

广西龙脊梯田区森林类型对土壤水力特性的影响

王醒^{1,2}, 方荣杰^{1,2}, 张帅普^{1,2}, 黄卉^{1,2}, 黄朗^{1,2}, 吴忠军³

(1. 桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学, 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004; 3. 桂林理工大学, 旅游与风景园林学院, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 研究不同森林类型土壤水力特性的变化特征, 为区域生态景观建设与水源涵养功能提升提供科学依据。[方法] 以广西壮族自治区龙脊梯田区不同森林类型(竹林、杉木林、混交林)和梯田为研究对象, 调查不同土层(10, 20, 40, 60 cm)土壤物理特性, 分析土壤水力性质差异及其影响因素。[结果] ① 龙脊梯田土壤质地主要为粉砂质壤土; 各层次土壤黏粒含量差异显著, 而粉粒和砂粒含量差异不显著; ② 杉木林和混交林各层次土壤容重差异性不显著, 竹林与梯田下层土壤容重均显著大于上层; 土壤毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量总体呈现: 混交林>杉木林>竹林>梯田; ③ 竹林土壤渗透能力最强, 杉木林和混交林次之, 梯田最弱; ④ 相同土壤吸力下, 混交林和杉木林土壤体积含水率大小相当, 土壤持水能力均大于竹林和梯田。土壤容重、孔隙度(毛管孔隙度、总孔隙度)是土壤渗透性和持水性的主要影响因子, 其中饱和导水率与土壤容重呈显著负相关, 与孔隙度呈显著正相关; 土壤水分特征曲线拟合参数 θ_s 与土壤容重、孔隙度(毛管孔隙度、总孔隙度)分别呈极显著负、正相关, α 与土壤孔隙度呈显著正相关。[结论] 竹林土壤渗透性能最强, 而土壤持水能力较弱, 杉木林、混交林均具有较强的土壤持水能力, 能发挥很好的水源涵养功能。

关键词: 龙脊梯田; 森林类型; 饱和导水率; 土壤水分特征曲线

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)05-0092-07

中图分类号: S714.5

文献参数: 王醒, 方荣杰, 张帅普, 等. 广西龙脊梯田区森林类型对土壤水力特性的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 92-98. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.013; Wang Xing, Fang Rongjie, Zhang Shuaipu, et al. Soil hydraulic characteristics of different forest types in a Longji terraced field in Guangxi region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 92-98.

Soil Hydraulic Characteristics of Different Forest Types in a Longji Terraced Field in Guangxi Region

Wang Xing^{1,2}, Fang Rongjie^{1,2}, Zhang Shuaipu^{1,2}, Huang Hui^{1,2}, Huang Lang^{1,2}, Wu Zhongjun³

(1. *Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology,*

Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. *Collaborative Innovation Center for Water*

Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. *College of Tourism and Landscape Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)*

Abstract: [Objective] Variation of soil hydraulic characteristics under different forest types were studied to provide a scientific basis for regional ecological landscape construction and selection of water resource conservation forests. [Methods] Different forest types (bamboo forest, chinese fir forest, mixed forest) and terraced fields were selected as the research objects at a Longji terraced field in Guangxi Zhuang Autonomous Reion. The main soil properties were measured in different soil layers (10, 20, 40, 60 cm) to study soil hydraulic characteristics and their influencing factors. [Results] ① The soil texture of Longji terraces was silty loam. The clay content of the soil had significant differences, but the silt and sand content had no significant differences in different layers. ② Soil bulk density differences in different layers of chinese fir forest and mixed forest were not significant, but the soil bulk density in the lower layer of bamboo forest and terraced

收稿日期: 2021-04-16

修回日期: 2021-06-07

资助项目: 桂林市科学研究与技术开发计划项目重大专项“龙脊梯田景观资源可持续利用技术集成研究与旅游产业示范”(20180102-2)

第一作者: 王醒(1995—), 女(壮族), 广西壮族自治区天峨县人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水文学。Email: 1394260457@qq.com。

通讯作者: 方荣杰(1966—), 男(汉族), 广西壮族自治区桂林市人, 研究员, 主要从事水资源可持续利用和水环境保护研究。Email: glfrj@126.com。

field was significantly higher than that in the upper layer. The soil capillary porosity, total porosity, and field water holding capacity followed the order of mixed forest > chinese fir forest > bamboo forest > terraces. ③ The soil permeability of bamboo forest was the greatest, followed by chinese fir forest and mixed forest, and was lowest in the terraced fields. ④ Under the same soil suction, the volumetric soil moisture content of mixed forest and chinese fir forest were similar, and the soil water holding capacity was greater than that of bamboo forest and terraced field. Soil bulk density and porosity (capillary porosity and total porosity) were the main factors influencing soil permeability and water holding capacity. The saturated water conductivity had a significant negative correlation with soil bulk density and a significant positive correlation with porosity. The soil water characteristic curve fitting parameter θ_s was significantly negatively and positively correlated with soil bulk density and porosity (capillary porosity and total porosity), respectively, and α was significantly positively correlated with soil porosity. [Conclusion] Bamboo forest had the greatest soil permeability, but the lowest soil water-holding capacity. Both chinese fir forest and mixed forest had large soil water-holding capacity, and can be instrumental in promoting good water conservation.

Keywords: Longji terrace; forest types; saturated hydraulic conductivity; soil water characteristic curve

森林具有保持水土、涵养水源等重要功能,其水文调节是通过植被冠层、枯落物层和土壤层等主要层次对降水的拦截和吸收发挥作用,使降水重新分配和充分贮蓄而起到强大的水源涵养功能,在调节气候、维持生态平衡等方面具有重要作用^[1-2]。其中,土壤层是植被赖以生存的基础,是森林涵养水源的主体,能减少水土流失、增加降雨入渗量,是天然的地下水库^[3-4]。而土壤水力性质作为土壤保持水分和传导水分的决定因素对土壤持水和渗透水特性的影响则决定了土壤保水效果及其水文效应,进而影响植被对土壤水分的吸收和土壤—植物—大气系统中的水循环^[5-6]。因此,研究森林土壤水力特性对区域生态环境保护和水资源管理具有重要意义。土壤水力特性通常由土壤水分特征曲线、饱和导水率等水力参数来描述,是许多与灌溉、排水、水分运动和土壤中溶质运移相关的研究和应用都需要确定的土壤指标,受地形、气候、土地利用方式等诸多因素影响,尤其不同土地利用方式对土壤容重、土壤质地、有机质含量等因子的改变必使土壤水力特性发生变化^[7-8]。国内外学者针对不同土地利用方式对土壤水力特性的影响进行了大量研究。Olorunfemi等^[9]通过比较农田、种植农业和天然林土壤水力特性发现,天然林比农田和种植地具有更高的持水能力。Owuor等^[10]通过对天然林与其改造所形成的农业用地土壤水力特性进行研究发现,天然森林向农业用地的转化后,土壤水力性质显著退化、土壤持水能力降低。纪月等^[11]通过比较不同退耕年限下土壤水力特性发现,随着退耕年限的增加,土壤理化性质逐渐接近天然林,土壤持水性能得到很大改善。土壤水力特性是活跃和变化的,人类活动、环境条件的变化会显著影响土壤水力特性,不同土地利用方式下土壤水力特性仍需要进一步研究。

广西壮族自治区龙脊梯田是人类宝贵的农业文化遗产,也是中国西南具有代表性的水梯田之一,更是山地水土保持的典范,具有“森林、村庄、梯田、溪流(河流)”四度同构的生态系统^[12]。梯田区域无塘无库,处于山顶的森林系统通过拦截降水并涵养在土壤中,形成源源不断的水流,是梯田灌溉的重要源头。近些年来,随着区域旅游业的快速发展,游客日益增多,部分用于农田灌溉的山涧流水被引为生活用水,加上一些水资源的不合理利用等因素,导致部分梯田撂荒、田块崩塌严重,给生态景观造成极大压力和一定的破坏,生态服务功能下降。虽然管理部门采取了一定的生态保护措施,将部分梯田退耕种植人工林,生态环境发生了显著变化,但在追求更大经济效益的同时,对诸多生态环境问题的解决仍是一项巨大挑战。森林水文效应及其对区域水资源平衡的影响已引起社会各界的关注^[13-14],但不同森林类型土壤水力性质的研究相对较少。混交林、竹林、杉木林是广西龙脊梯田区典型的森林类型,其中杉木林是由梯田退耕而来,为了增加土壤入渗、防止水土流失,下垫面土壤仍保留梯田原本的梯式结构。因此,本文以这3种不同森林类型和梯田为研究对象,从土壤基本物理性质、饱和导水率及水分特征曲线等方面综合分析广西龙脊梯田不同森林类型土壤水力特性差异,了解区域不同森林土壤保水、蓄水及渗透性能,以期为龙脊梯田生态环境修复和建设及水土资源管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

龙脊梯田位于广西桂林市龙胜各族自治县龙脊镇平安村龙脊山,位于东经 $109^{\circ}32'$ — $110^{\circ}14'$,北纬 $25^{\circ}35'$ — $26^{\circ}17'$ 。地处中亚热带季风气候区,夏季呈

东南风,冬季多西北风,风力一般 1~3 级。气候受季风影响,四季分明,年平均气温 14.4~16.9 °C,最热月(7 月)平均气温 25.4 °C,最高气温 32 °C,最冷月(1 月)平均气温 7.1 °C,最低气温-6 °C。年降雨量 1 600~1 700 mm,雨量丰沛,且主要集中在 5—9 月,年均日照时数 1 225.7 h,平均无霜期 290 d。区域海拔 300~1 900 m,最大坡度达 50°,地形特征独特,空间结构主要由森林、村寨及梯田组成,是典型自然—人工复合生态系统,土壤类型以红壤土、黄壤土及黄棕壤土为主,森林系统植被长势良好,覆盖率达 75.6% 以上,为区域水资源提供强大的保育功能,主要包含竹林、杉木林、混交林等水源涵养林类型,其中竹林主要优势种有毛竹(*Phyllostachys edulis*)、櫟木(*Loropetalum chinense*),杉木林主要优势种有杉木(*Cunninghamia lanceolata*),混交林优势种则主要有杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)、毛竹、櫟木等。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 本研究选定竹林、杉木林、混交林、梯田为研究对象,采样时间为 2019 年 7 月、2021 年 5 月。各林地选择 2 个 10 m×10 m 标准样地,各标准样地内取 3 个 1 m×1 m 小样方,而梯田土壤比较均匀,因此选择两个梯田,每个梯田内取两个 0.6 m×0.6 m 小样方进行采样,用环刀(体积为 100 cm³)采集 10, 20, 40, 60 cm 深度的原状土,每个深度取 3 个重复样,带回实验室以测定土壤物理特性。同时,调查不同林地植被种类及生长特征,记录植被胸径、树高及经纬度、海拔、坡向、坡度等因子特征(表 1)。

表 1 样地概况

| 土地利用类型 | 海拔/m | 坡向 | 坡度/(°) | 平均胸径/cm | 平均树高/m |
|--------|------|---------|--------|---------|--------|
| 竹林林地 | 950 | 北偏西 51° | 36 | 7.45 | 12.16 |
| 杉木林地 | 917 | 北偏西 20° | 35 | 15.60 | 13.00 |
| 混交林林地 | 895 | 北偏东 36° | 34 | 16.41 | 17.23 |
| 梯田 | 907 | 正北 | 40 | — | — |

1.2.2 样品处理及测定 土壤孔隙度、饱和含水率和田间含水量均采用环刀法测定,容重采用烘干法测定。土壤颗粒机械组成、饱和导水率测定分别采用马尔文 3000 激光粒度仪、马氏瓶恒定水头法。土壤质地划分采用国际制土壤质地分类标准来确定。土壤水分特征曲线采用美国 SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORP 生产的压力膜仪进行测定,先将环刀放入水中浸泡(24 h)至土壤饱和,然后在压力膜仪中

进行压力值为 30, 60, 100, 300, 500, 700, 1 000, 1 300 kPa 的土壤脱湿试验。

1.2.3 土壤水分特征曲线拟合模型 本研究采用应用较广泛且具有较高拟合精度和普适性的 Van-Genuchten 拟合方程^[15-17]来模拟土壤水分特征曲线,其方程表达式为:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率(cm³/cm³); θ_r 为残余含水率; θ_s 为饱和含水率; h 为土壤吸力(cm 或 Pa); α 是进气吸力相关的参数; m, n 为形状参数,与土壤孔径分布有关, $m = 1 - 1/n$ ($n > 1$)。为了适应 RETC 软件对土壤水分特征曲线的拟合单位,压力膜仪表盘压力单位 bar(100 kPa)按 100 kPa=1 020 cm 水柱换算为单位 cm。

1.2.4 数据处理 采用 Origin 2018 绘制相应图表及拟合土壤水分特征曲线,并采用 US Salinity Laboratory(美国盐改中心)开发的 RECT 软件求解土壤水分特征曲线方程的参数值。采用 SPSS 软件计算土壤水力参数之间的 Pearson 相关系数。

2 结果与分析

2.1 土壤基本物理性质

表 2 展示了各样地不同深度土壤基本物理性质。基于土壤颗粒机械组成,各样地土壤质地划分均为粉砂质壤土。不同层次粉粒、砂粒含量差异不显著($p > 0.05$),但各层次土壤黏粒含量差异随梯田、混交林、杉木林、竹林逐渐明显。随土层深度的增加,竹林、混交林及梯田样地土壤黏粒含量呈增加趋势,其中竹林 60 cm 深度土壤黏粒含量较 10 cm 深度显著增高了 10.06%;杉木林土壤黏粒含量变化相反。

梯田土壤容重随土层深度的增加而增大,而竹林、混交林、杉木林土壤容重呈先减小后增加的趋势,最小值分别出现在 20, 20, 40 cm;竹林和梯田下层(40, 60 cm)土壤容重显著大于上层(10, 20 cm),杉木林、混交林各土层的土壤容重差异不明显。总体而言,梯田平均土壤容重(1.34 g/cm³)最大,其次是竹林(1.17 g/cm³),杉木林(1.12 g/cm³)与混交林(1.09 g/cm³)平均土壤容重大小相当且较小。随土层深度的增加,竹林、混交林、梯田样地土壤孔隙度(毛细孔隙度、总孔隙度)、田间持水量呈先增加后减小的趋势,与土壤容重的变化趋势相反;竹林、梯田上层(10, 20 cm)土壤孔隙度和持水量均显著大于下层(40, 60 cm),而杉木林、混交林各土层孔隙度和田间持水量差异不明显。孔隙度和田间持水量均值均

表现为:混交林>杉木林>竹林>梯田;其中,混交林、杉木林、竹林样地平均总孔隙度分别高达55.52%,54.68%,54.67%,分别比梯田高出6.15%,5.32%,5.31%。

竹林、杉木林、混交林土壤饱和和导水率均随土层深度的增加呈先增后减小的变化趋势,最大值出现在中层深度(20,40 cm),其中竹林最大土壤饱和和导

率高达 7.58×10^{-2} cm/min,而梯田饱和和导水率随土层深度的增加而减小,梯田土层深度达40 cm后土壤饱和和导水率显著降低,透水能力极差,在较短时间内可以作为隔水层。平均饱和和导水率随梯田、混交林、杉木林、竹林依次增大,分别为: 3.63×10^{-2} , 2.50×10^{-2} , 1.84×10^{-2} , 0.37×10^{-2} cm/min,林地饱和和导水率比梯田高达5倍以上。

表2 广西龙脊梯田不同样地土壤基本物理性质

| 样地类型 | 土层深度/cm | 土壤颗粒机械组成/% | | | 容重/ ($g \cdot cm^{-3}$) | 毛细孔隙度/% | 总孔隙度/% | 田间持水量/% | 饱和导水率/($26 \text{ } ^\circ\text{C}$, $10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$) |
|------|---------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--|
| | | 黏粒 ($<0.002 \text{ mm}$) | 粉粒(0.002~ 0.05 mm) | 砂粒(0.05~ 2 mm) | | | | | |
| 竹林 | 10 | 2.97±0.08 ^d | 61.92±2.06 ^a | 35.11±2.10 ^a | 1.08±0.07 ^{bc} | 52.65±2.00 ^a | 57.71±3.36 ^a | 46.51±4.60 ^a | 3.69±4.03 ^a |
| | 20 | 6.57±0.53 ^c | 62.10±4.28 ^a | 31.33±4.73 ^a | 1.01±0.15 ^b | 49.94±5.80 ^a | 59.28±5.56 ^a | 49.86±9.61 ^a | 7.58±5.45 ^a |
| | 40 | 9.96±1.56 ^b | 58.16±10.6 ^a | 31.88±11.90 ^a | 1.26±0.08 ^{ab} | 41.87±3.32 ^b | 51.98±3.25 ^{ab} | 31.56±4.48 ^b | 2.89±2.39 ^a |
| | 60 | 13.03±2.18 ^a | 61.66±3.47 ^a | 25.31±4.94 ^a | 1.33±0.10 ^a | 41.53±1.88 ^b | 49.71±2.42 ^b | 30.11±0.82 ^b | 0.35±0.11 ^a |
| 杉木林 | 10 | 13.04±1.63 ^a | 51.81±5.60 ^a | 35.15±4.35 ^a | 1.16±0.03 ^a | 46.28±6.48 ^a | 53.93±3.56 ^a | 37.83±6.44 ^a | 0.98±1.04 ^a |
| | 20 | 9.79±0.65 ^b | 54.24±0.77 ^a | 35.97±0.13 ^a | 1.10±0.10 ^a | 45.54±7.39 ^a | 55.09±3.58 ^a | 39.55±9.92 ^a | 3.86±2.17 ^a |
| | 40 | 9.39±0.41 ^{bc} | 52.07±2.79 ^a | 38.54±2.40 ^a | 1.09±0.12 ^a | 48.54±4.60 ^a | 53.96±5.70 ^a | 44.92±6.32 ^a | 3.02±2.32 ^a |
| | 60 | 7.71±0.75 ^c | 56.37±3.01 ^a | 35.91±3.76 ^a | 1.12±0.12 ^a | 47.06±6.30 ^a | 55.76±4.82 ^a | 40.22±7.91 ^a | 2.13±1.85 ^a |
| 混交林 | 10 | 9.62±2.52 ^a | 64.81±10.24 ^a | 25.56±12.72 ^a | 1.07±0.05 ^b | 47.44±7.04 ^a | 57.04±3.72 ^a | 41.94±7.82 ^a | 1.07±0.80 ^a |
| | 20 | 5.23±1.14 ^b | 54.87±7.25 ^a | 39.91±7.53 ^a | 1.05±0.04 ^b | 49.58±5.93 ^a | 57.20±2.45 ^a | 44.60±7.39 ^a | 2.37±4.24 ^a |
| | 40 | 9.92±0.64 ^a | 59.4±1.70 ^a | 30.68±2.34 ^a | 1.06±0.06 ^b | 45.14±5.09 ^a | 56.36±2.28 ^a | 40.37±8.37 ^a | 2.83±3.73 ^a |
| | 60 | 10.14±2.59 ^a | 64.63±6.91 ^a | 25.23±9.50 ^a | 1.18±0.05 ^a | 44.32±6.84 ^a | 51.47±1.70 ^b | 35.34±4.94 ^a | 1.07±1.29 ^a |
| 梯田 | 10 | 7.00±0.51 ^a | 54.51±2.81 ^a | 38.49±2.61 ^a | 1.13±0.05 ^b | 47.86±1.95 ^a | 54.25±1.39 ^a | 40.50±3.32 ^a | 1.20±2.03 ^a |
| | 20 | 7.74±0.43 ^a | 55.67±4.15 ^a | 36.59±3.74 ^{ab} | 1.20±0.03 ^b | 49.55±1.50 ^a | 54.68±1.02 ^a | 39.61±4.38 ^a | 0.24±0.25 ^a |
| | 40 | 8.24±0.70 ^a | 61.05±3.45 ^a | 30.71±3.22 ^b | 1.50±0.16 ^a | 36.65±5.67 ^b | 44.10±6.48 ^b | 23.37±5.00 ^b | 0.01±0.01 ^a |
| | 60 | 9.40±2.62 ^a | 56.18±1.99 ^a | 34.43±2.05 ^{ab} | 1.54±0.15 ^a | 38.47±3.86 ^b | 44.42±5.10 ^b | 24.16±3.74 ^b | 0.03±0.03 ^a |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母分别表示各样地不同土层差异显著($p < 0.05$)。

2.2 土壤水分特征曲线

土壤质地、容重、孔隙特征等土壤物理性质对水分运移有直接影响,进而影响土壤水分特征曲线的变化规律,导致残余含水率(θ_r)、饱和含水率(θ_s)、进气值相关参数(α)、形状系数(n)等拟合水力参数呈现不一样的变化特征。表3展示了Van-Genuchten方程拟合土壤水分特征曲线的决定系数及拟合参数。各样地土壤水分特征曲线拟合效果较好,相关系数均达0.95以上,拟合参数具有一定差异。林地(竹林、杉木林、混交林) θ_r 较梯田变化波动大,林地、梯田 θ_r 变化范围分别为0.000 1~0.313 5 cm^3/cm^3 ,0~0.000 8 cm^3/cm^3 , θ_r 平均值随梯田、竹林、杉木林、混交林依次增大。饱和含水率 θ_s 随深度的增加而减小,均值表现为:杉木林>混交林>竹林>梯田,杉木林与混交林 θ_s 相近。各样地进气值相关参数 α ,形状系数 n 变化相对稳定且各土层差异不明显。

图1展示了各样地不同土层的土壤水分特征曲

线。不同样地各土层土壤含水率随土壤基质吸力的变化具有不同程度的变化特征。随着土壤基质吸力增加,在0~1 020 cm吸力段,土壤含水率急剧降低,释水能力强;而在1 020~13 260 cm吸力段,土壤含水率降低从缓慢逐渐趋于平缓,释水性能变弱。

土壤基质吸力变化引起不同土层土壤含水率变化差异明显。在相同土壤基质吸力条件下,竹林不同土层深度土壤体积含水率整体呈现:10 cm>60 cm>40 cm>20 cm;杉木林不同土层深度土壤体积含水率整体呈现:40 cm>60 cm>20 cm>10 cm,在0~1 020 cm吸力段,随土层深度的增大,土壤体积含水率整体呈增加趋势,且10,20,60 cm含水率变化趋势较相近,而随着吸力值增大,20,40,60 cm的含水率变化逐渐相近;混交林不同土层深度土壤体积含水率呈现:20 cm>10 cm>40 cm>60 cm,随土层深度的增大土壤体积含水率整体呈减小趋势;梯田不同土层深度土壤体积含水率变化具有明显的分层特征,随吸

力值的增大,上层(10,20 cm)土壤体积含水率明显高于下层(40,60 cm)。总体上,在同等土壤基质吸力条件下

下,混交林与杉木林土壤体积含水率大小相当,两者均大于竹林,且明显大于梯田下层(40,60 cm)土壤。

表 3 广西龙脊梯田区土壤水分特征曲线 Van-Genuchten 模型的拟合参数

| 样地 | 土层深度/ cm | 残余含水率(θ_r)/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) | 饱和含水率(θ_s)/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) | 进气值相关参数 (α)/cm | 形状系数 (n) | 决定系数 (R^2) |
|-----|-------------|--|--|----------------------------|-----------------|-------------------|
| 竹林 | 10 | 0.000 3 | 0.55 | 0.020 8 | 1.10 | 0.98 |
| | 20 | 0.000 1 | 0.56 | 0.050 5 | 1.13 | 0.99 |
| | 40 | 0.139 3 | 0.49 | 0.011 7 | 1.21 | 0.98 |
| | 60 | 0.000 4 | 0.46 | 0.009 2 | 1.12 | 0.98 |
| 杉木林 | 10 | 0.000 4 | 0.55 | 0.026 2 | 1.08 | 0.98 |
| | 20 | 0.279 8 | 0.54 | 0.016 1 | 1.25 | 0.97 |
| | 40 | 0.000 5 | 0.61 | 0.020 5 | 1.10 | 0.98 |
| | 60 | 0.000 9 | 0.54 | 0.027 6 | 1.08 | 0.97 |
| 混交林 | 10 | 0.214 1 | 0.56 | 0.006 7 | 1.26 | 0.96 |
| | 20 | 0.313 5 | 0.57 | 0.004 6 | 1.48 | 0.98 |
| | 40 | 0.226 5 | 0.56 | 0.004 6 | 1.34 | 0.98 |
| | 60 | 0.247 6 | 0.52 | 0.003 9 | 1.46 | 0.98 |
| 梯田 | 10 | 0.000 8 | 0.54 | 0.026 5 | 1.08 | 0.98 |
| | 20 | 0.000 7 | 0.55 | 0.019 3 | 1.07 | 0.98 |
| | 40 | 0.000 0 | 0.46 | 0.004 0 | 1.19 | 0.99 |
| | 60 | 0.000 6 | 0.45 | 0.002 3 | 1.20 | 0.98 |

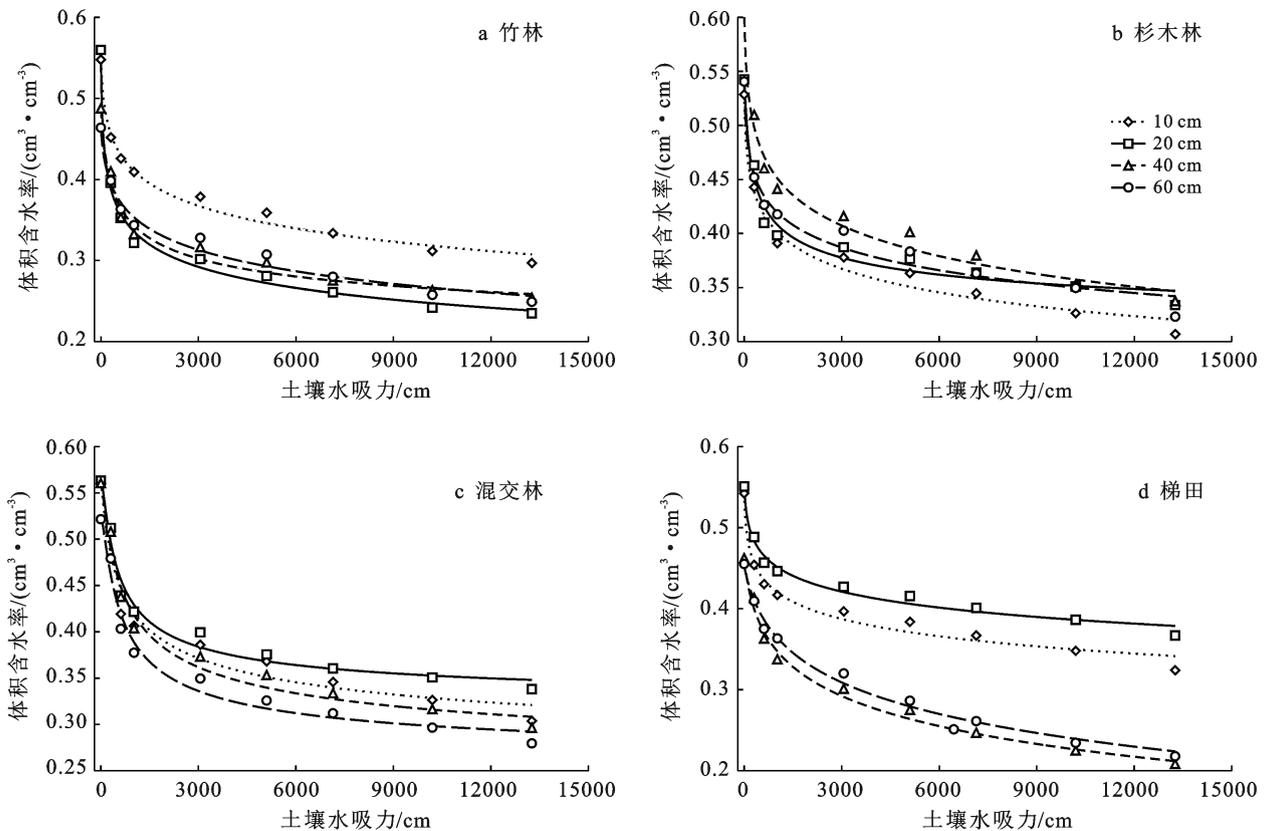


图 1 广西龙脊梯田区不同样地土壤水分特征曲线

2.3 相关性分析

表 4 展示了土壤水力参数与土壤基本物理性质的

相关性。土壤容重均与田间持水量、毛管孔隙度、总孔隙度呈极显著负相关($p < 0.01$);饱和导水率与土壤容

重呈显著负相关($p < 0.05$),与毛管孔隙度、总孔隙度呈显著正相关。土壤水分特征曲线拟合参数 θ_s 与土壤容重、孔隙度(毛管孔隙度、总孔隙度)分别呈极显

著负、正相关; α 与毛管孔隙度、总孔隙度均呈显著正相关; n 与土壤物理性质无显著关系,但与 θ_s , α 相互影响,与 θ_s , α 分别呈极显著正相关、显著负相关。

表 4 广西龙脊梯田区土壤水力参数与土壤基本物理性质的相关性分析

| 指标 | 黏粒 | 粉粒 | 砂粒 | 容重 | 毛管孔隙度 | 总孔隙度 | 田间持水量 | 饱和导水率 | 残余含水率 θ_r | 饱和含水率 θ_s | 进气值相关参数 α |
|------------------|--------|----------|--------|----------|---------|---------|---------|--------|------------------|------------------|------------------|
| 粉粒 | -0.096 | 1 | | | | | | | | | |
| 砂粒 | -0.357 | -0.895** | 1 | | | | | | | | |
| 容重 | 0.301 | 0.008 | -0.142 | 1 | | | | | | | |
| 毛管孔隙度 | -0.375 | 0.002 | 0.166 | -0.919** | 1 | | | | | | |
| 总孔隙度 | -0.321 | 0.002 | 0.142 | -0.977** | 0.963** | 1 | | | | | |
| 田间持水量 | -0.384 | 0.023 | 0.150 | -0.974** | 0.961** | 0.966** | 1 | | | | |
| 饱和导水率 | -0.372 | 0.299 | -0.114 | -0.592* | 0.549* | 0.563* | 0.654** | 1 | | | |
| 残余含水率 θ_r | -0.098 | 0.252 | -0.193 | -0.349 | 0.232 | 0.250 | 0.292 | 0.123 | 1 | | |
| 饱和含水率 θ_s | -0.372 | -0.113 | 0.272 | -0.929** | 0.845** | 0.887** | 0.924** | 0.467 | 0.254 | 1 | |
| 进气值相关参数 α | -0.141 | 0.078 | -0.011 | -0.479 | 0.550* | 0.548* | 0.540* | 0.574* | -0.486 | 0.392 | 1 |
| 形状系数 n | -0.107 | 0.341 | -0.272 | -0.097 | -0.042 | -0.021 | 0.045 | 0.111 | 0.889** | 0.058 | -0.604* |

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。

3 讨论

土壤水力特性主要受土壤结构、容重、土壤质地等因素的影响,与区域气候、地形、植被类型等变化密切相关。土壤作为森林生态系统的主体,不同森林类型因植被根系大小及其分布、枯落物分解、壤中微生物活动等差异而具有不同土壤理化特性,导致土壤水力特性差异明显^[18]。本研究结果表明,由混交林与梯田退耕还林而来的杉木林具有相似的土壤物理性质,两者各层次土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量差异不明显;而竹林与梯田下层(40, 60 cm)土壤容重均显著大于上层(10, 20 cm),孔隙度、田间持水量变化相反。这可能与竹林土壤黏粒在深层聚集相关,枯落物的分解、壤中微生物活动等均有利于林地土壤大孔隙的发育,有助于土壤黏粒在大孔隙中随土壤水分的入渗而向深处富集,使得下层土壤颗粒较细、黏度大且紧实,土壤容重较大,土壤孔隙度、持水量相应减小^[19-20]。

饱和导水率与土壤容重呈显著负相关,与毛管孔隙度、总孔隙度呈显著正相关,说明饱和导水率受土壤容重、孔隙度的影响较大。本研究发现,平均土壤饱和导水率表现为:竹林 > 杉木林 > 混交林 > 梯田,说明竹林土壤渗性能力最强,其次是杉木林和混交林,梯田土壤渗性能力最弱;其中,林地土壤渗透能力在中层(20, 40 cm)最强,梯田土壤渗透能力在表层(10 cm)最强且在土层深度达 40 cm 后显著降低,这是由于各林地中层土壤中植被根系密度大且穿插土

壤的深度深、土壤微生物活跃等,使土壤结构疏松多孔,土壤容重小、孔隙度大,而有利于土壤水分入渗,故土壤渗透能力强^[21],而农田耕作能使表层土破碎和疏松,但下层土壤由于受到长期挤压和剪切力的作用而变得密实,形成致密的犁板,导致农田比林地拥有更低的土壤导水率^[5],与 Owuor 等^[10]研究结果一致。同时,也说明梯田退耕还林能够改善土壤孔隙结构,特别是深层土壤结构的改善最为明显,有利于提高土壤渗透能力。

土壤水分特征曲线能反映土壤的持水性能,受土壤质地、容重、孔隙度等因素的影响,土壤水分特征曲线拟合参数 θ_s 与土壤容重、孔隙度(毛管孔隙度、总孔隙度)分别呈极显著负、正相关, α 与毛管孔隙度、总孔隙度均呈显著正相关,即土壤容重越小,土壤结构越疏松,孔隙度越大, θ_s , α 越大,土壤持水性增强^[22-23]。不同土壤结构使水分在土壤中运动时受到的阻力不同,导致同样地土壤水分运移特征往往具有明显差异,当土壤吸力很小时,土壤保留的水分取决于土壤孔隙结构,水分因重力作用易从大孔隙中排出,土壤水分下降速度快,不利于植被根系吸收,而随土壤吸力的增大,土壤毛细力、颗粒吸附力逐渐起决定作用,水分从小孔隙中释出较困难,与土壤颗粒大小和矿物成分密切相关^[24]。通过对比同样地各层次土壤持水性发现,梯田上层(10, 20 cm)土壤持水性显著高于下层(40, 60 cm);竹林、杉木林、混交林各层次土壤持水性差异不明显,但竹林、混交林上层土壤持水性高于下层,而杉木林下层土壤持水性高于上

层,这可能与杉木林被种植于梯田田面且保持土壤原本的梯式结构相关,梯形土面有助于重力水从上阶梯土面向下阶梯土面渗流,缩短了径流路径,增加了土壤入渗^[25],优化土壤环境,保证植物的正常生长,增加植被在土壤中的根系分布,进而有利于下层土壤性质的改善。冯天骄等^[26]对黄土丘陵区不同整地措施影响下土壤水力特性的研究发现,坡改梯整地方式相比于自然坡面具有更高的土壤持水性能和供水能力。这说明梯式整地与人工林种植相结合能够极大改善土壤结构,增强土壤渗透性和持水性,有利于防止水土流失,对生态恢复和保护具有重要意义。

总体上,广西龙脊梯田区混交林与杉木林土壤持水性相近,且均强于竹林,梯田最弱。从区域生态保护、水源涵养功能角度出发,竹林土壤剖面虽具有较强的渗透性能,但土壤持水性比杉木林和混交林差,不利于保育水资源,混交林与杉木林更能提升区域水源涵养功能。

4 结论

(1) 广西龙脊梯田土壤质地为粉砂质壤土,各土层土壤黏粒差异明显,粉粒和砂粒差异不显著。杉木林和混交林各层次土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量差异性不显著,竹林与梯田下层土壤容重显著大于上层,而上层土壤毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量下层;土壤容重总体呈现:梯田>竹林>杉木林>混交林,土壤毛管孔隙度、总孔隙度、田间持水量变化相反。土壤容重、毛管孔隙度、总孔隙度是影响土壤渗透性能和持水性能的关键因素。林地土壤渗透能力较强,为梯田土壤渗透能力 5 倍以上。

(2) 随土壤基质吸力的增加,土壤含水率呈逐渐下降趋势,在 0~1 020 cm 吸力段内下降迅速,而在 1 020~13 260 cm 吸力段内下降速度逐渐减慢。同样地在相同土壤吸力下,竹林、混交林、梯田上层土壤持水能力较强,杉木林下层土壤持水能力较强。混交林和杉木林土壤持水能力相近且均大于竹林,梯田土壤持水能力最弱。

[参 考 文 献]

- [1] 郭宇嘉,牛庆花,陆贵巧,等.承德市第三乡林场不同林分类型枯落物和土壤的持水特性[J].水土保持通报,2018,38(3):38-44.
- [2] 孙欧文,蔡建国,吴家森,等.浙江省典型森林类型枯落物及林下土壤水文特性[J].水土保持研究,2019,26(1):118-123.
- [3] 周玉杰,李建华,王春燕,等.海南岛 3 种森林类型的土壤特性及水源涵养功能[J].安徽农业科学,2017,45(36):165-167.
- [4] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31(3):118-122.
- [5] Yu Miaozi, Zhang Lulu, Xu Xuexuan, et al. Impact of land-use changes on soil hydraulic properties of Calcaric Regosols on the Loess Plateau, NW China [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015,178(3):486-498.
- [6] Pinheiro E A R, de Jong van Lier Q, Šimunek J. The role of soil hydraulic properties in crop water use efficiency: A process-based analysis for some Brazilian scenarios [J]. Agricultural Systems, 2019,173:364-377.
- [7] 胡传旺,王辉,刘常,等.南方典型土壤水力特征差异性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):97-102.
- [8] Shwetha P, Varija K. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils [J]. Aquatic Procedia, 2015,4:1142-1149.
- [9] Olorunfemi I E, Fasinmirin J T. Land use management effects on soil hydrophobicity and hydraulic properties in Ekiti State, forest vegetative zone of Nigeria [J]. Catena, 2017,155:170-182.
- [10] Owuor S O, Butterbach-Bahl K, Guzha A C, et al. Conversion of natural forest results in a significant degradation of soil hydraulic properties in the Highlands of Kenya [J]. Soil and Tillage Research, 2018,176:36-44.
- [11] 纪月,杜琳青,田鹏,等.米仓山不同退耕年限土壤理化性质变化特征[J].水土保持通报,2020,40(5):48-54.
- [12] 卢勇,余加红,唐晓云.神奇的龙脊梯田[J].国土资源科普与文化,2018(1):10-18.
- [13] 王龙,宋维峰,杨寿荣,等.广西龙脊梯田区森林枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2011,18(6):84-88.
- [14] 邵晖,黄晶,左腾云.桂林龙胜龙脊梯田整治水资源平衡分析[J].中国农学通报,2011,27(14):227-232.
- [15] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等.鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟[J].土壤学报,2016,53(2):355-364.
- [16] 李玉庆,蒙强,张存,等.西藏林芝地区土壤水分特征曲线适用性研究[J].灌溉排水学报,2017,36(10):75-81.
- [17] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):892-898.
- [18] 吕娇, Mustaq Shah, 崔义,等.土壤紧实度和凋落物覆盖对城市森林土壤持水、渗水能力的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(8):102-111.
- [19] 孟红旗,熊仁鹏,王崇,等.采煤沉陷区不同土地利用类型土壤水分、有机质和质地的空间变异性[J].土壤学报,2018,55(4):911-922.

- 团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2007(9):1973-1979.
- [21] 刘哲,韩霖昌,孙增慧,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究砂姜黑土添加秸秆后团聚体有机碳变化规律[J].农业工程学报,2017,33(14):179-187.
- [22] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.
- [23] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems [J]. Soil and Tillage Research, 1997,43(1/2):131-167.
- [24] 付威,雍晨旭,马东豪,等.黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J].农业工程学报,2019,35(21):252-261.
- [25] Song Z W, Zhu P, Gao H J, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon content and aggregate composition under continuous maize cropping in Northeast China [J]. Journal of Agricultural Science, 2015,153(2):236-244.
- [26] 张瑞,张贵龙,姬艳艳,等.不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响[J].环境科学,2013,34(1):277-282.
- [27] 刘哲,孙增慧,吕贻忠.长期不同施肥方式对华北地区温室和农田土壤团聚体形成特征的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(8):1119-1128.
- [28] Verchot L V, Dutaur L, Shepherd K D, et al. Organic matter stabilization in soil aggregates: Understanding the biogeochemical mechanisms that determine the fate of carbon inputs in soils [J]. Geoderma, 2011, 161(3/4):182-193.
- [29] 梁爱珍,张晓平,申艳,等.东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征[J].应用生态学报,2008,19(5):1052-1057.
- [30] Meng Qingfeng, Sun Yuting, Zhao Jing, et al. Distribution of carbon and nitrogen in water-stable aggregates and soil stability under long-term manure application in solonchic soils of the Songnen Plain, Northeast China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(6):1041-1049.
- [31] 赵红,袁培民,吕贻忠,等.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤,2011,43(2):306-311.
- [32] Wang Fang, Tong Yanan, Zhang Jinshui, et al. Effects of various organic materials on soil aggregate stability and soil microbiological properties on the Loess Plateau of China [J]. Plant, Soil and Environment, 2013,59, 162-168.
- [33] Tovihoudji P G, Akponikpè P B I, Adjogboto A, et al. Combining hill-placed manure and mineral fertilizer enhances maize productivity and profitability in Northern Benin [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 110(3):375-393.
- [34] 刘洪涛,陈同斌,郑国砥,等.有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析:以污泥堆肥生产有机肥为例[J].生态环境学报,2010,19(4):1000-1003.
- [35] 蒋倩红,陆志峰,赵海燕,等.长江中下游冬油菜产区有机无机肥配施下减氮增效潜力分析[J].中国农业科学,2020,53(14):2907-2918.
- [36] 简少芬,钟楚,谭桂玉,等.有机种植对环境和作物品质特征的研究进展[J].北方园艺,2020(12):148-154.

(上接第 98 页)

- [20] 孟红旗,赵同谦,徐华山,等.河岸带耕地降雨径流产流特征分析[J].农业环境科学学报,2009,28(4):749-754.
- [21] 文慧,倪世民,冯舒悦,等.赣南崩岗的发育阶段及部位对土壤水力性质的影响[J].农业工程学报,2019,35(24):136-143.
- [22] 牛晓倩,贾小旭,刘成功,等.关中平原农田土壤水力参数空间分异与模拟[J].水土保持学报,2021,35(1):198-204.
- [23] 李源,宋维峰,马建刚.中国西南水梯田土壤水分特性研究:以哈尼梯田为例[J].水土保持学报,2021,35(2):160-169.
- [24] 陈印平,夏江宝,刘俊华.不同农田防护林下盐碱地土壤水分特征曲线差异对比[J].中国水土保持科学,2019,17(5):18-24.
- [25] 王辉,杨小宝,田大作,等.紫鹊界梯田区不同土地利用类型土壤入渗特征研究[J].灌溉排水学报,2012,31(5):123-126.
- [26] 冯天骄,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性[J].环境科学,2017,38(9):3860-3870.