

南方红壤区土地利用方式对土壤水分入渗特性的影响

冯凯悦^{1,2}, 李进林², 韦杰¹, 黄平², 朱绪超³, 高磊³, 马雪莹⁴

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 211135; 4. 重庆市规划和自然资源调查监测院, 重庆 401147)

摘要: [目的] 研究红壤区土地利用方式对土壤水分入渗性能的影响, 为该区水土保持与土地利用规划提供科学依据。[方法] 使用双渗环测定了林地、灌丛、草地、花生地、玉米地和裸地等 6 种土地利用方式的土壤的水分入渗特征, 并运用 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型和 Mezenchev 等 4 种模型模拟水分入渗过程, 比较不同土地利用方式下的土壤水分入渗特征差异, 探讨土壤物理性质对土壤入渗性能的影响。[结果] ①红壤的初始、平均及稳定水分入渗速率分别为 3.50~41.93 mm/min, 2.03~28.37 mm/min, 1.28~17.15 mm/min, 这些水分入渗特征值在不同土地利用方式下的差异均表现为: 林地>裸地>灌丛>玉米地>草地>花生地; ②Kostiakov 模型模拟红壤入渗过程的效果最佳, 在 6 种土地利用方式中的 R^2 为 0.91~0.99, 而 Horton 和 Mezenchev 模型分别适合模拟草地和花生地土壤的水分入渗过程, R^2 分别为 0.93, 0.91, Philip 模型模拟红壤水分入渗过程的效果较差; ③影响红壤水分入渗特征值的物理因素包括非毛管孔隙度、自然含水率和黏粒含量, 贡献度分别为 25.80%~32.30%, 19.20%~21.20% 和 16.30%~20.70%。[结论] 不同土地利用方式下的红壤水分入渗性能存在差异, 其中, 林地土壤的入渗性能较好。建议在水土保持过程中实施农林复合措施, 改善红壤区农用地土壤的水分入渗性能。

关键词: 红壤; 水分入渗; 土地利用方式; 入渗模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0135-09

中图分类号: S152.7

文献参数: 冯凯悦, 李进林, 韦杰, 等. 南方红壤区土地利用方式对土壤水分入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 135-143. Feng Kaiyue, Li Jinlin, Wei Jie, et al. Effects of land use patterns on water infiltration in red soil region of southern China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 135-143. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.029; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.029.

Effects of land use patterns on water infiltration in red soil region of southern China

Feng Kaiyue^{1,2}, Li Jinlin², Wei Jie¹, Huang Ping², Zhu Xuchao³, Gao Lei³, Ma Xueying⁴

(1.School of Geography and Tourism Sciences, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2.Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China; 3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 211135, China; 4.Chongqing Institute of Surveying and Monitoring for Planning and Natural Resources, Chongqing 401147, China)

Abstract: [Objective] The impacts of the land use patterns on the water infiltration in red soil regions were studied to provide a scientific basis for soil and water conservation as well as land use planning. [Methods] A double-ring infiltrometer was used to quantify the water infiltration characteristics in red soils under six land use patterns: forest land, shrubland, grassland, peanut cropland, maize cropland, and bare land. Four infiltration models (Philip, Kostiakov, Horton, and Mezenchev) were used to simulate infiltration process. The differences in the water infiltration characteristics were compared among the land use types, and the influence of the physical properties of the soil on the water infiltration capacity was systematically investigated. [Results] ① The initial, average, and steady infiltration rates of the red soil ranged from 3.50 to 41.93, 2.03 to 28.37, and 1.28 to

收稿日期: 2025-05-12

修回日期: 2025-06-26

采用日期: 2025-06-27

资助项目: 中国科学院前瞻战略科技先导专项(A类)子课题“红壤结构改良与季节性干旱适应原理及技术”(XDA0440202); 国家自然科学基金项目“土壤结构对红壤农田小流域水文过程影响的模拟研究”(42077012), “土壤结构调节红壤干热复合灾害的潜能与机制”(42477323)。

第一作者: 冯凯悦(1999—), 女(汉族), 山西省运城市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: feng_kirakira@163.com。

通信作者: 李进林(1991—), 男(汉族), 重庆市人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。Email: chinlin_lee@sina.com。

17.15 mm/min, respectively. The water infiltration capacity decreased as follows: forest land > bare land > shrubland > maize cropland > grassland > peanut cropland; ② The Kostiakov model most accurately simulated the red soil infiltration processes among the four models, with an R^2 ranging from 0.91 to 0.99 for all land use pattern. In contrast, the Horton and Mezenzev models were particularly accurate in modeling the water infiltration of grandland and peanut cropland, with R^2 values of 0.93 and 0.91, respectively. The accuracy of the Philip model in modeling the water infiltration was relatively low. ③ The key physical factors influencing the water infiltration were the noncapillary porosity, natural moisture content, and clay content, which contributed 25.80% to 32.30%, 19.20% to 21.20%, and 16.30% to 20.70% of the total water infiltration capacity. [Conclusion] The water infiltration capacity of red soils varies widely across different land use pattern, with that under forest land being the highest. Certain agroforestry practices should be implemented to increase the water infiltration capacity of agricultural red soils to conserve soil and water.

Keywords: red soil; water infiltration; land use pattern; infiltration modeling

土壤水分入渗性能是降雨或灌溉水再分配的重要过程,也是评估土壤抗蚀性和保水性的关键指标,对地表径流调控、土壤侵蚀防治及生态环境建设具有重要意义^[1]。影响土壤水分入渗性能的因素复杂,包括土壤理化特性、区域环境条件、地表覆被状况和土地利用方式等。红壤作为中国南方的重要土壤资源,其覆盖面积占全国陆地总面积的21.2%^[2]。然而,由于红壤结构稳定性差、水分调蓄能力弱,红壤区成为中国土壤侵蚀较为严重的区域之一,平均侵蚀模数可达3 000 t/(km²·a)^[3]。

红壤是铁铝氧化物含量较高的壤质黏土,其较高的比表面积和表面电荷量提升了土壤颗粒对水分的吸持能力,从而导致水分入渗速率和渗透性能降低^[4]。红壤的细颗粒含量高、铁铝氧化物含量丰富,差异性团聚作用使得土体孔隙的孔径分布不均,微细孔隙比例高,而非毛管孔隙少,这导致重力水无法快速下渗,而是依赖毛管作用缓慢渗透,从而降低了水分入渗速率^[5-6]。土壤有机质可通过促进团聚体形成而提高孔隙度,进而增强土壤水分入渗及持水性能。然而,红壤有机质含量相对较低、胶结作用弱、结构稳定性较差,团聚体易遭到降雨击溅和径流冲刷作用的破坏,并形成致密的板结层,进而阻碍水分入渗^[7-8]。中国南方红壤区降雨历时短、强度高,团聚体被降雨击溅分散为细颗粒后堵塞土体孔隙,进而促进地表隔水层发育,这将改变土壤水分入渗过程^[9]。坡面尺度内,红壤入渗规律还受地形分异的影响,陡坡区表层土壤在强降雨过程中快速饱和,而缓坡地带的水分入渗衰减过程因侧向再分配而延缓^[10]。土地利用方式、地表覆被状况、田间管理措施都是人为活动的具体表现,这些因素对土壤水分入渗过程的影响较为复杂^[11-12]。研究^[13]表明,即便是同种类型的土壤,人为活动既可能改善土壤水分入渗性能,也可能降低土壤水分入渗性能。通常情况下,

深耕深松、秸秆还田、施用有机肥等措施通过改变土壤结构对水分入渗性能具有积极作用^[12,14]。

中国南方红壤区幅员辽阔,且具有丰富的水热资源和良好的区位优势,提高该地区后备土地的生产能力是保障国家粮食安全的重要途径。探明不同土地利用方式下的红壤水分入渗性能是土地资源利用与管理的基础。然而,已有研究多侧重于单一土地利用方式下红壤入渗特性的探讨,对多种典型土地利用方式下红壤入渗特性及其差异关注较少。因此,本文以中国南方典型红壤区为对象,研究林地、灌丛、花生地、草地、玉米地和裸地的土壤入渗性能,研究结果可为区域水土保持治理与土地利用规划提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于江西省吉安市吉州区兴桥镇的中国科学院南京土壤研究所红壤生态试验站井冈山基地内。该基地处于南方典型红壤丘陵区,区内平均海拔为84.5 m。试验地气候类型属于亚热带季风气候,年均气温18.3℃,无霜期280 d,年均降水量1 462 mm,降水主要集中在4—6月的梅雨季节。年均蒸发量为1 016 mm,其中,7—9月高温期的蒸发量约占全年蒸发总量的1/2。区域土壤类型是第四纪红层发育的红壤,其养分含量低、抗蚀能力弱、耕作障碍明显。区域内土地利用类型多,包括水田、耕地、园地、林地等,地形坡度在0°~15°。种植的常见农作物是花生(*Arachis hypogaea*)、油菜(*Brassica napus*)和玉米(*Zea mays*)。

1.2 样地选择、样品采集与原位试验

于2024年8月在试验基地内选择林地,灌丛,草地,花生地,玉米地和裸地共6种不同土地利用方式的样地,各样地的基本情况详见表1。每年的8月处于南方红壤区的雨季之中,其间的作物生长逐渐进入

成熟期,耕作活动对地表的扰动随之减少,土壤结构和植被覆盖趋于稳定。因此,这期间适合开展土壤入渗原位试验。土壤水分入渗过程采用双环入渗仪测定,内环和外环的直径分别为15,30 cm,环高为17.7 cm。试验前在不扰动原状土壤结构的前提下,移除地表枯落物和较大石块。试验装置布设时,先将双环缓慢地打入土体内5 cm,再用导管连通相对应的马氏瓶,然后通过马氏瓶向内外环同时注水,水头高度保持在5 cm^[15]。土壤水分入渗试验总时长为90 min,在前5 min内每隔1 min记录1次水面下降深度,在6~20 min内每隔3 min记录1次,在21~90 min内每隔5 min记录1次。

在每个样点周围采集土壤样品。采样前先去除土

壤表面植物残体,然后在每个采样点用容积为100 cm³的取土环刀采集环刀样,用保鲜膜密封后带回实验室测定容重、自然含水率、孔隙度、持水量等基本物理指标。此外,每点另采集1 kg散土样品,经风干、研磨并过筛后测定土壤颗粒组成和养分特征。

土壤容重、自然含水率、孔隙度和持水量采用“环刀法+烘干法”测量,土壤颗粒组成采用马尔文MS 2000激光粒度仪(英国马尔文仪器有限公司)测定^[1],总有机碳(TOC)和总氮(TN)使用德国Elementar公司生产的Vario MACRO Cube元素分析仪测试^[16],全磷(TP)依据国家标准《土壤总磷的测定 碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ632—2011)》,使用浓硫酸与高氯酸混合消解土样后,通过钼锑抗比色法测定。

表1 采样点的海拔高度、坡度和植被覆盖特征

Table 1 Elevation, slope, and vegetation cover characteristics of sampling sites

土地利用方式	海拔高度/m	坡度/(°)	主要植被类型
林地	88	0	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)
灌丛	85	2~4	胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)、金樱子(<i>Rosa laevigata</i>)、马唐(<i>Digitaria sanguinalis</i>)
草地	83	0	金色狗尾草(<i>Setaria pumila</i>)、白茅(<i>Imperata cylindrica</i>)
花生地	81	2~8	花生
玉米地	77	0	玉米
裸地	77	0	无植被

1.3 土壤入渗过程模拟

本文采用Philip模型、Horton模型、Kostiakov模型和Mezencev模型模拟不同土地利用方式下的红壤水分入渗过程^[1],其表达式为:

(1) Philip模型。

$$i = \frac{1}{2} S t^{-0.5} + A \quad (1)$$

式中: i 为土壤入渗速率(mm/min); S 为吸湿率; t 为入渗时间(min); A 为与入渗特性有关的拟合参数(mm/min)。

(2) Horton模型。

$$i = i_e + (i_0 - i_e) e^{-kt} \quad (2)$$

式中: i 为土壤入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); i_e 为稳定入渗速率(mm/min); i_0 为初始入渗速率(mm/min); k 为经验参数;指数项 e^{-kt} 表征入渗速率在入渗过程中随时间的指数衰减趋势,与土壤结构调整和孔隙分布有关。

(3) Kostiakov模型。

$$i = a t^{-b} \quad (3)$$

式中: a, b 为拟合参数。

(4) Mezencev模型。

$$i = i_e + a t^{-b} \quad (4)$$

式中: i_e 表示稳定入渗速率(mm/min); a, b 为拟合参数。

本研究采用决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE)评估模型的预测效果,其中,RMSE的计算公式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_{mi} - I_{pi})^2}{n}} \quad (5)$$

式中: I_{mi} 为第 i 次试验的实测值; I_{pi} 为第 i 次模型的预测值; n 为试验总次数。

1.4 数据分析

本研究运用Microsoft Excel 16.0初步整理各类试验数据。运用SPSS 26.0进行单因素方差分析(ANOVA)比较不同土地利用方式下土壤理化性质和入渗指标的差异,Pearson相关分析研究土壤水分入渗特征值与土壤理化性质间的关系,运用决策模型树(GBDT)量化土壤理化性质对入渗性能的贡献度。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下的红壤物理性质

红壤容重为1.22~1.48 g/cm³,均值为1.32 g/cm³。相比而言,红壤容重随土地利用方式不同而存在显著差异,其中,玉米地均值最高,为1.48 g/cm³,显著高于林地,灌丛,花生地和裸地的1.22,1.23,1.30,1.34 g/cm³ ($p < 0.05$) (表2)。土壤自然含水率最高

也是玉米地,为 22.94%,这除了与草地的 19.70% 接近外,显著高于其余 4 种土地利用方式下的土壤自然含水率($p < 0.05$)。然而,玉米地土壤的饱和持水量最低,为 27.21%,显著低于其他 5 种土地利用方式下的土壤($p < 0.05$)。就田间持水量而言,玉米地与除花生地外的其余土地利用方式均无显著性差异。红壤总孔隙度为 40.09%~51.63%,其中,花生地土壤的总孔隙度最高,为 51.63%,这显著高于玉米地土壤($p < 0.05$)。然而,裸地土壤的毛管孔隙度最低,仅为 36.78%。玉米地土壤的总孔隙度和非毛管孔隙度均最低,分别为 40.09% 和 1.51%,林地土壤的非毛管孔隙度最高,为 13.13%。红壤的颗粒以粉粒为主,体积

百分比为 78.20%~81.69%,均值为 80.46%,但在不同土地利用方式间无显著差异($p > 0.05$)。红壤的黏粒和砂粒含量较低,均值分别为 14.43% 和 5.48%。与其他土地利用方式相比,灌丛土壤的黏粒含量最高,为 16.32%,这显著高于草地土壤($p < 0.05$),但与其余 4 种土地利用方式下的土壤无显著性差异($p > 0.05$)。总体来看,红壤的 TOC 和 TP 含量相对较高,而 TN 含量相对较低。其中,林地土壤的 TOC 与 TN 含量最高,分别为 10.29 和 1.15 g/kg,这比其他土地利用方式土壤高 2~3 倍。TOC 与 TN 含量最低的均为裸地土壤,分别为 3.27 和 0.67 g/kg,草地土壤的 TP 含量最高,为 4.48 g/kg。

表 2 试验地不同土地利用方式下的红壤理化性质

Table 2 Soil physical and chemical properties under different land use patterns in experimental sites

指标	土地利用方式					
	林地	灌丛	草地	花生地	玉米地	裸地
容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.22±0.04 ^b	1.23±0.03 ^b	1.35±0.03 ^{ab}	1.30±0.05 ^b	1.48±0.11 ^a	1.34±0.10 ^b
自然含水率/%	15.41±2.54 ^{bc}	17.27±0.89 ^b	19.70±2.04 ^{ab}	12.90±2.04 ^c	22.94±2.31 ^a	15.86±2.63 ^{bc}
饱和持水量/%	41.40±2.72 ^a	36.89±3.05 ^{ab}	35.60±4.05 ^b	39.83±0.79 ^{ab}	27.21±3.44 ^c	35.98±0.67 ^{ab}
田间持水量/%	15.24±2.68 ^{ab}	16.81±0.92 ^{ab}	15.42±0.57 ^{ab}	17.82±0.35 ^a	13.27±3.02 ^b	13.88±2.51 ^{ab}
总孔隙度/%	50.62±4.66 ^a	45.34±3.09 ^{ab}	48.15±4.57 ^a	51.63±1.67 ^a	40.09±1.98 ^b	48.19±3.83 ^a
毛管孔隙度/%	37.49±4.32 ^{ab}	38.23±2.00 ^{ab}	44.55±5.04 ^a	41.42±4.02 ^{ab}	38.89±1.18 ^{ab}	36.78±1.82 ^b
非毛管孔隙度/%	13.13±1.81 ^a	7.12±4.93 ^{bc}	3.60±0.68 ^{cd}	10.22±2.36 ^{ab}	1.51±0.95 ^d	11.41±3.24 ^{ab}
黏粒/%	14.59±2.37 ^{ab}	16.32±0.73 ^a	13.44±1.73 ^b	13.72±0.31 ^{ab}	13.56±0.28 ^{ab}	14.95±1.08 ^{ab}
粉粒/%	79.19±3.49 ^a	81.51±0.77 ^a	78.20±4.55 ^a	80.88±2.42 ^a	81.30±2.51 ^a	81.69±0.49 ^a
砂粒/%	6.21±5.82 ^a	2.19±0.99 ^a	8.36±6.26 ^a	5.37±2.68 ^a	5.14±2.24 ^a	3.90±1.81 ^a
TOC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10.29±1.27 ^a	3.42±0.23 ^c	4.12±0.04 ^c	5.68±0.04 ^b	4.43±0.68 ^c	3.27±0.04 ^c
TP/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	4.07±0.17 ^{ab}	4.22±0.21 ^{ab}	4.48±0.14 ^a	4.04±0.25 ^b	4.13±0.08 ^{ab}	4.35±0.25 ^{ab}
TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1.15±0.09 ^a	0.71±0.04 ^d	0.86±0.04 ^{bc}	0.88±0.07 ^b	0.74±0.07 ^{cd}	0.67±0.06 ^d

注:表中数据均为平均值±标准误。同行不同小写字母表示不同土地利用方式下差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 不同土地利用方式的红壤水分入渗特征

不同土地利用方式下的红壤水分入渗过程在整体趋势上具有相似性,入渗速率均在第 1 分钟内达到峰值,随后则快速衰减(图 1)。初始入渗阶段,林地土壤的初始入渗速率最高,为 41.93 mm/min,这显著高于其余土地利用方式下的土壤,达到草地和花生地土壤的 10 倍以上($p < 0.05$)。土壤水分入渗速率在前 8 min 内快速下降,其中,在林地土壤中下降最快,第 2 min 的降幅达 20.91%。初始入渗阶段的入渗速率始终表现为:林地>裸地>灌丛>玉米地>草地>花生地,但不同土地利用方式间的差异随入渗过程而逐渐缩小,直至稳定入渗阶段,对应的入渗速率分别为 17.15, 5.92, 4.99, 4.89, 2.12, 1.28 mm/min。林地土壤的稳定入渗速率、平均入渗速率、饱和导水率和累积入渗量也均显著高于其他土地利用方式下的土壤($p < 0.05$)(表 3),依次为:林地>裸地>灌丛>玉米地>草地>花生地,其中,除灌丛与玉米地外,其

余各土地利用方式间的稳定入渗速率均存在显著性差异($p < 0.05$)(表 3)。相比而言,花生地土壤的入渗速率达到稳定入渗状态的用时较短,在 70 min 时达到 1.28 mm/min,随后基本保持不变。不同土地利用方式下的土壤水分累积入渗量存在显著差异($p < 0.05$),其中,最高的是林地,为 1 464 mm。综上分析,不同土地利用方式下的土壤初始入渗速率>平均入渗速率>稳定入渗速率>饱和导水率。

2.3 红壤水分入渗性能与土壤理化性质的关系

相关性分析表明,红壤水分入渗特征值(初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、饱和导水率、累积入渗量)与 TOC 含量、TN 含量、非毛管孔隙度、饱和持水量、黏粒含量及总孔隙度均呈正相关(图 2)。其中,入渗特征值与 TOC, TN 含量和非毛管孔隙度呈显著正相关($p < 0.01$ 或 $p < 0.05$),与 TOC 含量呈高度相关,相关系数为 0.76~0.80,与 TN 含量和非毛管孔隙度呈中度相关,相关系数分别为 0.60~0.66 和

0.48~0.52,与黏粒和总孔隙度呈低度相关,相关系数分别为0.17~0.22和0.15~0.16。红壤水分入渗特征值与毛管孔隙度、容重、TP含量、田间持水量、自然含水率、粉粒含量和砂粒含量则呈负相关,但均未通过统计学的显著性检验。

贡献度分析结果表明,红壤非毛管孔隙度、容重、自然含水率和黏粒含量是影响初始入渗速率的主要物理因素,累积贡献度达84%(图3)。红壤非毛管孔隙度、自然含水率、黏粒及饱和持水量是影响稳定入渗速率、平均入渗速率、饱和导水率和累积入渗量的主要物

理因素,贡献度分别为25.80%~32.30%,19.20%~21.20%,16.30%~20.70%和13.40%~16.00%。相比而言,非毛管孔隙度对这些入渗特征值的累积总贡献度最高,为141.30%,其中,对累积入渗量影响最大,贡献度达32.30%。

红壤自然含水率对各入渗特征值的贡献大致相当,均值为20.00%。红壤田间持水量、总孔隙度和毛管孔隙度对入渗特征值的影响相对较弱,贡献度均小于8.00%。综合来看,红壤非毛管孔隙度是影响入渗性能的主要物理因素,这与相关性分析结果一致。

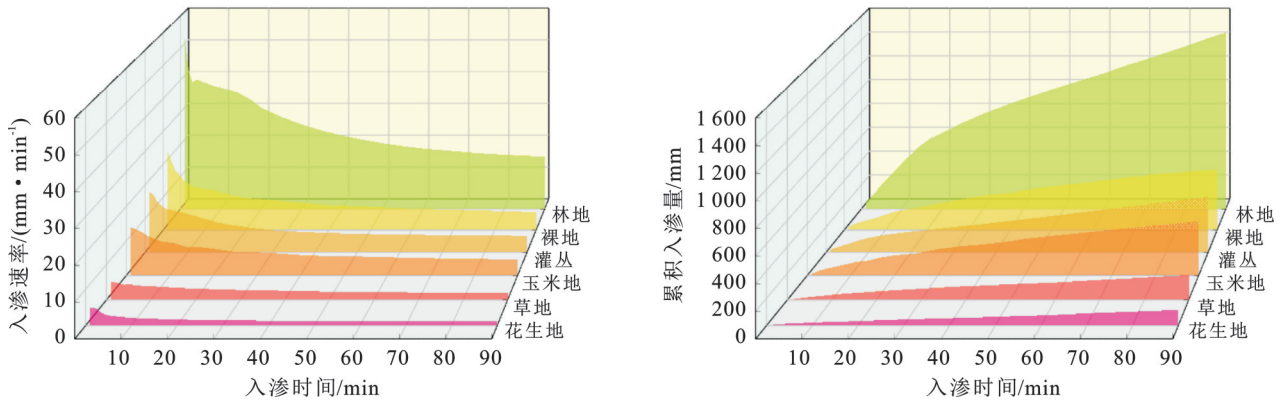


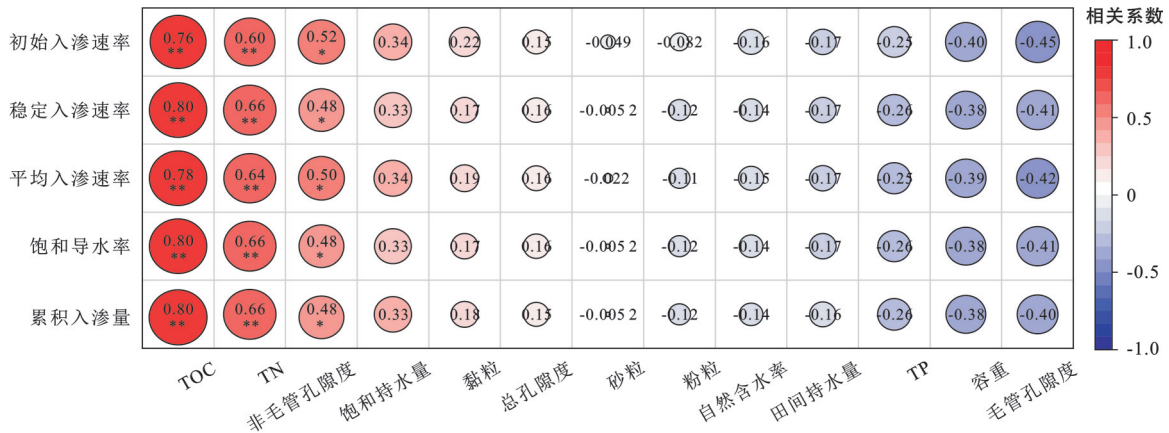
图1 试验地不同土地利用方式下红壤水分入渗过程

Fig.1 Red soil water infiltration characteristics of different land use patterns in experimental sites

表3 试验地不同土地利用方式下红壤的水分入渗特征值

Table 3 Red soil water infiltration characteristics indicators under different land use patterns in experimental sites

土地利用方式	初始入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	90 min 累积入渗量/ mm
林地	41.93±6.08 ^a	17.15±0.73 ^a	28.37±10.85 ^a	4.62±0.18 ^a	1 464.00±44.91 ^a
灌丛	14.19±2.56 ^{bc}	4.99±0.11 ^c	8.50±4.16 ^b	1.34±0.03 ^c	432.03±10.76 ^c
草地	4.45±0.46 ^d	2.12±0.04 ^d	3.10±1.00 ^c	0.57±0.01 ^d	186.00±6.53 ^c
花生地	3.50±1.19 ^d	1.28±0.01 ^e	2.03±1.16 ^c	0.34±0.00 ^e	129.50±14.50 ^f
玉米地	11.91±1.78 ^c	4.89±0.18 ^c	7.71±3.07 ^b	1.32±0.04 ^c	420.00±13.88 ^d
裸地	17.15±4.24 ^b	5.92±0.33 ^b	10.36±5.17 ^b	1.59±0.08 ^b	493.00±9.80 ^b



注:*表示 $p \leq 0.05$ 水平显著相关,**表示 $p \leq 0.01$ 水平显著相关。

图2 红壤水分入渗特征值与其理化性质的关系

Fig.2 Relationship between water infiltration characteristics and physicochemical properties of red soil

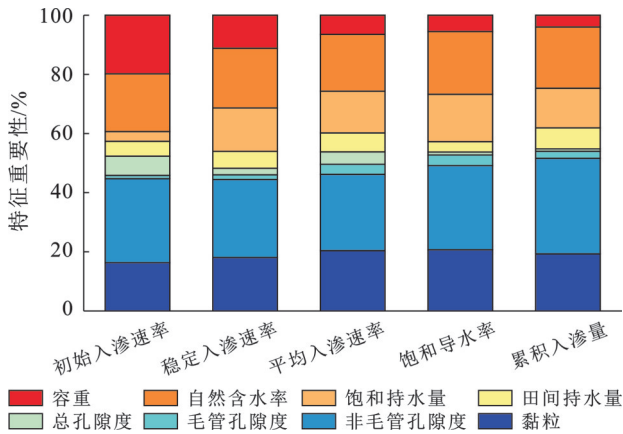


图3 红壤理化因子对水分入渗参数的特征重要性分析
Fig.3 Importance analysis of red soil physicochemical factor features on water infiltration parameters

2.4 不同土地利用方式下的红壤水分入渗过程模拟

Philip 模型模拟结果表明,表征稳定入渗速率的 A 值和吸湿率的 S 值分别为 1.52~23.19, 2.88~37.85 (表4)。相比而言,林地土壤的 A 值和 S 值均较高,说明林地土壤的入渗性能比其他土地利用方式下的土壤更好,草地和花生地的 A 值与 S 值均较低,即入渗性能较差,这与实测结果一致。Kostiakov 模型中的 a 值表征初始入渗速率,其大小在不同土地利用方式下依次为:林地>裸地>灌丛>玉米地>草地>花生地,这与实测入渗速率变化规律一致。Kostiakov 模型中的 b 值表征水分入渗速率随入渗过程的变化程度,其大小为 0.21~0.36,在不同土地利用方式下依次为:花生地>裸地>灌丛>玉米地>林地>草地,这说明花生地土壤的水分入渗速率衰减最快,林地和草地土壤的水分衰减过程较慢。Mezencev 模型与 Kostiakov 模型的参数表征含义一致,两者 a 值与 b 值在不同土地利用方式下的差异相似,相比而言,前者 a 值更低,而 b 值更高,这说明其模拟的入渗速率衰减更快。Horton 模型模拟结果表明, k 值为 0.56~2.06,其中,林地土壤的 k 值最大,即入渗速率衰减最快。Horton 模型中的 e 值为 1.02~1.08,且在不同土地利用方式下的差异较小。综合各模拟的结果来看,林地土壤的入渗能力最强,裸地,灌丛和玉米地土壤次之,草地和花生地土壤较差。总体来看,Philip 模型模拟的精度较低, R^2 和 RMSE 分别为 0.49~0.62 和 0.70~7.05,相比而言,Philip 模型对草地和花生地土壤的模拟效果较好。从不同入渗阶段来看,Philip 模型对快速入渗阶段的模拟效果较好。Horton 模型的 R^2 值范围和均值分别为 0.76~0.93, 0.87。相比而言, Horton 模型对花生地土壤的模拟精度较低。Kostiakov 模型对不同土地利用方式下的红壤水分入

渗过程的模拟效果较好, R^2 值为 0.91~0.99, RMSE 值较低,模拟结果与实测结果接近(图4)。Mezencev 模型的 R^2 值范围和均值分别为 0.82~0.93, 0.87, 且 RMSE 值变异弱,但模拟结果均大于实测值。相比而言, Mezencev 模型的模拟精度仍低于 Kostiakov 模型。相比之下,采用 Kostiakov 模型模拟不同土地利用方式下红壤水分入渗过程的效果均较好,而 Horton 模型和 Mezencev 模型适合用于模拟草地和花生地土壤水分入渗过程, Philip 模型模拟不同土地利用方式下红壤水分入渗过程的效果均较差。这可能是因为 Kostiakov 模型在数学形式上表现为入渗速率随时间的指数递减关系,更贴合红壤入渗速率在初始阶段变化较快、随后减缓并趋于稳定的非线性变化过程。红壤的大孔隙比例高,重力作用是水分在初始阶段快速入渗的主要原因。Philip 模型在模拟土壤毛管力主导的初始阶段入渗速率变化时具有优势,这可能是其在模拟红壤水分入渗过程效果较差的主要原因。

表4 4种水分入渗模型的参数拟合结果与精度评估
Table 4 Parameter fitting results and model accuracy assessment of four water infiltration models

模型	参数	土地利用方式					
		林地	灌丛	草地	花生地	玉米地	裸地
Philip 模型	A	23.19	6.72	2.71	1.52	6.46	7.89
	S	37.85	13.01	2.88	3.72	9.11	18.08
	R^2	0.56	0.55	0.49	0.58	0.52	0.62
	RMSE	7.05	2.73	0.70	0.74	2.09	3.13
Horton 模型	e	1.02	1.04	1.02	1.08	1.08	1.03
	k	2.06	1.32	2.01	0.83	0.56	1.59
	R^2	0.89	0.90	0.93	0.76	0.91	0.85
	RMSE	3.42	1.28	0.25	0.54	0.87	1.91
Kostiakov 模型	a	56.21	20.02	5.67	5.42	15.91	25.19
	b	0.24	0.31	0.21	0.36	0.25	0.32
	R^2	0.91	0.96	0.94	0.96	0.96	0.99
	RMSE	3.19	0.76	0.24	0.23	0.61	0.45
Mezencev 模型	a	40.71	15.69	3.68	4.49	11.48	20.49
	b	0.47	0.56	0.48	0.70	0.51	0.58
	R^2	0.82	0.88	0.82	0.91	0.86	0.93
	RMSE	4.40	1.39	0.40	0.34	1.11	1.28

3 讨论

3.1 红壤理化性质对入渗特性的影响

土壤理化性质是水分入渗性能的主要影响因素。本研究发现,红壤的水分入渗速率主要受非毛管孔隙度、容重和自然含水率的影响,这与吕德鹏

等^[17]的研究结果相似。其中,非毛管孔隙是孔径 $> 0.1 \text{ mm}$ 的大孔隙,也是优先流的路径,对土壤水分入渗性能具有决定性作用。本研究结果表明,红壤的初始入渗速率、稳定入渗速率、饱和导水率均与非毛管孔隙度呈显著正相关($p < 0.05$),贡献度分别为 28.40%, 26.40% 和 28.40%。通常情况下,土壤的孔隙结构与其容重密切相关,高容重土壤的颗粒排列紧密,作为优先流路径的土壤大孔隙因此被压缩,初始水分入渗速率也就随容重的增加而下降^[18]。已有研究^[19]表明,红壤容重为 $1.2 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ 时的稳定入渗速率为 $0.1 \sim 3.53 \text{ mm/min}$ 。然而,本研究结果显示,红壤容重为 $1.22 \sim 1.48 \text{ g/cm}^3$ 时的稳定水分入渗速率为 $1.28 \sim 17.15 \text{ mm/min}$ 。这种差异可能与土壤内部结构的均质程度有关,当土壤结构的各向异性越强时,在相同容重下出现大孔隙的可能性越大,土壤水分入渗速率也就越高。理论上,土壤自然含水率表征土壤孔隙的初始填充程度,初始含水率越高,

孔隙的填充率也就越高,其他物理性质相似的情况下,水分入渗速率则越低^[20]。本研究中,红壤的自然含水率为 $12.90\% \sim 22.94\%$,其中,林地土壤的自然含水率为 15.41% ,对应的初始入渗速率和稳定入渗速率分别为 $41.93, 17.15 \text{ mm/min}$,这明显高于红壤重塑土水分入渗的研究结果^[19]。这种差异可能与土壤原始水分的空间分布有关。本研究发现,红壤水分入渗特征值与砂粒含量呈低度负相关,与黏粒含量呈低度正相关(图 2)。这与已有研究存在差异^[21]。这可能与土壤的团聚体分布和剖面土体构型有关,即便是具有相似的土壤颗粒组成,水分入渗性能也可能随结构的不同而存在差异^[22]。本研究还发现,土壤水分入渗特征值与其 TOC 和 TN 含量呈极显著正相关($p < 0.01$),这与已有的研究结果相似^[23]。这是因为有机质是土壤团聚体形成的胶结物质之一,团聚体间形成的孔隙是水分迁移的通道,进而提高了土壤的水分入渗性能^[24]。

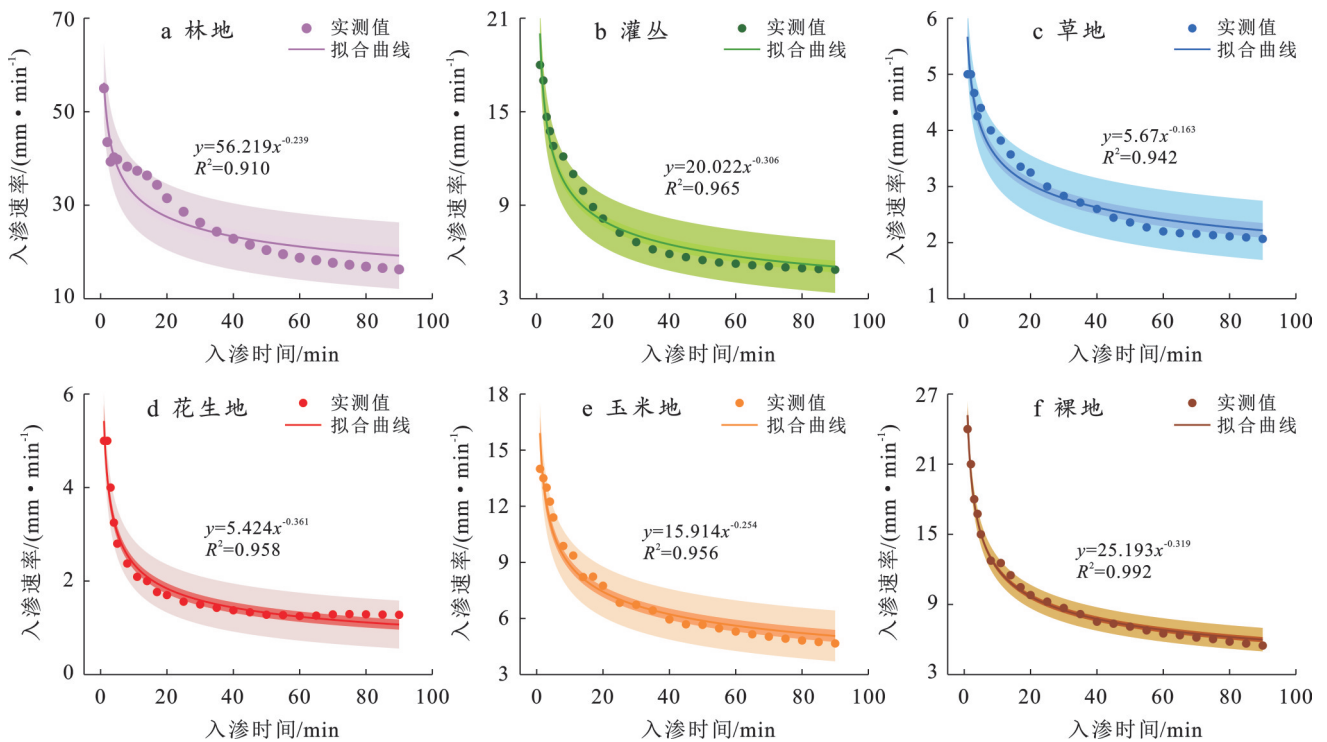


图4 Kostiakov模型拟合结果与实测值对比

Fig.4 Comparison between actual observed values and fitting results with Kostiakov model

3.2 土地利用方式对红壤入渗特性的影响

本研究发现,土地利用方式对红壤入渗性能具有显著影响。总体来看,土壤水分入渗性能依次为:林地 $>$ 裸地 $>$ 灌丛 $>$ 玉米地 $>$ 草地 $>$ 花生地,这与已有的研究^[1,25]结果相似。通常情况下,土壤的水分入渗性能主要由其非毛管孔隙度决定。本研究中的林地马尾松林,这种林木根系生长可形成丰富的大孔隙网络,进而增加非毛管孔隙的比例^[26]。此外,

林下枯落物层为土壤动物提供了良好庇护,这些动物活动改善并维持土壤孔隙的连通性,这也将提高林地土壤的水分入渗性能^[27]。已有研究^[28]表明,土体可在垂直型根系生长过程中形成贯通的根孔,另一方面,土体中的植物根系对水分运移还具有不可忽视的导流作用,因此,这种土壤的水分入渗性能强于生长须根型植物的土壤。本研究也发现了相似的规律,即林地土壤的水分入渗性能显著强于草地,花

生地和玉米地土壤,这正是因为草地、花生地和玉米地中的植被是根系埋深较浅的须根型植物。理论上,农地土壤在人为耕作、有机肥施用等措施的影响下会形成结构疏松的表层,这将有利于土壤水分入渗^[29]。然而,本研究发现,在除林地土壤外的其余土地利用方式中,裸地土壤的水分入渗性能却相对更好,这可能是因为连续高温导致地表产生裂隙,这些裂隙成为水分入渗的主要通道。另一方面,红壤耕地也容易形成致密的板结层,这将导致土壤水分的人渗性能降低^[8]。本研究中,尽管玉米地土壤的容重高于草地土壤,但玉米地土壤的稳定入渗速率反而更高,这可能是因为翻地等耕作活动疏松了深层土壤,进而增加透水性,此外,玉米根系生长形成的根孔也具有促进作用^[30]。总的来说,土地利用方式是通过改变土体构型而影响土壤的水分入渗性能,这与土壤基本理化性质对水分入渗性能的影响机理存在区别。未来的水土保持实践可从景观生态学视角出发,适当种植深根型树种提升土体的非毛管孔隙度,进而增强根区土壤的水分入渗性能,进而达到水土保持的目的。

4 结 论

(1) 红壤水分入渗性能随土地利用方式的不同存在差异,初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、饱和导水率和累积入渗量均表现为:林地>裸地>灌丛>玉米地>草地>花生地,其中,任意两种土地利用方式间的累积入渗量均存在显著性差异($p<0.05$)。

(2) Kostiaikov 模型模拟不同土地利用方式下红壤水分入渗过程的效果均较好,而 Horton 模型和 Mezencev 模型模拟草地和花生地土壤水分入渗过程的效果相对较好,Philip 模型模拟红壤水分入渗过程的效果较差。

(3) 红壤非毛管孔隙度、容重和自然含水率是影响其水分入渗性能的主要物理因素,对初始入渗速率的贡献度分别为 28.40%、19.80% 和 19.50%。红壤水分入渗性能与其 TOC 含量也呈显著的高度正相关($p<0.01$)。

参考文献 (References)

- [1] 苟俊菲,张林星,石海龙,等.喀斯特槽谷区岩层倾向对土壤入渗特性的影响[J].水土保持学报,2023,37(4):83-93.
Gou Junfei, Zhang Linxing, Shi Hailong, et al. Effects of rock strata dip on soil infiltration characteristics in karst trough valley area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(4): 83-93.
- [2] 张平仓,程冬兵.南方坡耕地水土流失过程与调控研究[J].长江科学院院报,2017,34(3):35-39.
Zhang Pingcang, Cheng Dongbing. Process and regulation of soil and water loss of slope farmland in south China [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 35-39.
- [3] 范亚琳,刘贤赵,高磊,等.不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J].土壤学报,2019,56(3):638-649.
Fan Yalin, Liu Xianzhao, Gao Lei, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 638-649.
- [4] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.南方典型土壤坡面产流产沙过程对PAM的响应[J].农业机械学报,2017,48(8):279-287.
Song Yuejun, Huang Yanhe, Yang Jie, et al. Response of runoff and sediment to PAM in typical soil slopes of south China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 279-287.
- [5] 朱晓敏,高磊,董东利,等.土壤孔隙结构对红壤剖面入渗特性的影响[J].土壤学报,2024,57(1):105-112.
Zhu Xiaomin, Gao Lei, Dong Dongli, 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: 105-112.
- [6] 卢佳宇,王辉,欧阳赞.低盐再生水灌溉对亚热带红壤水力特性及微观结构的影响[J].农业工程学报,2022,38(18):103-112.
Lu Jiayu, Wang Hui, Ouyang Zan. Effects of low-salinity reclaimed wastewater irrigation on the hydraulic properties and microstructure of subtropical red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 103-112.
- [7] 赵学强,潘贤章,马海艺,等.中国酸性土壤利用的科学问题与策略[J].土壤学报,2023,60(5):1248-1263.
Zhao Xueqiang, Pan Xianzhang, Ma Haiyi, et al. Scientific issues and strategies of acid soil use in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1248-1263.
- [8] 金慧芳,史东梅,宋鸽,等.红壤坡耕地耕层质量特征与障碍类型划分[J].农业机械学报,2019,50(12):313-321.
Jin Hui Fang, Shi Dongmei, Song Ge, et al. Cultivated-layer quality characteristics and obstacle types division of red soil sloping farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 313-321.
- [9] 朱秀端.不同措施对南方典型坡地利用模式下土壤侵蚀特征的影响[J].福建农业学报,2022,37(9):1230-1236.
Zhu Xiuduan. Functional models for soil erosion prevention on typical slope land in southern China [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37(9): 1230-1236.
- [10] 张悦,赵东风,郑勤民,等.评估温度对土壤水力特性的影响[J].土壤学报,2019,56(3):638-649.
Zhang Yue, Zhao Dongfeng, Zheng Qinmin, et al. Evaluating the effects of temperature on soil hydraulic

- and mechanical properties in the collapsing gully areas of south China [J]. *Catena*, 2022, 218:106549.
- [11] 宋鸽, 史东梅, 朱红业, 等. 不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3):610-622.
Song Ge, Shi Dongmei, Zhu Hongye, et al. Effects of tillage measures on quality of cultivated-layer in red soil slope farmland [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3):610-622.
- [12] 白永会, 查轩, 吴伟成, 等. 不同植被恢复模式对退化花岗岩红壤渗透性和持水量的影响[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(2):9-15.
Bai Yonghui, Zha Xuan, Wu Weicheng, et al. Effects of different vegetation restoration types on permeability and water holding capacity of degraded granite red soil [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(2):9-15.
- [13] Peng Youliang, Fei Liangjun, Jie Feilong, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil infiltration, water distribution, and leaching loss under muddy water irrigation conditions [J]. *Agronomy*, 2023, 13(8):2014.
- [14] 白力鑫, 何丙辉, 李天阳, 等. 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1):31-39.
Bai Lixin, He Binghui, Li Tianyang, et al. Effects of long-term fertilization and tillage on the production of runoff and sediment on purple soil slope cropland [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(1):31-39.
- [15] 张洪江, 付晓, 马思文, 等. 重庆四面山不同作物农田土壤根系分布与水分入渗特征[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2023, 21(3):137-144.
Zhang Hongjiang, Fu Xiao, Ma Siwen, et al. Root distribution and water infiltration characteristics of agricultural soils with different crops in the Simian Mountain of Chongqing [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023, 21(3):137-144.
- [16] 何平生, 李进林, 贺秀斌, 等. 三峡水库消落带泥沙淤积层水肥特性高程梯度分异[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(2):209-217.
He Pingsheng, Li Jinlin, He Xiubin, et al. Elevation-based differentiation in moisture and nutrients of sedimentary layer in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):209-217.
- [17] 吕德鹏, 张思毅, 贺斌, 等. 粤北红壤丘陵区不同土地利用方式下土壤大孔隙与水分入渗特征研究[J]. *土壤通报*, 2023, 54(6):1290-1298.
Lv Depeng, Zhang Siyi, He Bin, et al. Characteristics of soil macropore and water infiltration under different land use in hilly red soil region of northern Guangdong [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(6):1290-1298.
- [18] 王道祥, 李建兴, 王建文, 等. 耕作模式对红壤坡耕地典型作物不同生育期土壤入渗特性的影响[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2024, 42(4):44-52.
Wang Daoxiang, Li Jianxing, Wang Jianwen, et al. The influence of tillage measures on soil infiltration characteristics at different growth stages of typical crops in red soil slopes farmland [J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2024, 42(4):44-52.
- [19] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1):122-126.
Kang Jinlin, Yang Jie, Liu Yaojun, et al. Impacts of soil initial water content and bulk density on infiltration law of red soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1):122-126.
- [20] 邱德勋, 尹殿胜, 穆兴民, 等. 聚丙烯酰胺施用量、初始含水率和容重对土壤水分入渗特性的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(2):333-340.
Qiu Dexun, Yin Diansheng, Mu Xingmin, et al. Effects of polyacrylamide application amounts, initial water contents and bulk densities on soil infiltration characteristics [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(2):333-340.
- [21] 朱芸, 杜晨曦, 孙蕾, 等. 大别山北麓林下间作茶叶对改善土壤水分入渗的影响[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(19):72-82.
Zhu Yun, Du Chenxi, Sun Lei, et al. Impacts of intercropping tea trees under forest on soil water infiltration in the northern of Dabie Mountains [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(19):72-82.
- [22] Zhang Siyi, He Bin, Hao Beibei, et al. Quantification of red soil macropores affected by slope erosion and sediment using computed tomography [J]. *Vadose Zone Journal*, 2023, 22(6):e20276.
- [23] 张冠华, 易亮, 丁文峰, 等. 三峡库区苔藓生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7):1835-1842.
Zhang Guanhua, Yi Liang, Ding Wenfeng, et al. Effects of moss biocrust on soil water infiltration in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7):1835-1842.
- [24] 王移, 曹龙熹, 樊剑波, 等. 红壤坡地耕作措施对土壤入渗过程的影响机制[J]. *四川师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(1):108-114.
Wang Yi, Cao Longxi, Fan Jianbo, et al. The mechanism of tillage practices in affecting infiltration on slope farmland of the red soil region [J]. *Journal of Sichuan Normal University (Natural Science)*, 2020, 43(1):108-114.