

哈尼梯田水源区不同景观类型土壤水分的入渗特性及影响因子

刘澄静¹, 角媛梅¹, 高璇¹, 刘歆¹, 申恩孟²

(1. 云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 泸西县泸源普通高级中学, 云南 红河 652400)

摘要: [目的] 揭示不同景观类型土壤水分入渗特性及影响因子的差异, 为红河哈尼梯田世界遗产的保护及持续发展提供参考。[方法] 选择草地、林地、旱地和茶园等景观类型的 7 个样地, 用 Hood IL-2700 土壤水分入渗仪测定样地土壤水分入渗参数, 并分析枯落物持水性能和土壤物理性质因子对土壤水分的影响。[结果] 在人为影响程度不同的森林和草地生态系统内部, 土壤水分入渗能力表现为: 原始林 > 次生林 > 人工林, 荒草地 > 蕨草地。在研究区的 4 种景观类型水平上, 土壤水分入渗能力表现为: 园地(翻耕) > 草地 > 森林 > 耕地(未翻耕), 说明人为活动对土壤水分入渗效率影响显著。不同景观类型的土壤水分入渗特征值与影响因素的相关分析显示, 除园地外的其他景观类型土壤水分入渗值与土壤枯落物特征、土壤物理性质中的多个指标具相关性。[结论] 人为活动影响下的 4 种景观类型的土壤入渗能力差异明显, 枯落物特性和土壤物理性质是关键因素。

关键词: 哈尼梯田; 景观类型; 土壤入渗特性; 枯落物; 土壤物理性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)03-0099-07

中图分类号: S152.7, S157.3⁺1

文献参数: 刘澄静, 角媛梅, 高璇, 等. 哈尼梯田水源区不同景观类型土壤水分的入渗特性及影响因子[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 99-105. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.016. Liu Chengjing, Jiao Yuanmei, Gao Xuan, et al. Soil water infiltration characteristics and its influencing factors in different landscape types in water source area of Hani terrace[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 99-105.

Soil Water Infiltration Characteristics and Its Influencing Factors in Different Landscape Types in Water Source Area of Hani Terrace

LIU Chengjing¹, JIAO Yuanmei¹, GAO Xuan¹, LIU Xin¹, SHEN Enmeng²

(1. School of Tourism and Geographical Sciences, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China; 2. Luyuan Senior High School of Luxi County, Honghe, Yunnan 652400, China)

Abstract: [Objective] To investigate soil infiltration and its impact factors in different landscape types in order to provide references for the conservation and sustainable development of the cultural heritage in the Hani rice terraces of Honghe Autonomous Prefecture. [Methods] Seven sample plots located in different landscape types including grassland, forest land, dry farmland and tea garden land were selected. Soil moisture infiltration meter Hood IL-2700 was used to measure soil infiltration. The impacts of litter water holding capacity and soil physical features on soil moisture were analyzed. [Results] Due to the impacts of human utilization, soil infiltration capacity of the sub-ecosystem of forest and grassland was ranked as: natural forest > secondary forest > planted forest, and waste grassland > fern grassland. At the four types of landscape scale, soil infiltration capacity ranked as: tea garden land (which was plowed) > grassland > forest land > farmland (which was during the un-planting season). It indicated that human activity had a significant impact on soil infiltration. Correlation analysis between soil infiltration and its influencing factors showed that, except for

收稿日期: 2017-09-23

修回日期: 2017-12-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“哈尼梯田景观结构—水文连接度与世界遗产保护研究(41271203)”, “哈尼梯田遗产区聚落景观快速变化机制与景区化过程及保护”(41761115)

第一作者: 刘澄静(1994—), 男(汉族), 云南省宾川县人, 研究生, 研究方向为自然文化景观生态。E-mail: 18487101130@163.com。

通讯作者: 角媛梅(1972—), 女(汉族), 云南省曲靖市人, 博士, 教授, 主要从事景观生态研究。E-mail: ymjiao@sina.com。

the tea garden land, the soil infiltration in the other landscape types significant related to the indices of litter and soil physical property. [Conclusion] The soil infiltration capacity of the four landscape types are significantly different, and the features of litter and soil physical properties are the key factors that influence soil infiltration.

Keywords: Hani terraces; landscape type; soil infiltration characteristics; litters; soil physical properties

在以自然降水为主要补给水源的地区,本地降雨入渗是使水源区获得充足水源的重要水文过程。在目前极端气候事件频发造成水资源紧缺的情况下,关于入渗的理论和实践乃是保护水源地、发展节水型农业的重要依据之一^[1]。土壤圈处于大气圈、生物圈、岩石圈的交界面,是植被赖以生存的最主要载体,也是水循环的主要中转站,通过蒸发与入渗作用,将大气降水、地表径流和地下径流紧密的联系在一起,具有重要的生态水文功能^[2-4]。一个地区土壤的生态水文功能主要体现在土壤入渗性能和持水能力上,入渗性能是土壤涵养水源能力强弱的关键因素,它反映了土壤的调蓄能力,是评价土壤层水文功能的重要指标和模拟流域水文过程的重要参数之一^[5-6]。国内外很多学者对土壤入渗做过大量研究,不但确立了土壤入渗速率的测定方法^[7-8]和许多描述水分向土壤中入渗的数学模型(公式)^[9-10],而且对土壤水分入渗的影响因素作了详细记录。土壤水分入渗的测定方法很多,主要有注水法、水文法、人工降雨法等。其中,以注水法(双环法、环刀法、圆盘入渗仪法、Hood 入渗仪法等)最为常用^[11]。但是,影响土壤水分入渗的因素极为复杂,自然含水率、土壤孔隙度、容重、土壤质地、土地利用类型、土壤微生物和动物活动状况,以及枯落物持水性能、人为因素等都会对土壤水分入渗产生影响。其中,土壤容重和孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数,两者能反映土壤的透水性、通气性和根系延展时所受阻力的大小^[12-13],所以是影响土壤入渗性能的主要因素。

水是哈尼梯田农业系统的命脉,是区域内物质生活的依托^[14]。以降水为主要补给源的梯田水源区地处阴冷的高山地区,山间溪流水塘密布,全年均有长流水现象,是山腰居住区、下半山梯田区和低山河流湖泊的孕育之地,是天然的“绿色水库”,更是维系着哈尼族生存与文明以及哈尼梯田世界文化景观遗产存续的根基所在,因此,对哈尼梯田水源区的保护刻不容缓。目前,对哈尼梯田的研究主要集中在梯田文化产生与发展、独特的景观格局等方面,对水源区土壤的水文状况、土壤理化性质以及水土保持的研究相对较少。本文拟以哈尼梯田核心区全福庄河流域的不同景观类型土壤水分入渗特性为研究对象,通过德国 UTG 公司生产的 Hood IL-2700 型土壤水分入渗仪测定不同景观类型的土壤入渗状况,分析区域内土壤的物理性质、枯落物持水性能、人为活动等因素

对土壤水分入渗过程的影响,揭示不同景观类型土壤涵养水源功能的差异,为哈尼梯田开发与保护以及遗产的可持续发展提供参考。

1 研究区概况

研究区位于云南省南部的红河哈尼族彝族自治州元阳县中部全福庄河流域上游,距元阳县城南沙 28 km, 23°05'20"—23°07'20"N, 103°43'20"—103°47'30"E。地处哀牢山脉南段余脉的蒙自、元江高原盆地峡谷区,属红河一级支流麻栗寨河的源头区的全福庄河扇形流域上游,山脊走向为北东—南西向,整个地势南高北低,自南向北倾斜,海拔在 1 477~2 261 m,面积约 13.92 km²。该区域属亚热带山地季风气候,雨量充沛,年降水量 1 353.8 mm,蒸发量 929.4 mm,相对湿度 90.3%,全年日照时数 1 770.2 h,年无霜日 363 d,年均温 14.19 ℃。区内植被主要分布有中山湿性常绿阔叶、针叶林和南亚热带常绿阔叶苔藓林,原生植被主要以青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、木荷(*Schima superba*)、柃木(*Alnus cremastogyne*)、山茶(*Camellia japonica*)为主,已毁坏地区出现次生植被,农作物包括玉米、荞麦、土豆和稻谷。区内受不同风化作用和成土过程影响,发育有红壤、黄壤、黄棕壤、棕壤、紫色土、石灰土和水稻土等多种土壤类型,此外,流域一下的河谷地区还发育有砖红壤、燥红壤,土壤具有明显的垂直分布特征。研究区土地利用齐全,主要有原始林地(原始森林、古树原始林)、草地(荒草地、蕨草地)、人工林、茶园、耕地等土地利用类型,其中原始森林和荒草地占总面积比例 80%左右。

2 研究方法

2.1 样地选择及样品采集

根据土地利用现状分类国家标准及研究区实际情况在全福庄流域选择草地(蕨草地、荒草地),林地(原始林、次生林、人工林),耕地(旱地),园地(茶园)4种土地利用类型中的 7 个样地,并在每个样地中选择 3 个样点进行实地试验观测,记录其位置、地形、坡度坡向、植被和土壤类型等因子(表 1)。用 Hood IL-2700 土壤水分入渗仪测定每个试验点的土壤水分入渗情况,用环刀和铝盒采集原状土进行物理性质分析,自封袋采集枯落物进行枯落物持水性能分析。

表1 研究区样地详细信息

土地利用	样地类型	样地编号	海拔/m	坡度/(°)	土壤类型	根系	主要植物
林地	原始林	林1	2 038	15	黄棕壤	多量	树龄超百年的栎树、栲林
	次生林	林2	2 008	5~10	黄棕壤	多量	栎树林、栲林
	人工林	林3	1 928	5	黄棕壤	中量	水冬瓜
草地	荒草地	草1	1 990	25	黄棕壤	中量	蒿草、蕨类、人工油茶
	蕨草地	草2	2 110	30	黄棕壤	多量	蕨类、三颗针、紫茎泽兰
耕地	旱地	耕1	1 983	0	黄壤	少量	土豆(未翻耕、有结皮)
园地	茶园	园1	1 921	0	黄壤	少量	茶树(已翻耕)

2.2 试验方法及数据处理

2.2.1 土壤水分入渗测定 于2014年3月,在研究区使用 Hood IL-2700 土壤水分入渗仪测定每个试验点的土壤水分入渗情况。Hood IL-2700 土壤水分入渗仪由储水管、连接管、钢圈、水罩、数据采集器等组成,试验时,要在比较平坦的地方安装钢圈,把钢圈的一部分压入土壤,安装地若有植被,最好把植被切割至约 5 mm 高;将水罩放入钢圈内,水罩与钢圈之间用直径小于 2 mm 的饱和湿沙密封;给 U 型管注水至零刻度线,关闭所有阀门并连接管路,之后给内外管注水,内管水面要略高于外管水面,在内管中插入调压管;吸气球与调压管调节水罩中间水柱高度和 U 型管的液面高度差值,该差值是 Hood 水罩中施加在土壤表层的压力值;连接数据采集器,数据便会自动记录到数据采集器中来。室内采用 LOG_UGT 软件,将数据由采集器导入计算机,使用 Excel,SPSS 和 Graph 软件进行数据处理和图表制作,最终得出土壤的初始入渗、稳定入渗率、渗透系数和稳渗历时 4 个土壤入渗特性指标。

土壤初始入渗率(mm/min):指土壤入渗初期,单位时间内地表单位面积土壤的入渗水量^[15]。Hood 入渗仪的土壤初始入渗率计算公式为:

$$f_0 = \frac{q_0}{Tt_0} \quad (1)$$

式中: f_0 ——土壤初始入渗率(mm/min); q_0 ——入渗开始 3 min 的实测累积入渗量(mm); $t_0=3$ min。

土壤稳定入渗率(mm/min):入渗后期水流较为稳定时的入渗速率,它等于或接近饱和导水率^[15]。Hood 入渗仪的土壤稳定入渗率计算公式为:

$$f_s = \frac{\Delta h}{\Delta t(0.7+0.03)T} f \quad (2)$$

式中: f_s ——10℃标准水温时土壤入渗速率(mm/min); Δh ——某一时段 Δt 供水桶读数差值(mm); Δt ——时段(min); T ——某时段的平均水温(℃); f ——横切面面积指数,即储水管截面积与入渗面积

之比,小 Hood 罩为 0.313,大 Hood 罩为 1.56。

土壤渗透系数(cm/s):在单位水压梯度下,通过垂直于水流方向的单位土壤截面积的水流速度,又称土壤饱和导水率^[16]。Hood 入渗仪的土壤渗透系数(土壤饱和导水率)计算公式为:

$$\ln Q = \alpha h + \ln \left[\left(\pi r^2 + \frac{4r}{\alpha} \right) K_s \right] \quad (3)$$

$$\alpha = (h_1, h_2 < 3) \quad (4)$$

式中: K_s ——稳定入渗率(mm/min); h ——压力值(cm); r ——圆形入渗面半径(cm); α ——与土壤结构和毛管吸力有关的因子。

土壤稳渗历时,是指土壤层全部饱和时,入渗不再随入渗历时的延长而变化所需要的时间^[17]。

2.2.2 土壤物理性质测定 于2014年2月在区域内布置标准样地,采用环刀法对每个样地分点分层(每个样地选择 3 个采样点,每个采样点分 0—20, 20—40, 40—60 cm 共 3 层)取样,室内测定容重、孔隙度、自然含水率等土壤物理指标。

土壤容重的计算:

$$d = \frac{(M_1 - M_2)}{V} \quad (5)$$

式中: d ——土壤容重(g/cm³); M_1 ——环刀质量(g); M_2 ——环刀和干土的质量(g); V ——环刀容积(cm³)。

自然含水率的计算:

$$\theta = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \quad (6)$$

式中: θ ——自然含水率(%); M_1 ——铝盒加湿土重(g); M_2 ——铝盒加干土重(g); M_3 ——铝盒重量(g)。

孔隙度的计算:

$$P_t = \frac{W_2 - W_4}{V} \times 100\% \quad (7)$$

$$P_c = \frac{W_3 - W_4}{V} \times 100\% \quad (8)$$

$$P_u = \frac{W_2 - W_3}{V} \times 100\% \quad (9)$$

式中: P_t ——总孔隙度(%); P_c ——毛管孔隙度(%); P_u ——非毛管孔隙度(%); W_2 ——土壤饱和重(g); W_3 ——排出重力水后土壤重量(g); W_4 ——土壤干重(g); v ——环刀体积(cm^3)。

2.2.3 枯落物持水性能测定 将枯落物风干称重后置于清水中浸泡 24 h, 取出待样品无重力水滴落时称重, 用以测量其最大持水率与最大持水量。

最大持水率的计算:

$$P = \frac{X_1 - X_2}{X_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中: P ——最大持水率(%); X_1 ——枯落物风干重(g); X_2 ——浸水 24 h 枯落物湿重(g)。

最大持水量的计算:

$$W = W_1 \times P \quad (11)$$

式中: W ——最大持水量(g); W_1 ——枯落物重量(g); P ——最大持水率(%)。

3 结果与分析

3.1 景观类型对土壤入渗特性的影响

3.1.1 不同景观类型土壤入渗特性的差异 利用入渗仪对哈尼梯田水源区全福庄流域不同景观类型土壤的入渗性能进行测定, 并将各土地利用类型下各样地值进行平均, 得到初始入渗率、稳定入渗率、渗透系数 3 个特征值(表 2)。从这 3 个特征上看, 各景观类型土壤的初始入渗率、稳定入渗率存在较大的差异。各个特征值的最大值均分布在园地上, 最小值则分布在耕地上, 且园地的特征值明显的大于其他样地值。这说明受人类活动影响强烈的园地和耕地土壤结构与其他自然样地或人类影响较小样地之间存在差异。从土地利用类型土壤初始入渗率、稳定入渗率、渗透系数 3 个特征值来看, 研究区土壤入渗特性呈现出: 园地 > 草地 > 林地 > 耕地的特点, 其中林地和草地特征值较为接近, 耕地和园地相差较大。

表 2 哈尼梯田水源区不同景观类型土壤入渗特性

景观类型	初始入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	稳定入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	稳渗 历时/h
林地	2.82	0.44	0.61	0.78
草地	2.87	0.67	0.88	0.60
耕地	1.19	0.19	0.26	0.43
园地	19.29	3.01	4.31	0.96

从不同类型景观上看, 林地和草地两种带有植被的景观类型土壤入渗特性基本相似, 其中初始入渗率仅相差 0.05 mm/min 稳定入渗率相差 0.23 mm/min,

渗透系数则差 0.27 cm/s, 稳渗历时差 0.18 h; 而测试时没有植被, 且未翻耕的耕地的土壤入渗特性则要明显小于带有植被的 2 个景观类型, 也要明显小于已经翻耕的园地。一般认为, 初始入渗率越大, 下渗能力越强, 反之, 初始入渗率越小, 下渗能力越弱; 稳定入渗率越高, 则下渗强度越大, 土壤入渗性能越好; 而渗透系数的变化趋势与稳定入渗率的变化大体一致, 而渗透系数代表着水体通过土壤孔隙骨架的难易程度, 是代表土壤渗透性强弱的定量指标之一。因此, 在去除有人类活动翻耕影响的园地类型景观之后, 其余的 3 种类型景观的入渗特性出稳渗历时外, 则呈现出: 草地 > 林地 > 耕地的情况。

3.1.2 同一景观类型内土壤入渗特性差异 在同一景观类型内的多个样点间的土壤入渗特性也存在差异(表 3), 在森林类型景观内, 共有原始林、次生林和人工林 3 种样地类型, 其中, 人工林的土壤入渗特性要明显的比原始林和次生林差, 森林景观类型的入渗特性整体上则为: 次生林 > 原始林 > 人工林。而在草地类型景观内, 有荒草地和蕨草地 2 个样地, 两者的初始入渗率和稳渗历时基本一致, 但稳定入渗率、渗透系数则为草地大于蕨草地。

表 3 哈尼梯田水源区同一景观类型内土壤入渗特性

样地类型	初始入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	稳定入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	渗透系数/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	稳渗 历时/h
原始林	3.38	0.53	0.70	0.72
次生林	3.63	0.57	0.75	0.84
人工林	1.46	0.23	0.36	0.79
荒草地	2.87	0.90	1.33	0.58
蕨草地	2.88	0.45	0.44	0.63

3.2 枯落物对土壤入渗特性的影响

3.2.1 不同景观类型枯落物对土壤入渗特性的影响

枯落物是植被地面以上部分器官枯死脱落后堆积而成的半分解凋落物, 能增加土壤有机质、改善土壤结构, 具有涵养水源的功能, 对土壤水分的入渗性能也有较大的影响^[18]。不同景观类型内土壤入渗性能差异较大, 可能与不同景观内枯落物差异有关。如表 4 所示, 研究区 4 种景观类型中, 除园地和耕地无枯落物外, 其余 2 种景观类型枯落物均较多, 持水率较大, 储水性能较好。从枯落物厚度来看, 森林景观类型要明显厚于草地景观类型, 因此其枯落物总量和最大持水量也要高于草地, 但最大持水率则是草地要大于森林。说明, 草地景观类型要比森林景观类型的保水效率高, 但由于枯落物量的限制, 其持水量要小于森林景观类型。

表4 哈尼梯田水源区不同景观类型枯落物持水性能

景观类型	枯落物厚度/cm	枯落物总量/ (t·hm ⁻²)	最大持水率/%	最大持水量/ (t·hm ⁻²)
森林	3.63	41.16	258.77	113.23
草地	2.25	12.86	392.33	50.37
耕地	—	—	—	—
园地	—	—	—	—

3.2.2 同一景观类型枯落物对土壤入渗特性的影响

在同一景观类型内(表5),森林景观类型的3个样地中,人工林的枯落物厚度、总量及其最大持水率、持水量均最小,而原始林、次生林的枯落物厚度、总量及其最大持水率、持水量均较高,3个样地的枯落物持水性能呈现出:原始林>次生林>人工林的情况。在草地景观类型的2个样地中,荒草地和蕨草地的枯落物厚度、持水性指标基本一致,也呈现出枯落物厚度大,枯落物总量多,最大持水量大的特征。从整体上看,在森林和草地2种景观类型的5个样地中,原始林的枯落物厚度最大,枯落物总量最多,最大持水量最高;荒草地则是最大持水率最高。这说明,枯落物总量、最大持水量与枯落物厚度存在明显正相关关系,而最大持水率则与枯落物类型和结构、质地有关。

表5 哈尼梯田水源区同一景观类型内枯落物持水性能

样地类型	枯落物厚度/cm	枯落物总量/ (t·hm ⁻²)	最大持水率/%	最大持水量/ (t·hm ⁻²)
原始林	5.00	62.55	302.55	187.58
次生林	4.20	58.00	251.02	145.59
人工林	1.70	2.93	222.75	6.53
荒草地	2.00	11.00	397.10	43.68
蕨草地	2.50	14.72	387.56	57.05

表6 哈尼梯田水源区不同景观类型间土壤物理性质差异

景观类型	土层/cm	自然含水率/%	容重/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/%		
				总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
森林	0—20	36.27	1.08	59.13	39.02	20.11
	20—40	36.86	1.07	59.53	39.03	20.05
	40—60	34.12	1.12	57.80	37.72	19.94
草地	0—20	34.91	1.02	61.37	39.12	21.91
	20—40	32.87	1.08	59.56	39.46	20.37
	40—60	32.74	1.12	57.71	38.98	18.74
耕地	0—20	29.63	1.09	58.75	41.94	16.81
	20—40	25.07	1.14	56.90	39.64	17.26
	40—60	25.21	1.30	50.88	38.61	12.27
园地	0—20	30.12	1.10	58.48	48.81	9.67
	20—40	28.04	1.08	59.10	48.69	10.41
	40—60	25.75	1.16	56.34	46.55	9.79

3.3 土壤物理性质对入渗的影响

3.3.1 不同景观类型间土壤物理性质差异 土壤水分入渗是土体外部水分进入土壤的运动和再分配转化的复杂过程,实质是水分在土壤内部空隙间不断深入流动的过程^[19]。因此,土壤水分入渗的速率主要取决于土壤孔隙度和容重的大小,也与土壤的自然含水率有一定的相关性^[20-21]。土壤容重表示单位容积原状土壤的质量(风干),其大小主要由土壤孔隙度及土壤固体数量决定,总孔隙度越大,容重越小,土壤水分入渗速率与饱和导水率就越大,反之,总孔隙度越小,容重越大,土壤水分入渗速率与饱和导水率就越小,容重与总孔隙度呈负相关,与土壤水分入渗速率呈负相关,总孔隙度与土壤水分入渗速率呈正相关。由表6可知,研究区4种不同景观类型间的各项土壤理化性质指标均存在差异。从最能影响水分入渗的土壤孔隙度和容重来看,森林、草地、耕地和园地4种景观类型在3个深度上的总孔隙度差距不大,但受到人类活动影响的园地3个深度上的毛管孔隙度(48.81%,48.69%和46.55%)和耕地上的毛管孔隙度(41.94%,39.64%和38.61%)要高于自然环境下的森林和草地景观类型,而非毛管孔隙度则小于森林和草地景观类型,但是由于耕地没有像园地一样受到翻耕影响,所以毛管孔隙度没有像园地那样的明显。在土壤容重方面,4种景观类型不同深度上的容重也相差不大,但受人类活动影响的耕地和园地景观类型要稍稍大于自然状态下的森林和草地景观。就自然含水率来看,从大到小依次为:森林>草地>园地>耕地,森林景观类型最大达到36.27%,耕地类型景观最小为25.07,即自然状态下的森林和草地景观类型的自然含水率要高于园地和耕地。

3.3.2 不同景观类型间土壤物理性质差异 由表 7 可知,在森林景观类型内部人工林 3 个深度上的容重(1.14,1.12,1.18 g/cm³),要大于原始林和次生林,因此人工林土壤的总孔隙度和自然含水率也相应的小于原始林和次生林,从整体上来看,森林景观类型内部土壤物理性质存在差异,入渗能力呈现出原始林>次生林>人工林。从草地景观类型内部来看,荒草地 3 个深度上的容重(1.08,1.11,1.18 g/cm³)要大于蕨草地,因此荒草地土壤的总孔隙度和自然含水率

也要小于蕨草地。从研究区 4 种不同景观类型的 7 个样地来看,土壤容重和总孔隙度有显著差异,容重大小介于 0.96~1.18 g/cm³,由大到小排列为:耕地>人工林>荒草地>园地>次生林>原始林>蕨草地,总孔隙度大小介于 50.88%~63.60%,由大到小排列为:蕨草地>原始林>次生林>园地>草地>人工林>耕地。由此顺序可以看出,除受人类活动干扰较严重的园地土壤外,其余样地土壤的容重和总孔隙度呈反比。

表 7 哈尼梯田水源区同一景观类型内部土壤物理性质差异

样地类型	土层/cm	自然含水率/%	容重/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%		
				总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
原始林	0—20	41.41	1.01	61.82	32.56	29.26
	20—40	40.10	1.02	61.39	37.19	24.20
	40—60	36.06	1.11	57.97	37.78	20.19
次生林	0—20	43.21	1.10	58.68	48.99	9.69
	20—40	39.31	1.07	59.50	44.71	14.78
	40—60	38.67	1.06	59.97	38.18	21.97
人工林	0—20	24.18	1.14	56.90	35.52	21.38
	20—40	22.18	1.12	57.71	35.18	22.52
	40—60	27.62	1.18	55.45	37.19	17.66
荒草地	0—20	33.92	1.08	59.13	39.79	19.33
	20—40	33.21	1.11	58.27	41.68	16.58
	40—60	32.76	1.18	55.46	38.74	16.72
蕨草地	0—20	35.89	0.96	63.60	39.12	24.48
	20—40	32.53	1.04	60.84	36.69	24.15
	40—60	32.71	1.06	59.96	39.21	20.75

3.4 影响土壤入渗关键因素的相关性分析

除自然因素外,人为因素如耕种、灌溉等对土壤水分入渗也会产生较大的影响。研究区 4 种景观类型中,茶园入渗试验时其表土层受人工翻松不久,且园内除茶树外很少有其他植被,无枯落物,表层土体结构破坏严重,表土层极为疏松,其中有较大的土块存在,土壤初始入渗率、稳定入渗率、渗透系数均最大。而耕地则为未经翻松的土豆地,土豆刚出苗不久,根系极少,表层土壤颗粒较细,有轻微结皮现象,表层土约 10 cm 以下土层板结,质地较硬,初始入

率、稳定入渗率、渗透系数在 4 种景观类型中均最小。这些人为扰动使得土壤入渗与土壤孔隙度、枯落物持水性的相关性分析不明显。

在去掉这两类景观类型影响后可以看出(表 8),土壤渗透性能与枯落物最大持水率和最大持水量呈正相关,枯落物总量大,持水量大,土壤入渗性能强;森林景观类型中的原始林,次生林枯落物层次厚,总量多,持水量大,土壤入渗性能强;而草地景观以及人工林枯落物总量与持水量较小,入渗速率也随之降低。

表 8 哈尼梯田水源区土壤物理性质与土壤渗透性相关性分析

项目	自然含水率	容重	孔隙度			枯落物持水性能	
			总孔隙度	非毛管孔隙度	毛管孔隙度	最大持水率	最大持水量
初始入渗率	-0.125	-0.076	0.149	0.574**	-0.536*	0.286	0.825**
稳定入渗率	-0.129	-0.079	0.167	0.565**	-0.534*	0.656**	0.172
渗透系数	-0.080	-0.087	0.216	0.402	-0.411	0.474	0.060

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。

结合表2,表8可以看出,除园地之外,其余景观类型的初始和稳定入渗速率、渗透系数与土壤容重呈负相关,与总孔隙度和毛管孔隙度呈正相关,与非毛管孔隙度呈负相关。园地因受人为因素影响较大,入渗速率、渗透系数高于其他景观类型,与土壤容重、孔隙度的相关性不明显。自然含水率对土壤水分的人渗有重要的影响,自然含水率过高会降低土壤的人渗性能,相同条件下,自然含水率越高,入渗速率越低;自然含水率越低,入渗速率越高。通过表7—8可以看出,区域内土壤的人渗特性与自然含水率呈负相关关系,初始入渗率与自然含水率的相关系数为-0.125,稳定入渗率与自然含水率的相关系数为-0.129。

4 结论

(1) 从景观类型来看,在排除人为干扰的园地类型景观后研究区不同景观类型土壤入渗性能由强到弱依次为:草地类型景观>森林类型景观>耕地类型景观;在研究区同一景观内部的人渗特性也存在差异,在森林景观类型内部同样样地的土壤入渗特性由强到弱依次为:原始林>次生林>人工林,在草地景观类型内部则为:草地>蕨草地。

(2) 从不同景观类型间枯落物特征来看,枯落物总量、最大持水量与枯落物厚度存在明显正相关关系,而最大持水率则与枯落物类型和结构、质地有关,不同景观类型中,枯落物厚度较大(3.63 cm)的森林景观类型的枯落物总量 41.16 t/hm²,最大持水量 113.23 t/hm²,要明显大于枯落物厚度为 2.25 cm 草地景观的 12.86, 50.37 t/hm²;而草地景观类型的最大持水率要比森林景观大,则说明草地景观类型枯落物的持水性要优于森林景观类型。

(3) 从同一景观类型内枯落物特征来看,枯落物总量、最大持水量与枯落物厚度同样存在明显正相关关系,草地景观类型内 2 个样地枯落物厚度相差不大(2, 2.5 cm),则其枯落物总量与最大持水率也相差不大;在森林景观类型内部 3 个样地枯落物厚度相差较大(5, 4.2 和 1.7 cm),其枯落物总量与最大持水率相差较大;从枯落物的持水性能上看:荒草地>蕨草地>原始林>次生林>人工林。

(4) 从不同景观间的土壤物理性质来看,土壤容重和孔隙度是影响土壤入渗的重要因素,自然含水率的变化也与土壤容重和孔隙度有关。在不同景观间,森林、草地、耕地和园地 4 种景观类型在 3 个深度上的土壤容重和总孔隙度差距不大,但受到人类活动影响的园地和耕地上的毛管孔隙度要高于自然环境下

的森林和草地景观类型,土壤容重也呈现出人类影响景观类型大于自然景观类型的情况;自然含水率从大到小则依次为:森林>草地>园地>耕地,即自然状态下的森林和草地景观类型的自然含水率要高于园地和耕地。

(5) 从同一景观类型内部的土壤物理性质来看,在森林景观类型内人工林的土壤容重要大于原始林次生林,相应的人工林土壤总孔隙度和自然含水率也小于原始林和次生林;在草地景观类型内荒草地的土壤容重要大于蕨草地,因此荒草地土壤的总孔隙度和自然含水率也要小于蕨草地。

(6) 从研究区 4 种不同景观类型的 7 个样地来看,在排除人为干扰后各景观类型的人渗速率、饱和导水率与土壤容重呈负相关,与毛管孔隙度呈负相关,与非毛管孔隙度呈正相关。

[参 考 文 献]

- [1] 白文波,宋吉青,李茂松,等. 保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 18-23.
- [2] 段争虎. 土壤水研究在流域生态—水文过程中的作用、现状与方向[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 682-684.
- [3] 陈喜,宋琪峰,高满,等. 植被—土壤—水文相互作用及生态水文模型参数的动态表述[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(3): 362-368.
- [4] 李天杰,赵焯,张科利,等. 土壤地理学[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2006: 1-21.
- [5] 李雪转,樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力影响的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(1): 59-62.
- [6] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等. 宁夏六盘山南侧森林枯落物及土壤的水文生态功能研究[J]. 林业科学研究, 2007, 20(1): 15-20.
- [7] He Fuhong, Pan Yinghua, Tan Lili, et al. Study of the water transportation characteristics of marsh saline soil in the Yellow River Delta[J]. Science of The Total Environment, 2017, 574: 716-723.
- [8] 莫斌,陈晓燕,雷廷武,等. 不同方法测定紫色土坡耕地入渗性能试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 1-5.
- [9] Hillel D. Introduction to Soil Physics[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [10] AL-Kayssi A W, Mustafa S H. Modeling gypsumiferous soil infiltration rate under different sprinkler application rates and successive irrigation events[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 66-74.
- [11] 吴发启,赵西宁,崔卫芳. 坡耕地土壤水分入渗测试方法对比研究[J]. 水土保持通报, 2003, 23(3): 39-41.
- [12] 王小燕,蔡崇法,李鸿,等. 三峡库区碎石含量对紫色土容重和孔隙特征的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 379-386.

- concentrations of Barley seeds as influenced by salinity [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001,24(3):511-522.
- [10] Huang Zhenying, Zhang Xinshi, Gutterman Y, et al. Influence of light, temperature, salinity and storage on seed germination of *Haloxyton ammodendron* [J]. *Journal of Arid Environments*, 2003,55(3):4563-464.
- [11] 孙丽坤,刘万秋,陈拓,等. 柽柳属(*Tamrix*)植物生境适应机制与资源价值研究进展[J]. *中国沙漠*, 2016,36(2):349-356.
- [12] 罗君,彭飞,王涛,等. 黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)种子萌发及幼苗生长对盐胁迫的响应[J]. *中国沙漠*, 2017,37(2):261-267.
- [13] 段琦梅,梁宗锁,慕小倩,等. 黄芪种子萌发特性研究[J]. *西北植物学报*, 2005,25(6):1246-1249.
- [14] 隆雪明,刘湘新,文利新. 黄芪多糖及其应用[J]. *中兽医医药杂志*, 2007,26(2):24-27.
- [15] 张博,赵庆芳,郭鹏辉,等. 甘肃省重要中草药的化感作用初探[J]. *安徽农业科学*, 2008,36(2):601-605.
- [16] 张肖,王旭,焦培培,等. 胡杨(*Populus euphratica*)种子萌发及胚生长对盐旱胁迫的响应[J]. *中国沙漠*, 2016,36(6):1597-1605.
- [17] 巴图,赵萌莉,李倩,等. 不同苜蓿品种种子发芽对盐胁迫的响应[J]. *水土保持通报*, 2017,37(2):96-101.
- [18] 朱毅,范希峰,刘吉利,等. 盐胁迫对柳枝稷种子萌发的影响[J]. *中国草地学报*, 2014,36(4):38-43.
- [19] 何芳兰,赵明,王继和,等. 几种荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J]. *干旱区地理*, 2011,34(1):100-106.
- [20] 韩多红,晋玲,张勇. NaCl胁迫对膜荚黄芪种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. *中草药*, 2012,43(10):2045-2049.
- [21] 黄立华,梁正伟,马红媛. 不同盐分对羊草种子萌发和根芽生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008,27(5):1974-1979.
- [22] 刘爱荣,张远兵,黄守程,等. NaCl与Na₂CO₃对高羊茅种子萌发及幼苗生长胁迫效应比较[J]. *热带作物学报*, 2011,32(6):1064-1068.
- [23] 卢艳敏,苏长青,李会芬. 不同盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草业学报*, 2013,22(4):123-129.
- [24] 曾华. 辽宁省水稻品种苗期耐盐能力评价[J]. *北方水稻*, 2011,41(2):10-13.
- [25] Bayuelo-Jimenez J S, Craig R, Lynch J P, et al. Salinity tolerance of Phaseolus species during germination and early seedling growth [J]. *Crop Science*, 2002,42(5):1584-1594.
- [26] Croser C, Renault S, Franklin J, et al. The effect of salinity on the emergence and seedling growth of Picea mariane, Piceaglauca, and Pinusbanksiana [J]. *Environmental Pollution*, 2001,115(1):9-16.
- [27] 刘杰,张建坤,张学政. NaCl胁迫下虎尾草种子萌发特性的研究[J]. *北方园艺*, 2013(21):92-94.

(上接第105页)

- [13] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等. 晋西黄土区退耕还林22 a后林地土壤物理性质的变化[J]. *生态学报*, 2017,37(2):416-424.
- [14] 王清华. 梯田文化论—哈尼族生态农业[M]. 昆明:云南人民出版社:2010:16-18.
- [15] 朱良君,张光辉,任宗萍. 4种土壤入渗测定方法的比较[J]. *水土保持通报*, 2012,32(6):163-167.
- [16] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. *农业工程学报*, 2011,27(5):68-72.
- [17] Kinner D A, Moody J A. Spatial variability of steady-state infiltration into a two-layer soil system on burned hillslopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2010,381(3/4):322-332.
- [18] 王伟,张洪江,徐丽君,等. 四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J]. *水土保持学报*, 2008,22(4):90-99.
- [19] 李天阳,何丙辉,田家乐,等. 重庆璧山5种典型农林混合模式土壤理化性质及水分入渗特性[J]. *水土保持学报*, 2013,27(4):103-108.
- [20] 陈家林,孔玉华,裴丙,等. 太行山低山丘陵区不同植被类型土壤渗透特性及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2016,23(4):60-65.
- [21] 崔高仰,容丽,李晓东,等. 喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化[J]. *生态学杂志*, 2017,36(5):1188-1197.