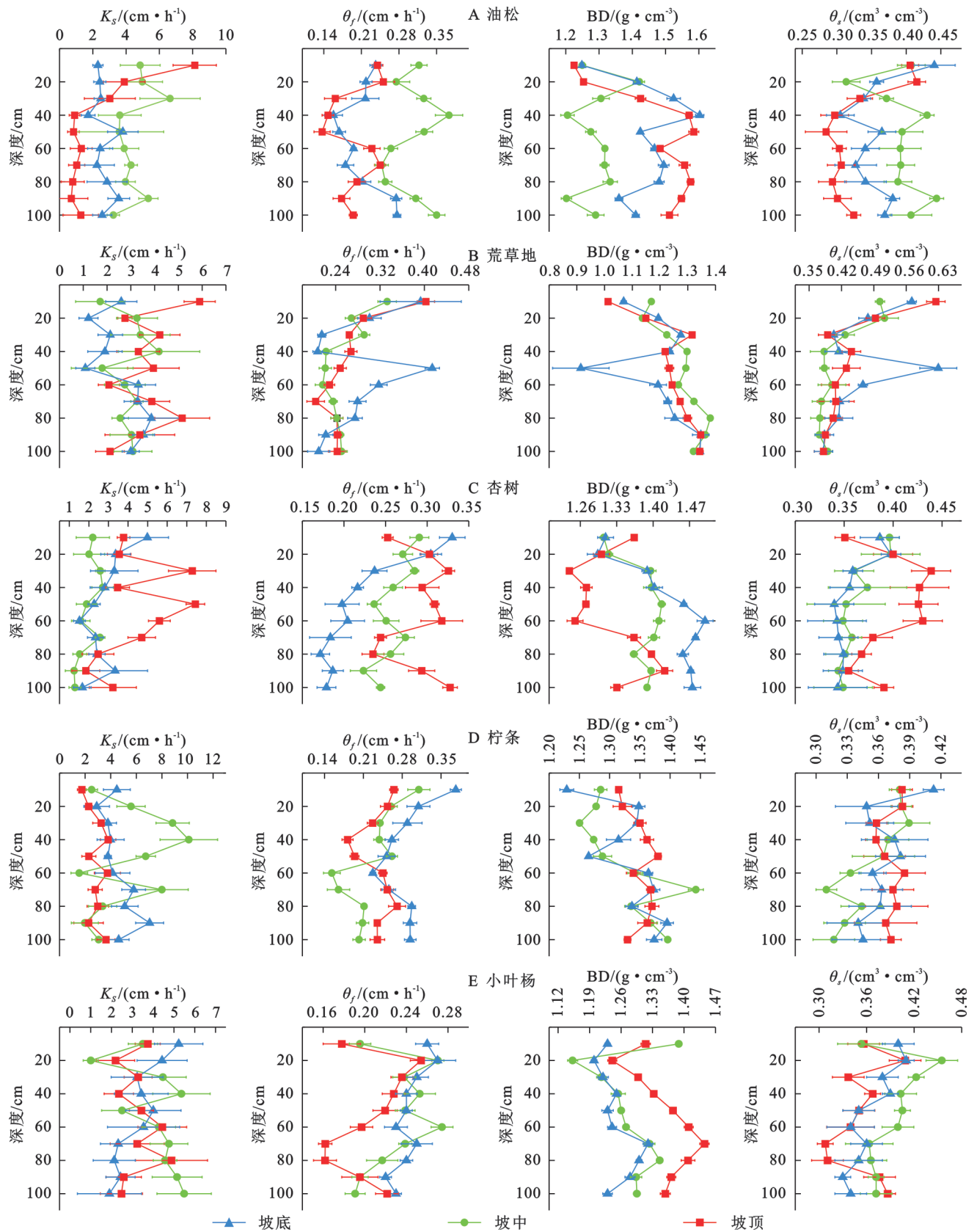


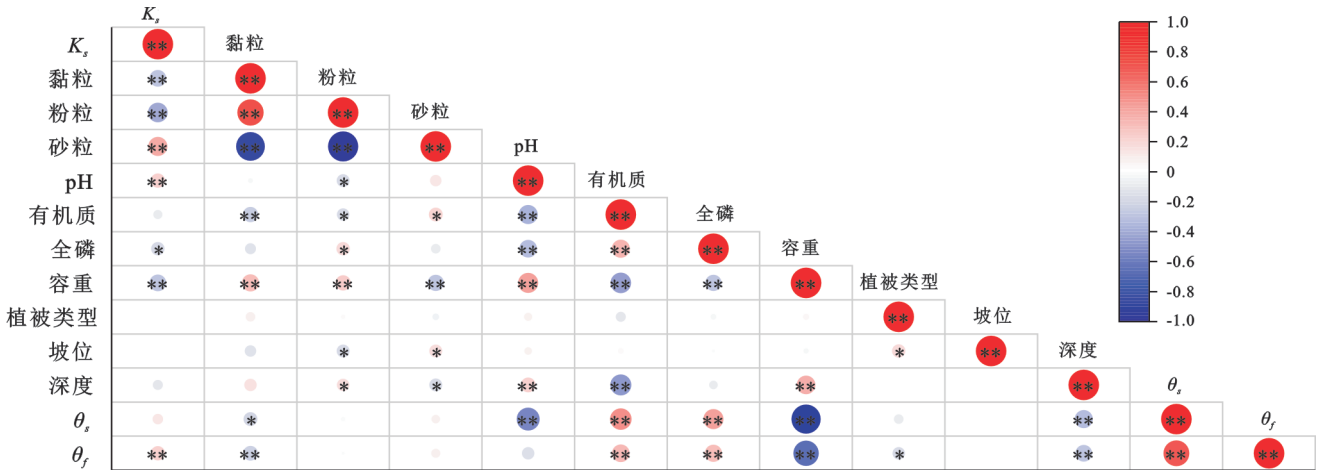
图 3 不同植被类型水力参数不同坡位垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of hydraulic parameters at different slope positions under different vegetation types

### 2.2 土壤水力特性的影响因素

2.2.1 相关性分析 为了揭示土壤水力特性的影响因素,本文对土壤基本理化性质、植被类型、深度与土壤水力特性进行相关性分析(图4)。由图4可知, $K_s$ 与砂粒和pH呈现极显著正相关( $p < 0.01$ ),与粉粒、黏粒和BD极显著负相关( $p < 0.01$ ),与全磷含量呈显著负相关( $p < 0.05$ )。BD与黏粒、粉粒、pH与深度呈极显

著正相关( $p < 0.01$ ),与砂粒、有机质、全磷和植被类型显著负相关( $p < 0.01$ )。 $\theta_s$ 与有机质、全磷和植被类型呈极显著正相关( $p < 0.01$ )。与pH、BD和深度呈极显著负相关( $p < 0.01$ ),与黏粒含量显著负相关( $p < 0.05$ )。 $\theta_f$ 与有机质和全磷含量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),与黏粒、BD和深度呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。



注:\*表示  $p < 0.05$ , \*\*表示  $p < 0.01$ 。

图 4 土壤水力特性与基本理化性质相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between soil hydraulic properties and basic physicochemical properties

2.2.2 随机森林分析 为了进一步分析土壤水文属性的影响因素,对与土壤水力特性有显著相关性的变量进行随机森林分析(图5)。不同水力特征RF模型预测结果  $R^2$  均在 0.68 以上,且 RMSE 分别为 1.23 ( $K_s$ ), 0.98(BD), 1.54( $\theta_s$ )和 0.67( $\theta_f$ )。综上分析,RF模

型对水力特性具有较好的预测能力。由图5可知,不同水力特性主要影响因素不同,影响  $K_s$  的主要因素为粉粒(41%)和BD(38%);影响BD的为砂粒(36%)、深度(32%)和植被类型(21%);影响  $\theta_s$  和  $\theta_f$  的主要因素均为BD,分别占比(82%)和(65%)。

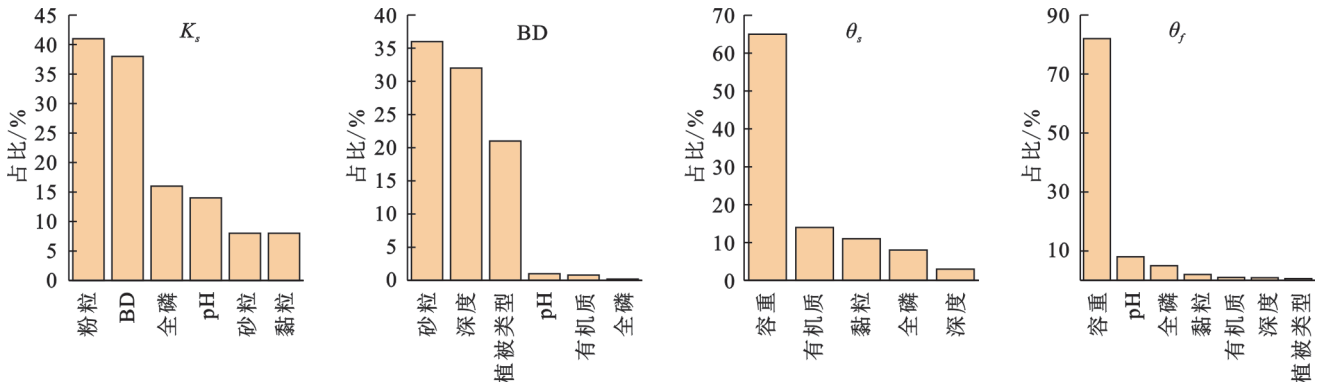


图 5 基于随机森林模型模拟土壤水力参数的影响因素

Fig. 5 Influencing factors of soil hydraulic parameters simulated using random forest model

### 2.3 水力属性传递函数的建立

选取水力属性的主要因素为自变量,利用多元逐步线性回归建立研究区水力属性的传递函数。由表3可知,不同水力属性传递函数的  $R^2_{adj}$  值介于 0.45~0.82,具有较好的预测能力,能够用于白于山区土壤水力属性的预测。其中  $\theta_f$  最高,达到了 82%,而  $K_s$  最低,为 45%。

## 3 讨论

一般而言,乔灌木的入渗能力和蓄水能力要高于荒草地<sup>[5,21-22]</sup>,这是由于乔灌木的根系相比草本要发达很多,形成了大量的孔隙,导致  $K_s$ 、 $\theta_f$  和  $\theta_s$  要高于草地。如王紫薇等<sup>[21]</sup>比较了青海省东部不同土地利用类型的  $K_s$  分布特征,发现  $K_s$  均值大小顺序为林地 >

草地>农地。Pan等<sup>[11]</sup>以区域尺度黄土高原为研究对象,比较了不同植被恢复类型对0~1 m  $K_s$ 的影响,发现不同植被类型  $K_s$  在0—70 cm 有显著差异,而70—100 cm 无显著性差异,且在0—70 cm 内乔木林和灌木兰要显著大于稀疏草原。然而,本研究的结果显示荒草地  $K_s$  高于灌木柠条  $K_s$ ,而田间持水量和饱和含水量无明显差异。这可能是由于一方面虽然灌木柠条有较发达的根系,但是本研究在采样过程中未发现大量根系,这可能与柠条地密度较为稀疏有关,导致土壤中根系并不发达。因此,在未来的研究中,应综合考虑林地的密度、林龄等因素。

表3 不同水力参数的传递函数  
Table 3 Pedotransfer functions of different hydraulic parameters

水力参数	传递函数	$R_{adj}^2$
$K_s$	$K_s=11.21\sim 0.06\times\text{粉粒}-3.29\times\text{BD}$	0.45
BD	$\text{BD}=1.40\sim 0.001\times\text{砂粒}+0.01\times\text{深度}-0.04\times\text{植被类型}$	0.52
$\theta_s$	$\theta_s=0.99\sim 0.45\times\text{BD}$	0.82
$\theta_f$	$\theta_f=0.69\sim 0.33\times\text{BD}$	0.62

本研究发现不同植被类型水力属性从坡顶到坡底均没有明显规律,有增大的趋势,也有减少的趋势,或先增大后减少的趋势。有的研究结果与本研究类似,如李文政等<sup>[23]</sup>以三峡山地不同坡位原状土样为研究对象发现坡顶  $K_s$  要显著高于坡底、坡下、坡中和坡上。也有的结果与本文不一致,如田昕等<sup>[24]</sup>发现黄土丘陵区柠条地坡下  $K_s$  最高,坡顶和坡中次之,坡肩和坡上最低。纳磊等<sup>[25]</sup>也得出相同坡向条件下,坡下部  $K_s$  最大,坡中部次之,坡顶部最小。造成以上不同结果是山地由于地形的原因,不同坡位的水、热属性和侵蚀过程不同,导致土壤水力属性存在差异。一般来说,坡地上部容易受到侵蚀,坡上粉、黏粒等细小颗粒不断被冲走,砂粒含量增加<sup>[26]</sup>,导致坡顶  $K_s$  较其他坡位较大。然而,在被侵蚀的过程中,土壤颗粒可能受到枯落物、根系等影响被拦截,导致不同坡位土壤颗粒并无显著差异。此外,  $K_s$  空间变异性强烈<sup>[3]</sup>,不仅受到土壤颗粒组成的影响,还受到植被根系、动物活动、枯落物、土壤本身结构等因素影响,导致本研究不同植被类型不同坡位水力属性规律不明显。

本文还得出影响不同植被类型  $K_s$  的主要因素为粉粒和容重。这与赵春雷等<sup>[27]</sup>结果类似,他们发现容重和土壤颗粒是影响坡面  $K_s$  空间分布的主要因素。然而,也有研究结果与本研究不同,如毛娜等<sup>[28]</sup>以黄土区不同植被类型坡面为研究对象,得出影响坡面不同植被类型  $K_s$  的主要因素由土壤持水特性、质地和养分含量3个主成分组成,其中土壤持水性能

贡献最大。田昕等<sup>[24]</sup>以黄土丘陵区柠条坡地为研究对象,发现有机碳、土壤密度和饱和含水量是影响  $K_s$  的关键因素,其中有机碳影响最大。  $K_s$  受到众多因素影响,这已成为广泛共识<sup>[3,5,22]</sup>。但由于土壤中的生态、水文等过程复杂且相互之间存在影响,且不同的试验设计不同,选取  $K_s$  的影响因素也不同,因此不同的研究结果也不同。在未来应该具体试验具体分析,根据不同的情景选取合适的变量进行研究。

## 4 结论

本研究通过野外采样和室内测定分析了白于山区不同植被类型下不同坡位土壤水力特性的空间变异特征及影响因素。结果表明:乔木的  $K_s$ 、 $\theta_s$  和  $\theta_f$  显著高于灌木和草地,而BD显著低于灌木和草地。不同植被类型下不同坡位土壤水力特性无明显规律。随着深度的增加,  $K_s$ 、 $\theta_s$  和  $\theta_f$  呈现减小的趋势,而BD呈现增加的趋势。相关性分析和随机森林结果表明:粉粒和BD是影响  $K_s$  变异的主要因素。砂粒、深度和植被类型是影响BD变异的主要因素。BD是影响  $\theta_s$  和  $\theta_f$  变异的主要因素。研究结果对于深入理解山地生态系统复杂条件下土壤水力特性的变异机理具有重要意义。

### 参考文献(References):

- [1] Lin H. Earth's Critical Zone and hydrogeology: concepts, characteristics, and advances [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(1):25-45.
- [2] 张甘霖,朱阿兴,史舟,等.土壤地理学的进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(1):57-65.  
Zhang G L, Zhu A X, Shi Z, et al. Progress and future prospect of soil geography [J]. Progress in Geography, 2018, 37(1):57-65.
- [3] 贺缠生,田杰,张宝庆,等.土壤水文属性及其对水文过程影响研究的进展、挑战与机遇[J].地球科学进展,2021,36(2):113-124.  
He C S, Tian J, Zhang B Q, et al. A review of advances in impacts of soil hydraulic properties on hydrological processes, challenges and opportunities [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(2):113-124.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils

- [J]. *Geoderma*, 2011, 163(1/2): 74-82.
- [7] 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.
- Zheng J Y, SHAO M A, Zhang X C, et al. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(3): 53-56.
- [8] 朱显谟. 黄土高原国土整治“28字方略”的理论与实践[J]. *中国科学院院刊*, 1998, 13(3): 232-236.
- Zhu X M. The 28-character strategy for reclaiming the Loess Plateau, its theory & practice[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 1998, 13(3): 232-236.
- [9] 安芷生, S. Porter, G. Kukla, 等. 最近13万年黄土高原季风变迁的磁化率证据[J]. *科学通报*, 1990, 35(7): 529-532.
- An Z S, Porter S, Kukla G, et al. Magnetic susceptibility evidence of monsoon changes in the Loess Plateau in the last 130 thousand years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1990, 35(7): 529-532.
- [10] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.
- Liu G B, Shangguan Z P, Yao W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 11-19.
- [11] 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: 129337.
- [12] 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: 115717.
- [13] 张泽凡, 张学珍. 黄土高原植被恢复对土壤物理参数的影响: 基于已发表数据的荟萃分析[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(6): 1012-1025.
- Zhang Z F, Zhang X Z. Effects of vegetation restoration on soil physical parameters on the Loess Plateau: a meta-analysis based on published data[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(6): 1012-1025.
- [14] 赵亚丽, 王云强, 张兴昌. 黄土高原生态工程区土壤容重及饱和导水率的分布特征[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(10): 83-89.
- Zhao Y L, Wang Y Q, Zhang X C. Distribution characteristics of bulk density and saturated hydraulic conductivity in intensive land restoration project areas on the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(10): 83-89.
- [15] 朱谡远, 岩晓莹, 郭天崎, 等. 黄土高塬沟壑区陡坡地典型植被不同恢复年限土壤物理性质比较研究: 以陕西长武王东沟为例[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2022, 41(5): 1033-1040.
- Zhu M Y, Yan X Y, Guo T Q, et al. A comparative study on soil physical properties of steep slopes in the Gully Region of the Loess Plateau with different restoration years of typical vegetation: a case study of Wangdonggou in Changwu, shannxi province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2022, 41(5): 1033-1040.
- [16] 王子龙, 赵勇钢, 赵世伟, 等. 退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究[J]. *草地学报*, 2016, 24(6): 1254-1262.
- Wang Z L, Zhao Y G, Zhao S W, et al. Study on soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in typical grassland of farmland conversion[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6): 1254-1262.
- [17] 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: 127730.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [19] 中华人民共和国国家林业局. 森林土壤水分-物理性质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, LY/T 1215-1999, 1999.
- State Forestry Administration of the People's Republic of China. Determination of forest soil water-physical properties [S]. Beijing: Standards Press of China, LY/T 1215-1999, 1999.
- [20] 傅子洵, 王云强, 安芷生. 黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 128-134.
- Fu Z H, Wang Y Q, An Z S. Spatio-temporal characteristics of soil bulk density and saturated hydraulic conductivity at small watershed scale on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 128-134.
- [21] 王紫薇, 邵明安, 黄来明, 等. 青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和导水率分布及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 150-155.
- Wang Z W, Shao M A, Huang L M, et al. Distribution and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in eastern Qinghai Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 150-155.
- [22] 于冬雪, 贾小旭, 黄来明. 黄土区不同土层饱和导水率空间变异与影响因素[J]. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1073-1079.
- Yu D X, Jia X X, Huang L M. Spatial variation and influencing factors of saturated hydraulic conductivity in different soil layers of the loess area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5): 1073-1079.