

# 不同根系构型草本与灌木复合对土壤饱和导水率的影响因素分析及模拟

王晨光<sup>1</sup>, 曹文华<sup>2</sup>, 马波<sup>1,3</sup>, 李占斌<sup>1,3</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.水利部 水土保持监测中心, 北京 100053; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探究不同根系构型草本与灌木复合时的根土性质的差异对土壤饱和导水率的影响, 并综合考虑根系和土壤性质建立估算土壤饱和导水率的经验方程, 为黄土高原植被恢复后的水文模型建立提供理论参考。[方法] 选取不同根系构型草本与灌木的混合样地, 分别为柠条锦鸡儿加冰草(须根系)和柠条锦鸡儿加铁杆蒿(直根系)。采用双环刀法测定不同样地土壤饱和导水率。[结果] 样地类型和土层深度对土壤饱和导水率的影响达到显著水平, 两者对土壤饱和导水率影响的因子贡献率分别为 26% 和 52%。直根系铁杆蒿与柠条锦鸡儿混合样地的土壤饱和导水率高于须根系冰草与柠条锦鸡儿混合样地, 并且不同样地的土壤饱和导水率随土层深度的增加均表现出降低的趋势。根长密度、团聚体以及土壤容重能够较好地模拟土壤饱和导水率, 其拟合精度  $R^2$  可以达到 0.86。[结论] 直根系草本与灌木复合时较须根系草本与灌木复合相比具有更高的饱和导水率。在不同样地中, 根长密度、团聚体以及土壤容重是影响饱和导水率的主要因素。

**关键词:** 根长密度; 团聚体; 土壤容重; 饱和导水率

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2023)04-0010-07

**中图分类号:** S152.49, S157.1

**文献参数:** 王晨光, 曹文华, 马波, 等. 不同根系构型草本与灌木复合对土壤饱和导水率的影响因素分析及模拟 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 10-16, 43. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.002; Wang Chenguang, Cao Wenhua, Ma Bo, et al. Analysis and simulation of factors affecting soil saturated hydraulic conductivity by combinations of grasses and shrub with different root configurations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 10-16, 43.

## Analysis and Simulation of Factors Affecting Soil Saturated Hydraulic Conductivity by Combinations of Grasses and Shrubs with Different Root Configurations

Wang Chenguang<sup>1</sup>, Cao Wenhua<sup>2</sup>, Ma Bo<sup>1,3</sup>, Li Zhanbin<sup>1,3</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Monitoring Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The impacts on soil saturated hydraulic conductivity that occur because of differences in root and soil properties between combinations of grasses and shrubs having different root configurations were studied, and an empirical equation for estimating soil saturated hydraulic conductivity was established by comprehensively considering root and soil properties in order to provide a theoretical reference for the establishment of hydrological models appropriate for conditions following vegetation restoration on the Loess Plateau. [Methods] Plots of grass-shrub mixtures having different root system configurations were used; *Agropyron cristatum* and *Caragana korshinskii*, and *Artemisia gmelinii* and *Caragana korshinskii*.

收稿日期: 2023-02-01

修回日期: 2023-03-06

资助项目: 内蒙古自治区鄂尔多斯市科技计划项目“鄂尔多斯十大孔兑综合治理拦沙换水工程生态恢复效果评估”(2022YY012); 国家重点研发计划项目(2022YFF300800); 国家自然科学基金项目(42277342)

第一作者: 王晨光(1994—), 男(汉族), 河南省济源市人, 博士研究生, 研究方向为土壤侵蚀。Email: 15129656512@163.com。

通讯作者: 李占斌(1962—), 男(汉族), 河南省南阳市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。Email: llweb@126.com。

Saturated hydraulic conductivity was measured by the double-ring knife method. [Results] The influence of sample grass-shrub mixture type and soil depth on soil saturated hydraulic conductivity was significant, and their factor contribution rates on soil saturated hydraulic conductivity were 26% and 52%, respectively. The soil saturated hydraulic conductivity of the tap-root grass *Artemisia gmelinii* and *Caragana korshinskii* mixture was greater than that of the fibrous root grass *Agropyron cristatum* and *Caragana korshinskii* mixture. Soil saturated hydraulic conductivity of different plots declined with increasing soil depth. Root length density, soil aggregates, and soil bulk density better simulated soil saturated hydraulic conductivity, with a fitting accuracy ( $R^2$ ) reaching 0.86. [Conclusion] The combination of a taproot grass and a shrub had a higher saturated hydraulic conductivity than observed for the combination of fibrous root grasses and shrubs. Root length density, soil aggregates, and soil bulk density were the main factors affecting saturated hydraulic conductivity.

**Keywords:** root length density; aggregates; soil bulk density; saturated hydraulic conductivity

黄土高原大部地处我国半干旱地区,水分是限制其生态和经济发展的一个重要因素之一。朱显谟院士在提出黄土高原治理的“28字方略”中,首先就强调全部雨水就地入渗拦蓄。因此强化黄土高原的渗透性研究,对于黄土高原的可持续发展具有重要意义。自植被恢复以来,黄土高原的土壤性质发生了巨大的变化。多数研究表明,自退耕还林还草以来,黄土高原的有机质、团聚体、容重、土壤微生物、土壤孔隙度以及土壤肥力都趋于良性发展<sup>[1-3]</sup>。这些土壤性质的变化对土壤的水文性质造成了巨大的影响。土壤水文性质对于降雨的再分配有着极其重要的作用,其在很大程度上决定了渗入地下的降水与从地面流向河流网络的降水的比例。饱和含水量、田间持水量和饱和导水率通常被认为是重要土壤水文参数。其中土壤饱和导水率,作为应用最广泛的土壤参数之一,其在干旱和半干旱的黄土高原地区,能够较好地表征地表的水文变化过程和土壤对水的转化储存能力<sup>[4-5]</sup>。

近些年来,关于黄土高原植被恢复对于土壤饱和导水率的影响因素研究已经受到了越来越多的人的关注<sup>[2,4]</sup>。众多学者研究发现,土壤饱和导水率会受到立地类型的强烈影响<sup>[4,6]</sup>。但是目前关于不同立地类型土壤饱和导水率的影响因素研究,主要集中在土壤性质方面。而关于根系性质与土壤饱和导水率之间的定量关系没有被重视,而根系对于水分的运移具有重要的影响,因此在考虑土壤饱和导水率的影响因素时,根系性质应该被考虑<sup>[7-8]</sup>。同时,目前关于植被恢复中土壤饱和导水率的影响因素研究主要集中在单一植物样地,而对于复合样地,尤其是不同根系构型草本与灌木复合样地土壤饱和导水率的影响因素研究依旧较少<sup>[1,7-8]</sup>。因此本文选取黄土高原侵蚀比较严重的黄土丘陵沟壑区,并选取该区域分布较为广泛的柠条锦鸡儿和冰草(须根系),柠条锦鸡儿和铁杆蒿(直根系)两个混生群落,探究不同根系构型草

本与灌木复合时的根土性质的差异对土壤饱和导水率的影响,并综合考虑根系和土壤性质建立估算土壤饱和导水率的经验方程,以期对黄土高原土壤水分入渗模型的建立做出一定的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于陕西省绥德县韭园沟中游的王茂沟小流域,属黄土丘陵沟壑区。该区域面积为 5.97 km<sup>2</sup>,主沟长 3.75 km,沟壑密度 4.31 km/km<sup>2</sup>。地表覆盖着约 120~150 m 厚的马兰黄土。该地区受到季风气候的强烈作用,降雨量少且季节分布不均匀。主要集中在 6—9 月,多年平均降雨量约为 513 mm。该区地形破碎且地貌复杂,在黄土高原第一副区具有一定的代表性和典型性。研究区灌木林主要以柠条锦鸡儿、沙棘、达乌里胡枝子为主,其中柠条锦鸡儿较为广泛。撂荒草地主要植物群落有冰草、铁杆蒿等。

### 1.2 样品采集

本研究于 2020 年 9 月在试验地进行采样,选取以柠条锦鸡儿+冰草、柠条锦鸡儿+铁杆蒿为代表,且植被长势均匀的两个样地作为研究对象。样地基本信息详见表 1。为排除土壤类型,相对海拔以及植被恢复年限等因素的影响,本研究选择的两个样地坡面较为接近。样地的土壤类型均为黄绵土,且灌木生长年限均为 15 a。在选取合适样点后,小心剪去地上部分,除去地表枯落物及结皮。为了保证环刀内能够含有灌木的根系,在采集距灌木基部不同位置的样品时,需提前在样点周围挖掘 40 cm 深的剖面,以简单观察灌木的根系分布,然后确定采样位置,从而使得环刀内样品能够含有灌木根系。然后用高 5 cm,直径 5 cm 的圆状环刀进行采样。同时用直径 10 cm,高 5 cm 特制圆状容器。在环刀两侧进行采样。采样方法与测定饱和导水率的环刀的方法一致,采集环刀

周围的根土复合样品,用于测定根系参数。同时小心采集未被破坏原状土壤,装在铝制盒子中,用于测定团聚体、有机质和机械组成。采样位置为灌木基部和距灌木基部 50 cm 处。采样深度为 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm。每个样地选择 3 株灌木,在每株灌木不同位置的不同深度处均采集 1 个样品,每个样地共计 24 个样品,两个样地共计 48 个样品。

表 1 研究区样地基本信息

Table 1 Basic information about sample site in study area

植被类型	根系构型	坡度/ (°)	坡向	盖度/ %	灌木株 行距/cm
NJB	直+须	15	半阴坡	75	150×120
NJT	直+直	17	半阴坡	60	140×110

注: NJB, NJT 分别代表柠条锦鸡儿加冰草, 柠条锦鸡儿加铁杆蒿混合样地。下同。

### 1.3 样品测定

1.3.1 土壤样品测定 将在室外用环刀取的原状土样,带回室内浸入水中,浸泡 24 h。浸水时要保持水面与环刀上表面平齐。在达到预定时间后,将环刀取出,除去上盖,在上面套上一个空环刀。接口处用不透水胶带紧密缠绕后,再用橡胶圈固定,然后将接合好的环刀放到漏斗上,漏斗下面用 100 ml 烧杯承接。向上的空环刀中加水,水层厚 5 cm。待水头稳定后,开始接水计时。水头稳定时间一般为 1 h 左右。本试验设定接水时间为 5 min,同时测定水温。饱和导水率(渗透系数)计算公式为:

$$K_t = \frac{10 \times Q_n \times L}{t_n \times S \times (h + L)} \quad (1)$$

式中:  $K_t$  为温度为  $t$  (°C) 时的饱和导水率(渗透系数)(mm/min);  $Q_n$  为第  $n$  次渗出水量( $\text{cm}^3$ );  $t_n$  为每次渗透所间隔时间(min);  $S$  为土壤横截面积( $\text{cm}^2$ );  $h$  为水层厚度(cm);  $L$  为土层厚度(cm)。

待饱和导水率测定完毕后,将样品放在 105 °C 烘箱,烘干至恒重测定土壤容重。同时将铝制盒子中的样品过筛,测定土壤团聚体和有机质。土壤团聚体的测定采用湿筛法,土壤有机质的测定采用重铬酸钾外加热法,土壤粒径采用马尔文激光粒度仪测定。

1.3.2 根系样品测定 将直径 10 cm,高 5 cm 特制圆状容器内的根土复合样品置于 0.25 mm 土筛内冲洗得到根系样品。之后用彩色扫描仪对根系样品进行扫描(400 dpi)。扫描完毕后,用 Win RHIZO 根系分析系统对根长、根表面积、根径(RD)进行分析。根重密度(RMD,  $\text{mg}/\text{cm}^3$ )、根长密度(RLD,  $\text{cm}/\text{cm}^3$ )、根表面积密度(RSD,  $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )的计算公式为:

$$\text{RMD} = \frac{\text{RM}}{V} \quad (2)$$

$$\text{RLD} = \frac{\text{RL}}{V} \quad (3)$$

$$\text{RSD} = \frac{\text{RSA}}{V} \quad (4)$$

式中: RM 为根重( $\text{mg}$ );  $V$  为容器的体积( $\text{cm}^3$ ); RL 为根长( $\text{cm}$ ); RSA 为根系表面积( $\text{cm}^2$ )。

### 1.4 数据分析

采用统计分析采用 IBM SPSS Statistics 19.0,绘图采用 Origin 8.0。

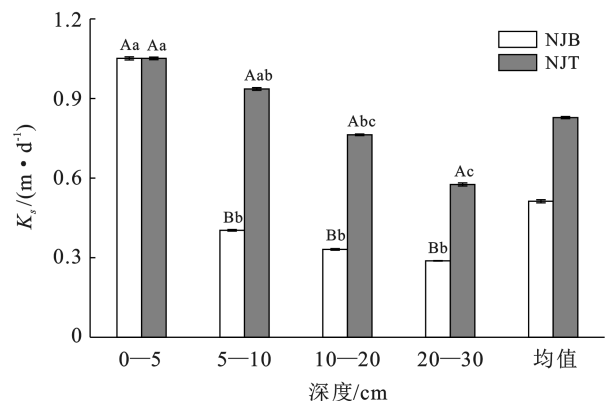
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤饱和导水率分布特征

从表 2 可以看出,样地类型、深度以及两者的交互作用对土壤饱和导水率的影响均达到显著水平。3 者对土壤饱和导水率的因子贡献率依次 26%, 52%, 12%。其中柠条锦鸡儿加冰草的在 0—30 cm 的土壤饱和导水率的分布范围为 0.29~1.05 m/d。柠条锦鸡儿加铁杆蒿的在 0—30 cm 的土壤饱和导水率的分布范围为 0.58~1.05 m/d。不同样地的土壤饱和导水率随深度的增加均呈降低的趋势。总体来说,柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地的土壤饱和导水率均值高于柠条锦鸡儿加冰草样地(图 1)。

表 2 各因子对土壤饱和导水率影响显著性及贡献率分析  
Table 2 Analysis of significance and contribution rate of each factor to soil saturated hydraulic conductivity

指标	F 值	显著性	因子贡献率/%
样地类型	69.86	<0.01	26
深度	52.23	<0.01	52
样地类型×深度	10.33	<0.01	12
误差			11



注:小写字母表示样地相同时饱和导水率随深度变化的差异,大写字母表示深度相同时,饱和导水率随样地变化的差异。

图 1 不同样地土壤饱和导水率分布

Fig. 1 Distribution of saturated hydraulic conductivity of different sample plots

## 2.2 根系及土壤指标分布特征

从图 2 可知,在随土层深度的变化中,在根系性质方面,不同样地的根重密度、根长密度、根面积密度、根径随着土层深度的加深均表现出降低的趋势。在土壤性质方面,团聚体以及有机质含量随土层深度的增加整体表现出降低的趋势,而容重表现出增加的趋势。黏粒、粉粒、砂粒含量随土层深度的增加变化幅度较小。在随样地的变化中,柠条锦鸡儿加冰草样地的根重密度均值、根面积密度均值、根径均值较柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地相比呈现出增加的趋势,其分别增加 51.95%, 5.05%, 14.96%。而根长密度均值较柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地相比呈现出减少的趋势,其降低 8.99%。在土壤性质方面,柠条锦鸡儿加冰草样地的砂粒均值、容重均值较柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地相比呈现出增加的趋势,其分别增加 41.66% 和 7.23%, 而黏粒均值、粉粒均值、有机质均值、团聚体均值较柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地相比表现出减小的趋势,其分别减小 28.44%, 13.78%, 33.87%, 67.80%。

## 2.3 饱和导水率影响因素分析及估算

由于野外植被类型多样,空间异质性较强,因此将不同属性样品的相同指标体系与土壤饱和导水率做回归分析和相关性分析,从而探究在不同样地下影响土壤饱和导水率的共性指标,并用这些指标去估算饱和导水率,对于土壤饱和导水率预测模型的建立和

推广具有一定的意义<sup>[7-8]</sup>。由图 3 可知,在根系指标中,根长密度与根面积密度与土壤饱和导水率呈显著正相关,且根长密度与饱和导水率的相关系数高于根面积密度。在土壤指标中,与土壤饱和率呈显著正相关的指标是黏粒、粉粒、有机质和团聚体,而与土壤饱和导水率呈负相关的是砂粒和容重。其中不同土壤指标相关性从大到小依次为土壤容重、土壤团聚体、土壤有机质、黏粒、砂粒、粉粒。为综合考虑土壤性质和根系性质对于土壤饱和导水率的影响,分别选取根系性质中相关性最大的根长密度以及土壤性质中相关性最大的土壤容重作为模拟土壤饱和导水率的指标。但是从相关性分析中可以看到,土壤团聚体也具有较高相关性。由于团聚体主要反映土壤结构的稳定性,而黄土高原地区的土壤遇水容易滑脱落实,甚至失陷,这会导致土壤的渗透性突然下降,因此土壤结构的稳定性也是影响黄土高原土壤渗透的一个重要指标。本研究将土壤团聚体也作为分析和模拟饱和导水率的指标。总的来说,本研究将根长密度、团聚体以及土壤容重作为模拟土壤饱和导水率的指标,模拟结果如表 3 所示。从表 3 可以得知,本文在将根系和土壤性质综合考虑时,其回归方程(6) $R^2$  可以达到 0.86。而前人仅仅只用根系性质或土壤性质模拟土壤饱和导水率时, $R^2$  在 0.66~0.79 之间。本文在将根系和土壤性质综合考虑时,其回归方程的拟合精度较前人相比,得到一定的提升。

表 3 土壤饱和和导水率回归方程

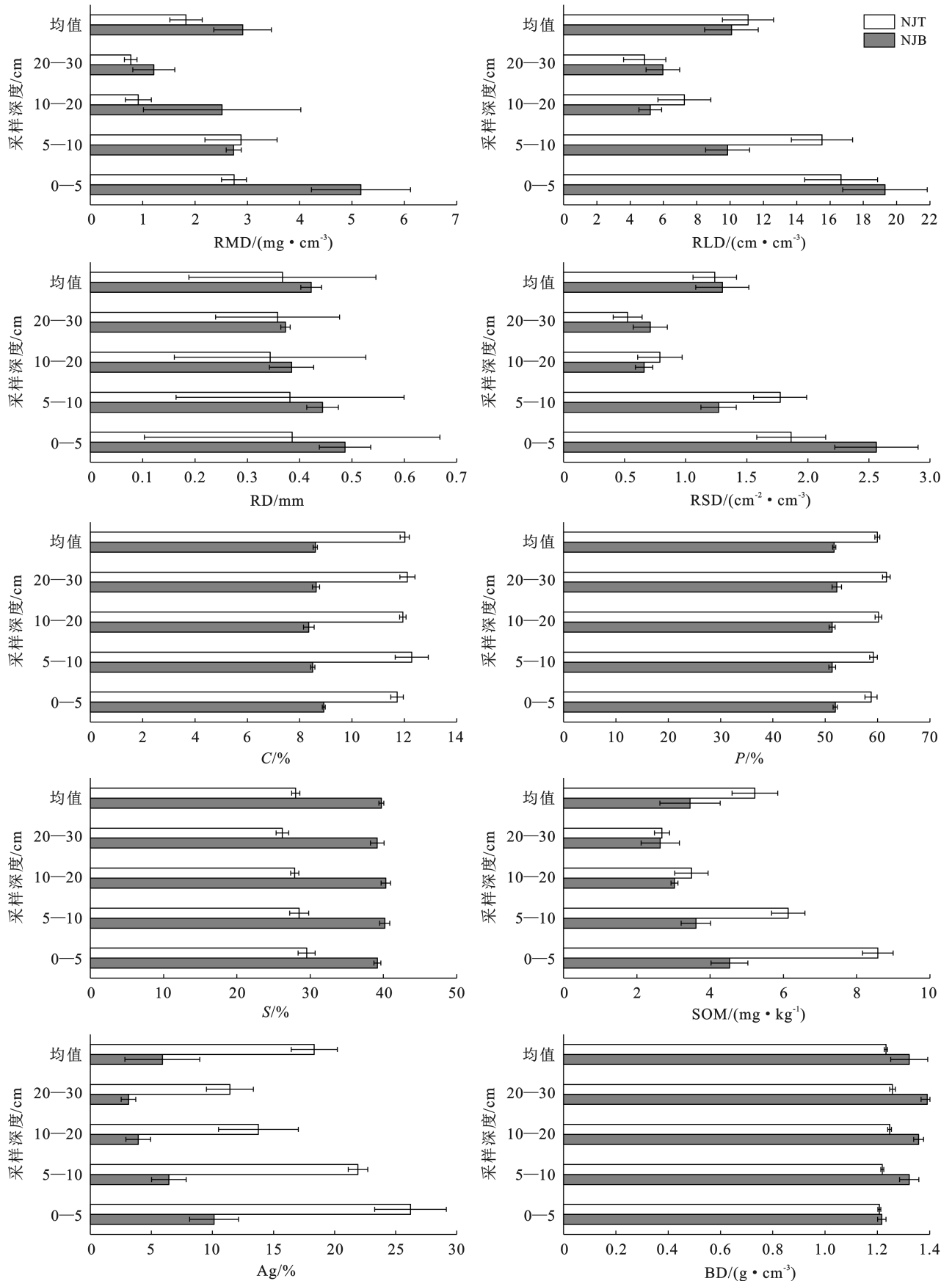
Table 3 Regression equation of soil saturated hydraulic conductivity

项目	$E_q$	$R^2$	文献来源
已有研究	$y = a \times \text{RLD} + b$	0.74 ( $p < 0.01$ )	李建兴等, 2013 <sup>[9]</sup>
	$y = a + b \times \text{InSOM}$	0.72 ( $p < 0.01$ )	Li 等, 2018 <sup>[10]</sup>
	$y = a \times \text{Ag} + b$	0.66 ( $p < 0.01$ )	王国梁等, 2003 <sup>[11]</sup>
	$y = a + b \times \text{clay} + c \times \text{sand} - \text{BD}$	0.79	PTF
本研究	$y = a \times \text{RLDb} \times \text{BDc} \times \text{Agd}$	0.86	公式(6)

## 3 讨论

在本研究中,直根系草本与灌木复合的土壤饱和导水率高于须根系草本与灌木复合的土壤饱和导水率,这与 Zhu Pingzong 等<sup>[8]</sup> 研究结果类似。这可能与不同样地的根系和土壤性质的差异有关。在本研究中,根长密度与根表面积密度与土壤饱和导水率呈现显著正相关关系,这与多数研究者研究结果相似<sup>[7,9]</sup>。研究<sup>[12-13]</sup> 表明,随着根长密度和根表面积密度的增加,其对土壤支撑作用往往也会增强。这能够

较大程度避免土壤的滑脱落实,从而使得土壤保持了较高的透水性。植物根系的分布路径也会极大程度影响土壤的导水性能。研究表明,根长密度和根表面积越大,其在土壤中穿插缠绕形成的大孔隙数量就越多,水分在下渗时,往往会在这些大孔隙中形成优先流而快速下渗,这可能是随着根长密度和根表面积密度的增加,土壤饱和导水率表现出增加趋势的原因<sup>[7,14]</sup>。在土壤性质中,土壤团聚体和有机质与土壤饱和导水率呈正相关,容重与土壤饱和导水率呈负相关关系,这与多数研究结果一致<sup>[4,7]</sup>。

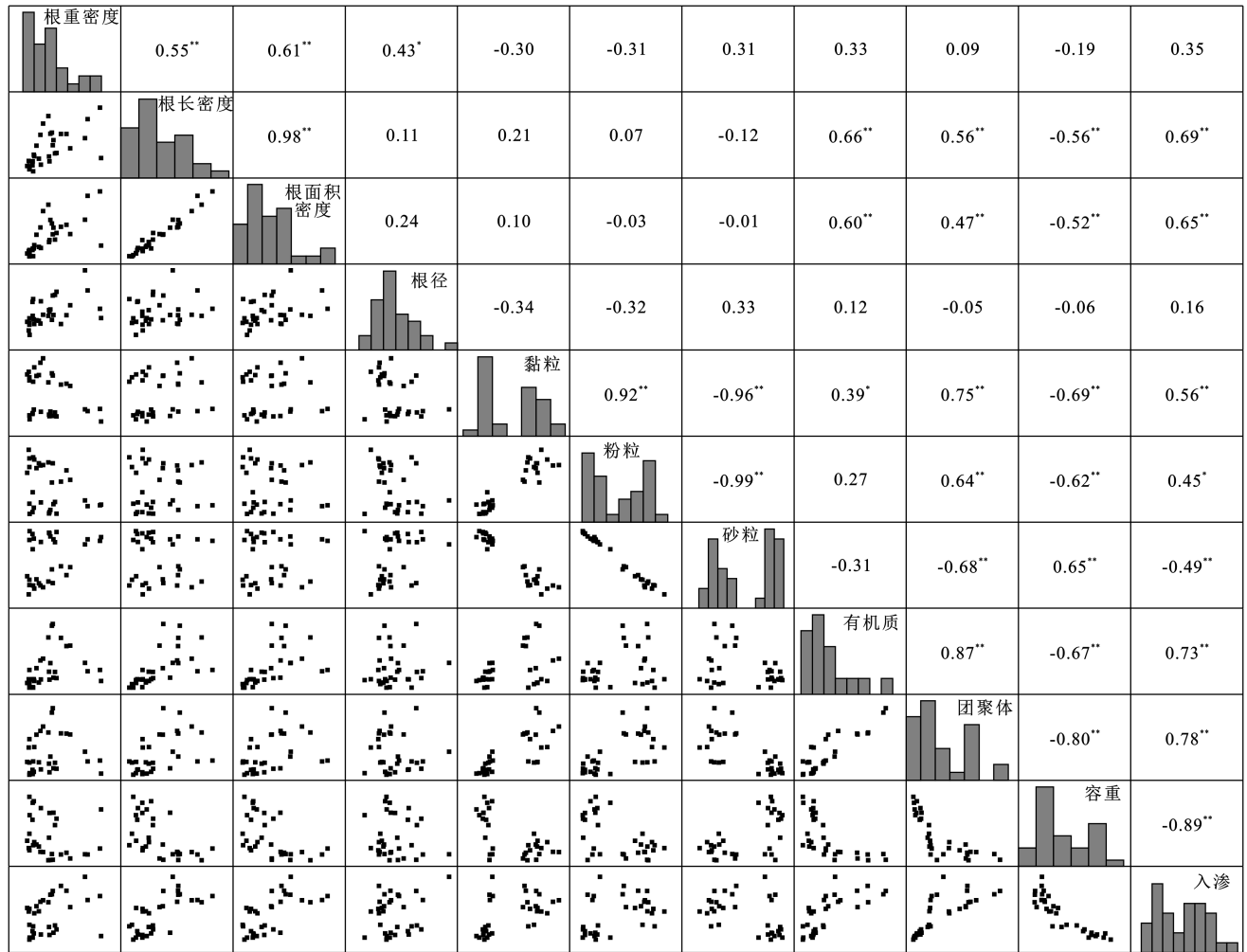


注:RMD表示根重密度;RLD表示根长密度;RD表示根径;RSD表示根表面积密度;C表示黏粒;P表示粉粒;S表示砂粒;SOM表示有机质;Ag表示大于0.25 mm土壤团聚体;BD表示土壤容重。

图 2 不同样地根系及土壤指标分布

Fig.2 Distribution of root system and soil indicators in different sample plots





注:①左侧点表示两两变量之间的散点图,中间柱状图表示数据分布直方图;②\*\*表现 0.01 水平上显著相关,\*表现 0.05 水平上显著相关。

图 3 不同指标二元散点矩阵及相关性系数图

Fig.3 Binary scatter matrix and correlation coefficient of different indicators

研究表明,土壤团聚体与土壤结构的稳定性密切相关,随着大于 0.25 mm 土壤团聚体含量的增加,土壤结构稳定性会不断增强,其抵抗水的崩解能力将会不断增加,在一定程度可以降低土壤遇水时滑脱落实的风险,这可能是随着土壤大团聚体含量增加,土壤饱和和导水率表现出增加趋势的原因<sup>[15-16]</sup>。而土壤容重能够直接反映土壤的孔隙状况,研究表明,土壤容重与土壤孔隙状况呈负相关关系<sup>[8]</sup>,而土壤孔隙作为水分下渗的主要路径,其数量越高,土壤导水能力往往越强,这可能是随着容重的降低土壤饱和和导水率表现出增加趋势的原因<sup>[17-18]</sup>。土壤有机质作为土壤团聚体的重要胶结物质,其含量的增加,能够促进大团聚体的形成,提高土壤的水力传导能力和结构稳定性,从而间接提高土壤的饱和和导水率<sup>[7-8]</sup>。这可能是土壤饱和和导水率与有机质呈正相关关系的原因。因此在本研究中,柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地的饱和和导水率高于柠条锦鸡儿加冰草样地,可能是因为柠条锦鸡儿加铁杆蒿样地的根长密度、大于 0.25 mm 团聚体

含量高于柠条锦鸡儿加冰草样地,而容重低于柠条锦鸡儿加冰草样地所致。

在不同样地中,土壤饱和和导水率随着土层深度的增加,均表现出降低的趋势,这与桑凯欣等<sup>[7]</sup>和陈永华等<sup>[19]</sup>研究结果类似。从以上分析中可以发现,根长密度、根面积密度、团聚体、有机质随着土层深度的增加表现出降低的趋势,而容重表现出增加的趋势。这可能是随着土层深度的增加,土壤的水分和养分往往会趋于减少,而容重往往会趋于增加,对根系的生长起到了一定的限制作用,这可能是根长密度和根表面积密度随土层深度增加整体表现出降低趋势的原因<sup>[20-21]</sup>。而根系不仅对于土壤团聚体的形成具有极为重要的作用,并且其输入的根系分泌物也是土壤有机质的重要来源之一,根系的减少可能是土壤团聚体和有机质随土层深度的增加整体表现出降低趋势的原因<sup>[22-23]</sup>。由于土壤饱和和导水率与根长密度、根表面积密度、团聚体、有机质呈显著正相关关系,而与土壤容重呈现显著负相关关系,因此根长密度、根表

面积密度、团聚体含量、有机质含量随土层深度的增加而降低,容重随土层深度的增加而增加,可能是土壤饱和导水率随着土层深度的增加表现出降低趋势的原因。

由于土壤饱和导水率的测定常常费时费力,因此通过选取一些便于得到的土壤和根系参数对其进行模拟是多数学者常用的手段<sup>[4,8]</sup>。从表 3 可以看出,本研究基于根长密度、团聚体以及土壤容重建立的经验方程较单一考虑根系或者土壤性质时,方程的拟合精度有较大提高。这说明植被恢复的坡面尺度上,对于土壤饱和导水率进行模拟时,根系参数应当被考虑<sup>[8,11,19,24]</sup>。但是受限于样本的数量,本研究所得到的经验方程的适用性需要进一步验证。

## 4 结论

在本试验中,多因素方差分析表明,样地类型和土层深度对于土壤饱和导水率均有显著的影响,两者对土壤饱和导水率的因子贡献率依次为 26%,52%。直根系草本铁杆蒿与柠条锦鸡儿混合样地的土壤饱和导水率高于须根系草本冰草与柠条锦鸡儿混合样地。将根系性质的根长密度以及土壤性质的团聚体和土壤容重与土壤饱和导水率建立经验方程时,拟合精度  $R^2$  可达到 0.86,较前人仅考虑土壤性质或者根系性质与土壤饱和导水率建立的经验方程的相比,拟合精度  $R^2$  提高了 16.22%~30.30%。

### [参 考 文 献]

- [1] Gu Chaojun, Mu Xingmin, Gao Pen, et al. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019,19(2):716-728.
- [2] Wu Wenjie, Chen Guangjie, Meng Tingfang, et al. Effect of different vegetation restoration on soil properties in the Semi-arid Loess Plateau of China [J]. *Catena*, 2023,220:106630.
- [3] Dou Yanxing, Yang Yang, An Shaoshan, et al. Effects of different vegetation restoration measures on soil aggregate stability and erodibility on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2020,185:104294.
- [4] Qiu Dexun, Xu Ruirui, Wu Changxue, 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.
- [5] 曾建辉,马波,郭迎香,等.冻融条件下生物结皮覆盖对土壤饱和导水率的影响[J].*生态学报*,2022,42(1):348-358.
- [6] Wang Hao, Zhang Guanghui, Li Ningning, et al. Variation in soil erodibility under five typical land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2019,174:24-35.
- [7] 桑凯新,胡淦林,黄超,等.黄河河岸带 5 种植物类型根系结构特征对土壤渗透性的影响[J].*中国水土保持科学*,2020,18(5):1-8.
- [8] Zhu Pingzong, Zhang Guanghui, Zhang Baojun. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau [J]. *Geoderma*, 2022,412:115717.
- [9] 李建兴,何丙辉,湛芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].*生态学报*,2013,33(5):1535-1544.
- [10] Li Tongchuan, Shao Mingan, Jia Yuhua, et al. Using the X-ray computed tomography method to predict the saturated hydraulic conductivity of the upper root zone in the Loess Plateau in China [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018,82(5):1085-1092.
- [11] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].*自然资源学报*,2003,18(5):529-535.
- [12] 蒋芳市,何恺文,李慧,等.2 种草本植物根系对崩岗洪积扇土壤分离的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(6):112-117.
- [13] Hao Haoxin, Qin Jiahui, Sun Zhaoxiang, et al. Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils [J]. *Catena*, 2021,203:105378.
- [14] Li Qiang, Liu Guobin, Zhang Zheng, et al. Relative contribution of root physical enlacing and biochemical exudates to soil erosion resistance in the loess soil [J]. *Catena*, 2017,153:61-65.
- [15] 朱显谟,田积莹.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J].*水土保持学报*,1993,7(3):1-10.
- [16] Lu Jia, Zheng Fenli, Li Guifang, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the mollisol region of Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2016,161:79-85.
- [17] 梁向锋,赵世伟,张扬,等.子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J].*生态学报*,2009,29(2):636-642.
- [18] 刘目兴,吴丹,吴四平,等.三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J].*生态学报*,2016,36(11):3189-3196.
- [19] 陈永华,叶权平,张文辉,等.不同间伐强度下桥山麻栎林土壤渗透特性[J].*水土保持研究*,2019,26(1):113-117.
- [20] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].*农业工程学报*,2013,29(10):153-159.

- mental Science and Pollution Research, 2017, 24(30): 23953-23965.
- [11] 陆雅佩, 罗久富, 王丽娜, 等. 海拔与坡向对伏牛山自然陡坡土壤种子库的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(6): 74-84.
- [12] 张展, 高照良, 宋晓强, 等. 黄延高速公路边坡植被与土壤特性调查研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 191-195.
- [13] Rivera D, Mejias V, Jáuregui B, et al. Spreading topsoil encourages ecological restoration on embankments: Soil fertility, microbial activity and vegetation cover [J]. PLoS One, 2014, 9(7): e101413.
- [14] 严雨洁, 夏露, 赵冰琴, 等. 向家坝工程扰动区不同修复类型边坡土壤养分及土壤酶活性特征[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2005-2015.
- [15] 王辰元, 周明涛, 胡旭东, 等. 蒸散视角下护坡植被滴灌技术评价[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 85-92.
- [16] 朱蒙恩, 沙利云, 周明涛, 等. 西藏高寒地区不同边坡生态修复类型土壤的肥力变化[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 158-165.
- [17] 章穗, 张梅, 迟国泰, 等. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34-42.
- [18] Li R, Kan S, Zhu M, et al. Effect of different vegetation restoration types on fundamental parameters, structural characteristics and the soil quality index of artificial soil [J]. Soil and Tillage Research, 2018, 184: 11-23.
- [19] 张泽洲, 王冬梅, 李梦寻. 干湿交替程度对土壤速效养分的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 265-270.
- [20] 段玉婷, 王志泰, 徐小明, 等. 石质边坡植被建植后土壤养分与植物群落特征动态研究[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 10-18.
- [21] 全思懋, 管晓进, 王绪奎, 等. 江苏省域农田土壤速效钾含量变化及其影响因子研究[J]. 土壤, 2019, 51(2): 257-262.
- [22] 雷斯越, 赵文慧, 杨亚辉, 等. 不同坡位植被生长状况与土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 86-91, 105.
- [23] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [24] 平李娜, 王辉, 沈紫燕. 坡度对黏性红壤土坡面溶质迁移特征的影响[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(5): 47-50, 58.
- [25] 高郟, 李江荣, 卢杰, 等. 色季拉山急尖长苞冷杉林不同坡向土壤养分及肥力研究[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1331-1341.
- [26] 刘莹, 许丽, 丰菲, 等. 乌海矿区矸石山边坡植被重建初期物种多样性及群落稳定性[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 190-196.
- [27] 陈乐乐, 施建军, 王彦龙, 等. 高寒地区不同退化程度草地群落结构特征研究[J]. 草地学报, 2016, 24(1): 210-213.
- [28] 税伟, 冯洁, 李慧, 等. 喀斯特退化天坑不同坡向植物群落系统发育与功能性状结构[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 8050-8060.
- [29] 何肖肖, 王娇娇, 孙鲁龙, 等. 基于 AHP-EWM 评价陕西渭北地区无袋栽培苹果果实品质[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 70-78, 87.
- [30] 陈品章, 杨海浪, 胡波, 等. 基于植被恢复的水泥改性膨胀土换填土复合改良试验研究[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(5): 112-118.
- [31] Hu Xudong, Gao Jiazhen, Zhou mingtao, et al. Evaluating the success of engineering disturbed slope eco-restoration in the alpine region, Southeast Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. 山地科学学报(英文版), 2021, 18(11): 2820-2832.
- [32] 乔欧盟, 陈璋. 矿区不同类型生态护坡工程植物多样性对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 742-748.
- [33] Wu Wenjuan, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu. Driving mechanisms of climate-plant-soil patterns on the structure and function of different grasslands along environmental gradients in Tibetan and Inner Mongolian Plateaus in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339: 130696.
- [34] 尹金珠, 朱凯华, 史翔宇, 等. 庆丰采石场岩质边坡植被恢复状况和土壤特性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 144-149, 155.

(上接第 16 页)

- [21] Fan Ying, Miguez M G, Jobbag Y, et al., et al. Hydrologic regulation of plant rooting depth [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America., 2017, 114(40): 10572-10577.
- [22] 刘均阳, 周正朝, 苏雪萌. 植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 267-27.
- [23] Zhou Shuang, Lin Junjie, Wang Peng, et al. Resistant soil organic carbon is more vulnerable to priming by root exudate fractions than relatively active soil organic carbon [J]. Plant and Soil, 2022: 1-12.
- [24] Wang Hao, Zhang Guanghui, Li Ningning, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2018, 325: 18-27.