

滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素

何苗苗, 刘芝芹, 王克勤, 雷祖团

(西南林业大学生态与环境学院, 昆明 650000)

摘要: 为掌握滇中高原滇池流域周边不同植被覆盖类型对土壤入渗性能的影响, 选用双环入渗法探究土壤入渗特性。以滇池流域典型植被覆盖类型(华山松+云南油杉混交林、云南松纯林、旱冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林)为研究对象, 通过野外调查和试验测定, 揭示土壤入渗特性及影响入渗的特征因子。结果表明: (1) 华山松+云南油杉混交林与云南松纯林、旱冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林相比, 土壤容重最小, 有机质含量最高, 水稳性团聚体最多, 孔隙度和非毛管孔隙度比例明显优于其他林地。(2) 5 种植被覆盖类型下入渗性能有明显差别, 具体入渗性能表征为华山松+云南油杉混交林>旱冬瓜+麻栎混交林>灌木林>云南松纯林>桉树人工林。(3) 选择 Kostiakov 公式、Horton 公式、Philip 公式, 模拟 5 种典型植被类型覆盖下林地土壤入渗过程, Philip 模型对滇池流域土壤入渗过程的拟合效果最佳。(4) 5 种典型植被类型覆盖下, 林地土壤入渗特征与土壤容重均呈显著负相关($P<0.05$), 初始入渗速率与非毛管孔隙度、 >5 mm 水稳性团聚体、 >2 mm 水稳性团聚体均呈极显著正相关($P<0.01$); 土壤入渗的 5 个主要影响因子为 >2 mm 水稳性团聚体、 >5 mm 水稳性团聚体、容重、有机质、非毛管孔隙度。研究结果为该研究区水土流失治理和土壤侵蚀防治提供基础依据。

关键词: 滇池流域; 土壤入渗; 植被覆盖类型; 影响因素

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0181-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.026

Soil Infiltration Characteristics and Influencing Factors Under Different Vegetation Cover Types in Dianchi Lake Basin

HE Miaomiao, LIU Zhiqin, WANG Keqin, LEI Zutuan

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650000)

Abstract: In order to master the effects on soil infiltration performance of different vegetation cover types around Dianchi Lake Basin in Central Yunnan Plateau, double ring infiltration method was used to explore soil infiltration characteristics. Taking the typical vegetation cover types of *Pinus armandii* Franch. + *Keteleeria evelyniana* Mast. mixed forest, *Pinus yunnanensis* pure forest, *Alnus nepalensis* D. Don + *Quercus acutissima* Carruth. mixed forest, *Eucalyptus robusta* Smith artificial forest and shrub forest in Dianchi Lake Basin as the research objects, soil infiltration characteristics and its influencing were studied through field investigation and experimental measure. The results showed that: (1) Compared with *P. yunnanensis* pure forest, *A. nepalensis* D. Don + *Q. acutissima* Carruth. mixed forest and *E. robusta* Smith artificial forest and shrub forest, *P. armandii* Franch. + *K. evelyniana* Mast. mixed forest had the lowest soil bulk density, the highest content of organic matter, the most water stable aggregates, and the proportion of porosity and non capillary porosity. (2) Soil infiltration performance significantly differed under different vegetation cover types, which listed in the following order: *P. armandii* Franch. + *K. evelyniana* Mast. mixed forest > *A. nepalensis* D. Don + *Q. acutissima* Carruth. mixed forest > shrub forest > *P. yunnanensis* pure forest > *E. robusta* Smith artificial forest. (3) Kostiakov formula, Horton formula, and Philip formula were selected to simulate the soil infiltration process of forest land under five typical vegetation types. Through data compari-

收稿日期: 2021-10-14

资助项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(20200015); 国家自然科学基金项目(41761098); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目

第一作者: 何苗苗(1999—), 女, 本科生, 主要从事森林水文研究。E-mail: 1076009148@qq.com

通信作者: 刘芝芹(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事森林生态与水文研究。E-mail: lzq-xl@163.com

son, it could be seen that Philip model had the best fitting effect on the soil infiltration process of Dianchi Lake Basin. (4) Correlation analysis showed that there was a significant negative correlation between soil infiltration characteristics and soil bulk density under five typical vegetation types ($P < 0.05$), and there were significant positive correlations between initial infiltration rate and non-capillary porosity, >5 mm water stable aggregate content, and >2 mm water stable aggregate content ($P < 0.01$). Principal component analysis showed that the five main influencing factors of soil infiltration were >2 mm water stable aggregate content, >5 mm water stable aggregate content, bulk density, organic matter, and non-capillary porosity. The research results could provide a basis for soil erosion control and soil erosion control in the study area.

Keywords: Dianchi Lake basin; soil infiltration; vegetation cover type; influence factor

土壤入渗作为影响地表径流形成与发展的关键因素,直接参与水分在下垫面蓄渗和漫流阶段,达到蓄满和超渗的产流条件。探究土壤水分入渗性能是掌握流域内径流产生方式的先决条件,入渗性能强的土壤,可以保证较多的降水就地入渗,一方面减少地表径流产生;另一方面,可形成地下径流、壤中流,进而补给浅层地下水,有效防治水土流失。因此,研究土壤入渗特征、评价土壤入渗能力对防治水土流失、提升植被涵养水源能力有重要意义^[1]。

土壤入渗作为防治土壤水力、化学和混合侵蚀的前提和基础,被越来越多的学者重视和研究。Rossi等^[2]研究植被和地形对土壤渗透深度的影响指出,植被斑块内的渗透深度是可变的,而渗透变异性由地形控制;宋爱云等^[3]对亚高山草甸土壤入渗性能研究得出,土壤稳渗速率与土壤容重存在极显著负相关关系,而与土壤总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤通气度以及单位面积的地上部分生物量均呈极显著正相关关系;陈娟等^[4]针对荒漠草原不同土壤入渗性能的研究指出,土壤结构差异会引起入渗性能不同;刘芝芹等^[5]研究认为,在干热河谷区,土壤入渗性能的重要影响因子为容重、有机质及孔隙比例以及水稳性团聚体。关于土壤入渗的研究多集中在干热河谷区、紫色土丘陵区、黄土高原区,而鲜有针对高原湖泊流域,尤其是滇中高原区滇池流域典型植被覆盖类型下土壤入渗性能的相关研究还非常缺乏。

已有研究^[6]表明,近 30 年来滇池水体富营养化异常严重,从 1988—2002 年,滇池流域的污染物产生量持续增加,滇池治理作为生态环境保护和水质治理的重要工程,经过 20 年的治理,流域内点源污染控制成效显著。来自于农业面源污染和近年来城市扩张迁移的污染物输出压力仍十分巨大,林草植被恢复重建是滇池流域水土保持最积极有效的措施。不同植被覆盖类型下林地土壤层通过降雨、下渗、地下径流等过程对降雨过程进行再次分配,从而影响地表水

资源分配,能有效控制面源污染^[7]。本文通过对滇池流域不同植被覆盖类型下土壤入渗特性的分析和研究,阐明滇中高原滇池流域 5 种典型植被覆盖类型下土壤水分入渗特性及影响因素,为该流域水体保护、面源污染防治和水土流失治理提供基础研究;同时,为揭示该流域不同植被类型下的土壤层水文功能及土壤侵蚀防治提供可靠依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

滇池位于云南省昆明市西南部(102°37′—102°48′E, 24°40′—25°02′N),流域面积 2 920 km²,气候属亚热带高原季风气候,冬半年气候干燥温凉,夏半年湿润温热。雨季为 5—10 月,旱季为 11 月至翌年 4 月。年均降水量为 1 000 mL,年均气温 14.8 ℃,该区域季节性气温变幅较小,分布广泛的植被类型为华山松+云南油杉混交林、旱冬瓜+麻栎混交林、云南松纯林、灌木林、桉树人工林。

1.2 研究方法

1.2.1 样方调查 于 2020 年 10—12 月到试验区实地踏查,选定样地,布设标准地。在滇池流域选择华山松+云南油杉混交林、云南松纯林、旱冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林 5 种典型植被覆盖类型作为试验样地。考虑样点分布的代表性,分别在各植被覆盖类型样地内随机布设 3 个样方,样地设置的具体尺寸为:华山松+云南油杉混交林、云南松纯林、旱冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林样方为 20 m×20 m,灌木林样方为 10 m×10 m,不同植被类型基本情况见表 1。

1.2.2 样品采集与测定 分别在 5 种典型植被覆盖林地的样地上、中、下 3 个坡位选取较为平整地段,在已选取的每个平整地段对角线上均匀选取 3 个试验样点,用环刀法分层采集样点原状土,采样深度为 0—20,20—40,40—60 cm。将采集的土样带回室

内测定土壤容重和孔隙度,采用湿筛法^[8]对 $>5, >2, >0.25$ mm 水稳性团聚体进行测定。采用重铬酸钾容量法^[9]对土壤有机质进行测定。以上各测定量均设3次重复。土壤理化性质见表2。

表1 不同植被覆盖类型下试验样地概况

植被类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	伴生植物	林龄/ a	郁闭度/ %	树高/ m
华山松+云南油杉混交林地	2010	15	N	滇青冈、云南含笑、三叶鬼针	35	90	16.2
云南松纯林地	2110	20	NE	小铁子、箭竹	30	90	11.5
旱冬瓜+麻栎阔叶混交林地	1950	18	SW	箭竹、紫茎泽兰、青蒿	20	85	18.5
桉树人工林地	1900	10	N	紫茎泽兰	10	40	15.6
灌木林地	1950	15	NE	侧柏、慈竹、雀舌黄杨	20	90	3.0

表2 不同植被类型下不同层次土壤理化性质

植被类型	土层深度/cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%	>5 mm 水稳性团聚体含量/%	>2 mm 水稳性团聚体含量/%	>0.25 mm 水稳性团聚体含量/%	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)
华山松+云南油杉混交林地	0-20	0.95±0.01	54.15±8.96	42.18±4.95	11.97±0.25	70.72±0.38	81.24±1.57	71.55±0.79	83.34±3.99
	20-40	1.01±0.05	53.06±5.50	39.28±1.83	13.78±0.33	62.34±0.81	76.35±1.10	69.73±0.93	35.32±1.13
	40-60	1.10±0.15	55.15±9.97	43.14±0.30	12.34±1.89	57.68±7.66	71.23±0.45	85.34±1.00	20.34±1.17
云南松纯林地	0-20	1.05±0.20	48.87±0.36	40.23±2.10	8.64±0.48	43.22±1.10	56.10±2.66	80.34±0.89	46.33±0.90
	20-40	1.24±0.12	56.11±1.79	45.57±3.10	10.54±0.78	32.17±0.43	47.34±2.42	92.34±0.89	22.35±0.68
	40-60	1.34±0.34	64.95±2.50	55.31±1.01	9.64±1.23	21.88±1.68	45.32±2.92	82.45±10.01	15.45±1.89
旱冬瓜+麻栎混交林地	0-20	1.00±0.12	57.96±4.27	47.72±2.37	10.24±2.01	50.23±1.22	72.36±5.98	87.55±3.22	69.14±1.09
	20-40	1.14±0.02	68.25±1.09	56.04±4.08	12.21±2.24	42.61±0.95	57.23±2.44	90.15±1.08	28.67±2.71
	40-60	0.97±0.10	59.80±1.45	48.46±8.09	11.34±0.45	33.78±0.67	55.77±0.57	80.15±2.30	20.21±0.71
桉树人工林地	0-20	1.12±0.19	51.44±1.56	43.90±1.66	7.54±1.34	27.11±1.55	42.56±3.09	70.12±1.22	42.12±1.34
	20-40	1.36±0.08	58.30±1.45	49.88±0.79	8.42±0.53	19.88±0.57	29.88±0.90	66.34±1.22	20.45±1.10
	40-60	1.58±0.25	52.10±9.67	44.55±0.68	7.63±0.48	16.11±1.34	30.25±4.40	52.77±1.57	10.37±1.28
灌木林地	0-20	1.02±0.19	50.97±3.26	42.00±1.67	8.97±0.16	48.76±1.36	69.44±1.01	87.56±17.11	60.15±7.30
	20-40	1.15±0.17	66.98±0.20	54.64±1.03	12.34±2.11	37.63±1.27	55.25±2.41	79.43±0.78	23.88±0.68
	40-60	1.20±0.13	57.82±1.48	47.58±2.75	10.24±2.21	28.54±1.24	50.33±0.90	82.66±1.34	15.26±1.41

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

选用双环入渗仪法测定入渗速率,内、外环直径分别为15,32 cm,环高30 cm,厚度2 mm,将双环压入试验样点的土壤表面以下25 cm。试验开始在外环加入适量的水防止水分溢出,向内环注水用于测量土壤入渗过程,各样点入渗达到稳定入渗后结束试验。初始入渗率为入渗开始1 min时的入渗速率;取30 min内的入渗总量计算平均入渗速率;取前80 min内的渗透量作为渗透总量。

1.2.3 土壤入渗模型 研究土壤水分入渗的数学模型有很多种类型,如Green-Ampt公式^[10]、Kostiakov公式^[11]、Philip公式^[12]和Horton方程^[13]等,本研究选用3个比较有代表性,准确度较高的土壤入渗水分模型来对5种不同植被覆盖类型下的土壤水分入渗过程进行模拟。3种常见的土壤水分入渗模型为

$$\text{Kostiakov 公式: } f(t) = at^{-b}$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); a, b 为拟合参数。

$$\text{Horton 公式: } f(t) = fc + (f_0 - fc)e^{-\beta t}$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); fc 为稳定入渗率(mm/min); f_0 为初始入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); β 为经验参数。

$$\text{Philip 公式: } f(t) = 0.5St^{-1/2} + fc$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); t 为入渗时间(min); S 为吸湿率(%); fc 为稳定速率(mm/min)。

1.2.4 数据处理与分析 试验数据采用Excel 2013软件进行统计和处理,SPSS 21.0软件用于分析数据相关性和主成分以及对土壤入渗模型进行拟合。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖类型下土壤的入渗特征

2.1.1 土壤入渗过程 土壤入渗性能是影响水土流

失发生与地表径流产生的关键因素^[14]。探究土壤入渗过程对减轻流域内水土流失、提升植被涵养水源性能有重大作用。根据入渗时间与入渗速率点绘制出 5 种不同植被覆盖类型下的土壤入渗过程,由图 1 可知,5 种样地的土壤水分入渗过程都会经历土壤入渗速率的急速下降、缓慢下降和稳定 3 个阶段,第 1 阶段(0~5 min),土壤水分入渗处于湿润阶段,土壤水分运动由分子力作用主导,被土壤颗粒吸附后变成薄膜水,瞬时达到最大的入渗速率而后马上急速下降。第 2 阶段(5~50 min),土壤水分转入渗漏阶段,水分在土壤孔隙中的运动受毛管力和重力的共同作用,入渗强度逐渐减小,入渗速率慢慢下降,直到水分充满土壤孔隙,该阶段结束。第 3 阶段(50 min 之后),5 种样地的土壤水分均处于渗透阶段,当水分充满整个土壤孔隙,此时水分只在重力作用下运动,土壤水分入渗速率达到稳定阶段。其中,灌木林入渗速率到达稳定状态的所需时间最长,达 48 min;华山松+云南油杉混交林入渗速率到达稳定状态所需时间最短,仅为 24 min,说明华山松+云南油杉混交林土壤疏松,结构良好,大小孔隙比例分配合理,有利于水分快速下渗。在 80 min 时,5 种植被覆盖类型下土壤入渗速率均达到稳定,入渗速率最大的为华山松+云南油杉混交林,最小为桉树人工林,说明在稳定入渗阶段,5 种样地中华山松+云南油杉混交林可以有效减少地表径流的产生,防治土壤被冲刷。

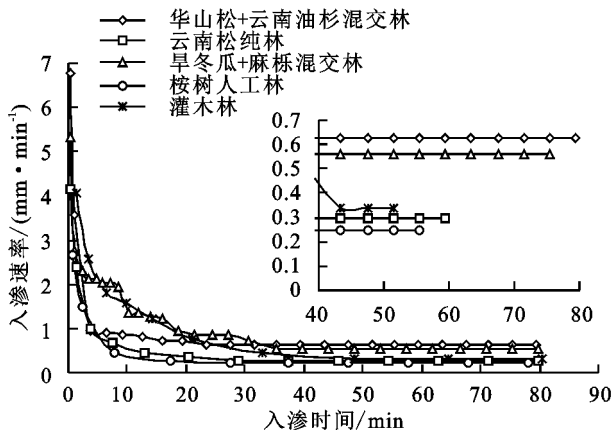


图 1 不同植被类型下土壤入渗过程

2.1.2 土壤入渗特征 在探究土壤渗透性能时,初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率和渗透总量常被作为衡量指标。由表 3 可知,华山松+云南油杉混交林的初始入渗率和稳定入渗速率最大,分别达到 6.79, 0.64 mm/min。华山松+云南油杉混交林初始入渗率是云南松纯林、早冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林的 1.64, 1.27, 2.54, 1.67 倍,稳定入渗速率是云南松纯林、早冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林的 2.21, 1.14,

2.56, 1.88 倍。早冬瓜+麻栎混交林的平均入渗速率最大,为 1.77 mm/min,分别是华山松+云南油杉混交林、云南松纯林、桉树人工林、灌木林的 1.13, 1.48, 1.73, 1.31 倍;其渗透总量也最高,为 5 600 mm,分别是华山松+云南油杉混交林、云南松纯林、桉树人工林、灌木林的 1.17, 2.1, 2.55, 1.3 倍。

华山松+云南油杉混交林和早冬瓜+麻栎混交林的 4 个入渗指标均优于云南松纯林、桉树人工林、灌木林,且华山松+云南油杉混交林和早冬瓜+麻栎混交林入渗能力明显大于云南松纯林,这与张莉^[15]的研究结果相一致,表明在该流域内适当树种混生对改善林分结构、提高土壤肥力具有较好促进作用,纯林地由 1 种树木组成,对光照、热量、水分、养分条件消耗利用比较单一,且不能充分利用环境因子,当环境资源有限时,纯林地种内竞争加剧抑制生长,而混交林地耐荫树种和喜光树种、深根性树种同浅根树种相搭配可以有效利用光照资源和吸收水分营养。

对比华山松+云南油杉混交林和早冬瓜+麻栎混交林的入渗性能,华山松+云南油杉混交林平均入渗速率和渗透总量低于早冬瓜+麻栎混交林,但本文平均入渗速率是前 30 min 内的,华山松+云南油杉混交林在 24 min 时已达到稳定入渗速率,此时早冬瓜+麻栎混交林还并未达到稳定入渗,且渗透总量的统计也是截止到 80 min,华山松+云南油杉混交林的初始入渗速率和稳定入渗速率均大于早冬瓜+麻栎混交林,当时间持续增加的时候,最后渗透总量也将会大于早冬瓜+麻栎混交林。综合 4 个入渗指标来看,华山松+云南油杉混交林的入渗性能最优,是由于在该流域内其树种组成搭配适宜、群落结构得当、生态环境优良、枯落物分解程度大,土壤有机质含量、土壤结构优于其他植被类型^[16]。桉树人工林入渗性能最差,可能与桉树根系分布较浅,且对土壤水肥条件需求较高,会大量吸收土壤上层水分及营养,造成浅层土壤养分的缺失^[17]有关,且其极强的吸水能力破坏流域内土壤的结构和水肥状况,使得土壤易板结,影响水分下渗,不利于水土的保持与吸收。

2.1.3 土壤入渗模型拟合 由表 4 可知,3 种模型 R^2 的均值都达到 0.950 以上,在 Kostiaskov 模型中, a 值为 1.968~4.886,其数值表征第 1 个单位时间内的平均入渗速率,大小依次为灌木林>早冬瓜+麻栎混交林>华山松+云南油杉混交林>云南松纯林>桉树人工林,与实测的平均入渗速率大小情况不符。在 Horton 模型中, f_c 表征稳定入渗率,为 0.256~0.672,大小依次为早冬瓜+麻栎混交林>华山松+云南油

杉混交林>灌木林>云南松纯林>桉树人工林,与实测稳定入渗率大小情况不符。在 Philip 模型中, S 的变化为 3.921~9.083,表征为土壤入渗能力的大小, S 值越大,表明土壤入渗性能越强,土壤吸湿率大小依

次为华山松+云南油杉混交林>旱冬瓜+麻栎混交林>灌木林>云南松纯林>桉树人工林,该结果与实测数据高度吻合。所以在该流域内选用 Philip 公式模拟土壤入渗过程得出的结果贴近实际,最为精准。

表3 不同植被类型下土壤入渗特征指标

植被类型	初始入渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	渗透总量/ mm
华山松+云南油杉混交林地	6.79	0.64	1.56	4800
云南松纯林地	4.15	0.29	1.20	2600
旱冬瓜+麻栎混交林地	5.33	0.56	1.77	5600
桉树人工林地	2.67	0.25	1.02	2200
灌木林地	4.06	0.34	1.35	4300

表4 土壤入渗模型的拟合参数

植被类型	Kostiakov 公式			Horton 公式				Philip 公式	
	a	b	R^2	f_c	f_0	β	R^2	S	R^2
华山松+云南油杉混交林	3.170	0.499	0.970	0.666	8.378	1.057	0.997	9.083	0.972
云南松纯林	2.416	0.553	0.984	0.340	4.860	0.519	0.993	4.914	0.971
旱冬瓜+麻栎混交林	3.287	0.387	0.960	0.672	4.198	0.170	0.866	5.358	0.932
桉树人工林	1.968	0.556	0.980	0.256	3.244	0.389	0.999	3.921	0.975
灌木林	4.886	0.566	0.983	0.431	4.520	0.147	0.972	5.244	0.979

注: a 为第 1 个单位时间内平均的入渗速率; b 为入渗速率随时间降低的快慢性; f_c 为稳定入渗率; f_0 为初始入渗率; β 为入渗速率随时间变化快慢; S 为土壤入渗能力大小; R^2 为相关性程度。

2.2 土壤入渗的影响因素

2.2.1 土壤入渗的相关性分析 由表 5 可知,土壤容重与初始入渗率、稳定入渗速率、累积入渗量均呈负显著相关($P<0.05$),这与林代杰等^[18]研究结果一致。土壤容重越小,其土壤孔隙度比例和结构、透气透水越好。华山松+云南油杉混交林的容重是 5 种样地中最小的,故其土壤结构、土壤入渗性能较其他样地更好。

土壤非毛管孔隙度与初始入渗速率呈极显著正相关($P<0.01$),与稳定入渗速率呈显著正相关($P<0.05$),非毛管孔隙数量的多少是判断土壤的通气性能好坏的重要影响因子。华山松+云南油杉混交林的非毛管孔隙度是 5 种样地中最大的,故其土壤的通气性能优于其他 4 种样地。

土壤孔隙度和毛管孔隙度对初始入渗速率、稳定入渗速率、累积入渗总量均未达到显著影响,对于毛管孔隙度而言,其与初始入渗速率和稳定入渗速率均为不显著负相关,这与前人^[9]研究结果不一致,可能与该区域近年连续干旱,且采样时间刚好处在旱季,水位接连下降,土壤含水量减少,流域内长时间干旱使得土壤毛管孔隙度下降,使其对土壤入渗特征的影响甚微。孔隙度与 3 个人渗特征均呈不显著正相关,孔隙度由毛管孔隙度和非毛管孔隙度共同影响,非毛

管孔隙度与初始入渗率和稳定入渗率呈显著相关,毛管孔隙度却与 3 个人渗特征均呈不显著相关,所以,孔隙度整体与 3 个人渗特征相关性不高。

土壤有机质与初始入渗速率呈显著正相关($P<0.05$)。土壤有机质可以通过间接作用影响土壤肥力,一方面有机质的矿质化过程,分解出供作物生长和微生物生命活动所必需的能量^[19];另一方面,土壤有机质自身疏松多孔的结构有助于土壤水分下渗吸收。华山松+云南油杉混交林土壤有机质含量是云南松纯林、旱冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林的 1.65,1.33,1.9,1.23 倍,故其土壤水分入渗性能最好。

>5 mm 水稳性团聚体和>2 mm 水稳性团聚体与初始入渗速率呈极显著正相关($P<0.01$),与稳定入渗速率呈显著正相关($P<0.05$),>0.25 mm 水稳性团聚体与 3 个人渗特征值均呈正相关,但不显著,与王珊珊等^[1]研究结果不一致。可能与不同地区不同地形土壤水稳性团聚体结构存在差异有关,水稳性团聚体对于防止水土流失具有积极影响,增强土壤入渗性能。在该流域中>5 mm 水稳性团聚体和>2 mm 水稳性团聚体对土壤入渗性能贡献率最大,华山松+云南油杉混交林的>5 mm 水稳性团聚体和>2 mm 水稳性团聚体含量明显多于其他 4 种样地,故其土壤抵抗侵蚀能力也最强。

表 5 土壤入渗性能与影响因子相关性分析

入渗特征	容重	孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	有机质	>5 mm 水稳性团聚体	>2 mm 水稳性团聚体	>0.25 mm 水稳性团聚体
初始入渗率	-0.909*	0.121	-0.396	0.970**	0.882*	0.974**	0.961**	0.863
稳定入渗率	-0.888*	0.216	-0.274	0.917*	0.828	0.956*	0.893*	0.823
累积入渗量	-0.932*	0.624	0.163	0.848	0.760	0.769	0.824	0.915

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2.2 影响因子主成分分析 对土壤入渗过程的影响因子进行主成分分析, KMO 检验值为 0.667(>0.5), sig=0。前 2 个成分的特征值均>1, 第 1, 2 个主成分的特征值分别为 4.049, 2.361; 前 3 个成分的累积贡献率达到 90.065%(>85%), 第 1, 2, 3 个主成分的方差贡献率分别为 50.618%, 29.514%, 9.932%, 满足主成分分析条件, 故可以从前 3 个成分来表征对入渗性能的影响, 提取这 3 个因子记作 F1、F2、F3。

由表 6 可知, 第 1 个主成分因子主要由>2, >5 mm 水稳性团聚体、容重、有机质、非毛管孔隙度决定; 第 2 个主成分因子主要由孔隙度、毛管孔隙度、>0.25 mm 水稳性团聚体决定; 第 3 个主成分因子主要由>0.25 mm 水稳性团聚体、非毛管孔隙度决定。根据分析主成分的方差贡献率大小和比较各影响因子负荷量绝对值, 影响土壤入渗的 5 个主要因子为>2, >5 mm 水稳性团聚体、容重、有机质、非毛管孔隙度。该结果与相关性分析高度吻合, 说明该流域内土壤容重越小, 有机质含量越高, 非毛管孔隙度越大, >2, >5 mm 水稳性团聚体含量越多, 土壤入渗性能越好。5 种样地中华山松+云南油杉混交林土壤容重最小, >2, >5 mm 团聚体含量最多, 有机质含量最高, 非毛管孔隙度最大, 是该流域控制水土流失, 改善立地条件最理想的植被类型。

表 6 影响因素主成分负荷矩阵

影响因素	F1	F2	F3
有机质	0.757	-0.265	0.355
容重	-0.900	-0.120	-0.176
孔隙度	-0.265	0.937	-0.039
毛管孔隙度	-0.496	0.808	0.144
非毛管孔隙度	0.583	0.603	-0.526
水稳性团聚体	>5 mm	0.964	0.032
	>2 mm	0.969	0.137
	>0.25 mm	0.376	0.543

3 讨论

华山松+云南油杉混交林是 5 种植被覆盖类型下林地土壤入渗性能最优的, 从树种组成分析, 华山松喜湿润微耐干旱, 不耐瘠薄。云南油杉喜暖耐干

旱, 耐水百湿, 具有强阳性、抗旱、耐瘠薄。2 种树种对于光照、水分等资源的吸收利用极其互补。旱冬瓜+麻栎混交林中, 旱冬瓜和麻栎 2 种树种在光照上存在微弱竞争关系, 并不是最优的混交林种植模式。从郁闭度和树龄来看, 华山松+云南油杉混交林的郁闭度和树龄均为最大, 郁闭度的增加使得枯落物数目增多, 微生物的分解作用也随之增强, 提高了土壤养分的可利用性。一般而言, 树龄越大, 土壤中的树木根系会越深越广, 从而为树木成长获取更多水分和营养, 增强其土壤入渗性能。

模拟土壤入渗过程中, 在该流域林地内选用 Philip 模型拟合结果最为理想、精准。王佳坤^[20]在对砒砂岩土壤水分入渗特征及适用模型的研究中发现, Philip 公式适用于土壤入渗历时较短且适合积水入渗。在初始含水量均匀、积水条件下, Philip 公式属于均质土壤一维入渗专属模型公式。赖坡等^[21]在研究降雨入渗模型的研究方法中发现, Philip 模型的适用性在初始含水量均匀且存在积水的均质土地地区比较实用, 该流域土壤入渗测定就是在初始含水量均匀、积水条件下进行, 且属于均质土, 选用 Philip 模型可以较好地模拟土壤入渗过程。选用 Horton 模型拟合时需要考虑较多的外界因素, 而自然土体结构本身就有许多因素不可控制, 而 Kostikov 适合长历时土壤入渗, 所以, Kostikov 模型和 Horton 模型对该流域并不适用。

本文着重于研究不同植被覆盖类型下土壤入渗性能的差异, 虽然将 0—60 cm 土层划分为 3 个层次, 但是并没有详细分析不同土层土壤入渗性能的差异, 只是取每个样地 0—60 cm 土层的平均入渗性能进行比较, 结论在短时间入渗过程和没有遇到强降雨和持续长降雨的条件下适用, 但遇到特殊天气情况, 选用平均入渗性能的方法就不够全面且容易出现与实际不符的结果。在相关性分析时, 该试验是假定各样地初始含水量相同的条件下进行的研究, 未考虑到自然初始含水量的差异也会影响土壤入渗; 另外, 由于该流域从外界因素看, 滇池属于昆明城市下游, 大量污水废水排入其中。从自身因素看, 滇池较为封闭, 污

水排入后没有干净水源交换,这2个因素导致滇池的污染物含量中已经含有不少有机质,下一步研究应考虑土壤有机质如氮、磷、钾等具体元素对土壤入渗性能影响的研究,使得出的结果更加精准,更有利于滇池流域水体保护、面源污染防治和水土流失治理。

4 结论

(1)华山松+云南油杉混交林与云南松纯林、早冬瓜+麻栎混交林、桉树人工林、灌木林相比,其土壤容重最小、有机质含量最高、水稳性团聚体最多、孔隙度和非毛管孔隙度比例明显优于其他林地。

(2)5种植被覆盖类型下入渗性能有明显差别,具体入渗性能表征为华山松+云南油杉混交林>早冬瓜+麻栎混交林>灌木林>云南松纯林>桉树人工林。

(3)利用3种回归模型对5种典型植被类型覆盖下林地土壤入渗过程的入渗速率与时间进行模拟,通过数据比对可知,Philip公式对滇池流域土壤入渗过程的拟合效果最佳。

(4)相关性分析表明,5种典型植被类型覆盖下林地土壤入渗特征与土壤容重均呈显著负相关($P < 0.05$),初始入渗速率与非毛管孔隙度、 >5 mm水稳性团聚体、 >2 mm水稳性团聚体均呈极显著正相关($P < 0.01$)。主成分分析表明,土壤入渗的5个主要影响因子为 >2 mm水稳性团聚体、 >5 mm水稳性团聚体、容重、有机质、非毛管孔隙度。

参考文献:

- [1] 王珊珊,毕华兴,刘俊,等.晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2020,34(5):231-237,243.
- [2] Rossi M J, Ares J O, Jobbagy E G, et al. Vegetation and terrain drivers of infiltration depth along a semiarid hill-slope [J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 1399-1408.
- [3] 宋爱云,董林水,刘世荣,等.不同亚高山草甸群落类型的土壤入渗特征及影响因素[J].水土保持研究,2018,25(3):41-45.
- [4] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原不同土壤类型水分入渗特征[J].水土保持学报,2018,32(4):18-23.
- [5] 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.
- [6] 侯鹏飞.城镇化背景下滇池叶绿素a浓度时空变化特征研究[D].昆明:云南师范大学,2020.
- [7] 杨建辉.晋陕黄土高原沟壑型聚落场地雨洪管控适地性规划方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [8] 陈楚楚,刘芝芹,王克勤,等.高原湿地碧塔海周边典型植被类型的土壤水分特征[J].水土保持学报,2015,29(6):222-226,232.
- [9] 赵丽芳,于晓菲,于军,等.有机肥料中有机质的测定及影响因素[J].石化技术,2018,25(5):31-33.
- [10] Mohammadzadeh H J, Khalili D. Development of the Green-Ampt infiltration rate model and relationship of the GA model parameters with soil hydraulic parameters [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021, 26(11):e2130.
- [11] 冯锦萍.区域尺度上土壤入渗模型特征参数传输函数的研究[D].太原:太原理工大学,2017.
- [12] 孙娜.河套灌区畦田土壤水分入渗特性及入渗模型参数预测[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [13] 桑非凡,宋孝玉.黄土高原沟壑区土壤水分入渗模型适用性探讨[J].灌溉排水学报,2014,33(增刊1):183-185.
- [14] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛,等.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].生态学报,2019,39(24):9111-9118.
- [15] 张莉.杉木-厚朴人工混交林与杉木纯林生物量对比[J].安徽农学通报,2019,25(9):55-56.
- [16] 赵洛琪,付登高,吴晓妮,等.滇中不同植物群落土壤养分及其计量比的变化特征[J].土壤,2020,52(6):1248-1255.
- [17] 王日敏.桉树人工林于环境的作用及其生长因素的影响探讨[J].科学之友,2013(10):162-163.
- [18] 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.
- [19] 何相宜.江西大岗山杉木人工林和毛竹林土壤肥力特征及影响因素[D].北京:北京林业大学,2019.
- [20] 王佳坤.砭砂岩土壤水分入渗特征及适用模型研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [21] 赖坡,程圣国,陈勇,等.降雨入渗模型的研究方法综述[J].山西建筑,2016,42(26):71-73.