

# 黄土陡坡人工植被下土壤表层的水文效应

刘万智<sup>1</sup>, 赵锦梅<sup>1</sup>, 张露韡<sup>2</sup>, 朱 恭<sup>2</sup>, 毛光锐<sup>1</sup>, 崔海明<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070;

2.兰州市南北两山环境绿化工程指挥部, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** [目的] 探讨栽植坡度、坡向对绿化陡坡土壤表层水文效应的影响,为黄土陡坡植被恢复过程中水资源的有效利用提供科学依据。[方法] 在干旱半干旱区选择 $46^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 和 $56^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 两个陡坡级的阴坡、半阴坡、阳坡、半阳坡4种坡向绿化8a的乔灌木陡坡,测定0—40 cm土层的土壤基本性状、持水量和渗透性能,分析各土壤因子和地形因子的关系。[结果] ①坡度和坡向立地因子之间交互作用对0—40 cm土层土壤容重、质量含水量、总孔隙度、最大持水量有显著影响( $p<0.05$ ),对0—20 cm土层土壤毛管孔隙度、毛管持水量有显著影响( $p<0.05$ ),其他因子影响均不显著( $p>0.05$ )。②不同坡度间,最大持水量表现为: $46^{\circ}\sim 55^{\circ}>56^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 陡坡;平均渗透速率则表现为: $56^{\circ}\sim 65^{\circ}>46^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 陡坡;同时不同坡向间,最大持水量表现为:阳坡( $522.42\text{ t/hm}^2$ )>半阳坡( $505.03\text{ t/hm}^2$ )>阴坡( $502.27\text{ t/hm}^2$ )>半阴坡( $496.15\text{ t/hm}^2$ );土壤平均渗透速率表现为阳坡( $0.79\text{ mm/min}$ )>半阳坡( $0.59\text{ mm/min}$ )>阴坡( $0.42\text{ mm/min}$ )>半阴坡( $0.30\text{ mm/min}$ )。③双因素方差分析表明,坡度级和坡向的双因素交互作用对陡坡的水文特征影响最大。[结论]  $46^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 陡坡的土壤基本性状优于 $56^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 陡坡,而阳坡和半阳坡的水源涵养能力高于阴坡和半阴坡。

**关键词:** 土壤理化性状; 土壤水文特征; 黄土陡坡; 坡度和坡向

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2024)02-0119-09

**中图分类号:** Q948, S152.7

**文献参数:** 刘万智, 赵锦梅, 张露韡, 等. 黄土陡坡人工植被下土壤表层的水文效应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 119-127. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.013; Liu Wanzhi, Zhao Jinmei, Zhang Luwei, et al. Soil surface hydrological effects of artificial vegetation on loess steep slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 119-127.

## Soil Surface Hydrological Effects of Artificial Vegetation on Loess Steep Slopes

Liu Wanzhi<sup>1</sup>, Zhao Jinmei<sup>1</sup>, Zhang Luwei<sup>2</sup>, Zhu Gong<sup>2</sup>, Mao Guangrui<sup>1</sup>, Cui Haiming<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2.Lanzhou City

North and South Two Mountains Environmental Greening Project Headquarters, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** [Objective] The influences of slope inclination aspect on hydrological characteristics in the soil surface layer and on the greening steep slopes were studied in order to provide a basis for the effective use of water resources in the process of vegetation restoration on steep loess slopes. [Methods] We conducted a comprehensive study on two steep slopes with inclinations of  $46^{\circ}\sim 55^{\circ}$  and  $56^{\circ}\sim 65^{\circ}$  located in arid and semi-arid regions. These slopes were categorized into four slope orientations: shady slopes, semi-shady slopes, sunny slopes, and semi-sunny slopes. Arboriculture and shrubbery greening initiatives were implemented on these steep slopes over an 8-year period. We conducted extensive analyses on basic soil properties, water-holding capacity, and infiltration of the 0—40 cm soil layer. Furthermore, we explored the intricate relationship between various soil factors and terrain factors. [Results] ① The interaction between slope

收稿日期: 2023-08-19

修回日期: 2023-10-31

资助项目: 甘肃省科技计划自然科学基金项目“兰州市南北两山陡坡绿化生态成效研究”(LNLJ2022(01))

第一作者: 刘万智(1995—), 女(汉族), 甘肃省兰州市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 1055396072@qq.com。

通信作者: 赵锦梅(1978—), 女(汉族), 甘肃省天水市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治方面的研究。Email: zhaojm@gsau.edu.cn。

classes and slope orientations stand factors had a significant effect ( $p < 0.05$ ) on soil bulk weight, mass water content, total porosity, and maximum water holding capacity in the 0—40 cm soil layer, and a significant effect ( $p < 0.05$ ) on soil gross tubular porosity and gross tubular water holding capacity in the 0—20 cm soil layer. However, these differences were not statistically significant ( $p > 0.05$ ) under alternative conditions.

② Maximum water-holding capacity was found to be higher for the  $46^\circ \sim 55^\circ$  steep slopes than for the  $56^\circ \sim 65^\circ$  steep slopes. Conversely, the average infiltration rate was higher for the  $56^\circ \sim 65^\circ$  steep slopes than for the  $46^\circ \sim 55^\circ$  steep slopes. Sunny slopes had the highest maximum water-holding capacity ( $522.42 \text{ t/hm}^2$ ), followed by semi-sunny slopes ( $505.03 \text{ t/hm}^2$ ), shady slopes ( $502.27 \text{ t/hm}^2$ ), and semi-shady slopes ( $496.15 \text{ t/hm}^2$ ). Similarly, the average soil infiltration rate was highest for sunny slopes ( $0.79 \text{ mm/min}$ ), followed by semi-sunny slopes ( $0.59 \text{ mm/min}$ ), shady slopes ( $0.42 \text{ mm/min}$ ), and semi-shady slopes ( $0.30 \text{ mm/min}$ ).

③ A two-factor analysis of variance revealed that the interaction between slope class and slope aspect had the most significant impact on the hydrological characteristics of steep slopes. [Conclusion] Basic soil properties were better for  $46^\circ \sim 55^\circ$  steep slopes than for  $56^\circ \sim 65^\circ$  steep slopes. Moreover, sunny and semi-sunny slope orientations exhibited greater water-holding capacities than shady and semi-shady slope orientations.

**Keywords:** soil physical and chemical properties; soil hydrological characteristics; loess steep slopes; slope and aspect

涵养水源、保持水土是森林生态系统的主要生态功能之一,而其调水、蓄水和持水功能则主要通过土壤层完成<sup>[1]</sup>。土壤层水文效应包括土壤的渗透性能和持水能力两个方面,其土壤孔隙的数量和大小为主要限制因素<sup>[2]</sup>。通常情况下,地形特征对土壤形成及利用具有重要作用,海拔高度、坡向坡度及地表性质的不同等因素在一定程度上影响土壤的许多特性<sup>[3-4]</sup>。而就分布于较高海拔的黄土陡坡而言,由于其特殊的生境条件,地形因子通过影响坡面光照、气温、降水、土壤性质和植被格局条件等直接或间接引起土壤水文效应的变化<sup>[5-6]</sup>。近几年,对于中国黄土陡坡土壤水文效应的研究中,李增尧<sup>[7]</sup>等研究了黄土区陡坡坡面因子对土壤水分的影响,表明坡度、坡向和成坡时间因子对坡面土壤含水量的影响主要集中在 0—40 cm 土层深度内,对较深层土壤含水量影响作用较小;潘成忠<sup>[8]</sup>等研究了黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性,表明纵向和横向坡位对坡面土壤水分分布均存在影响,但纵向坡位的影响要较横向显著。王延平<sup>[9]</sup>等指出在自然降雨条件下,陡坡地多年生人工植被的土壤贮水亏缺状况不能得到改善。可见,坡度、坡向和坡位等立地因子对土壤水文效应的影响较大。

由于社会经济快速发展,黄土区的道路、住房等基础设施建设往往因开挖山体而形成大面积陡峭裸露坡面<sup>[10]</sup>。因其土质疏松,坡度陡峭,夏季风暴强度大,植被条件差,滑坡、水土流失等地质灾害问题严重<sup>[11]</sup>。对于陡坡治理,进行生态修复并构建适宜的植物群落,是稳定坡体结构、保持水土、美化环境有效

途径<sup>[12-13]</sup>。绿化陡坡与裸露陡坡相比,可以改善土壤的结构和环境,植物根系与土的交界面会成为降雨入渗的优先通道,降水入渗较快,提高了土壤含水率,土壤孔隙度分布不均匀,增加了土壤持水能力,对绿化保护和生态环境具有很好的改善效果<sup>[14-15]</sup>。鉴于此,完善坡度和坡向对土壤性状和水文特征资料与研究数据对于深入认知绿化措施对陡坡生态系统的影响和生态服务功能的发挥有重要的意义。

黄土高原陡坡受水流冲刷,土壤松散裸露,植被受损,局部气候条件导致水土流失问题严重,是生态环境变化的敏感区<sup>[16]</sup>。自 1999 年,随着“山川秀美”工程的实施,退耕还林(草)在改善黄土高原生态环境已具有一定的成效<sup>[17-18]</sup>。但大于  $45^\circ$  的黄土陡坡占比大,坡度和坡向对土壤基本性质和水文效应的影响规律和机制尚不清晰,特别是黄土高原陡坡绿化区域。为此,探索黄土陡坡区不同坡度及坡向土壤基本性状及水文特征,以及立地条件对变化规律的影响程度,可为黄土陡坡绿化过程中,不同区域的选择提供理论依据。本文在黄土陡坡坡度坡向分布的基础上,分别选择不同坡度级( $46^\circ \sim 55^\circ$  和  $56^\circ \sim 65^\circ$ )和坡向的陡坡进行土壤基本性状及水文特征分析研究,旨在探讨坡度、坡向和土层等因子对土壤水文特征的影响规律及影响效果,为该区域陡坡绿化提高造林成活率和保存率提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于  $103^\circ 21' - 104^\circ 00' \text{E}$ ,  $35^\circ 53' - 36^\circ 33' \text{N}$ , 海拔 1 800~2 100 m,土壤种类以灰钙土为主,属于

北温带半干旱大陆性季风气候,全年平均日照时数 2 607.6 h,无霜期 185 d 左右,多年平均降雨量为 327 mm,年均水分蒸发量为 1 468 mm,年平均气温 9.8 ℃,蒸发量远大于降雨量,降季节分配不均,主要集中于 7—9 月<sup>[19]</sup>。该区内植被以灌草木为主,造林树种主要有怪柳(*Tamarix chinensis*)、白榆(*Ulmus pumila*)、柠条(*Caragana microphylla*)、红砂(*Reaumria songarica*)、四翅滨藜(*Atriplex canescens*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)和枸杞(*Lycium chinenes*)等。草本植物主要有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、戈壁针茅(*Stipa gobiea*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、冷蒿

(*Artemisia frigida*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、野韭(*Allium ramosum*)等。

1.2 样地设置

2022 年 6 月,在研究相关资料和实地踏查的基础上,选择坡度和坡向不同的 8 a 生洞穴栽植绿化措施下的陡坡进行研究,分别为 46°~55°和 56°~65°的阴坡(0~45°,315°~360°)、半阳坡(45°~135°)、阳坡(135°~275°)和半阴坡(275°~315°),坡度级为 46°~55°与 56°~65°,以坡度 50°~60°间裸露陡坡为对照,每个样地分别设置 3 个 10 m×10 m 的植被调查样方。样地详细概况详见表 1。

表 1 研究样地基本概况  
Table 1 Basic overview of studied sample plots

| 坡度级    | 坡向  | 海拔/<br>m | 经度<br>(E) | 纬度<br>(N) | 植被类型     | 平均<br>高度/cm | 平均<br>基径/mm | 平均<br>冠幅/cm | 总盖度/<br>% |
|--------|-----|----------|-----------|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 46°~55 | 阴坡  | 1 786    | 103°59′   | 36°36′    | 怪柳、柠条    | 111.93      | 10.91       | 70.10       | 54        |
|        | 阳坡  | 1 806    | 103°76′   | 36°26′    | 怪柳、柠条    | 111.25      | 11.52       | 137.97      | 59        |
|        | 半阴坡 | 1 767    | 103°58′   | 36°34′    | 怪柳、柠条    | 148.23      | 17.46       | 97.91       | 54        |
|        | 半阳坡 | 1 806    | 103°58′   | 36°32′    | 怪柳、柠条    | 95.90       | 12.01       | 57.35       | 47        |
| 56°~65 | 阴坡  | 1 908    | 103°17′   | 36°29′    | 怪柳、柠条、红砂 | 91.88       | 11.12       | 56.00       | 54        |
|        | 阳坡  | 1 867    | 103°73′   | 36°28′    | 怪柳、柠条    | 135.40      | 13.64       | 168.60      | 70        |
|        | 半阳坡 | 1 817    | 103°58′   | 36°36′    | 怪柳、柠条    | 119.13      | 10.17       | 65.65       | 56        |
|        | 半阴坡 | 1 670    | 103°82′   | 36°17′    | 怪柳、四翅滨藜  | 102.78      | 10.79       | 69.35       | 53        |
| 裸露陡坡   | —   | 1 745    | 103°79′   | 36°08′    | —        | —           | —           | —           | —         |

1.3 研究方法

1.3.1 土壤样品采集 在每块未被扰动的样地根据坡上、坡中、坡下位置选取 3 个样方用容积为 100 cm<sup>3</sup>的环刀采集 0—20 cm,20—40 cm 土层原状土,每层 3 次重复,共取土样 162 个,用于测定土壤容重、土壤孔隙度和土壤渗透性。

1.3.2 测定指标与方法 用烘干法测定土壤质量含水量(105 ℃,24 h),采用环刀法测定土壤容重,用环刀浸水法测定田间持水量和渗透性,均在室内进行测定。

孔隙度计算公式为<sup>[20]</sup>:

$$P_t=93.947-32.995D \tag{1}$$

$$P_c=W \cdot D \tag{2}$$

$$P_n=P_t-P_c \tag{3}$$

式中: $P_t$  为土壤总孔隙度(%); $P_n$  为土壤非毛管孔隙度(%); $P_c$  为土壤毛管孔隙度(%); $D$  为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>); $W$  为田间持水率(%)。

土壤持水性能计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$W_{\max}=10\ 000P_tH \tag{4}$$

$$W_m=10\ 000P_cH \tag{5}$$

$$W_{\min}=10\ 000P_nH \tag{6}$$

式中: $W_{\max}$ , $W_m$ , $W_{\min}$ 分别为土壤最大持水量、毛管持水量、非毛管持水量(t/hm<sup>2</sup>); $H$  为土壤厚度(m)。本研究持水量计算土层厚度取 10 cm。

土壤渗透性采用双环刀法测定,将环刀上、下盖取下,下端换上有网孔且垫有滤纸的底盖,在上端套上一个空环刀,接口处用胶布封好,严防从接口处漏水,然后将结合的环刀放在漏斗上,架上漏斗架,漏斗下面承接有烧杯,往上面的空环刀中加水,水层 5 cm。加水以后每 1 min 更换漏斗下的烧杯;分别量出渗水量 $Q_1,Q_2,Q_3 \cdots Q_{15}$ ,每更换一次烧杯要将上面环刀中水面加至原来高度。待渗出量稳定后,实验结束<sup>[22]</sup>。

1.4 数据分析

用 Excel 对数据进行统计,运用 SPSS 24.0 进行数据分析。采用 ANOVA 单因素检验 9 个处理间的差异( $p<0.05$ ),采用 Duncan 法进行多重比较,采用交

互作用进行双因素方差分析分析坡度和坡向在每个土层对土壤水文特征的影响,用 Origin 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同坡度和坡向对人工林土壤基本性状的影响

2.1.1 土壤容重和含水量 双因素方差分析表明(表 2),坡度级和坡向分别对 0—20 cm 土层的土壤含水量影响达到显著水平;坡度级与坡向的交互作用对 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的土壤容重和含水量影响均达到显著水平。由表 3 可知,0—20 cm 土层的土壤质量含水量(除 46°~55°半阴坡)均小于 20—40 cm。不同坡度和坡向绿化陡坡地较裸露陡坡地在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤容重和质量含水量均差异显著( $p<0.05$ );在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中,土壤容重均为裸露陡坡最大,且在阳坡和半阳坡为 46°~55°阳坡最小,分别为 1.29,1.30 g/cm<sup>3</sup>;在阴坡和半阴坡为 56°~65°阴坡最小,分别为 1.33 和 1.32 g/cm<sup>3</sup>。同样,在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中,土壤质量含水量在阳坡和半阳坡为 56°~65°阳坡最小,分别为 1.70%和 3.14%,46°~55°半阳坡最大,为 5.89%和 9.29%;在阴坡和半阴坡 0—20 cm 和 20—40 cm 土层均为 56°~65°半阴坡最大,分别为 5.04%和 5.44%,在 0—20 cm 土层为 46°~55°阴坡最小(2.23%),在 20—40 cm 土层为 46°~55°半阴坡最小(4.45%)。

表 2 坡度级和坡向对土壤容重及质量含水量影响的方差分析( $F$  值)

Table 2 Variance analysis of effects of slope grade and aspect, on soil bulk density and water content ( $F$ -value)

| 土壤参数    | 土层/cm | 坡度级     | 坡向     | 坡度级×坡向 |
|---------|-------|---------|--------|--------|
| 土壤容重    | 0—20  | 1.36    | 1.21   | 3.65 * |
|         | 20—40 | 0.67    | 1.41   | 2.96 * |
| 土壤质量含水量 | 0—20  | 14.15 * | 8.60 * | 6.45 * |
|         | 20—40 | 2.34    | 2.01   | 3.19 * |

注:\*,\*\* 分别表示  $p<0.05$  和  $p<0.01$  水平差异显著。下同。

2.1.2 土壤孔隙度 双因素方差分析表明(表 4),坡向对 0—20 cm 土层土壤毛管孔隙度的影响达到显著水平,坡度级和坡向的交互作用对土壤总孔隙度 0—20 cm 与 20—40 cm 土层影响达到显著水平。由图 1 可知,毛管孔隙度在 0—20 cm 土层均高于 20—40 cm 土层,非毛管孔隙度则相反,0—20 cm 土层的低于 20—40 cm 土层。在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层中,不同坡度和坡向绿化陡坡地较裸露陡坡地土壤

总孔隙度差异显著( $p<0.05$ ),而非毛管孔隙度差异均不显著( $p>0.05$ );总孔隙度在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层均为裸露陡坡最小,分别为 48.73%和 47.98%;46°~55°—阳坡最大,分别为 52.10%和 52.38%;在 0—20 土层不同坡度和坡向绿化陡坡地较裸露陡坡地毛管孔隙度差异显著( $p<0.05$ ),为 46°~55°阳坡最大(46.95%),裸露陡坡最小(41.52%),在 20—40cm 土层中差异不显著( $p>0.05$ )。

表 3 不同立地条件下土壤容重和质量含水量

Table 3 Soil bulk density and mass water content under different site conditions

| 坡度级     | 坡向  | 土层/cm | 土壤容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 土壤质量<br>含水量/%            |
|---------|-----|-------|--------------------------------|--------------------------|
| 46°~55° | 阴坡  | 0—20  | 1.38±0.02 <sup>ab</sup>        | 2.23±0.69 <sup>c</sup>   |
|         |     | 20—40 | 1.36±0.04 <sup>abc</sup>       | 5.31±0.1 <sup>bc</sup>   |
|         | 阳坡  | 0—20  | 1.29±0.02 <sup>c</sup>         | 5.17±1.85 <sup>a</sup>   |
|         |     | 20—40 | 1.30±0.01 <sup>c</sup>         | 6.39±1.26 <sup>abc</sup> |
|         | 半阴坡 | 0—20  | 1.39±0.02 <sup>ab</sup>        | 4.68±0.44 <sup>ab</sup>  |
|         |     | 20—40 | 1.37±0.02 <sup>abc</sup>       | 4.45±0.86 <sup>bc</sup>  |
|         | 半阳坡 | 0—20  | 1.35±0.01 <sup>bc</sup>        | 5.89±0.87 <sup>a</sup>   |
|         |     | 20—40 | 1.41±0.04 <sup>abc</sup>       | 9.29±1.54 <sup>a</sup>   |
| 56°~65° | 阴坡  | 0—20  | 1.33±0.03 <sup>bc</sup>        | 3.31±0.62 <sup>bc</sup>  |
|         |     | 20—40 | 1.32±0.01 <sup>bc</sup>        | 4.64±0.14 <sup>bc</sup>  |
|         | 阳坡  | 0—20  | 1.39±0.03 <sup>ab</sup>        | 1.70±0.30 <sup>c</sup>   |
|         |     | 20—40 | 1.42±0.03 <sup>ab</sup>        | 3.14±0.59 <sup>c</sup>   |
|         | 半阴坡 | 0—20  | 1.39±0.03 <sup>ab</sup>        | 5.04±0.65 <sup>ab</sup>  |
|         |     | 20—40 | 1.35±0.01 <sup>abc</sup>       | 5.44±0.4 <sup>abc</sup>  |
|         | 半阳坡 | 0—20  | 1.38±0.02 <sup>ab</sup>        | 1.84±0.12 <sup>c</sup>   |
|         |     | 20—40 | 1.42±0.00 <sup>a</sup>         | 7.13±0.4 <sup>ab</sup>   |
| 裸露陡坡    | —   | 0—20  | 1.44±0.03 <sup>a</sup>         | 2.85±0.54 <sup>c</sup>   |
|         |     | 20—40 | 1.43±0.07 <sup>a</sup>         | 6.85±2.67 <sup>abc</sup> |

注:不同小写字母表示同一土层不同样地之间差异显著性( $p<0.05$ )。下同。

表 4 坡度级和坡向对土壤孔隙度及持水量影响的方差分析( $F$  值)

Table 4 Variance analysis of effects of slope grade and aspect on soil porosity and water holding capacity ( $F$ -value)

| 土壤参数              | 土层/cm | 坡度级  | 坡向     | 坡度级×坡向 |
|-------------------|-------|------|--------|--------|
| 总孔隙度/<br>最大持水量    | 0—20  | 0.22 | 0.46   | 4.39 * |
|                   | 20—40 | 0.75 | 1.87   | 4.30 * |
| 毛管孔隙度/<br>毛管持水量   | 0—20  | 1.89 | 3.39 * | 1.87   |
|                   | 20—40 | 1.06 | 1.53   | 1.51   |
| 非毛管孔隙度/<br>非毛管持水量 | 0—20  | 1.58 | 2.88   | 1.38   |
|                   | 20—40 | 0.76 | 0.50   | 0.90   |



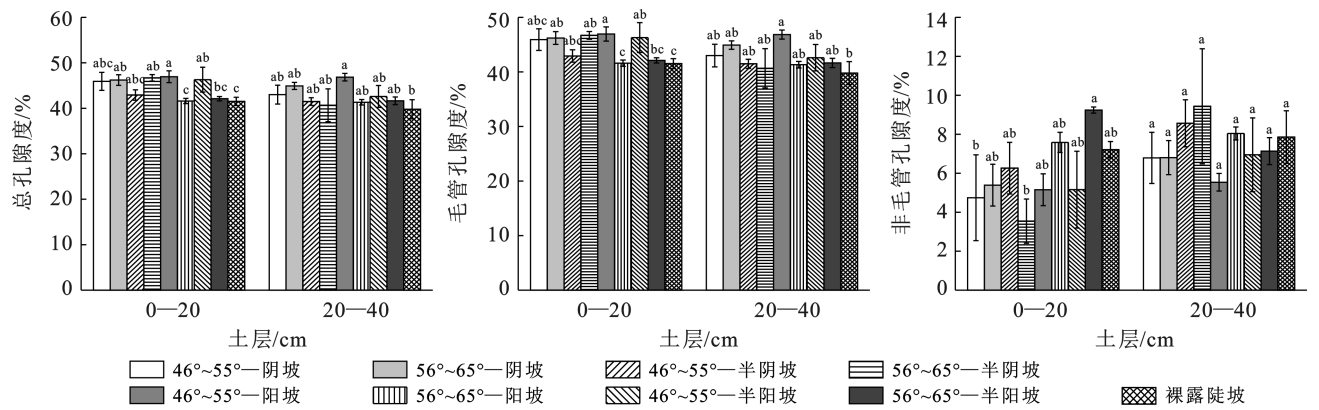


图 1 不同立地条件下土壤孔隙度特征

Fig.1 Characteristics of soil pores under different ground conditions

2.2 土壤持水量

由于土壤持水量与孔隙度的内在联系,其双因素方差分析的坡度级和坡向影响结果也体现出一致性。由表 5 可以看出,在 46°~55°坡度下,阳坡与半阳坡最大持水量高于阴坡与半阴坡,在 0—20 cm 土层毛管持水量高于 20—40 cm 土层,且 0—20 cm 土层的非毛管持水量低于 20—40 cm 土层,而 56°~65°坡度下无明显变化规律。在 0—20 cm 土层中,不同坡度

级和坡向绿化陡坡地较裸露陡坡地最大持水量和毛管持水量均差异显著 ( $p < 0.05$ ),非毛管持水量差异均不显著 ( $p > 0.05$ ),最大持水量和毛管持水量均在 46°~55°阳坡最大,变化范围分别为 487.30~521.01 t/hm<sup>2</sup>,415.20~469.47 t/hm<sup>2</sup>;在 20—40 cm 土层最大持水量差异显著 ( $p < 0.05$ ),毛管持水量和非毛管持水量差异均不显著 ( $p > 0.05$ ),最大持水量变化范围为 479.80~523.82 t/hm<sup>2</sup>。

表 5 不同立地条件下土壤持水量特征

| Table 5 Characteristics of soil water holding capacity under different site conditions |      |       |                             |                             |                              |
|--|------|-------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 坡度等级   | 坡向   | 土层/cm | 最大持水量/(t·hm <sup>-2</sup> ) | 毛管持水量/(t·hm <sup>-2</sup> ) | 非毛管持水量/(t·hm <sup>-2</sup> ) |
| 46°~55°  | 阴 坡  | 0—20  | 506.65±9.44 <sup>abc</sup>  | 459.21±19.8 <sup>abc</sup>  | 47.43±22.01 <sup>b</sup>     |
|  |      | 20—40 | 497.89±8.95 <sup>bc</sup>   | 430.02±20.74 <sup>ab</sup>  | 67.87±13.13 <sup>a</sup>     |
|  | 阳 坡  | 0—20  | 521.01±5.00 <sup>a</sup>    | 469.47±13.01 <sup>a</sup>   | 51.54±8.17 <sup>ab</sup>     |
|  |      | 20—40 | 523.82±7.86 <sup>a</sup>    | 468.46±8.30 <sup>a</sup>    | 55.36±4.52 <sup>a</sup>      |
|  | 半阴坡  | 0—20  | 491.83±9.2 <sup>bc</sup>    | 429.21±11.39 <sup>abc</sup> | 62.62±13.23 <sup>ab</sup>    |
|  |      | 20—40 | 500.47±6.53 <sup>abc</sup>  | 414.83±8.39 <sup>ab</sup>   | 85.65±12.06 <sup>a</sup>     |
|  | 半阳坡  | 0—20  | 514.55±8.63 <sup>ab</sup>   | 462.96±27.36 <sup>ab</sup>  | 51.59±19.70 <sup>ab</sup>    |
|  |      | 20—40 | 495.50±5.38 <sup>bc</sup>   | 426.03±24.20 <sup>ab</sup>  | 69.47±18.92 <sup>a</sup>     |
|  | 阴 坡  | 0—20  | 516.02±7.64 <sup>ab</sup>   | 462.12±11.70 <sup>ab</sup>  | 53.90±10.74 <sup>ab</sup>    |
|  |      | 20—40 | 517.23±1.06 <sup>ab</sup>   | 449.20±7.75 <sup>ab</sup>   | 68.02±8.74 <sup>a</sup>      |
| 56°~65°  | 阳 坡  | 0—20  | 491.89±0.57 <sup>bc</sup>   | 416.06±5.75 <sup>c</sup>    | 75.83±5.18 <sup>ab</sup>     |
|  |      | 20—40 | 493.62±4.04 <sup>bc</sup>   | 413.22±6.06 <sup>ab</sup>   | 80.41±3.34 <sup>a</sup>      |
|  | 半阴坡  | 0—20  | 502.45±4.27 <sup>abc</sup>  | 467.02±7.08 <sup>ab</sup>   | 35.42±11.35 <sup>b</sup>     |
|  |      | 20—40 | 501.00±8.92 <sup>abc</sup>  | 406.64±36.00 <sup>ab</sup>  | 94.36±29.52 <sup>a</sup>     |
|  | 半阳坡  | 0—20  | 513.56±6.15 <sup>ab</sup>   | 421.13±4.81 <sup>bc</sup>   | 92.43±1.59 <sup>a</sup>      |
|  |      | 20—40 | 487.83±3.02 <sup>c</sup>    | 416.48±8.46 <sup>ab</sup>   | 71.35±6.92 <sup>a</sup>      |
|  | 裸露陡坡 | 0—20  | 487.30±11.62 <sup>c</sup>   | 415.20±9.10 <sup>c</sup>    | 72.10±4.18 <sup>ab</sup>     |
|  |      | 20—40 | 479.80±12.92 <sup>c</sup>   | 397.88±21.01 <sup>b</sup>   | 78.58±13.48 <sup>a</sup>     |

2.3 土壤渗透性能

双因素方差分析表明(表 6),坡度级在 0—20 cm

土层对土壤平均渗透速率影响达到显著水平,坡度级和坡向两因子的交互作用对 0—20 cm 与 20—40 cm

土层土壤平均渗透速率影响均显著。由图 2 可知,不同坡度和坡向的立地条件陡坡间土壤渗透速率均不同。其中 0—20 cm 土层为 0.15~1.50 mm/min,表现为:56°~65°阳坡>56°~65°半阳坡>46°~55°阴坡>46°~55°半阴坡>56°~65°阴坡>46°~55°阳坡>56°~65°半阴坡>46°~55°半阳坡>裸露陡坡;20—40 cm 土层为 0.05~0.97 mm/min,表现为:56°~65°—阳坡>46°~55°半阴坡>56°~65°半阳坡>56°~65°—阴坡>56°~65°半阴坡>46°~55°阴坡>46°~55°阳坡>裸露陡坡>46°~55°半阳坡。综合 0—40 cm 土层整体表现出,56°~65°阳坡坡面渗透速率

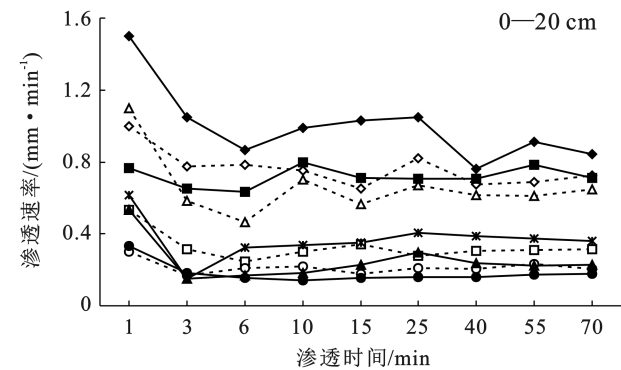


图 2 不同坡度和坡向的立地条件陡坡间土壤渗透过程

Fig.2 Different slopes and slope site conditions of soil penetration between steep slopes

### 3 讨论

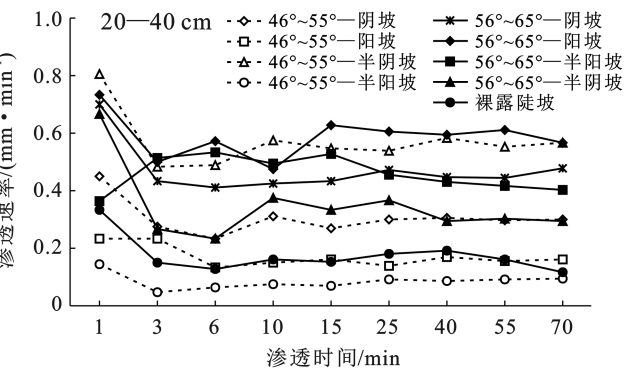
#### 3.1 土壤基本性状

土壤容重是表征土壤水文物理性质的重要指标,一般认为,土壤容重小则土质疏松,利于拦截降水、促进入渗和减缓地表径流<sup>[23]</sup>。由于本研究区陡坡分布于 46°~65°的高度坡度范围内,受人为干扰土壤容重的程度较小,影响土壤物理性质的主要是植物的根系作用<sup>[24]</sup>。在本研究中,46°~55°阳坡陡坡坡面土壤容重最小,总孔隙度、毛管孔隙度最大,表明相对于 56°~65°级陡坡,46°~55°陡坡具有较好的物理性状。裸露陡坡在不同立地因子陡坡坡面土壤容重最大,总孔隙度最小,因此物理性质表现为最差。分析认为,土壤体系具有较多的根系系统,而根系生长过程对土层的穿插会明显降低土壤容重,从而提高土壤孔隙度<sup>[25]</sup>。46°~55°陡坡较 56°~65°陡坡坡度缓,阳坡植被冠幅和综合盖度高于其他坡向坡面,生长相对旺盛,植物根系在土壤表层分布密集,保水性相应提高,减少了土壤水分蒸发,增加了表层土壤的湿度,提高了微生物的种类和数量,导致表层土壤较疏松,改善了土壤基本性状,这与不同陡坡坡面的凋落物组成、分解程度及根系的生长状况有很大关系<sup>[26]</sup>。此外,

较高,土壤渗透性能较好,56°~65°半阳坡坡面渗透速率次于前者,46°~55°的阴坡和半阴坡坡面土壤渗透性好于阳坡和半阳坡坡面,46°~55°半阳坡和裸露陡坡土壤渗透性能最差。

表 6 坡度级和坡向对土壤渗透特征影响的方差分析(F 值)

| Table 6 Variance analysis of influence of slope grade and aspect on soil infiltration characteristics (F-value) |       |        |      |        |
|---|-------|--------|------|--------|
| 土壤参数  | 土层/cm | 坡度级    | 坡向   | 坡度级×坡向 |
| 土壤渗透性   | 0—20  | 0.03   | 0.19 | 4.97 * |
|   | 20—40 | 7.01 * | 1.33 | 5.10 * |



在高度陡坡,土壤的孔隙度除了受植物根系的影响,还受立地因子的影响较大,坡向不同,水热条件各异,在自然状态下,阳坡热量条件好,迎风坡水分条件好,植被茂盛,阴坡热量条件差,植被相对稀疏<sup>[3]</sup>。裸露陡坡无植被生长,其地表蒸发强烈,坡面湿度低,具有较高的土壤容重和较低的土壤孔隙度及持水量。且研究得出土壤容重与总孔隙度之间呈现负相关,不同坡度坡向陡坡坡面土壤容重的表现规律正好与土壤总孔隙度相反,这与何文强等<sup>[27]</sup>的研究结论相一致。

土壤水分含量不仅影响土壤的物理性质,制约着土壤中养分的溶解、转移和微生物的活动,也是影响土壤肥力有效性的一个重要因素<sup>[27]</sup>。本研究中黄土陡坡不同坡度坡向的陡坡水分主要来源于降水,比较集中于土壤浅层,46°~55°陡坡的半阳坡坡面土壤质量含水量最高,裸露陡坡在不同立地因子陡坡坡面质量含水量最小,这是由于植物盖度对土壤含水量的影响<sup>[28]</sup>。降水在原状陡坡坡面停留时间短,入渗强度小,而降水时坡面上的水由于重力作用向坡底汇集,使陡坡坡面上较缓坡面等微地形的入渗强度增大,土壤质量含水量较高,这与王鹏祥等对土壤水分影响的研究结论相一致<sup>[29]</sup>。

#### 3.2 土壤持水性

土壤的持水性能是评价土壤水分保持和涵养水

源的重要指标,反映了土壤持水、储存、供水调蓄的能力的大小<sup>[30]</sup>。土壤持水特征受植被特征、地形和土壤特性差异的影响而呈现相应变化<sup>[31]</sup>。研究区不同坡度坡向最大、毛管、非毛管土壤持水能力均具有相似变化规律,这是因为黄土陡坡绿化的植被对陡坡坡面土壤孔隙度改善的趋势一致所形成的。不同坡度坡向 0—20 cm 土层毛管持水量高于 20—40 cm 土层,是因为研究区位于黄土高原干旱半干旱区,地下水位深,土壤水分为少量毛管水,这与刘小娥<sup>[32]</sup>等对兰州市南北两山典型灌丛土壤理化性质的研究结果相一致。另外,坡度级对土壤最大持水量产生了显著影响( $p < 0.05$ ),且表现为:  $46^\circ \sim 55^\circ > 56^\circ \sim 65^\circ$ ,这说明  $46^\circ \sim 55^\circ$  陡坡土壤的水源涵养能力高于  $56^\circ \sim 65^\circ$  陡坡;坡度级与坡向的交互作用对最大持水量产生了极显著影响( $p < 0.01$ ),表现为  $46^\circ \sim 55^\circ$  陡坡的阳坡最大,这主要是因为植被特性以及坡度坡向的不同导致了土壤孔隙度的差异,而土壤孔隙度在一定程度上决定着土壤的水文效应,改善土壤通气状况,增加土壤吸水及持水性能,进而导致了土壤水源涵养能力的差异<sup>[33]</sup>。同时,阳坡坡面的土壤容重和孔隙度等变化规律相一致原因形成的。

### 3.3 土壤渗透性

土壤水分入渗是一个非常复杂的动态过程,是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的重要环节,受到自然因素和人为因素共同影响<sup>[34]</sup>。山地土壤由于受成土母质、地形地貌、气候条件等变化的影响较大,导致土壤的物理性质在空间分布上产生不同程度的变化,从而影响着森林土壤的渗透性能<sup>[35]</sup>。在本研究中,入渗速率最大为  $56^\circ \sim 65^\circ$  陡坡的阳坡,最小为裸露陡坡,可能是  $56^\circ \sim 65^\circ$  阳坡植被盖度最高,更有利于拦截降水并促进降水渗透速率加快,且坡向对土壤渗透性产生了极显著影响( $p < 0.01$ ),坡度级与坡向的交互作用对土壤渗透性产生了显著影响( $p < 0.05$ ),立地因子变化包含了气候和土壤等因子的多尺度变化,造成陡坡生境异质性的主导因子,对土壤水文特征有显著影响<sup>[36]</sup>。另外,兰州市降雨等级以微雨、小雨和中雨事件为主,各月降雨分布很不均匀<sup>[37]</sup>。在不同雨强下,阳坡的渗漏量大于阴坡且阳坡较阴坡具有更高的水分利用效率<sup>[38]</sup>。因此,不同坡度级及其坡向共同影响了渗透性能。综上所述,由于本次调查数据仅来源于兰州南北两山,对于立地条件相同或相近的区域具有一定理论基础。且本次研究只对水文效应的土壤层进行了探讨,在今后的研究中应加入林冠层与凋落物层的水文效应,以此系统地探讨森林植

被的水源涵养能力,以期对黄土陡坡生态系统水源涵养能力提供给科学依据。

## 4 结 论

(1) 对黄土陡坡不同坡度和坡向 9 个样地的研究表明,不同坡度下土壤性状差异明显,土壤最大持水量表现为:  $46^\circ \sim 55^\circ > 56^\circ \sim 65^\circ$ , 平均渗透速率表现为:  $56^\circ \sim 65^\circ > 46^\circ \sim 55^\circ$ ; 坡向对土壤性状也有较大影响,最大持水量表现为阳坡最大,土壤平均渗透速率表现为阳坡最快。

(2) 不同样地土壤基本性状及水文效应差异明显,坡度和坡向立地因子之间交互作用对 0—40 cm 土层土壤容重、质量含水量、总孔隙度、最大持水量与 0—20 cm 土层毛管孔隙度、毛管持水量均差异显著( $p < 0.05$ ),对 0—40 cm 土层非毛管孔隙度、非毛管持水量与 20—40 cm 土层毛管孔隙度、毛管持水量间均差异不显著( $p > 0.05$ )。

(3) 黄土陡坡地土壤基本性状与水文功能密切相关,其中土壤孔隙度是影响黄土陡坡的不同坡度坡向土壤水文效应的主要因素。

## 参考文献(References)

- [1] 娄淑兰,刘目兴,易军,等.三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J].生态学报,2019,39(13): 4844-4854.  
Lou Shulan, Liu Muxing, Yi Jun, et al. Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the Three Gorges area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): 4844-4854.
- [2] 吕刚,王韞策,李叶鑫,等.辽西北风沙地不同林草措施土壤水文效应研究[J].干旱区地理,2018,41(2): 342-348.  
Lv Gang, Wang Yunce, Li Yexin, et al. Hydrological effects of different forest and grass measures on the soil in wind sandy land of Northwestern Liaoning Province [J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 342-348.
- [3] 陈冲,周卫军,郑超,等.红壤丘陵区坡度与坡向对耕地土壤养分空间差异的影响[J].湖南农业科学,2011(23): 53-56.  
Chen Chong, Zhou Weijun, Zheng Chao, et al. Impacts of slope gradient and slope aspect on soil properties of farmland in red soil hilly region [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2011(23): 53-56.
- [4] 周学云,高文良,吴亚平,等.定量研究雅安地形坡向坡度对降水分布的影响[J].气象科学,2019,39(3): 322-335.  
Zhou Xueyun, Gao Wenliang, Wu Yaping, et al. Quantitative study on the influence of terrain aspect and gradient on the precipitation distribution in Ya'an [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(93):

- 322-335.
- [5] 吕宸, 宫渊波, 龚伟, 等. 川西高寒山地灌丛草甸土壤水文效应特征[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(5): 1170-1177.  
Lv Chen, Gong Yuanbo, Gong Wei, et al. Characteristics of soil hydrological effects of alpine shrub meadow in Western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(5): 1170-1177.
  - [6] 刘鑫, 毕华兴, 李笑吟, 等. 晋西黄土区基于地形因子的土壤水分分异规律研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 411-417.  
Liu Xin, Bi Huaxing, Li Xiaoyin, et al. Variation of soil moisture in relation to topographic factors in loess region of West Shanxi [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007(3): 411-417.
  - [7] 李增尧, 赵兴凯, 朱清科. 陕北黄土区陡坡坡面因子对土壤水分的影响[J]. 排管机械工程学报, 2017, 35(9): 798-805.  
Li Zengyao, Zhao Xingkai, Zhu Qingke. Effects of farmland slope on soil moisture in semi-arid loess plateau of Northern Shaanxi [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2017, 35(9): 798-805.
  - [8] 潘成忠, 上官周平. 黄土半干旱丘陵区陡坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 5-9.  
Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Spatial variability of soil moisture on steep slopeland in loess hill region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 5-9.
  - [9] 王延平, 邵明安, 张兴昌. 陕北黄土区陡坡地人工植被的土壤水分生态环境[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3769-3778.  
Wang Yanping, Shao Ming'an, Zhang Xingchang. Soil moisture ecological environment of artificial vegetations in steep slope of loess region in North Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008(8): 3769-3778.
  - [10] 赵兴凯, 李增尧, 朱清科. 陕北黄土区具干表土层的极陡坡绿化技术研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(2): 312-320.  
Zhao Xingkai, Li Zengyao, Zhu Qingke. Greening technology at extremely steep slopes with dried top soil in the loess region of Northern Shaanxi [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(2): 312-320.
  - [11] Gu Chaojun, Mu Xingmin, Gao Peng, 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.
  - [12] 赵满兴, 余光美, 白二磊, 等. 陕北黄土高原植被恢复对土壤理化性状的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(25): 86-94.  
Zhao Manxing, Yu Guangmei, Bai Erlei, et al. Effects of vegetation restoration on soil physicochemical properties in the Loess Plateau of Northern Shaanxi [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(25): 86-94.
  - [13] 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): 75-84.  
Lu Yapei, Luo Jiufu, Wang Lina, et al. Effects of altitude and slope aspect on soil seed banks on natural steep slope of Funiu Mountain, Henan Province of Central China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(6): 75-84.
  - [14] 聂小军, 张建辉, 刘刚才, 等. 金沙江干热河谷侵蚀陡坡植被恢复对土壤质量的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(4): 1636-1640.  
Nie Xiaojun, Zhang Jianhui, Liu Gangcai, et al. Effects of vegetation restoration on soil quality of eroded hillslopes in dry-hot valley of Jinsha River [J]. Ecology and Environment, 2008, 17(4): 1636-1640.
  - [15] 邝高明, 朱清科, 赵磊磊, 等. 黄土丘陵沟壑区陡坡微地形分布研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 1083-1088.  
Kuang Gaoming, Zhu Qingke, Zhao Leilei, et al. Study on distribution of microrelieves on steep slopes in a loess hilly-gully region [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(6): 1083-1088.
  - [16] Feng Tianjiao, Wei Tianxing, Keesstra S D, et al. Long-term effects of vegetation restoration on hydrological regulation functions and the implications to afforestation on the Loess Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 330: 1-13.
  - [17] 黄艳丽, 李占斌, 苏辉, 等. 人工林对黄土高原小流域上下游不同坡面土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 108-116.  
Huang Yanli, Li Zhanbin, Su Hui, et al. Effect of man-made forest on soil moisture of different slopes in upper and lower reaches of small watershed of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 108-116.
  - [18] 安文明, 梁海斌, 王聪, 等. 黄土高原阴/阳坡向林草土壤水分随退耕年限的变化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6120-6127.  
An Wenming, Liang Haibin, Wang Cong, et al. Dynamic characteristic of soil water with an increase in restoration years on the shady and sunny slope aspects of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(18): 6120-6127.
  - [19] 高凤霞, 韩惠. 西部半干旱区兰州市南北两山森林生态效益评估[J]. 生态科学, 2021, 40(6): 106-115.  
Gao Fengxia, Han Hui. Assessment of urban forest ecological benefits in the western semi-arid region of



- southern and northern mountains of Lanzhou City [J]. Ecological Science, 2021,40(6):106-115.
- [20] 赵洪书. 从重力计算土壤总孔隙度的初步探讨[J]. 土壤学报, 1964,12(2):230-234.
- Zhao Hongshu. A method for the calculation of soil porosity from volume weight [J]. Acta pedologica Sinica, 1964(2):230-234.
- [21] 杨晓霞, 赵锦梅, 张雪, 等. 祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1):197-207.
- Yang Xiaoxia, Zhao Jinmei, Zhang Xue, et al. Litter and soil water conservation function of typical shrubs in Eastern Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2022,45(1):197-207.
- [22] 刘睿明. 黑河西大湖湿地水文变化对土壤物理特性和植被群落影响研究[D]. 甘肃 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- Liu Ruiming. Effects of hydrological changes on soil physical characteristics and vegetation community in Xidahu Wetlands of Heihe River [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2019.
- [23] 王铁浩, 王彦辉. 酸沉降背景下马尾松林土壤水文物理性质比较研究[J]. 四川农业大学学报, 2021,39(1):67-70.
- Wang Yihao, Wang Yanhui. Comparative study of soil hydro-physical properties of masson pine forest under the background of acid deposition [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021,39(1):67-70.
- [24] 侯宁宁, 苏晓琳, 杨钙仁, 等. 桉树造林的土壤物理性质及其水文效应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3):101-107, 114.
- Hou Ningning, Su Xiaolin, Yang Gairen, et al. Soil physical properties and hydrological effects of *Eucalyptus* plantation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):101-107,114.
- [25] 谢国雄, 章明奎, 吴崇书, 等. 杭州城市绿地表土理化性状的研究[J]. 江西农业学报, 2013,25(9):57-61.
- Xie Guoxiong, Zhang Mingkui, Wu Chongshu, et al. Study on physical and chemical properties of greenbelt surface soil in Hangzhou City [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013,25(9):57-61.
- [26] Jord'an A, Zavala L M, Gil J. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in Southern Spain [J]. Catena, 2010,81(1):77-85.
- [27] 何文强, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山东坡不同植被类型土壤层水文效应[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(2):102-113.
- He Wenqiang, Chen Lin, Pang Danbo, et al. Hydrological effects of soil layers in different vegetation types on the eastern slopes of the Helan Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(2):102-113.
- [28] 周炼川. 西南喀斯特地区不同石漠化程度土壤性状及生态效应研究[D]. 江苏 南京: 南京农业大学, 2009.
- Zhou Lianchuan. Study on the soil characteristics and ecological effects in karst regions under rocky desertification, Southwest China [D]. Nanjing, Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2009.
- [29] 张琛, 赫有有, 薛婷婷, 等. 松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状垂直变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6):231-240.
- Zhang Chen, He Youyou, Xue Tingting, et al. Vertical variation of physical properties of uncultivated black soil in Northern Songnen Plain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):231-240.
- [30] 王鹏祥, 朱清科, 申明爽, 等. 陕北黄土区陡坡微地形土壤水分对降雨的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8):167-172.
- Wang Pengxiang, Zhu Qingke, Shen Mingshuang, et al. Response of soil moisture of steep slope micro-topography to rainfall in loess region of Northern Shaanxi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020,34(8):167-172.
- [31] 史小红, 樊才睿, 李畅游, 等. 呼伦贝尔草原不同放牧草场土壤水文特性研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):145-149, 214.
- Shi Xiaohong, Fan Cairui, Li Changyou, et al. Soil hydrological characteristics of different grazing system grassland in Hulun-Beier [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):145-149,214.
- [32] 赵锦梅, 王彦辉, 王紫, 等. 祁连山东段金强河河谷高寒草地土壤的水文特征[J]. 草业科学, 2020,37(2):256-265.
- Zhao Jinmei, Wang Yanhui, Wang Zi, et al. Soil hydrological characteristics of alpine grasslands in the Jinjiang River valley in Eastern Qilian Mountains [J]. Pratacultural Science, 2020,37(2):256-265.
- [33] 刘小娥, 苏世平, 李毅. 兰州市南北两山典型灌丛土壤理化性质[J]. 草业学报, 2021,30(6):28-39.
- Liu Xiaoe, Su Shiping, Li Yi. Soil physical and chemical properties under four typical shrubs found on the Northern and Southern Mountains of Lanzhou City, Northwest China [J]. Acta Pratacultural Sinica, 2021, 30(6):28-29.
- [34] 马浩, 尹忠东, 许智超. 川中丘陵紫色土区土壤水分入渗性能研究[J]. 西北林学院学报, 2011,26(3):68-72.
- Ma Hao, Yin Zhongdong, Xu Zhichao. Capability of soil water infiltration of purple soil in hilly area of Central Sichuan [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011,26(3):68-72.

- Pub. Co., 1989.
- [29] Rodriguez-Galiano V, Mendes M P, Garcia-Soldado M J, et al. Predictive modeling of groundwater nitrate pollution using random forest and multisource variables related to intrinsic and specific vulnerability: A case study in an agricultural setting (Southern Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 476/477 (1): 189-206.
- [30] 郑刚. 基于 KNN 法的森林蓄积量的遥感估计和反演: 以广东省翁源县为例 [D]. 江苏 南京: 南京林业大学, 2009.
- Zheng Gang. Remote sensing estimation and inversion of forest volume based on KNN Method: A case study of Wengyuan County, Guangdong Province [D]. Nanjing, Jangsu: Nanjing Forestry University, 2009.
- [31] 徐新良, 曹明奎. 森林生物量遥感估算与应用分析 [J]. *地球信息科学*, 2006, 8(4): 122-128.
- Xu Xinliang, Cao Mingkui. An analysis of the applications of remote sensing method to the forest biomass estimation [J]. *Geo-Information Science*, 2006, 8(4): 122-128.
- [32] 肖锦成, 欧维新, 符海月. 基于 BP 神经网络与 ETM<sup>+</sup> 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类 [J]. *生态学报*, 2013, 33(23): 7496-7504.
- Xiao Jincheng, Ou Weixin, Fu Haiyue. Land cover classification of Yancheng Coastal Natural Wetlands based on BP neural network and ETM<sup>+</sup> remote sensing data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(23): 7496-7504.
- [33] 黄丽. BP 神经网络算法改进及应用研究 [D]. 重庆: 重庆师范大学, 2010.
- Huang Li. Research on improvement and application of BP neural network algorithm [D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2010.
- [34] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用 [J]. *应用昆虫学报*, 2013, 50(4): 1190-1197.
- Li Xinhai. Using "random forest" for classification and regression [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2013, 50(4): 1190-1197.
- [35] 李明军, 杜明凤, 喻理飞. 贵州省杉木中龄林蓄积量与立地因子的关系研究 [J]. *林业资源管理*, 2014(5): 58-63.
- Li mingjun, Du Mingfeng, Yu Lifei. Study on the relationship between the stand volume and site factors in chinese fir forest of middle age in Guizhou Province [J]. *Forest Resources Management*, 2014(5): 58-63.
- [36] 刘唐, 江涛, 李昂, 等. 基于神经网络和不同立地质量的森林蓄积量遥感估测 [J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 38(2): 25-35.
- Liu Tang, Jiang Tao, Li Ang, et al. Remote sensing estimation of forest stock volume based on neural network and different site quality [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 38(2): 25-35.
- [37] 汪玮, 孟伟. 不同立地因子对杉木蓄积量的影响 [J]. *热带林业*, 2017, 45(3): 23-26.
- Wang Wei, Meng Wei. The influence of different site factors on Chinese fir volume [J]. *Tropical Forestry*, 2017, 45(3): 23-26.

(上接第 127 页)

- [35] 亢晨波, 郭汉清, 张垚, 等. 关帝山不同海拔和坡向土壤水分入渗特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(6): 76-82.
- Kang Chenbo, Guo Hanqing, Zhang Yao, et al. Infiltration characteristics of soil moisture at different altitudes and slopes of Guandi Mountain [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50(6): 76-82.
- [36] 翟朝阳, 邱娟, 司洪章, 等. 微地形对大西沟新疆野杏萌发层土壤因子的影响 [J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 2168-2179.
- Zhai Zhaoyang, Qiu Juan, Si Hongzhang, et al. Effects of microtopography on germination layer soil factors in *Armeniaca vulgaris* Lam. in Daxigou [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 2168-2179.
- [37] 张珊, 杨树文, 王恒亮. 顾及黄土滑坡的兰州市不同等级降雨时空变化特征 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 184-191.
- Zhang Shan, Yang Shuwen, Wang Hengliang. Spatio-temporal variation of rainfall for different categories in Lanzhou during 1965—2015 considering loess landslide [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(1): 184-191.
- [38] 王英宇. 公路石质边坡喷播绿化植被的降雨、灌溉水分分配特征 [J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 128-138.
- Wang Yingu. Water distribution characteristics of highway slope greening under irrigation and rainfall conditions [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 128-138.