

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.06.029

CSTR:32310.14.stbxb.2025.06.029

杨得权,邓洁,郭红妍,等.三峡水库梅溪河消落带不同土地利用方式土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2025,39(6):85-93.

YANG Dequan, DENG Jie, GUO Hongyan, et al. Soil infiltration characteristics and their influencing factors under different land use types in riparian zone of Meixi River, Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):85-93.

三峡水库梅溪河消落带不同土地利用方式 土壤入渗特征及其影响因素

杨得权, 邓洁, 郭红妍, 薛梦涵, 高澳寒, 王轶浩

(重庆师范大学地理与旅游学院, 山区生态系统碳循环与碳调控重庆市重点实验室,
三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331)

摘要: [目的] 为探究梅溪河消落带不同土地利用方式土壤入渗特征及其影响因素。[方法] 采用野外原位调查监测与室内样品分析测定相结合的方法, 对三峡库区梅溪河消落带人工恢复林地、自然恢复草地和农耕地的土壤基本物质性质、土壤入渗特征及其影响因素进行系统研究。[结果] 3种土地利用方式中各土层土壤总孔隙度及持水量均以草地最大, 而各土层土壤非毛管孔隙度则均以林地最优; 土地利用方式对消落带表层(0~20 cm)土壤入渗特征产生显著影响($p < 0.05$), 且草地和林地0~20、20~40 cm土层稳定入渗速率为2.39、0.51 mm/min和1.81、0.54 mm/min, 均优于耕地(0.96、0.46 mm/min); Kostiakov模型、Philip模型和Horton模型均能很好拟合各土地利用方式的土壤入渗过程, 拟合优度(R^2)均值大小排序为Philip模型(0.981) > Horton模型(0.977) > Kostiakov模型(0.913); 土壤入渗特征与土地利用方式、土层深度、土壤体积质量、土壤pH呈显著负相关($p < 0.05$), 与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、有机质、全氮、全磷呈显著正相关($p < 0.05$), 土壤有机质、土壤pH和土地利用方式是影响消落带土壤入渗的主要因素。[结论] 消落带自然恢复草地提升表层土壤入渗性能的效果最好, 而林地对下层土壤的改善作用明显。研究结果可为三峡水库消落带土壤侵蚀预防治理及土地利用优化管理提供科学依据。

关键词: 土壤入渗特征; 土地利用方式; 消落带; 三峡水库

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0085-09

Soil Infiltration Characteristics and Their Influencing Factors under Different Land Use Types in Riparian Zone of Meixi River, Three Gorges Reservoir

YANG Dequan, DENG Jie, GUO Hongyan, XUE Menghan, GAO Aohan, WANG Yihao

(Chongqing Field Scientific Observation and Research Station of Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area,

Chongqing Key Laboratory of Carbon Cycling and Carbon Regulation in Mountain Ecosystem, School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] To investigate soil infiltration characteristics and their influencing factors under different land use types in the riparian zone of the Meixi River. [Methods] By combining field in-situ investigation and monitoring with laboratory sample analysis, a systematic study was conducted to investigate the basic physical properties of the soil, soil infiltration characteristics, and their influencing factors in artificially restored forestland, naturally restored grassland, and farmland within the riparian zone of the Meixi River in the Three Gorges Reservoir. [Results] Among the three land use types, grassland exhibited the highest total soil porosity and water holding capacity across all soil layers, while forestland had the greatest non-capillary porosity across all soil layers. Land use types significantly affected the soil infiltration characteristics of the surface layer (0–20 cm) in the

收稿日期: 2025-06-15

修回日期: 2025-07-25

录用日期: 2025-08-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-09-26

资助项目: 重庆市自然科学基金面上项目(CSTB2023NSCQ-MSX0741); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000502); 重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(CSTB2023TIAD-LDX0010, CSTB2024TIAD-LDX0001); 重庆师范大学基金项目(20XLB005)

第一作者: 杨得权(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ydq263414@163.com

通信作者: 王轶浩(1982—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail: wyih515@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

riparian zone ($p < 0.05$). The stable infiltration rates of 0—20, 20—40 cm soil layers in grassland and forestland were 2.39, 0.51 mm/min, and 1.81, 0.54 mm/min, respectively, both significantly higher than those of farmland (0.96, 0.46 mm/min). The Kostiakov, Philip, and Horton models all effectively simulated the soil infiltration processes under different land use types, with average values of the goodness of fit (R^2) ranked as: Philip Model (0.981) > Horton Model (0.977) > Kostiakov Model (0.913). Soil infiltration characteristics were significantly negatively correlated with land use types, soil depth, soil bulk density, and soil pH ($p < 0.05$), while exhibiting significantly positive correlation with total porosity, non-capillary porosity, saturated water holding capacity, organic matter, total nitrogen, and total phosphorus ($p < 0.05$). Among these, soil organic matter, soil pH, and land use types were the primary factors influencing soil infiltration in the riparian zone. [Conclusion] The naturally restored grassland in the riparian zone demonstrates the most effective enhancement of surface soil infiltration performance, while forestland significantly improved the subsurface soil layers. These findings can provide a scientific basis for the prevention and control of soil erosion and the optimized management of land use in the riparian zone of Three Gorges Reservoir.

Keywords: soil infiltration characteristics; land use type; riparian zone; Three Gorges Reservoir

Received: 2025-06-15

Revised: 2025-07-25

Accepted: 2025-08-01

Online(www.cnki.net): 2025-09-26

三峡水库是当今世界最大的水利枢纽工程,其实施特殊的“冬蓄夏排”运行方式,使得库周形成水位落差达 30 m、面积为 349 km²的水陆交错地带,即消落带^[1]。三峡水库消落带人为活动强烈,加之反季节周期性水位涨落影响,从而产生植被退化严重、生物多样性下降、地质灾害易发等诸多生态环境问题^[2],尤其土壤侵蚀异常强烈。已有研究^[3]表明,三峡库区长江干、支流消落带的土壤侵蚀模数分别为 54 050、9 191 t/(km²·a),约为三峡库区平均土壤侵蚀模数 3 185 t/(km²·a)的 17.3 倍,这直接影响着三峡水库生态安全及库区经济社会可持续发展。故当地政府部门及科研工作者积极尝试通过植被恢复与重建以应对三峡水库消落带所产生的负面生态环境影响,因此在消落带形成人工营造林地、农耕地、撂荒地和自然恢复草地等多种土地利用方式并存分布格局^[4-5]。

土壤入渗表征地表水向土壤水的转化过程^[6],直接决定着土壤涵养水源功能的发挥及地表径流的形成,进而影响着土壤侵蚀过程的发生与发展,是水土保持的主要研究内容之一^[7]。近年来国内外研究学者在三峡库区对土壤入渗特征开展了一系列研究,其中,李建兴等^[8]对三峡库区不同边坡植物物种根系特征与土壤渗透性之间的关系研究发现,植物的根系特征显著影响到土壤的入渗特征,并且土壤的渗透性随土壤深度增加而降低;张轩铭等^[9]对三峡库区不同发育程度紫色砂岩的入渗特征及其影响因素研究发现,土壤的入渗特征与土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度等都具有较强相关性;云慧雅等^[10]、刘目兴等^[11]对三峡库区不同类型森林的土壤入渗特征进行研究,不同森林的土壤入渗性能存在差异,且土

壤物理性质和土壤入渗速率存在相关关系。综上所述可知,三峡库区土壤入渗特征受到植被类型及其根系特征、土层深度、土壤物理性质等多重因素影响,然而以往三峡库区这些研究多针对三峡水库库岸带或小流域,而对受波动水位变化影响的三峡水库消落带的土壤入渗特征研究并不多见,尤其对消落带不同土地利用方式的土壤入渗特征研究还未见报道,使得难以科学认识和深入理解三峡水库消落带土壤入渗特征的空间变化及其驱动机制,这严重制约着三峡水库消落带土壤侵蚀预防治理。

本文在位于三峡库区腹地地带的重庆市奉节县梅溪河消落带,以其人工营造林地、自然恢复草地和农耕地为研究对象,研究消落带不同土地利用方式的土壤基本物质性质、入渗特征差异及其影响因素,以为三峡水库消落带土壤侵蚀预防治理及土地利用管理提供科学依据与参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区奉节县康乐镇的梅溪河消落带,距离奉节县城约 30 km。梅溪河属于长江北岸的一级支流,也是三峡库区的长江主要支流之一,流域总面积约 2 001 km²,受三峡水库周期性水位涨落的影响,在入江口朔源而上形成长约 21 km 的消落带。研究区属中亚热带湿润季风气候,年平均降水量 1 150 mm,雨量季节分布不均,降水主要集中在 6—8 月。土壤以黄壤为主,研究区消落带现有土地利用方式有人工营造林地、自然恢复草地和农耕地,其中人工营造林地主要分布在高程 170~175 m 的消落带,造林树种主要有落羽杉(*Taxodium distichum*)、池杉(*Taxodium*

ascendens)等;自然恢复草地在整个消落带均有分布,生长的草本植物主要有狗牙根(*Cynodon dactylon*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、蓼(*Polygonum*)等;农耕地主要分布在高程160~175 m的消落带,栽种的主要农作物有玉米(*Zea mays*)、花生(*Arachis hypogaea*)等。

1.2 典型样地布设

由于三峡水库水位反季节周期性涨落变化,造成不同高程消落带的淹水时长产生较大差异,因此根据消落带淹水时长差异及土地利用类型的空间分布范围,将消落带划分为<170、170~175 m 2个高程梯度,同时以高程175~185 m的未淹水库岸带为对照。然后在不同高程梯度消落带及库岸带选择坡度、坡向、土壤等立地条件基本一致的区域,设置典型样地(图1),其中高程<170 m消落带设有自然恢复草地典型样地;高程170~175 m消落带设有人工营造林地、自然恢复草地、农耕地典型样地;高程175~185 m库岸带设有农耕地、人工营造林地典型样地。自然恢复草地和农耕地典型样地规格均为5 m×10 m;人工营造林地典型样地规格为5 m×20 m。每种土地利用方式分别布设3个典型样地,共计布设18个典型样地。

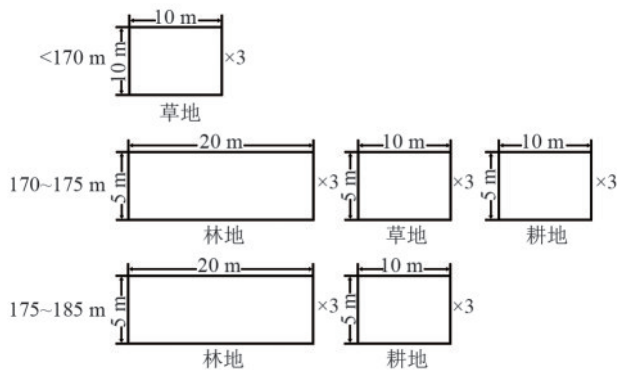


图1 样地布设示意

Fig. 1 Schematic diagram of sample plot layout

1.3 土壤样品采集与测定

2024年5月在各典型样地随机挖3个土壤剖面,用体积为100 cm³环刀按0~20、20~40 cm土层分层采集原状土,每层2~3个重复,用于测定土壤体积质量、孔隙度、持水量、入渗特征等物理性质。同时在各典型样地采用五点法选取采样点,然后在各采样点用土钻分0~20、20~40 cm土层采集土样,并将各典型样地的同一土层土样进行混合,即每个典型样地取得2个混合土样,用于测定土壤pH、有机质、全氮、全磷、全钾等化学性质。

将土壤样品带回实验室并经预处理后,测定各土壤理化性质指标,其中,采用环刀法测定土壤体积

质量、孔隙度、持水量、入渗特征等;电位法测定土壤pH;重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量;凯氏定氮法测定土壤全氮含量;钼锑抗分光光度法测定土壤全磷含量;火焰光度计法测定土壤全钾含量^[12-13]。

1.4 数据处理与分析

运用Excel 2019软件对数据进行处理,并用SPSS 23.0软件对土壤基本物理性质进行单因素方差分析(One-way ANOVA)及LSD检验法的多重均值比较分析、土壤入渗速率及其影响因素的Pearson相关分析;用R语言对当前主流的土壤入渗模型进行土壤入渗过程拟合,包括Kostiakov模型、Philip模型和Horton模型。

Kostiakov模型:

$$I(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中: $I(t)$ 为入渗率,mm/min; t 为入渗时间,min; a 、 b 为模型参数。

Philip模型:

$$I(t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad (2)$$

式中: A 为稳定入渗率,mm/min; S 为模型参数。

Horton模型:

$$I(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: f_c 为稳定入渗率,mm/min; f_0 为初始入渗率,mm/min; k 为模型参数。

最后运用Canoco 5软件对土壤入渗特征的影响因素进行冗余分析,并用Origin 2020软件制图。

2 结果与分析

2.1 消落带不同土地利用方式的土壤基本物理性质

单因素方差分析表明,消落带土地利用方式对各土层土壤体积质量、孔隙度和持水量的影响均不显著($p > 0.05$)。对同一土层不同土地利用方式的土壤物理性质进行比较发现(表1),0~20 cm土层的土壤总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均表现为草地>耕地>林地,且草地的土壤毛管孔隙度显著高于耕地、林地($p < 0.05$);草地和林地的土壤体积质量均为1.46 g/cm³,高于耕地的1.42 g/cm³;土壤非毛管孔隙度则以林地最大,耕地次之,草地最小。同样地,20~40 cm土层的草地土壤总孔隙度、饱和持水量、毛管持水量和田间持水量均高于耕地、林地,且林地和草地的土壤非毛管孔隙度均显著高于耕地($p < 0.05$),其中以林地最大,为5.70%,相反,20~40 cm土层的耕地土壤体积质量、毛管孔隙度均高于林地、草地。除土壤体积质量和毛管孔隙度外,各土地利用方式的0~20 cm土层土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、毛管持水量、田间持水量总体均高于20~40 cm土层。

表 1 消落带不同土地利用方式的土壤基本物理性质
Table 1 Basic soil physical properties under different land use types in riparian zone

| 土层深度/cm | 土地利用方式 | 体积质量/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) | 总孔隙度/% | 毛管孔隙度/% | 非毛管孔隙度/% | 饱和持水量/% | 毛管持水量/% | 田间持水量/% |
|---------|--------|--|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|
| 0~20 | 林地 | 1.46±0.07a | 41.89±1.78a | 31.00±10.78b | 10.05±4.62a | 28.70±2.05a | 21.12±7.15a | 21.55±1.51a |
| | 草地 | 1.46±0.16a | 43.77±5.60a | 36.59±2.30a | 7.18±3.70a | 31.73±11.10a | 26.21±6.87a | 23.99±6.70a |
| | 耕地 | 1.42±0.15a | 43.63±3.73a | 34.39±3.52ab | 9.24±6.60a | 31.18±5.94a | 24.20±1.36a | 22.35±1.38a |
| 20~40 | 林地 | 1.57±0.09a | 39.56±2.67a | 33.86±4.84a | 5.70±2.59a | 25.23±2.82a | 21.67±3.97a | 20.64±5.19a |
| | 草地 | 1.54±0.10a | 40.89±2.01a | 35.34±1.53a | 5.56±1.64a | 26.72±2.78a | 23.05±1.86a | 20.81±2.48a |
| | 耕地 | 1.59±0.02a | 39.76±7.81a | 35.89±7.69a | 3.87±0.91b | 25.21±6.18a | 22.75±5.89a | 20.10±6.39a |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一土层不同土地利用方式间差异显著($p<0.05$)。

2.2 消落带不同土地利用方式的土壤入渗特征

由图 2 可知,消落带不同土地利用方式的土壤入渗速率随时间变化规律基本相似,均表现为土壤初始入渗速率极高,且土壤入渗速率随着时间延长而快速下降,之后出现明显转折,即土壤入渗速率变化幅度明显减弱,并随着时间延长而缓慢降低,最后逐渐趋于稳定。据此可将消落带土壤入渗过程划分为

3 个阶段,即前 10 min 的土壤入渗速率快速下降阶段,该阶段土壤入渗速率迅速下降,但相比其他阶段仍然较高;10~60 min 为土壤入渗速率缓慢下降阶段,该阶段土壤入渗速率变化幅度较小,但仍处于下降过程;60~90 min 为土壤入渗速率趋于稳定阶段,该阶段土壤入渗速率基本处于稳定,达到最低水平,即稳定入渗速率。

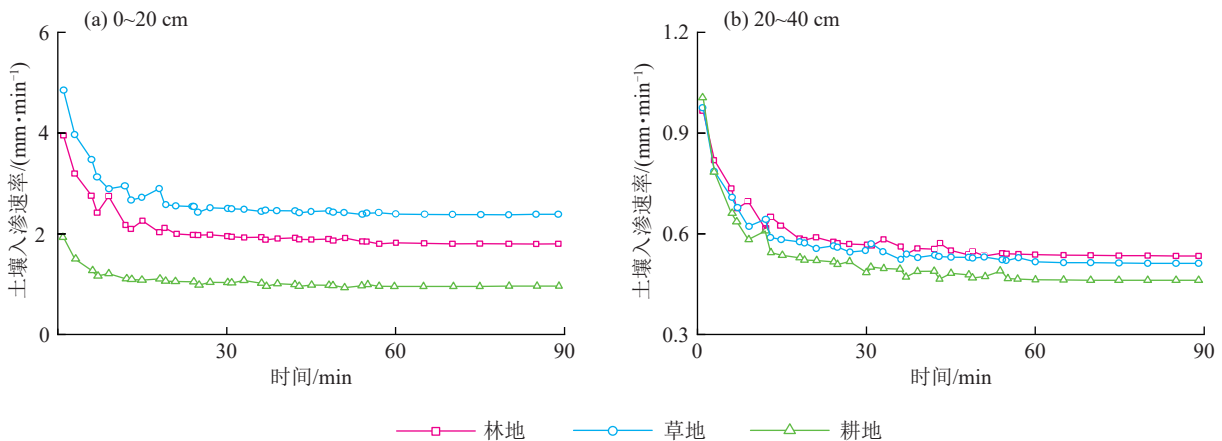


图 2 消落带不同土地利用方式的土壤入渗过程

Fig. 2 Soil infiltration processes under different land use types in riparian zone

消落带不同土地利用方式的土壤入渗过程存在一定差异性,且随土层而异。相比林地和草地,耕地 0~20 cm 土层的土壤入渗速率总体随时间的变化幅度较小,且更快趋于稳定,而耕地 20~40 cm 土层的土壤入渗速率变化却较大,且趋于稳定的过程更为缓慢。总体来看,0~20 cm 土层土壤在整个入渗过程的速率大小排序均为草地>林地>耕地,20~40 cm 土层则均为林地>草地>耕地,且各土地利用方式的 20~40 cm 土层土壤入渗速率均比 0~20 cm 土层更快趋于稳定。

进一步对消落带不同土地利用方式的土壤入渗速率进行单因素方差分析,结果表明,土地利用方式对 0~20 cm 土层土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率均产生显著影响($p<0.05$),但对 20~40 cm

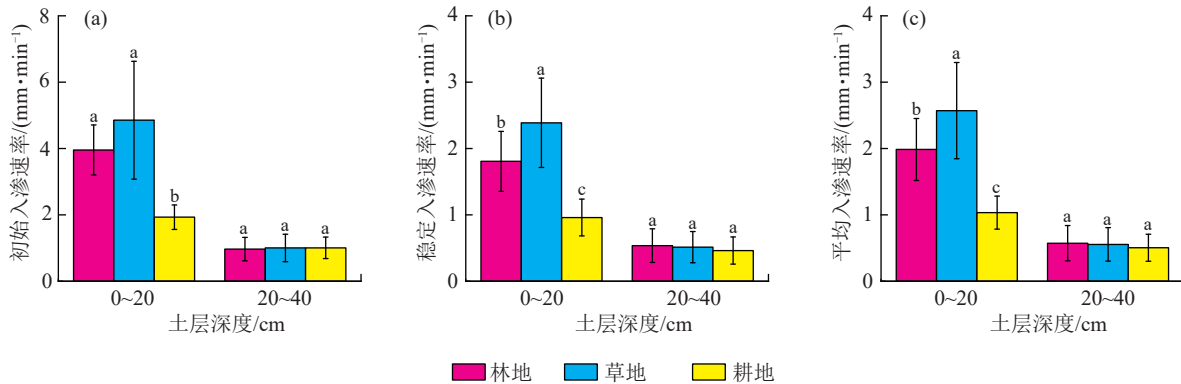
土层的土壤入渗速率影响则均不明显($p>0.05$)。由图 3 可知,0~20 cm 土层的林地和草地土壤初始入渗率均显著高于耕地,且草地的稳定入渗率(2.39 mm/min)、平均入渗率(2.57 mm/min)均显著高于林地(分别为 1.81、1.99 mm/min)、耕地(分别为 0.96、1.03 mm/min),而林地也显著高于耕地($p<0.05$),但消落带不同土地利用方式之间的 20~40 cm 土层土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率均无显著差异($p>0.05$)。各土地利用方式的 0~20 cm 土层土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率均高于 20~40 cm 土层。

2.3 消落带不同土地利用方式的土壤入渗过程模型拟合

对消落带不同土地利用方式的土壤入渗过程进

行方程拟合(表 2),结果表明,Kostiakov 模型、Philip 模型和 Horton 模型均能很好地拟合消落带各土地利用方式的土壤入渗过程,且均达到极显著水平($p < 0.01$),其中 Kostiakov 模型的拟合优度(R^2)为 0.89~0.94,平均值为 0.913; Philip 模型的拟合优度为

0.97~0.99,平均值为 0.981; Horton 模型的拟合优度为 0.96~0.99,平均值为 0.977。由此可见,以 Philip 模型对消落带各土地利用方式的土壤入渗过程拟合效果最好,其次为 Horton 模型,以 Kostiakov 模型最差。



注:图柱上方不同字母表示同一土层不同土地利用方式间土壤入渗特征差异显著($p < 0.05$)。

图 3 消落带不同土地利用方式对土壤入渗特征的影响

Fig. 3 Effects of different land use types on soil infiltration characteristics in riparian zone

表 2 消落带不同土地利用方式的土壤入渗过程模型拟合

Table 2 Model fitting of soil infiltration processes under different land use types in riparian zone

| 土层深度/cm | 土地利用方式 | Kostiakov 模型 | | | Philip 模型 | | | Horton 模型 | | | |
|---------|--------|--------------|----------|--------|-----------|----------|--------|----------------------|----------------------|----------|--------|
| | | <i>a</i> | <i>b</i> | R^2 | <i>S</i> | <i>A</i> | R^2 | <i>f_c</i> | <i>f_o</i> | <i>k</i> | R^2 |
| 0~20 | 林地 | 3.70 | 0.18 | 0.92** | 5.12 | 1.49 | 0.98** | 1.80 | 2.41 | 0.05 | 0.97** |
| | 草地 | 4.52 | 0.17 | 0.90** | 5.93 | 1.99 | 0.97** | 2.40 | 3.25 | 0.08 | 0.96** |
| | 耕地 | 1.74 | 0.15 | 0.89** | 2.18 | 0.82 | 0.99** | 0.94 | 1.20 | 0.04 | 0.98** |
| 20~40 | 林地 | 0.91 | 0.13 | 0.92** | 1.04 | 0.47 | 0.98** | 0.53 | 0.68 | 0.05 | 0.97** |
| | 草地 | 0.91 | 0.14 | 0.94** | 1.09 | 0.45 | 0.99** | 0.50 | 0.66 | 0.04 | 0.99** |
| | 耕地 | 0.91 | 0.17 | 0.91** | 1.21 | 0.39 | 0.98** | 0.45 | 0.60 | 0.04 | 0.99** |

注:**表示 $p < 0.01$ 。下同。

2.4 消落带土壤入渗特征的影响因素分析

消落带土壤初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率与水位梯度、土地利用方式、土层深度、土壤理化性质的相关性分析(表 3)表明,消落带土壤初始入渗率与土地利用方式、土层深度、土壤体积质量、土壤 pH 均呈极显著负相关($p < 0.01$),而与土壤非毛管孔隙度、饱和持水量、有机质、全氮均呈显著或极显著正相关。土壤稳定入渗率与土层深度、土壤体积质量、土壤 pH 均呈显著或极显著负相关,而与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、有机质、全氮、全磷均呈显著或极显著正相关。土壤平均入渗率同样与土地利用方式、土层深度、土壤体积质量、土壤 pH 均呈显著或极显著负相关,而与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、有机质、全氮、全磷均呈显著或极显著正相关。然而消落带各土壤入渗特征与水位梯度、土壤毛管孔隙度、毛管持水量、田间持水量、全钾的相关性均不显著($p > 0.05$)。

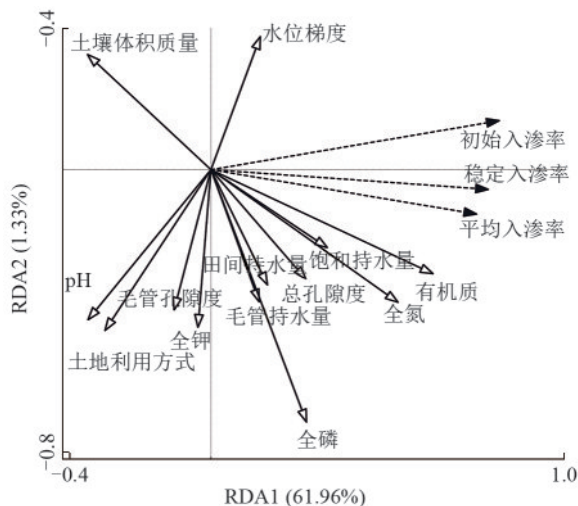
表 3 消落带土壤入渗特征及其影响因素的相关性

Table 3 Correlation between soil infiltration characteristics and their influencing factors in riparian zone

| 影响因素 | 初始入渗率 | 稳定入渗率 | 平均入渗率 |
|----------|----------|----------|----------|
| 水位梯度 | 0.164 | 0.048 | 0.102 |
| 土地利用方式 | -0.309** | -0.170 | -0.209* |
| 土层深度 | -0.617** | -0.604** | -0.621** |
| 土壤体积质量 | -0.238** | -0.298** | -0.300** |
| 土壤总孔隙度 | 0.175 | 0.236* | 0.235* |
| 土壤毛管孔隙度 | -0.140 | -0.026 | -0.063 |
| 土壤非毛管孔隙度 | 0.312** | 0.255** | 0.275** |
| 土壤饱和持水量 | 0.237* | 0.272** | 0.277** |
| 土壤毛管持水量 | 0.059 | 0.149 | 0.129 |
| 土壤田间持水量 | 0.085 | 0.160 | 0.146 |
| 土壤 pH | -0.341** | -0.200* | -0.261** |
| 土壤有机质 | 0.474** | 0.516** | 0.502** |
| 土壤全氮 | 0.382** | 0.453** | 0.426** |
| 土壤全磷 | 0.124 | 0.301** | 0.242* |
| 土壤全钾 | -0.094 | 0.022 | 0.004 |

注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

进一步对消落带土壤入渗特征及其影响因素进行冗余分析(图4)表明,第1排序轴(RDA1)的解释量为61.96%,第2排序轴(RDA2)的解释量为1.33%,累计解释值为63.29%,累计解释拟合方差值为99.97%,说明前2轴能较好地解释土壤入渗特征与其影响因素的关系。由图4可知,作为响应变量的土壤入渗特征(土壤初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率)箭头方向相近、均指向第1排序轴的正方向,且它们与第1排序轴之间的夹角都很小,表明第1排序轴可以较好地解释各个土壤入渗特征指标的变化。第1排序轴的影响因素主要包括土壤有机质、饱和持水量、全氮、总孔隙度、pH和土地利用方式,其中土壤有机质、土壤pH、土地利用方式对响应变量贡献度分别为38.9%、29.1%、13.4%,累计贡献度达到81.4%,说明土壤有机质、土壤pH和土地利用方式是影响消落带土壤入渗特征的主要因素。



注:虚线实心箭头为响应变量,实线空心箭头为解释变量。

图4 消落带土壤入渗特征及其影响因素的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of soil infiltration characteristics and their influencing factors in riparian zone

3 讨论

本研究发现,消落带不同土地利用方式之间大多数土壤基本物理性质的差异均不显著,与陈超等^[14]研究结果相似。一方面可能与采样时间有关,本研究采样时间在5月,此时耕地的玉米播种及其生长时间不长,土壤仍较为疏松;另一方面,可能与消落带特殊生境有关,消落带周期性水位波动环境对土壤基本物理性质产生明显影响^[3],而它与土地利用方式可能存在权衡作用,从而一定程度上抵消土地利用方式的影响。同时本研究也发现,消落带不同土地利用方式之间的0~20 cm土层毛管孔隙度、20~40 cm土层非毛管孔隙度差异显著($p < 0.05$)。土壤非毛管孔隙是指土壤中孔径 > 0.1 mm的孔隙,反

映土壤通气及透水性能。本研究发现,各土层的土壤非毛管孔隙度均以林地最大,说明林地对土壤非毛管孔隙度的改善作用最大,可能与林地土壤中有较多中大径级根系分布有关^[15-16]。消落带各土地利用方式的土壤物理性质在土壤剖面呈现明显的空间分异,除土壤体积质量和毛管孔隙度外,其他土壤物理性质均随土层加深而减小,与前人^[17-18]研究结果一致。

消落带土壤入渗过程总体上可分为快速下降、缓慢下降、趋于稳定3个阶段,但不同土地利用方式的土壤入渗过程存在一定差异性。其中,耕地表层的土壤入渗速率随时间变化幅度较小而更快趋于稳定,且整个入渗过程的速率均以耕地最小。可能是因为频繁翻耕导致耕地的土壤团聚体破坏、孔隙分布不均,使得土壤变得松散且容易被压实^[19],水分难以入渗所致,而林地和草地土壤拥有强大的植物根系系统,能够更好地联结土壤颗粒^[20],从而维持土壤的孔隙结构,并且植物根系的穿插、延展过程会形成纵横交错的根孔^[21],而水分下渗优先沿植物根孔等非毛管孔隙运输。本研究也表明,消落带各土层的土壤非毛管孔隙度均以林地最大,这些都促进土壤的入渗^[22-23]。除此之外,消落带林地和草地的地表植被覆盖率高,可以更好缓解降雨雨滴对地表土壤的击溅侵蚀,从而保持良好且稳定的土壤结构,促进土壤入渗^[24],而耕地虽也有农作物覆盖,但仍有大量的地表土壤裸露,容易受降雨雨滴击蚀而板结,影响土壤入渗。故土地利用方式对消落带表层土壤的入渗特征均产生显著影响。同时,消落带下层土壤的入渗特征表现为林地最优,草地其次,耕地最差,但耕地在该土层的入渗过程速率变化较大、趋于稳定的过程更为缓慢。可能与不同土地利用方式的植物根系分布深度有关,其中林地由于生长着乔木树种,其根系分布往往超过40 cm土层深度;草地主要生长着草本植物,其根系一般分布在40 cm土层之内;耕地生长的农作物的根系主要分布在20 cm土层之内,超过20 cm的下层土壤分布的根系则很少^[25]。

本研究表明,消落带土壤入渗特征与土壤体积质量、总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量等物理性质呈显著或极显著相关,说明土壤入渗特征受到这些土壤物理性质影响,是因为土壤入渗本质是土壤水分在重力作用下不断向土壤深层流动的过程,而土壤非毛管孔隙是土壤重力水的主要通道,并且土壤孔隙度与土壤体积质量息息相关^[26]。同时,本研究发现,消落带土壤入渗特征还与土壤pH、有机质、全氮、全磷等化学性质呈显著或极显著相关。赵洋毅等^[7]研究也表明,决定土壤肥力的全氮和土

壤pH对土壤渗透性的影响比较显著,因为一般土壤pH越大,土壤的交换性钠离子含量也越大,从而使土壤变得黏重团结,降低土壤入渗;而土壤有机质是土壤团聚体形成的重要胶结剂^[27],有机质含量越高,土壤的孔隙状况和结构越好,有利于增加土壤的入渗。此外,消落带土壤入渗特征总体与土层深度、土地利用方式呈显著或极显著负相关,说明消落带土壤入渗特征还受到土层深度与土地利用方式影响,且土壤入渗特征随土层加深而减小。李建兴等^[28]和RASOOL等^[29]研究也发现,土层深度的变化显著影响土壤入渗特征,是因为随着土层深度的增加,土壤受到人为扰动和根系作用的影响逐渐变小,且深层土壤还受到表层土壤挤压而孔隙变小,从而降低土壤入渗^[30-31],而土地利用方式变化直接改变土地覆盖特征及土壤理化性质^[32-33],尤其是地表覆被及植物根系分布的变化,进而影响到土壤入渗。

冗余分析进一步表明,土壤有机质、土壤pH和土地利用方式是影响消落带土壤入渗特征的主要因素,说明这些因素对消落带土壤入渗性能起到决定性作用,其中土壤有机质、土壤pH是反映土壤性质的基础性指标,而土地利用方式代表人为活动强度,也凸显土地合理利用与管理在消落带土壤侵蚀预防治理中的重要性。然而,本研究未发现,消落带土壤入渗特征与表征消落带水位涨落变化的水位梯度显著相关,可能是因为本研究试验设计的消落带仅分<170、170~175 m 2个高程梯度,且高程170~175 m消落带所受淹水时间较短,未能充分反映水位涨落变化的影响,因此,未来尚需要进一步细分消落带的不同高程梯度等级,尤其是低海拔消落带典型样地的布设与采样,以明晰水位涨落变化对消落带土壤入渗特征的影响及其贡献,同时还需对消落带不同土地利用方式的土壤入渗影响机理进行深入研究。

4 结论

1) 消落带3种土地利用方式中以草地对各土层的土壤总孔隙状况及持水性能改善作用最大,而各土层的土壤非毛管孔隙度均以林地最优。除土壤体积质量和毛管孔隙度外,消落带其他土壤基本物理性质及渗透特征均随土层加深而减小。

2) 消落带不同土地利用方式的土壤入渗过程可分为快速下降、缓慢下降、趋于稳定3个阶段。土地利用方式对消落带表层土壤入渗特征产生显著影响,其中草地对表层土壤入渗特征改善作用最大,而林地则对下层土壤入渗特征改善作用最大。

3) Kostiakov模型、Philip模型和Horton模型均

能很好拟合消落带各土地利用方式的土壤入渗过程($p < 0.01$),拟合优度大小排序为Philip模型>Horton模型>Kostiakov模型。

4) 总体上消落带土壤入渗特征与土地利用方式、土层深度、土壤体积质量、土壤pH呈显著负相关,与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、饱和持水量、有机质、全氮、全磷呈显著正相关。冗余分析表明,土壤有机质、土壤pH和土地利用方式是影响消落带土壤入渗特征的主要因素。

参考文献:

- [1] YUAN X Z, ZHANG Y W, LIU H, et al. The littoral zone in the Three Gorges Reservoir, China: Challenges and opportunities [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(10): 7092-7102.
- [2] XIAO Y, XIAO Q, XIONG Q L, et al. Effects of ecological restoration measures on soil erosion risk in the Three Reservoir area since the 1980s [J]. *Geohealth*, 2020, 4(12): e2020GH000274.
- [3] BAO Y H, HE X B, WEN A B, et al. Dynamic changes of soil erosion in a typical disturbance zone of China's Three Gorges Reservoir [J]. *Catena*, 2018, 169: 128-139.
- [4] 贺秀斌, 鲍玉海. 三峡水库消落带土壤侵蚀与生态重建研究进展 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 160-168.
HE X B, BAO Y H. Research advances on soil erosion and ecological restoration in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(4): 160-168.
- [5] 鲍玉海, 贺秀斌, 钟荣华, 等. 三峡水库消落带植被重建途径及其固土护岸效应 [J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 171-174.
BAO Y H, HE X B, ZHONG R H, et al. Revegetation and its effects on soil reinforcement in the riparian zone of Three-Gorge Reservoir [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 171-174.
- [6] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
SHAO M A, WANG Q J, HUANG M B. *Soil physics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [7] 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.

- [8] 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.
LI J X, HE B H, CHEN Y. Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration[J].Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [9] 张轩铭,戴翠婷,李朝霞,等.三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报, 2022, 36(4):92-98.
ZHANG X M, DAI C T, LI Z X, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors of purple sandstone with different degrees of development in the Three Gorges Reservoir Area[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4):92-98.
- [10] 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.
- [11] 刘目兴,杜文正,张海林.三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究[J].长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 299-306.
LIU M X, DU W Z, ZHANG H L. Research on the soil infiltration capacity of different forest types in the Three Gorges Reservoir Area[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(3):299-306.
- [12] JIANG X J, CHEN C F, ZHU X A, et al. Use of dye infiltration experiments and HYDRUS-3D to interpret preferential flow in soil in a rubber-based agroforestry systems in Xishuangbanna, China [J]. Catena, 2019, 178: 120-131.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:1-105.
Bao S D. Soil agrochemical analysis [M]. 3 rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:1-105.
- [14] 陈超,杨丰,赵丽丽,等.贵州省不同土地利用方式对土壤理化性质及其有效性的影响[J].草地学报, 2014, 22(5):1007-1013.
CHEN C, YANG F, ZHAO L L, et al. Influences of different land use types on soil characteristics and availability in karst area, Guizhou Province[J].Acta Agrestia sinica, 2014, 22(5):1007-1013.
- [15] 井海梦,赵允格,刘姝延,等.黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响[J].农业环境科学学报, 2023, 42(7):1532-1539.
JING H M, ZHAO Y G, LIU S Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil permeability of croplands in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42 (7) : 1532-1539.
- [16] 王檬檬,李钢铁,党宏忠,等.黄土残塬沟壑区苹果园土壤的持水特征[J].中国水土保持科学, 2019, 17(6): 27-33.
WANG M M, LI G T, DANG H Z, et al. Water-holding characteristics of apple orchards in the gully area of the Loess Plateau[J].Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(6):27-33.
- [17] 李志,袁颖丹,胡耀文,等.海拔及旅游干扰对武功山山地草甸土壤渗透性的影响[J].生态学报, 2018, 38(2): 635-645.
LI Z, YUAN Y D, HU Y W, et al. Effects of elevation and tourism disturbance on meadow soil infiltration on Wugong Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(2):635-645.
- [18] JU X N, GAO L, SHE D L, et al. Impacts of the soil pore structure on infiltration characteristics at the profile scale in the red soil region[J].Soil and Tillage Research, 2024, 236:e105922.
- [19] 邓子正,黄明镜,张吴平,等.旱作条件下保护性耕作对土壤结构和体积质量影响试验研究[J].土壤通报, 2023, 54(1):46-55.
DENG Z Z, HUANG M J, ZHANG W P, et al. Effects of conservation tillage on soil structure and bulk density under dryland[J].Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(1):46-55.
- [20] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报, 2019, 33(5):105-113.
ZHAO F W, WANG N, SU X M, et al. Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in loess hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5):105-113.
- [21] LIU Y, CUI Z, HUANG Z, et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China[J].Catena, 2019, 182:e104147.
- [22] 王轶浩,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): 63-70.
WANG Y H, WANG Y H. 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):63-70.
- [23] SHI S L, ZHAO F Y, REN X M, et al. Soil infiltration properties are affected by typical plant communities in a

- semi-arid desert grassland in China [J]. *Water*, 2022, 14(20):e3301.
- [24] 易兴松,戴全厚,严友进,等.西南喀斯特地区耕地撂荒生态环境效应研究进展[J].*生态学报*,2023,43(3):925-936.
YI X S, DAI Q H, YAN Y J, et al. Research progress on the ecological environment effect of farmland abandonment in karst areas of southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(3):925-936.
- [25] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].*生态学报*,2014,34(8):1975-1983.
CHENG L P, LIU W Z, LI Z. Soil water in deep layers under different land use patterns on the loess tableland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8):1975-1983.
- [26] 周宏.干旱区包气带土壤水分运移能量关系及驱动力研究评述[J].*生态学报*,2019,39(18):6586-6597.
ZHOU H. Review of studies on the relationship between soil water movement and energy and their driving forces in the vadose zone of arid regions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(18):6586-6597.
- [27] EVINER V T, HAWKES C V. Embracing variability in the application of plant-soil interactions to the restoration of communities and ecosystems [J]. *Restoration Ecology*, 2008, 16(4):713-729.
- [28] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].*应用生态学报*,2013,24(3):725-731.
LI J X, HE B H, MEI X M, et al. Effects of different planting modes on the soil permeability of sloping farmlands in purple soil area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3):725-731.
- [29] RASOOL T, DAR A Q, WANI M A. Comparison of infiltration model parameter estimation techniques under different land use/land covers [J]. *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 2021, 12 (4) : 448-476.
- [30] 张梦月,张钊玮,杨毅轩,等.黄土塬区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(5):192-202.
ZHANG M Y, ZHANG Z W, YANG Y X, et al. Effects of different land use patterns on soil physicochemical properties in the Loess Plateau Area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5):192-202.
- [31] 杨浩,王文龙,娄义宝,等.黄土塬沟壑区典型植被沟头土壤渗透性和抗剪强度特征[J].*应用生态学报*,2023,34(7):1862-1870.
YANG H, WANG W L, LOU Y B, et al. Infiltration and shear strength characteristics of gully heads soil of typical vegetation on the gullied Loess Plateau, northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7):1862-1870.
- [32] 郎燕,刘宁,刘世荣.气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究[J].*生态学报*,2021,41(13):5106-5117.
LANG Y, LIU N, LIU S R. Changes in soil erosion and its driving factors under climate change and land use scenarios in Sichuan-Yunnan-Loess Plateau region and the southern hilly mountain belt, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13):5106-5117.
- [33] 张百婷,李宗省,冯起,等.基于土地利用变化的祁连山地区生态系统服务价值演化分析[J].*生态学报*,2024,44(10):4187-4202.
ZHANG B T, LI Z X, FENG Q, et al. Evolution of ecosystem service values in Qilian Mountains based on land-use change from 1990 to 2020 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(10):4187-4202.