

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.036.

张珉瑞, 王立娜, 李盼, 等. 金沙江干热河谷区 5 种植被土壤入渗性能影响因素评价[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 37-45.

Zhang Minrui, Wang Lina, Li Pan, et al. Influencing Factors of Soil Infiltration Performance of Five Types of Vegetation in Dry-Hot Valley Area of Jinsha River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 37-45.

金沙江干热河谷区 5 种植被土壤入渗性能 影响因素评价

张珉瑞¹, 王立娜², 李盼¹, 经又亮¹, 段青松¹, 杨苑君¹

(1. 云南农业大学 水利学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学 建筑工程学院, 昆明 650201)

摘要: [目的] 探究植物对边坡土壤水分入渗过程的影响, 为金沙江干热河谷区生态修复和植被建设提出指导性建议。[方法] 以云南省永仁县的 5 种典型植被(桉树、台湾相思、锥连栎、余甘子、云南松)为研究对象, 采用野外调查、室内分析和室内入渗试验的方法, 分析不同植被类型土壤入渗性能的差异性。[结果] (1) 随着土层深度增加, 土壤入渗性能逐渐降低, 且土层间存在显著差异($p < 0.05$); (2) 不同植被类型土壤入渗性能存在显著差异($p < 0.05$), 主成分分析结果显示 5 种土壤入渗能力综合排名为: 桉树 > 余甘子 > 锥连栎 > 云南松 > 台湾相思; (3) Horton 模型对永仁县干热河谷区 5 种典型植被土壤入渗性能拟合度最好, 平均拟合度为 0.953, 可以用来模拟和预测永仁县干热河谷区典型植被土壤入渗能力; (4) 土壤入渗性能与土壤容重、土壤有机质、非毛管孔隙度、 < 0.25 mm、 $0.25 \sim 1$ mm、 $3 \sim 5$ mm、 > 5 mm 团聚体含量呈显著相关关系($p < 0.05$)。[结论] 5 个研究树种中, 余甘子样地土壤结构的改善效果较好; 土壤非毛管孔隙度、 < 0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量、 $3 \sim 5$ mm 土壤水稳性团聚体含量是影响土壤入渗性能的决定性因素; 建议在研究区种植余甘子和锥连栎, 能有效提高土壤入渗性能, 缓解水土流失。

关键词: 金沙江干热河谷; 土壤入渗; 土壤理化性质; 土壤入渗模型; 通径分析

中图分类号: S157; S714

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0037-09

Influencing Factors of Soil Infiltration Performance of Five Types of Vegetation in Dry-Hot Valley Area of Jinsha River

Zhang Minrui¹, Wang Lina², Li Pan¹, Jing Youliang¹, Duan Qingsong¹, Yang Yuanjun¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China;

2. College of Architecture and Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the the influence of plants on the soil water infiltration process on slope, and to provide guidance for ecological restoration and vegetation construction in the dry-hot valley of Jinsha River. [Methods] Five typical types of vegetation (*Eucalyptus citriodora*, *Acacia confusa*, *Quercus franchetii*, *Phyllanthus emblica*, *Pinus yunnanensis*) in Yongren County of Yunnan Province were taken as the research objects. Field investigation, indoor analysis and indoor infiltration test were used to explore the differences in soil infiltration performance of different vegetation types. [Results] (1) With the increase of soil depth, soil infiltration performance gradually decreased, and there were significant differences ($p < 0.05$). (2) There were significant differences in soil infiltration capacity among different vegetation types ($p < 0.05$). The comprehensive ranking of soil infiltration capacity of five vegetation types was follows: *Eucalyptus citriodora* > *Phyllanthus emblica* > *Quercus franchetii* > *Pinus yunnanensis* > *Acacia confusa*, (3) The Horton model has the best fitting degree for the soil infiltration performance of five typical vegetations in the dry-hot valley area of Yongren County, with an average fitting

收稿日期: 2024-01-22

修回日期: 2024-02-22

资助项目: 国家自然科学基金(32060368; 31700635); 云南省应用基础研究计划项目(2018FD045)

第一作者: 张珉瑞(1999—), 男, 四川泸州人, 硕士生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 2585334039@qq.com

通信作者: 杨苑君(1989—), 女, 云南楚雄人, 讲师, 博士, 主要从事水土保持与生态环境工程研究。E-mail: yangyuanjunbj@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

degree of 0.953, which can be used to simulate and predict the soil infiltration capacity of typical types of vegetation in the dry-hot valley area of Yongren County. (4) Soil infiltration performance was significantly correlated with soil bulk density, soil organic matter, non-capillary porosity and 5 mm aggregate content ($p < 0.05$). Through the path analysis results, it could be seen that the content of 3~5 mm aggregates and soil non-capillary porosity were the decisive factors affecting the initial infiltration rate and average infiltration rate of soil, and the content of < 0.25 mm water-stable aggregates was the direct limiting factor on soil infiltration performance. [Conclusion] Among the five studied tree species, the improvement effect of soil structure in the *Phyllanthus emblica* plot is the best. Soil non-capillary porosity, < 0.25 mm soil water-stable aggregate content, 3~5 mm soil water-stable aggregate content are the decisive factors affecting soil infiltration performance. It is recommended to plant *Phyllanthus emblica* and *Quercus variabilis* in the study area, which can effectively improve soil infiltration performance and alleviate soil erosion.

Keywords: Jinsha River dry-hot valley; soil infiltration; soil physical and chemical properties; soil infiltration model; path analysis

金沙江干热河谷地区是长江流域水土流失最严重的地区之一^[1]。云南段金沙江干热河谷区位于云南省西北部、北部和东部,是云南地区农业生产发展的黄金产业带。但由于该地区气候复杂,降水集中,植被覆盖率低,加上近年来当地人民不断完善基础设施以及对自然资源的不合理开发,导致该地区生态环境问题严重,水土流失和土壤侵蚀加剧。而植被恢复和生态治理对该地区水土保持和农业发展具有重要作用,因此研究该地区不同植被土壤入渗性能的差异性及其影响因素,有助于改善该地区土壤质量和植被恢复建设。

土壤作为土壤—植物—大气连续体 (SPAC) 不可或缺的部分,是植物赖以生存的基础,也是大多数植物涵养水源的重要场所^[2-3]。土壤入渗指水分从土层表面垂直进入土壤并在土壤中不断运移的过程,其作为水文循环的关键环节,对地表产流、地表水、地下径流三者之间的关系有着重要影响^[4-5]。研究表明,植被能有效地改善土壤理化性质和土壤结构,加强土壤入渗性能。土壤入渗性能作为评价土壤水文特性和影响土壤侵蚀的重要指标,在很大程度上反映了水土保持能力^[6-8]。因此研究不同植被土壤的入渗性能,对改善土壤侵蚀、防治水土流失有着重要意义^[9-11]。赵恩辉等研究黄河三角洲 3 种植被类型土壤涵养水源的能力发现刺槐林地土壤水源涵养功能大于白蜡和柳树林地,因此建议可在研究区内优先考虑种植刺槐树种^[12];陈楚楚等研究滇西北高原不同植被类型土壤入渗特性发现林地土壤入渗能力显著大于草地以及旱地,说明林地具有较强的水土保持能力,应该重视该地区的林地培育工作^[13]。而目前金沙江干热河谷地区土壤水分的研究多集中于冲沟区优先流对土壤可蚀性的影响,关于该地区不同植被类型土壤入渗性能的对比研究尚不成熟^[14],本研究样地选择在金沙江流域干热

河谷地区云南省永仁县,选取当地典型植被研究不同植物类型土壤入渗性能的差异性及其影响因素,提出有利于该地区改善土壤结构,提高水分入渗,减少地面径流的优势物种或物种配置,为该地区植被恢复,区域植被建设提供数据基础和技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省楚雄彝族自治州西北部的永仁县 ($101^{\circ}14' - 101^{\circ}49'E, 25^{\circ}51' - 26^{\circ}30'N$), 与四川省攀枝花市紧邻,主要受海洋季风气候的影响,属亚热带气候。该地区气候复杂,光照充足,年平均气温 $17.8^{\circ}C$,地貌格局复杂,地势起伏变化剧烈,为典型的干热河谷气候区,土壤主要以燥红土为主。研究区主要植物有锥连栎 (*Quercus franchetii*)、余甘子 (*Phyllanthus emblica*)、台湾相思 (*Acacia confusa*)、云南松 (*Pinus yunnanensis*)、桉树 (*Eucalyptus citriodora*)、云南油松 (*Keteleeria evelyniana* Mast.)、马桑 (*Coriaria nepalensis* Wall.) 等。

1.2 试验设计

试验于 2023 年 4 月进行,选取永仁县 5 种植被 (锥连栎、余甘子、台湾相思、云南松、桉树) 进行研究。如表 1 所示,台湾相思、桉树属于水土保持的重要造林树种,余甘子、云南松、锥连栎是云南段金沙江干热河谷区典型植被^[1],通过野外调查方法在同一个坡面上选择生长状况良好的植被样地,设置 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的样方,选取 5 种植被样地内的优势树种,每个树种选取 3 棵。清除土层表面腐殖质和枯枝落叶,挖掘 30 cm 土层剖面,每 10 cm 为一层,每层用 100 cm^3 的环刀取 3 个样,每层再用自封袋收 2 kg 的散土,用于土壤理化性质的测定。取样过程参照《土工试验方法标准 GB/T 50123-2019》^[15]。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample plots

植被类型	海拔/m	坡度/(°)	平均冠幅/m	平均株高/m	平均林龄/a	冠幅盖度/%
台湾相思	1511	23	2.3	3.2	27	25
锥连栎	1509	25	3.6	4.1	16	16
余甘子	1512	24	2	2.6	19	21
云南松	1495	23	2.1	10.5	25	19
桉树	1521	23	2.6	5.3	16	12

1.3 土壤入渗性能和理化性质测定

土壤入渗性能采用双环刀法^[16]测定。每个样地土壤以 10 cm 为一层,分别测定每种植物土壤 0—10 cm, 10—20 cm,20—30 cm 土层处的入渗性能,每个树种设置 3 个重复,试验土样共 135 个。分别计算初始入渗率(Y_1)、平均入渗率(Y_2)、稳定入渗率(Y_3)、渗透总量(Y_4),初渗率=最初时间段入渗量/入渗时间,本研究取前 5 min 入渗率作为初始渗透率;平均入渗率=达到稳渗时的总入渗量/入渗时间;稳渗率=单位时间内渗透量稳定时的渗透速率。

土壤容重、孔隙度采用环刀法测定^[15],水稳性团聚体组成采用湿筛法^[15]测定,土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定^[16]。

1.4 土壤水分渗透过程模拟

本研究选取 3 个常用土壤水分入渗模型(Kostiakov, Philip, Horton 模型)对 5 种植被土壤入渗特性进行描述,公式分别为:

$f(t)=at^{-b}$ $f(t)=a+bt^{-1/2}$ $f(t)=a+bt^{-n}$
式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a, b, n 为拟合参数。

1.5 数据处理

采用 spss26.0 进行相关性分析、主成分分析、单

因素方差分析、土壤入渗过程拟合、通径分析,采用 Origin 2021 作图,

2 结果与分析

2.1 植被类型对土壤理化性质的影响

土壤容重、孔隙度和团聚体可作为水土保持效果的评价指标,对土壤的生产力和生态功能有重要影响。有机质则反映了土壤的营养供应能力,还能改善土壤的通气、透水 and 保水性。通过比较不同植被土壤的理化性质指标,可直接对比分析各植被类型的土壤结构,为研究区水土保持造林树种的建议提供支撑。

土壤容重作为评价土壤结构的重要指标,反映土壤的透气及透水性能,还能反映植被对土壤质地的改善效果,是评价植被土壤涵养水源的重要指标,受植被根系、土壤质地、有机质含量等多种因素的影响^[12,17]。由表 2 可知,5 种植被样地土壤容重在 0—30 cm 均存在显著差异($p<0.05$),且均随土层深度变化呈正相关关系,分别增大了 16.19%,20.8%,22%,21.36%,21.81%。在 0—30 cm 土层,土壤容重表现为:台湾相思>云南松>桉树>余甘子>锥连栎,说明锥连栎和余甘子植被能较好地改善土壤结构。

表 2 5 种不同植被土壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties of five different vegetations

植被类型	深度/ cm	容重/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	有机质/ (g·kg ⁻¹)	水稳性团聚体			
						<0.25 mm	0.25~0.5 mm	3~5 mm	>5 mm
桉树	0—10	1.19±0.14cBC	20.19±3.28aB	26.65±2.06aC	10.68±0.35aB	49.82±0.63cA	7.03±0.11bD	5.87±0.17aD	27.67±0.72aA
	10—20	1.28±0.22bB	19.63±2.52aD	21.12±2.17bBC	9.66±0.33bB	51.00±0.39bA	7.15±0.12bD	5.61±0.21abE	26.81±0.31bA
	20—30	1.49±0.17aBC	17.15±2.09aC	18.56±1.26bB	8.22±0.50cB	52.15±0.06aA	7.40±0.07aD	5.44±0.19aE	25.72±0.26cA
台湾相思	0—10	1.41±0.10bA	21.34±3.04aA	21.49±3.37aD	9.50±0.08aC	28.76±0.24cC	8.92±0.29cC	13.51±0.13aB	21.36±0.53aB
	10—20	1.57±0.11abA	25.13±0.79aA	16.84±1.20abC	8.55±0.27bC	30.85±0.15bC	9.72±0.11bC	13.22±0.08abC	18.20±0.28bC
	20—30	1.70±0.05aA	22.54±5.62aA	10.61±6.74bC	6.26±0.10cD	31.25±0.36aC	10.13±0.15aC	12.75±0.57bC	17.58±0.41bB
云南松	0—10	1.25±0.06bB	22.91±1.97bB	32.94±3.27aB	7.53±0.15aD	18.45±0.53bE	9.25±0.27aC	21.09±0.15aA	19.03±0.29aC
	10—20	1.27±0.03bB	27.40±3.61abB	24.37±3.32bB	7.10±0.19abD	19.03±0.12abE	9.56±0.06abC	18.83±0.24bB	18.48±0.33bB
	20—30	1.51±0.06aB	29.12±1.21aA	17.27±2.20cB	6.77±0.33bCD	19.36±0.11aE	10.02±0.39aC	18.06±0.40cB	17.75±0.11cB
余甘子	0—10	1.17±0.12cBC	28.12±2.86bB	27.90±10.20aA	14.48±0.19aA	42.57±0.41cB	9.85±0.30bB	11.19±0.38aC	13.46±1.15aD
	10—20	1.32±0.33bB	29.01±2.43bDE	30.96±7.58bA	13.69±0.20aA	43.35±0.14bB	11.14±0.30aB	10.22±0.10bD	10.51±0.94bE
	20—30	1.44±0.23aBC	30.79±3.42aBC	25.71±6.75cA	12.65±0.74bA	44.24±0.34aB	11.61±0.13aB	9.79±0.09bD	9.79±0.12bD
锥连栎	0—10	1.10±0.03bC	20.25±3.32aB	38.24±2.33aA	7.73±0.07aD	20.38±0.50cD	10.96±0.43cA	22.51±0.37aB	18.52±0.57aC
	10—20	1.29±0.12aB	25.30±4.01aBC	25.89±4.43bB	7.54±0.32abD	21.31±0.19bD	12.21±0.25bA	20.00±0.45bA	17.40±0.70bD
	20—30	1.34±0.26aC	23.89±1.22aB	25.69±2.38bA	7.26±0.16bC	22.13±0.27aD	13.03±0.18aA	19.07±0.22cA	15.52±0.39bC

注:表中数据平均值±标准偏差,不同大写字母表示同一土层不同植被之间的差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示同一植被不同土层之间的差异显著($p<0.05$)。

土壤孔隙度也是土壤通气性和透水性的重要标志。由表 3 可知,在 0—30 cm 土层,5 种植被类型土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度存在显著差异($p<0.05$)。桉树、台湾相思、云南松、余甘子锥连栎样地土壤非毛管孔隙度总体上与土层深度的变化呈负相关关系。非毛管孔隙度减小幅度分别为 30.36%,50.62%,10.92%,32.16%,32.81%。土壤最大非毛管孔隙度(38.24%)出现在锥连栎样地,最小非毛管孔隙度出现在台湾相思样地(10.61%)。说明锥连栎样地土壤通气透水的性能优于其余 4 种植被,台湾相思样地土壤通气透水性能相较于其余 4 种样地土壤较差。土壤毛管孔隙度随土层深度变化呈现出不同的变化趋势,其中云南松、余甘子、锥连栎样地土壤毛管孔隙度随土层深度的增加逐渐增加,桉树样地土壤毛管孔隙度随土层的增加逐渐减小,台湾相思样地土壤毛管孔隙度随土层深度的增加呈现倒“V”型。在 0—30 cm 土层,余甘子样地土壤毛管孔隙度显著大于其余 4 种植被,说明余甘子样地土壤的涵养水源的能力大于其余 4 种植被。

表 3 土壤入渗性能主成分分析

Table 3 Principal component analysis of soil infiltration performance

参数	主成分		
	P ₁	P ₂	P ₃
Y ₁	0.985	-0.138	0.104
Y ₂	0.991	-0.124	-0.038
Y ₃	0.991	-0.115	-0.069
Y ₄	0.913	0.408	0.004
特征值	3.769	0.214	0.017
贡献率	94.217	5.347	0.424
累计贡献率	94.217	99.563	99.987

有机质对土壤中大团聚体的形成起促进作用,显著影响土壤结构,而土壤团聚体也能防止有机质被降解^[18]。5 种样地土壤有机质与土层深度变化呈负相关关系,且存在显著差异($p<0.05$)。分别减少了 34.10%,23.03%,10.09%,6.08%,12.63%,在 0—30 cm 土层土壤有机质表现为余甘子>桉树>台湾相思>锥连栎>云南松,余甘子样地土壤有机质显著大于其他 4 种植被类型($p<0.05$)。不同样地土壤水稳性团聚体含量存在显著差异($p<0.05$),各样地土壤<0.25 mm 水稳性团聚体含量最高,且随土层深度的增加其含量也逐渐增加,<0.25 mm 水稳性团聚体含量具体表现为桉树>余甘子>台湾相思>锥连栎>云南松;>5 mm 水稳性团聚体随土层深度的增加呈负相关关系,具体表现为桉树>台湾相思>云南松>锥连栎>余甘子;这可能是因为土壤表层枯枝落叶以及各植被的凋落物较多,因此土层表面有机质含量较多,对土壤大团聚体呈形成具有促进作用,而随着土层深

度的增加,土壤有机质含量减少,对土壤中大团聚体含量形成的促进作用减弱,因此深层土壤中小团聚体的含量增大,大团聚体的含量较少^[16]。

2.2 不同类型植被样地土壤入渗性能

土壤入渗性能作为描述土壤水分入渗的关键指标,反映了土壤涵养水源的能力。由图 1 可知,5 种植物土壤入渗性能随土层深度的增加逐渐降低,且土层之间存在显著差异($p=0.02$)。由图 2 的差异性分析可知,不同植被类型土壤入渗性能指标变化存在显著差异($p<0.05$)。桉树、台湾相思、云南松、余甘子、锥连栎样地土壤初始入渗率 0.3~4.2 mm/min、平均入渗率 0.2~3.5 mm/min、稳定入渗率 0.2~2.6 mm/min、渗透总量 158.7~9.4 ml。在 0—20 cm 土层,桉树样地土壤 4 个土壤入渗指标均显著大于其他 4 种植被($p<0.05$)。在 0—10 cm 土层,桉树土壤初始入渗率分别是台湾相思、云南松、余甘子、锥连栎样地土壤的 2.93 倍、1.91 倍、1.69 倍、1.83 倍;稳定入渗率分别是其台湾相思、云南松、余甘子、锥连栎样地土壤的 3.31 倍、2.31 倍、1.26 倍、1.94 倍;在 20—30 cm 土层,余甘子样地土壤 4 个土壤入渗指标均显著大于其他 4 种植被($p<0.05$)。余甘子样地土壤初始入渗率分别是桉树、台湾相思、云南松、锥连栎样地土壤的 2.12 倍、2.95 倍、2.16 倍、1.12 倍;稳定入渗率分别是桉树、台湾相思、云南松、锥连栎样地土壤的 2.67 倍、3.21 倍、3.32 倍、1.24 倍;从上述入渗性能结果可以看出,桉树样地土壤在 0—20 cm 土层处初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率显著大于其余 4 种样地土壤($p<0.05$),但是 20—30 cm 土层处,桉树样地土壤入渗性能大幅度降低。而余甘子样地土壤在该土层处初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率显著大于其余 4 种样地土壤($p<0.05$),仍然具有较好的人渗能力。

为评价这 5 种植被类型土壤的入渗能力,对土壤初始入渗率(Y₁)、平均入渗率(Y₂)、稳定入渗率(Y₃)、渗透总量(Y₄)进行主成分分析(KMO 为 0.721,Bartlett 球形检验 $p<0.01$),以便描述它们对土壤入渗能力的贡献程度。主成分分析表明(表 3),第一主成分和第二主成分贡献率为 99.563%,几乎解释了整个方差,其中第一个主成分方差贡献率达到 94.217%,其主成分方程为: $Y=0.261 Y_1+0.263 Y_2+0.263 Y_3+0.242 Y_4$ 。

为比较 5 种植被类型土壤入渗性能,根据上述主成分方程,计算 5 种样地土壤不同土层入渗性能得分(表 4),除台湾相思样地外,其余 4 种土壤入渗性能得分均随土层深度的增加而降低。虽然不同样地土壤的入渗性能在同一土层的排序有所差异,但是在 0—20 cm 土层,土壤入渗性能表现为桉树样地土壤

入渗性能最强、余甘子样地土壤入渗性能次之,台湾相思样地土壤入渗性能最差。在20—30 cm土层,余甘子样地土壤入渗性能最强,锥连栎样地土壤入渗性能次之,云南松样地土壤入渗性能最差。与2.2不同

样地土壤入渗性能的结果分析一致,因此结合上述研究结果可以得出,桉树、余甘子、锥连栎样地土壤在研究土层处入渗能力显著优于其余2种植被,可适用于控制该地区土壤侵蚀和防治水土流失。

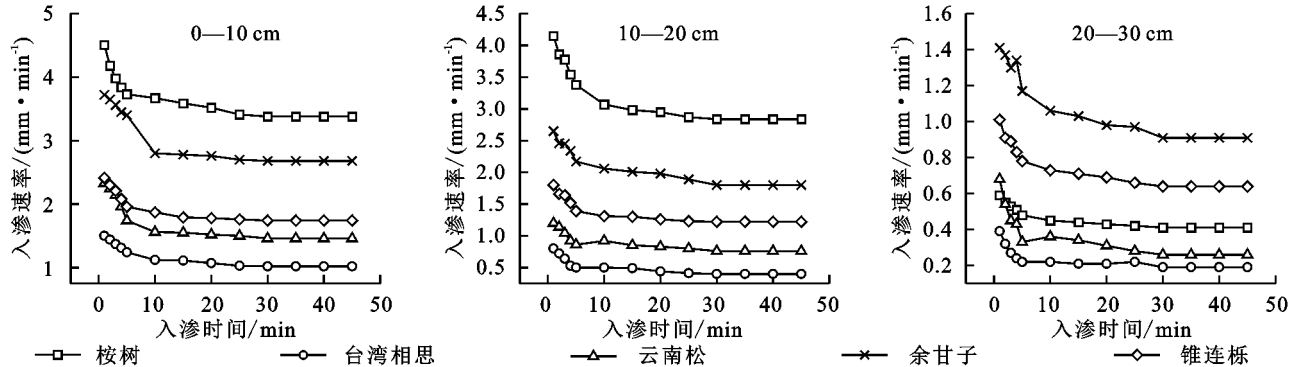
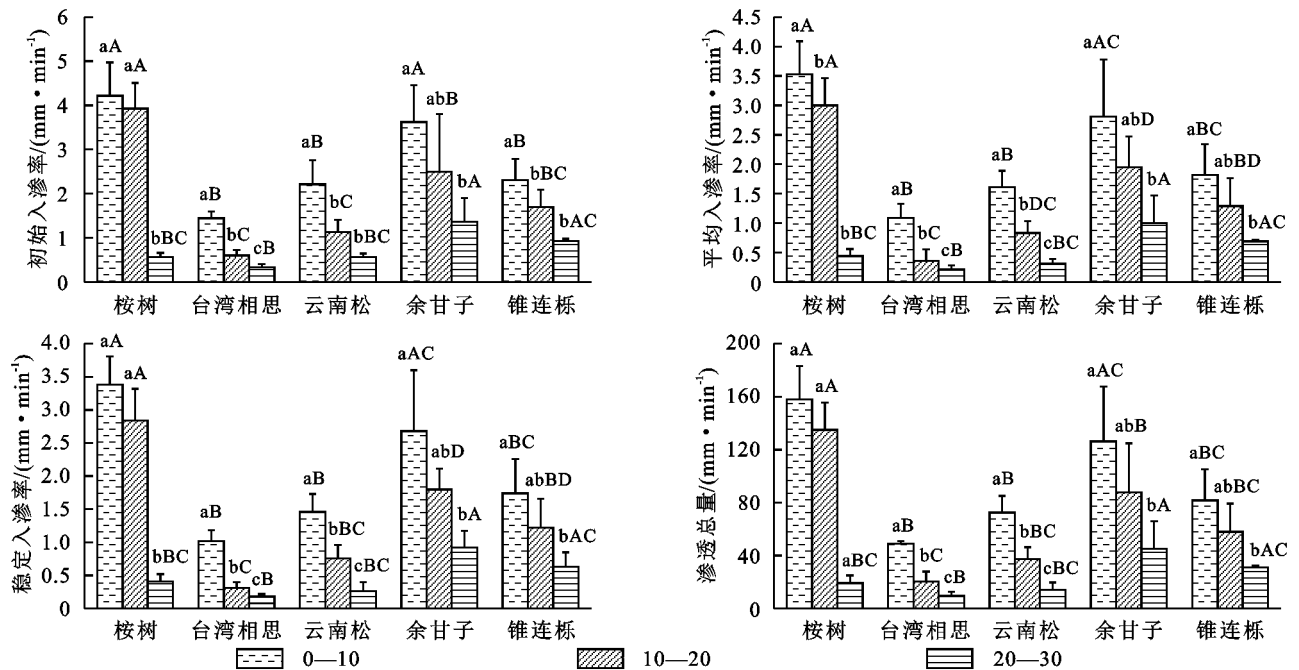


图1 5种植被类型土壤各土层入渗速率

Fig. 1 Infiltration rate of each soil layer of 5 vegetation types



注:不同大写字母表示同一土层不同植被之间的差异显著($p < 0.05$),不同小写字母表示同一植被不同土层之间的差异显著($p < 0.05$)。

图2 不同植被类型土壤入渗性能

Fig. 2 Soil infiltration performance of different vegetation types

表4 5种植被类型土壤渗透性能评价

Table 4 Evaluation of soil permeability of 5 vegetation types

植被类型	0—10 cm		10—20 cm		20—30 cm		平均得分	综合排序
	得分	排序	得分	排序	得分	排序		
桉树	2.061	1	1.603	1	-0.960	3	0.901	1
台湾相思	-0.305	5	-0.994	5	-1.177	4	-0.826	5
云南松	0.226	4	-0.562	4	-1.061	5	-0.466	4
余甘子	1.408	2	0.532	2	-0.391	1	0.516	2
锥连栎	0.429	3	-0.104	3	-0.705	2	-0.126	3

2.3 不同植被土壤水分入渗过程拟合

土壤入渗模型作为评价土壤入渗能力的重要方法,能定性评价土壤水分的入渗过程和反映土壤入渗

速率与时间之间的关系^[19],本文采用 Kostiakov, Horton, Philip 模型对研究区5种样地土壤的入渗速率与入渗时间之间的关系进行拟合,拟合结果见表5。5

种植类型土壤不同土层水分入渗性能与 3 个模型拟合度均较高。模型拟合度 R^2 均值具体表现为 Horton 模型(0.953)>Philip 模型(0.919)>Kostiakov 模型(0.917)。说明 Horton 模型对永仁县干热河谷区 5 种典型植被入渗性能拟合度最好,Philip 模型次之、Kostiakov 模型最差。Horton 模型为经验性模型,存在 3 个参数因子,因此能更好地反映土壤入渗与时间

之间的关系;Philip 模型主要适用于土壤质地较均匀的地区,受土壤结构的影响较大;Kostiakov 模型的参数均为经验参数,能较好地反映短时间内土壤的入渗过程,但用于模拟土壤长时间的入渗能力存在一定局限性^[17],在本研究中 5 种样地土壤入渗时间均较长,且土质为非均质土,因此也导致 Horton 模型拟合效果优于 Kostiakov 模型和 Philip 模型。

表 5 不同植被类型不同土层土壤入渗方程

Table 5 Soil infiltration equation of different vegetation types and different soil layers

植被类型	深度/cm	Kostiakov	R^2	Horton	R^2	Philip	R^2
桉树	0—10	$0.393t^{-0.070}$	0.946	$0.345+0.139e^{-0.311t}$	0.950	$0.319+0.134t^{-1/2}$	0.977
	10—20	$0.414t^{-0.112}$	0.977	$0.283+0.152e^{-0.176t}$	0.990	$0.255+0.177t^{-1/2}$	0.952
	20—30	$0.061t^{-0.122}$	0.900	$0.040+0.023e^{-0.157t}$	0.905	$0.036+0.028t^{-1/2}$	0.880
台湾相思	0—10	$0.151t^{-0.117}$	0.961	$0.101+0.057e^{-0.170t}$	0.965	$0.091+0.067t^{-1/2}$	0.932
	10—20	$0.076t^{-0.190}$	0.907	$0.042+0.057e^{-0.388t}$	0.924	$0.032+0.048t^{-1/2}$	0.942
	20—30	$0.034t^{-0.183}$	0.705	$0.020+0.037e^{-0.611t}$	0.936	$0.015+0.022t^{-1/2}$	0.820
云南松	0—10	$0.232t^{-0.132}$	0.912	$0.149+0.108e^{-0.231t}$	0.972	$0.130+0.114t^{-1/2}$	0.917
	10—20	$0.114t^{-0.106}$	0.891	$0.082+0.057e^{-0.388t}$	0.924	$0.072+0.048t^{-1/2}$	0.942
	20—30	$0.060t^{-0.223}$	0.775	$0.031+0.077e^{-0.687t}$	0.931	$0.021+0.042t^{-1/2}$	0.862
余甘子	0—10	$0.381t^{-0.099}$	0.932	$0.269+0.124e^{-0.150t}$	0.974	$0.249+0.146t^{-1/2}$	0.881
	10—20	$0.269t^{-0.110}$	0.989	$0.183+0.089e^{-0.134t}$	0.961	$0.168+0.113t^{-1/2}$	0.956
	20—30	$0.148t^{-0.132}$	0.959	$0.090+0.057e^{-0.102t}$	0.979	$0.083+0.071t^{-1/2}$	0.878
锥连栎	0—10	$0.241t^{-0.098}$	0.980	$0.173+0.079e^{-0.173t}$	0.979	$0.158+0.093t^{-1/2}$	0.954
	10—20	$0.178t^{-0.115}$	0.958	$0.122+0.074e^{-0.238t}$	0.973	$0.108+0.079t^{-1/2}$	0.962
	20—30	$0.100t^{-0.134}$	0.958	$0.063+0.040e^{-0.159t}$	0.926	$0.055+0.049t^{-1/2}$	0.926
均值			0.917		0.953		0.919

2.4 土壤理化性质对土壤渗透性能的影响

植被能显著改善土壤结构与质地,而土壤水分入渗过程受土壤理化性质等多方面的影响,为了进一步研究土壤理化性质与土壤入渗性能之间的关系,对 5 种样地土壤入渗性能与土壤理化性质进行相关性分析(表 6)。总体上土壤入渗性能与土壤容重、土壤有机质、非毛管

孔隙度、水稳性团聚体含量存在显著相关关系($p<0.05$)。其中土壤入渗性能与土壤容重、 $<0.25\text{ mm}$ 、 $0.25\sim0.5\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量呈显著负相关关系;与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、 $3\sim5\text{ mm}$ 、 $>5\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量呈显著正相关关系;毛管孔隙度对土壤入渗性能没有显著影响($p>0.05$)。

表 6 土壤入渗性能相关性分析

Table 6 Correlation analysis of soil infiltration performance

入渗特征	容重	毛管 孔隙度	非毛管 孔隙度	有机质	水稳性团聚体			
					<0.25	$0.25\sim0.5$	$3\sim5$	>5
初渗率	-0.801**	-0.442	0.818**	0.886**	-0.893**	-0.878**	0.792**	0.886**
稳渗率	-0.784**	-0.422	0.825**	0.882**	-0.894**	-0.882**	0.816**	0.900**
平均入渗率	-0.856**	-0.426	0.814**	0.881**	-0.886**	-0.884**	0.814**	0.912**

注:* 表示显著相关($p<0.05$),** 表示极显著相关($p<0.01$)。

由上述可知,土壤容重、非毛管孔隙度、有机质,水稳性团聚体含量为影响土壤入渗性能的主要因子,为判断 7 种因子对土壤入渗性能的影响程度,采用通径分析进行进一步的研究,因 3 个土壤入渗性能指标与 7 种因子的相关性表现一致,所以下面以土壤平均入渗率为例进行具体分析。

土壤理化性质与土壤平均入渗率的通径系数如

表 7 所示。由表 7 可以看出,影响土壤平均入渗率的直接效应表现为非毛管孔隙度 $X_2>3\sim5\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量 $X_6>$ 小于 0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量 $X_4>5\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量 $X_7>$ 土壤有机质 $X_3>$ 土壤容重 $X_1>0.25\sim0.5\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量 X_5 。对土壤平均入渗率产生直接正向影响的有土壤非毛管孔隙度、土壤有机质、 $3\sim5\text{ mm}$

土壤水稳性团聚体含量、 >5 mm 土壤水稳性团聚体含量,对土壤平均入渗率产生直接负向影响的有土壤容重、 <0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量、 $0.25\sim 0.5$ mm 土壤水稳性团聚体含量,非毛管孔隙度对土壤平均入渗率产生的直接效应最大(0.737),其次为 $3\sim 5$ mm 水稳性团聚体含量(0.380),通过分析影响土壤平均入渗率的间接效应发现 $X_{1,6}$ (0.549), $X_{2,6}$ (-0.232), $X_{3,6}$

(-0.407), $X_{4,6}$ (0.800), $X_{5,6}$ (-0.503), $X_{7,6}$ (0.278)的间接效应均较大,通过分析影响土壤平均入渗率的决策效应发现, $3\sim 5$ mm 土壤水稳性团聚体含量决策效应最大(0.816),其次是 <0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量(-0.442),再者是非毛管孔隙度(0.176)。剩余通径系数为 0.373,说明还有其他影响土壤平均入渗率的因素未考虑。

表 7 主要理化因子对土壤平均入渗率的通径系数

Table 7 Path coefficient of main physical and chemical factors on average infiltration rate of soil

因子	相关系数	直接通径系数	间接通径系数							总和	系数和	决策系数
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
X_1	-0.856^{**}	-0.113^*		-0.492	-0.071	-0.166	0.041	0.549	0.094	-0.045	-0.158	0.023
X_2	0.814^{**}	0.737^{**}	0.075		0.046	0.020	-0.020	-0.232	-0.064	-0.174	0.563	0.176
X_3	0.881^{**}	0.161^*	0.050	0.211		0.116	-0.045	-0.407	0.006	-0.070	0.091	0.081
X_4	-0.886^{**}	-0.286^*	-0.066	-0.052	-0.065		0.054	0.800	0.061	0.732	0.446	-0.442
X_5	-0.884^{**}	-0.102^*	0.045	0.143	0.072	0.151		-0.503	-0.191	-0.282	-0.384	0.152
X_6	0.814^{**}	0.380^*	0.075	0.206	0.079	0.276	-0.062		-0.079	0.496	0.876	0.816
X_7	0.912^{**}	0.235^*	-0.045	-0.200	0.004	-0.075	0.083	0.278		0.045	0.280	0.055

注: * 表示显著相关($p<0.05$), ** 表示极显著相关($p<0.01$)。

3 讨论

研究表明^[20-22],植被有利于改善土壤结构,提高土壤入渗能力。本研究发现,5 种样地土壤理化性质和入渗性能存在显著差异($p<0.05$),且土壤理化性质与土壤入渗性能之间存在显著相关关系,与多数研究结果一致^[23-27],本文所研究 5 种样地土壤入渗性能与土壤容重、非毛管孔隙度、有机质、 $3\sim 5$ mm、 >5 mm 水稳性团聚体含量存在显著相关关系。本文得出,桉树、余甘子、锥连栎 3 种样地土壤在所研究土层处土壤结构优于其余 2 种植物土壤($p<0.05$),因此相较于台湾相思和云南松样地土壤表现出较强的入渗性能。结合 2.1 不同植被土壤的理化性质分析结果可知,在 0—20 cm 土层处,桉树样地土壤有机质含量、 >5 mm 水稳性团聚体含量相较于锥连栎、余甘子样地土壤较高,土壤容重相对较小,因此桉树样地土壤入渗能力优于余甘子和锥连栎样地土壤。由于桉树植物根系主要分布于浅层土壤处^[28],对深层土壤的改善能力较弱,所以在 20—30 cm 土层处桉树样地土壤容重较大,非毛管孔隙度较小,有机质含量下降,因此表现出在该土层深度处土壤入渗性能显著下降。但在 20—30 cm 土层深度处余甘子、锥连栎样地土壤结构优于桉树样地,因此在该土层深度处余甘子、锥连栎样地土壤入渗性能显著大于桉树样地($p<0.05$),这可能是由于锥连栎与余甘子为金沙江干热河谷区典型“稀疏灌草丛”树种,植被覆盖度大,地下根系分布丰富,土壤中植被凋落物和腐殖质也相应较多、有机质较高,能显著改善土壤结构,促进土壤大团聚体的合

成、增加土壤孔隙,提高了土壤的入渗性能^[16]。台湾相思与云南松样地土壤在本研究中入渗性能相较于其他样地土壤表现较差,这可能与这两种植被自身的生物特性有关,如凋落物中养分含量低,且凋落物中存在油性物质等情况,导致凋落物分解缓慢,减少了土壤中有机质的含量,微生物活动减弱,对土壤结构的改善作用减弱,土壤稳定性较差,导致其土壤入渗性能下降^[29]。

结合本文分析结果,在进行该地区水土流失的治理中桉树、余甘子、锥连栎是该地区水土保持配置的优选物种,这 3 种样地土壤有着出色的入渗能力,更能促进金沙江干热河谷地区的水分循环的能力。但是实际情况中,桉树对土壤水分和养分的消耗大,降低土壤质量,影响其他植物生长,建议减少种植。而余甘子样地和锥连栎样地土壤在所研究土层处入渗性能较好,且同为金沙江干热河谷地区典型“稀疏灌草丛”树种,适应该地区的气候,对土壤中营养物质的需求与桉树相比相对较低,因此结合该地区的实际情况以及本研究结果,建议可在该地区优先考虑种植余甘子、锥连栎这两种植物来改善该地区的土壤结构,提高土壤的入渗能力,减少地面径流,缓解水土流失的情况。

4 结论

(1) 研究区不同植被类型土壤理化性质存在差异性($p<0.05$),余甘子样地土壤理化性质总体上较好,说明余甘子植被对土壤结构的改善效果较好。

(2) 不同样地土壤入渗性能随时间的变化相同,呈现出快速递减,然后趋于缓慢,最终稳定的趋势。对 5

种样地土壤入渗性能进行主成分分析发现,土壤入渗性能综合排名为桉树>余甘子>锥连栎>云南松>台湾相思,采用 Kostiakov, Horton, Philip 土壤水分入渗模型对研究区 5 种不同植被类型土壤入渗性能与时间的关系拟合发现,3 个模型拟合程度均较高, Horton 模型(0.953)更能体现研究区土壤水分入渗过程。

(3) 分析不同植被土壤入渗性能与土壤理化性质之间的关系发现,土壤非毛管孔隙度、 $<0.25\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量、 $3\sim5\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量是影响土壤入渗性能的决定性因素,且土壤毛管孔隙度、 $3\sim5\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量对土壤入渗性能产生正向影响,而 $<0.25\text{ mm}$ 土壤水稳性团聚体含量对土壤入渗性能产生负向影响。

(4) 5 个研究树种中,建议在研究区优先考虑种植余甘子和锥连栎,从而有效改善土壤入渗性能,缓解水土流失。

参考文献(References):

- [1] 张珉瑞,朱少东,李盼,等.干热河谷区 4 种典型植被土壤抗剪性能影响因素探究[J].江西农业大学学报,2023,45(5):1285-1296.
Zhang M R, Zhu S D, Li P, et al. Influencing factors of soil shear performance of four typical vegetations in dry-hot valley area[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(5):1285-1296.
- [2] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2010,30(15):4162-4172.
Zhao Y Y, Wang Y J, Wang Y Q, et al. Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15):4162-4172.
- [3] 高婵婵,赵传燕,王超,等.黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J].水土保持学报,2016,30(1):117-121,126.
Gao C C, Zhao C Y, Wang C, et al. Soil physicochemical properties and infiltration characteristics under different vegetation types in Tianlaochi watershed in the upstream of Heihe River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(1):117-121,126.
- [4] Michaelides K, Lister D, Wainwright J, et al. Vegetation controls on small-scale runoff and erosion dynamics in a degrading dryland environment[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(11):1617-1630.
- [5] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等.不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J].水土保持研究,2016,23(1):13-17.
Mo B, Chen X Y, Yang Y C, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1):13-17.
- [6] 杨静,张耀艺,谭思懿,等.亚热带不同树种土壤水源涵养功能[J].生态学报,2020,40(13):4594-4604.
Yang J, Zhang Y Y, Tan S Y, et al. Soil water conservation functions of different plantations in subtropical forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13):4594-4604.
- [7] 杨海龙,朱金兆,毕利东.三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J].水土保持学报,2003,17(3):63-65,69.
Yang H L, Zhu J Z, Bi L D. Soil permeability capability research on Yangtze River Three Gorges Reservoir Area forest watershed ecosystem[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2003, 17(3):63-65,69.
- [8] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.
Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1):33-36.
- [9] Ali Kalhoro S, Ding K, Zhang B Y, et al. Soil infiltration rate of forestland and grassland over different vegetation restoration periods at Loess Plateau in northern hilly areas of China[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2019, 15(1):91-99.
- [10] Deng L, Kim D G, Peng C, et al. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(11):3974-3984.
- [11] 宋日,刘利,马丽艳,等.作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J].南京农业大学学报,2009,32(3):93-97.
Song R, Liu L, Ma L Y, et al. Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(3):93-97.
- [12] 赵恩辉,吴磊,赵生华.黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价[J].水土保持研究,2023,30(6):255-263.
Zhao E H, Wu L, Zhao S H. Comprehensive evaluation of soil water conservation function of different vegetation types in the Yellow River Delta[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6):255-263.
- [13] 陈楚楚,黄新会,刘芝芹,等.滇西北高原湿地不同植被类型下的土壤入渗特性及其影响因素[J].水土保持通报,2016,36(2):82-87.
Chen C C, Huang X H, Liu Z Q, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of surface soil in plateau

- wetland of northwest Yunnan Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(2):82-87.
- [14] 刘芝芹,黄新会,王克勤.金沙江干热河谷不同土地利用类型土壤入渗特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2014,28(2):57-62.
Liu Z Q, Huang X H, Wang K Q. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of different forest soils in jingshajiang dry-hot valley region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(2):57-62.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method:GB/T50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [16] 苏世平,刘小娥,李毅.兰州市南北两山不同灌丛土壤渗透特性[J].*水土保持研究*,2022,29(5):149-154,163.
Su S P, Liu X E, Li Y. Soil infiltration characteristics under four shrub types in southern and northern mountains of Lanzhou city[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):149-154,163.
- [17] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].*农业工程学报*,2009,25(6):40-45.
Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009,25(6):40-45.
- [18] 任立军,李金,邹洪涛,等.生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J].*土壤*,2023,55(4):756-763.
Ren L J, Li J, Zou H T, et al. Effect of bio-organic fertilizer combined with chemical fertilizer on nutrient contents and soil aggregate distribution in greenhouse soil[J]. *Soils*, 2023,55(4):756-763.
- [19] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey Lakes Watershed, central Ontario [J]. *Journal of Hydrology*, 2005,306(1/2/3/4):1-20.
- [20] 李怡帆,张国涛,雷鸣宇,等.西南山区云南松根土复合体力学特性及其对浅层坡体稳定性的影响[J].*水土保持通报*,2022,42(6):88-96.
Li Y F, Zhang G T, Lei M Y, et al. Mechanical properties of Yunnan pine root-soil system and its influence on shallow slope stability in southwestern mountainous region of China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(6):88-96.
- [21] Zhou Y Y, Wang X M. Mesomechanics characteristics of soil reinforcement by plant roots[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019,78(5):3719-3728.
- [22] Capilleri P P, Cuomo M, Motta E, et al. Experimental investigation of root tensile strength for slope stabilization [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2019,49(6):687-697.
- [23] 冯璐,丁康,屈媛媛,等.黄土塬边坡植被类型对土壤孔隙的影响[J].*草业科学*,2020,37(4):625-634.
Feng L, Ding K, Qu Y Y, et al. The influence of Loess Tableland slope vegetation type on soil pore characteristics [J]. *Pratacultural Science*, 2020,37(4):625-634.
- [24] Xu L Y, Wang M Y, Tian Y T, et al. Changes in soil macropores: Superposition of the roles of organic nutrient amendments and the greenhouse pattern in vegetable plantations[J]. *Soil Use and Management*, 2019,35(3):412-420.
- [25] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].*生态学报*,2020,40(5):1610-1620.
Li P, Wang D M, Ding C, et al. Soil infiltration characteristics and its influencing factors of typical vegetation type in Loess Alpine Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(5):1610-1620.
- [26] 张玉琪,梁婷,张德罡,等.祁连山东段退化高寒草甸土壤水分入渗的变化及团聚体对水分入渗的影响[J].*草地学报*,2020,28(2):500-508.
Zhang Y Q, Liang T, Zhang D G, et al. Variation of soil water infiltration and the influence of aggregates in degraded alpine meadow in eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020,28(2):500-508.
- [27] 朱梦雪,王克勤,赵洋毅,等.中亚热带不同演替森林群落林地土壤渗透性特征[J].*东北林业大学学报*,2023,51(7):128-134,161.
Zhu M X, Wang K Q, Zhao Y Y, et al. Soil permeability characteristics of woodland in different succession forest communities in central subtropics [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023,51(7):128-134,161.
- [28] 何苗苗,刘芝芹,王克勤,等.滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2022,36(3):181-187.
He M M, Liu Z Q, Wang K Q, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors under different vegetation cover types in Dianchi Lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022,36(3):181-187.
- [29] 云慧雅,毕华兴,王珊珊,等.不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J].*水土保持学报*,2021,35(6):183-189.
Yun H Y, Bi H X, Wang S S, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021,35(6):183-189.