

DOI: 10.5846/stxb201902220332

孙天宇, 张丽萍, 费凯, 邓龙洲, 刘俏, 范晓娟. 林地土壤水源涵养多因素复合模拟研究——以茗溪流域为例. 生态学报, 2020, 40(8): - .

Sun T Y, Zhang L P, Fei K, Deng L Z, Liu Q, Fan X J. Multi-factor composite simulation of soil water conservation in forest land: A case study of the Tiaoxi River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

林地土壤水源涵养多因素复合模拟研究 ——以茗溪流域为例

孙天宇, 张丽萍*, 费凯, 邓龙洲, 刘俏, 范晓娟

浙江大学环境与资源学院, 浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058

摘要: 为了研究不同植被覆盖度、不同林相及不同林种林下土壤水源涵养的特性, 本研究以浙江省茗溪流域上游区为例, 采用野外不同林种土壤持水能力定时定点实测取样、室内不同植被覆盖度(0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 75%, 90%)、不同林相(上层覆盖、下层覆盖、上下层覆盖)的物理模型人工模拟降雨试验方法, 通过不同深度土壤水分含量测试、产汇流和入渗系数计算, 探索了林地不同经营管理方式下土壤涵养水源的特性, 结果表明: (1) 地表入渗系数随植被覆盖度的增加而增大, 随坡长增加入渗系数的增长比率增加, 降雨过程中植被覆盖度对入渗系数的影响比坡长的影响大。 (2) 不同林相的模拟试验结果表明, 地表入渗系数排序为上下层覆盖>上层覆盖>下层覆盖>裸地。随着产流历时增加, 林下土层的蓄水量呈线性增加, 与裸地比较, 累积蓄水量增加百分数为: 上层覆盖为 23%, 下层覆盖为 29%, 上下层覆盖为 37%。 (3) 通过监测不同林地不同深度土壤含水率的变化, 并与裸地进行对比得出不同林地涵养水源能力的强弱。其蓄水能力排序分别为板栗林>茶园>竹林。研究结果为林地管理、林相培育和林地土壤持水能力的提高具有科学方法论上的支撑和生产实践方面的借鉴。

关键词: 植被覆盖度; 林相结构; 持水能力; 模拟试验; 水源涵养

Multi-factor composite simulation of soil water conservation in forest land: A case study of the Tiaoxi River Basin

SUN Tianyu, ZHANG Liping*, FEI Kai, DENG Longzhou, LIU Qiao, FAN Xiaojuan

College of Environmental & Resource Sciences of Zhejiang University, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Hangzhou 310058, China

Abstract: The present study investigated the effects of vegetation coverage, forest form, and forest species on the soil water conservation capacity of forest land. The research was conducted in the upper reaches of the Tiaoxi River Basin (Zhejiang Province, China) and involved indoor artificial rainfall simulations. Physical models were obtained for different levels of vegetation coverage (0, 15, 30, 45, 60, 75, and 90%) and different forest forms (upper cover, lower cover, upper and lower cover). In addition, the study also measured the water-holding capacity of soils at different depths in the field. Results indicated that: (1) The infiltration coefficient increased with the increasing vegetation coverage, increased more rapidly as slope length increased, and was affected more by vegetation coverage than slope length during rainfall. (2) The forest form simulation experiment indicated that the surface infiltration coefficient decreased as follows: upper and lower layer coverage > upper layer coverage > lower layer coverage > bare land. The amount of water stored in the forest soil increased linearly with the runoff duration, and the cumulative water storage of the three forest forms was 37, 29, and 23% greater than that of bare land, respectively. (3) This study monitored changes in soil moisture content at different depths and in different

基金项目: 茗溪上游水源涵养与农村水环境综合整治县域示范(2014X07101-012-02)

收稿日期: 2019-02-22; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lpzhang@zju.edu.cn

forests. By comparing intact forest (chestnut forest, tea garden and bamboo forest) with the bare land, the strength of the water source capacity of forest land was obtained. Water storage capacity decreased as follows: chestnut forest > tea garden > bamboo forest. These findings provide scientific methodological support and production practice that can be used for managing forest land, cultivating various forest forms, and improving soil water-holding capacity.

Key Words: vegetation coverage; forest structure; water holding capacity; simulated experiment; water conservation

林地的水源涵养功能是全球水资源循环的重要调节方式之一^[1]。由于林木冠层、枯枝落叶层、土壤层等对雨水的截留吸收和阻滞作用,林地对延缓和减少地表径流的形成作用显著^[2-5],林地可以有效减少水土流失,具有水源涵养功能^[6-7]。为了合理评价林地的水源涵养能力,更好地开展区域林地管理与利用,国内外专家学者进行了大量的研究。有些学者对一定区域内不同林地类型的水源涵养能力进行了比较,如胡健^[8]等对青海云杉林、灌木丛与草地的根区土壤累计入渗量、土壤湿度进行了研究,结果表明青海云杉林具有更强的水源涵养能力。Jian^[9]等研究了不同土地覆盖类型下的土壤水分动态变化。刘凯^[10]等研究了青海高寒区不同林地类型的土壤特性及其水源涵养功能,结果表明云杉落叶松混交林水源涵养能力最强。齐特^[11]等比较了冀北地区丰宁县不同水源林地的土壤持水能力,研究得到杨树林地的涵养水源能力最强。刘璐璐^[12]等比较了琼江河流域不同林地类型的水源涵养能力,结果表明阔叶混交林涵养水源能力最强。研究方法主要是比较土壤物理特性及持水性能指标^[13-14],在此基础上有的学者也进行了蓄水能力的定量计算。适宜森林覆盖率的研究是水源涵养林空间配置的基础研究^[15],有不少学者对植被覆盖率对林地水源涵养能力的影响进行了研究,如张华嵩^[16]等通过对降雨量观测资料的平衡计算,发现随着植被覆盖度的增长,地表径流会逐渐减少,土壤入渗量会不断增加。Zhou^[17]等使用已发布数据代入 Fuh 方程检验,发现森林覆盖率与覆盖类型对于流域水产量影响显著。

林地水源涵养能力的研究多对土壤容重、孔隙度、持水量、入渗速度以及水文过程等进行测定与比较,研究手段既包括小尺度的单点试验,也有遥感和流域大尺度的试验。水源涵养能力的定量计算多由相关指标转换得到,往往仅对应吸持贮存水量而忽略了入渗过程中的滞留贮存水量,误差较大。植被覆盖率、林相类型等与林地水源涵养能力关系的研究也大都需要依靠过往的数据积累或长期的野外监测试验,存在较大的限制性。尚未见到将上述两方面研究进行有效整合的例子,这限制着对特定区域内林地水源涵养能力的综合评价,不利于林地管理、林相培育优化过程中的借鉴和参照。

因此,本研究通过室内人工模拟降雨方法,开展了针对林地水源涵养功能的多角度研究。一是从区域总体植被覆盖情况,展开植被覆盖度模拟研究;二是针对不同类型林地的林相特征,展开林相结构模拟研究;三是进行不同林地持水特性的实地监测。本研究汇总了上述 3 种方式的土壤入渗和林下水源涵养的研究成果,能够更加准确地对林地水源涵养能力进行定量评价,其中包含土壤水分下渗过程量,对植被覆盖度、林相等因子的研究限制也较小,多角度综合研究更加全面。其中植被覆盖度研究是针对特定区域内的总体水源涵养情况,林相研究可以细化比较不同类型林地的水源涵养能力,实地持水特性的监测是对林相研究结果的有效验证与补充。研究成果以期能为经济林地减少坡面径流,提高土壤蓄水能力的管理提供数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与供试材料

茗溪流域位于浙江省北部,干流长 157.4 km,流域面积 4576.4 km²,森林覆盖率达 90%以上,土地利用类型以林地为主。流域地处中热带季风区北缘和北亚热带季风区南缘,气候温和湿润,雨量充沛,四季分明,平均降雨量 1460 mm,年均气温 15.5—15.8℃。每年 5 月中旬至 7 月中旬为梅汛期,降水量 450—510 mm;8 至 9 月为台汛期,降水量在 190—380 mm。

在室内试验测试的土壤是浙江省临安市(图1)的典型红壤,也是苕溪流域最为普遍的土壤类型。试验土壤根据野外相应土壤层的容重逐层填入,土槽的边缘用力压实。装土前,在槽底垫5 cm厚的天然沙,保证土壤的透气透水接近天然状况。在土槽的下坡端嵌有边缘高5 cm的铁质集水槽。2013年11月—2014年10月,在浙江大学华家池校区,玻璃温室内采用全套人工模拟降雨试验设备进行试验,试验温度保持在20—25℃之间。模拟降雨装置是压控式双向侧喷式人工模拟降雨器。降雨试验前,在土槽周边安置20个降雨标定桶通过反复率定,使降雨均匀度达到90%左右。野外监测选择在浙江省安吉县杭垓镇兰家边山塘小流域示范区,于2017年9月12日—10月22日期间进行采样监测。

1.2 试验方法

本研究分室内外2部分进行。

1.2.1 林下土壤蓄水随植被覆盖度变化

在林下土壤蓄水随植被覆盖度变化的试验中,采用室内人工模拟降雨的方式开展研究,设计径流槽土层厚度控制在50 cm,坡度20°,径流槽宽度0.5 m,降雨强度2 mm/min,植被覆盖度0%、15%、30%、45%、60%、75%、90%,坡长1 m、2 m、3 m、4 m、5 m,降雨产流后每2 min取径流混合水样1个,连续监测30 min。记录不同植被覆盖度、不同坡长下的地表径流减少量。间隔固定时间开展试验,经测量土壤实验前含水率均在5%—7%之间,每次降雨前土壤含水率基本一致。土壤的理化性质见表1。

表1 试验小区的土壤(0—10cm)理化性质^[18]

Table 1 Physicochemical characteristics of surface layer soil (0—10 cm) in experimental plot

pH	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	总氮 Total nitrogen/ (g/kg)	硝态氮 NO ₃ -N/ (mg/kg)	氨态氮 NH ₄ ⁺ -N (mg/kg)	全磷 Total phosphorus/ (g/kg)	土壤有机碳 Soil organic carbon/ (g/kg)	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	粘粒 Clay/%
4.5	1.12	0.77	30.8	4.4	0.21	10.76	25.05	49.10	25.85

1.2.2 林下覆盖层变化试验的土壤蓄水和入渗量特征

上层和下层覆盖模拟试验中,径流槽几何尺寸1.5 m×0.75 m×0.5 m,坡度15°,降雨强度为(1.70±6%) mm/min,监测历时为产流后60 min,每2 min取一个径流混合水样,两个径流槽平行试验,分析所用数据是两个径流槽的平均值。模拟覆盖是将模拟树叶固定于定制的不锈钢钢架,覆盖度是根据固定的模拟覆盖在坡面上的投影面积求得。在试验中采用的覆盖是将叶片四个为一组固定在装有铁丝绳的不锈钢架上,每个架子上均匀的固定36组叶片,根据叶片大小,组数以及叶片的倾斜度等,求得每个架子的覆盖度为65%。

下层覆盖位于和土体轻微接触的位置,上层覆盖距离土体上方80 cm的距离,其覆盖高度大抵相当于一层的灌木,上下层覆盖均可以通过土槽边缘安装的支架进行独立拆卸,以获得试验所需的覆盖组合类型。变覆盖试验土槽示意图如图2。其中A土槽示意的是带有上层覆盖的情况,B土槽示意下层覆盖的情况,根据试验需要,每个土槽可以得到裸坡、上层覆盖、下层覆盖以及上下层覆盖的四种模拟覆盖组合形式。每次降雨试验,A、B两个土槽采取相同的覆盖组合以达到重复对比的试验目的。

1.2.3 野外实地林下土壤持水特性监测

在示范区内对地貌部位相对相近的板栗林、茶园与竹林3处不同林地进行定时间采样和监测,林地基础数据见表2。样品采集包括3个平行样品,从地表层向下每隔5 cm采集样品1个,每个剖面采集12个样品,最终求取3个平行样品的平均值。每次采集样品108个。利用环刀法所取的原状土样,将盛有新鲜土样的大

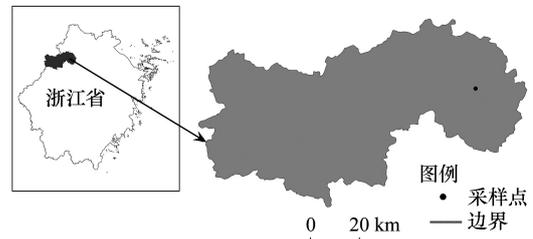


图1 研究区地理位置图

Fig.1 Geographical location of the study area

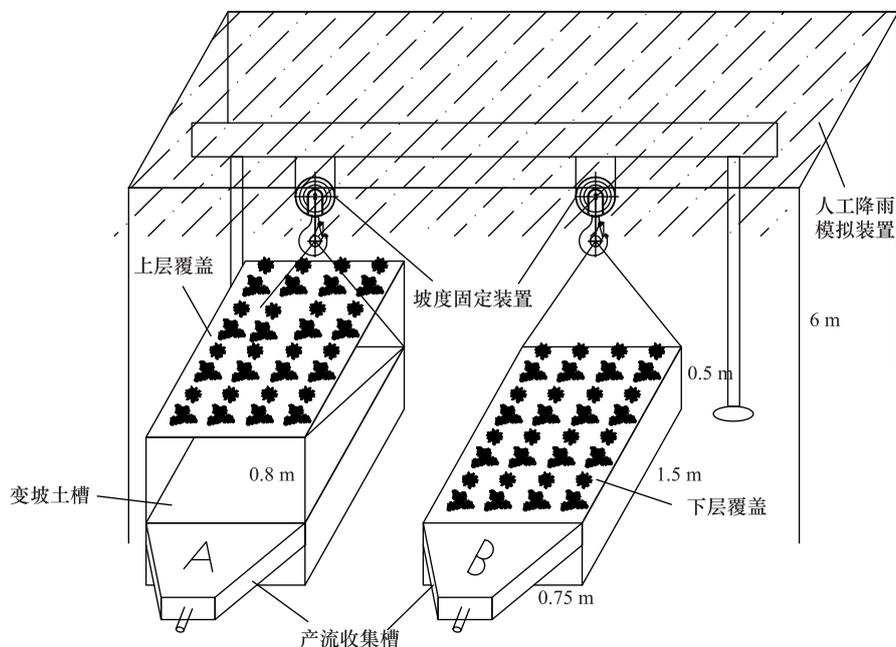


图2 变覆盖试验土槽装置示意图

Fig.2 Different coverage conditions test soil trough device diagram

型铝盒在分析天平上称重,准确至 0.01 g。揭开盒盖,放在盒底下,置于已预热至 105℃ 的烘烤箱中烘烤 12 h。取出盖好,在干燥器中冷却至室温(约需 30 min),立即称重,求取土壤含水率值。2017 年 9 月 12 日—10 月 22 日期间共监测采集样品 8 次。为了能直观显示不同林地及裸地土壤持水能力的差异,在 10 月 20 日和 10 月 22 日增加了裸坡地剖面,每次采集样品 144 个。

表 2 野外监测林地的基础数据

Table 2 Basic properties of soil in forest land monitoring

林地类型 Forest type	地形位置 Terrain location	海拔高度 Altitude/m	林下管理 Forest management	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity/%
板栗林 Chestnut forest	坡顶	122	不除草	1.37	48.74
茶园 Tea garden	凸坡	129	定期除草	1.47	45.44
竹林 Bamboo forest	凸坡	143	不除草	1.24	53.03
裸地 Bare land	坡顶	109	不除草	1.70	37.86

1.3 研究方法

1.3.1 林下土壤蓄水量计算公式

林下土壤蓄水量是指降雨过程中除去径流的入渗量,公式如下:

$$P = R \times S \times f \times J \quad (1)$$

式中, P 为全年理论最大蓄水量(m³), R 为年均降雨量(mm), S 为汇水面积(km²), f 为覆盖度, J 为入渗率;

1.3.2 入渗量与入渗系数计算公式

本研究中入渗量即为蓄水量,既包括土壤吸持贮存水量和也包括入渗过程中的短时滞留贮存水量。

$$I = K \times T \times S_1 \times \cos\alpha - C \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{I}{K \times T \times S_1 \times \cos\alpha} \quad (3)$$

式中, J 为入渗量, I_0 为入渗系数, K 为降雨强度(mm/min), T 为降雨时间(min), S_1 为试验土槽面积(m^2), α 为坡度, C 为收集的径流量(l);

1.3.3 数据处理及分析方法

采用 Sigmaplot 14.0 软件进行数据统计及图表制作,通过 SPSS 22.0 软件进行数据分析、建立回归方程。

2 结果与分析

2.1 林下土壤蓄水随植被覆盖度的变化

将室内模拟植被覆盖度的试验监测的 525 个数据绘制成植被覆盖度与入渗关系图(图 3)。由图 3 可知,随着坡长的增加,总体上入渗系数呈不断增加的趋势,但存在一定的波动,覆盖度越高时波动越小。覆盖度为 0,15%,30%和 45%时,坡长为 2 m 处的入渗系数均有所降低,分别比 1 m 处降低 9.7%,5.6%,4.2%和 0.8%。覆盖度为 60%,75%,90%时,坡长 2 m 处的入渗系数比 1 m 处保持不变或少量增加。如图 3,随着植被覆盖度的增加,土壤入渗呈现出明显的上升趋势,并且在坡长延长相同长度时,增加量不断增加。如不同覆盖度条件下(0—90%),坡长 2 m 处至 5 m 处入渗系数增加量分别为 0.078,0.052,0.063,0.051,0.041,0.028,0.019。为了能直观的描述递增的趋势,由图 2 数据拟合得递增公式(表 3)。由表 3 可以得知,在所有的 5 个设计坡长中,回归模型的决定系数 R^2 基本在 0.9 以上。

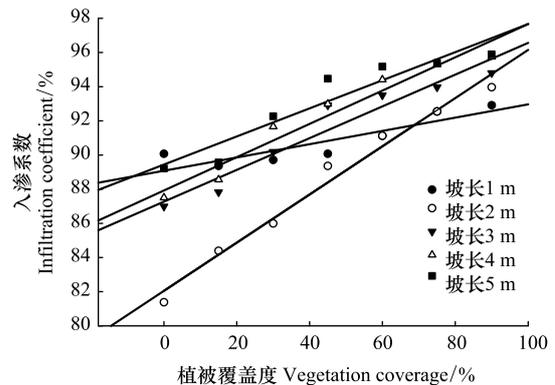


图 3 地表入渗系数随植被覆盖度增加的变化规律

Fig.3 The variation of surface infiltration coefficient with the increase of vegetation coverage

表 3 坡地土壤入渗随植被覆盖度和坡长变化的拟合式及拟合度

Table 3 The fitting function and fitting degree of soil infiltration in slope land with vegetation cover and slope length

坡长 Slope length/m	拟合式 Fitting function	决定系数 R^2	坡长 Slope length/m	拟合式 Fitting function	决定系数 R^2
1	$J = 0.0004f + 0.8908$	0.7963	4	$J = 0.0010f + 0.8792$	0.9476
2	$J = 0.0014f + 0.1795$	0.9804	5	$J = 0.0008f + 0.8944$	0.8995
3	$J = 0.0009f + 0.8727$	0.9295			

注: J 代表入渗系数, f 代表植被覆盖度

分析上述结果发生的原因:随着坡长的延长,坡面下部的流量很容易快速增大进而使坡面径流深增加,当径流深较大时,增加的水压很大程度上能增强土壤入渗量,导致入渗系数缓慢增大。坡长由 1m 延长到 2m 时入渗系数减少,而 2m 延长到 5m 的过程中均是缓慢增大,可能是由于在 2 m 坡长范围内,坡面径流的流路不够长,不足以汇流成较大流量径流。而入渗系数与植被覆盖度的良好相关性关系,也可能是由于坡面径流深随着植被覆盖度的增加而增大,带来土壤入渗量的增加而导致的。

为了进一步对比分析植被覆盖度、坡长与入渗系数的关系,本文将降雨过程中实测的数据利用 SPSS22.0 进行回归分析,得出拟合回归模型:

$$J = 0.0085L + 0.0905f + 0.8459, R^2 = 0.77 \quad (4)$$

式中, J 为入渗系数; L 为坡长(m); f 为覆盖度。

回归模型拟合度较好,且模型方差分析表明 F 统计量对应的 P 值为 0.000 远小于 0.01,则说明该模型整体上是非常显著的,覆盖度与坡长对于入渗系数的综合影响可以用线性相关方程较准确地描述,模型决定系数为 0.77。覆盖度与入渗系数在 0.01 水平上极显著正相关,相关系数 0.80,坡长与其在 0.05 水平上显著正相关,相关系数为 0.36,说明在室内人工模拟降雨实验中植被覆盖度对入渗系数的影响比坡长要大很多。通过

该回归模型,结合地区植被覆盖条件可以粗略估算最小入渗系数值。

2.2 林下不同覆盖层的土壤蓄水和入渗量特征

图4所示为不同覆盖条件下的土壤入渗过程曲线。随着产流历时增加,总体看来入渗系数次序为上下层覆盖>上层覆盖>下层覆盖>裸地。根据产流1h的累积入渗量,裸地为4.6 L,上层覆盖为6.1 L,下层覆盖为5.3 L,上下层覆盖为6.6 L。由此可知,蓄水最好的是上下层覆盖,与裸地比较累积蓄水量增加百分数:上层覆盖为23%,下层覆盖为29%,上下层覆盖为37%。

由图5可知,裸坡地的入渗量远小于径流量。与裸坡地相比,具有下层覆盖、上层覆盖和上下层覆盖的林相结构,其林下土壤的蓄水量会呈现出直线型大幅增加。由于土槽试验是有限土层,覆盖模拟没有植被的蒸腾和根系的吸收,所以试验所得数据是林地蓄水量的下限,但其能说明林地不同覆盖层次和覆盖率的蓄水规律和趋势,即水源的涵养量。

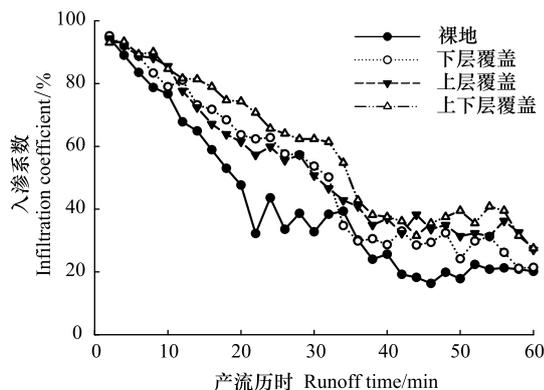


图4 不同覆盖条件下林下土壤的入渗系数

Fig.4 Infiltration coefficient of forest soil under different cover conditions

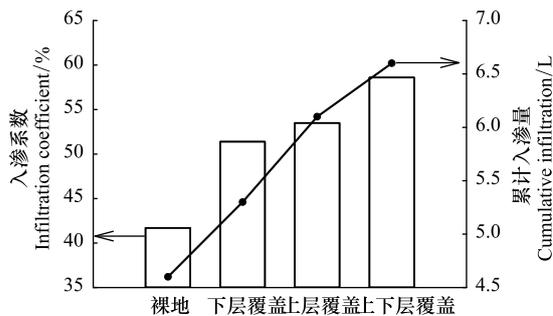


图5 入渗系数随覆盖条件的变化

Fig.5 Infiltration coefficient changes with cover condition

2.3 林下土壤持水特性

2.3.1 不同坡地林下土壤的持水特征

由图6显示,不同林地的土层持水性能差异很大,其中板栗林的表层含水率最大,整体上茶园表层含水率大于竹林。板栗林、茶园与竹林的表层含水率的平均值分别为29.34%、28.32%、27.15%。板栗林和竹林剖面上含水率均呈随深度增加而减少的趋势,且板栗林变化最大。而茶园大部分情况变化不明显,各层差距不大。在0—20 cm的纵向剖面上,含水率不断下降且变化幅度较大,板栗林、茶园和竹林的递减幅度平均值分别为2.89%、1.39%、1.05%。20—40 cm的纵向剖面上,含水率基本保持不变,甚至出现缓慢的上升。40—60 cm的剖面上,含水率总体上逐步降低且变化幅度很小。这些规律与余新晓^[19]对不同土壤层次含水量变化规律的描述完全一致。

由图7可知,总体上不同林地含水率随着剖面深度增加而逐渐减少,裸地含水率在20—60 cm变化不大,且总体比表层土含水率高一些。比较土壤表层(0—20 cm)的含水率,板栗林、茶园与竹林都显著比裸地含水率高,其中板栗林与茶园含水率较为接近。根据图6与图7的数据分析,野外测量与室内模拟实验结果总体规律较为一致,持水能力次序分别为板栗林、茶园、竹林、裸地,分别对应室内模拟试验中的上下层覆盖、下层覆盖、上层覆盖与裸坡。

根据林地对土壤蒸发的原理,分析上述规律的原因:(1)林地的蒸腾作用使得地面以上空气较为湿润,表层土壤能够吸收更多水分;林地也起到遮挡阳光的作用,使得地表温度更低,且土层表面有绿色植物、枯枝落叶等覆盖物时,也能够起到遮挡作用并截持部分水分,共同减缓水分蒸发^[20]。因此,总体上林地表层含水率

高于裸地。裸地下层含水率与林地相差不大或是甚至更高,其原因是所选裸地的底层可能存在过去的死根提供有机质,促进深层处持水能力依旧较强。(2)根据所测土壤总孔隙度^[21],裸地的土壤总孔隙度(37.86%)远小于3种林地,3种林地中竹林最高(53.03%),茶园(45.44%)与板栗林(48.74%)相近。这是由于林地的根系较为发达,能够通过死根的分解、根际分泌物的作用等,促进土壤团聚体的形成和孔隙状况的不断改善,增加土壤持水能力。竹林存在土壤中横向生长的地下茎^[22],因此竹林土壤疏松,透水性能更好,表层持水能力较差。

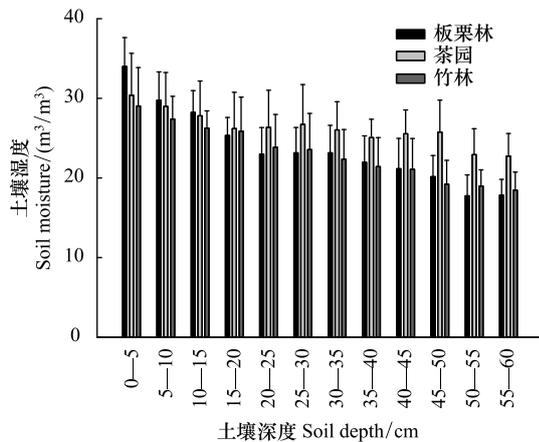


图6 示范区内不同林种坡地土层的含水率

Fig.6 The soil water holding characteristics of different forest types in the demonstration area

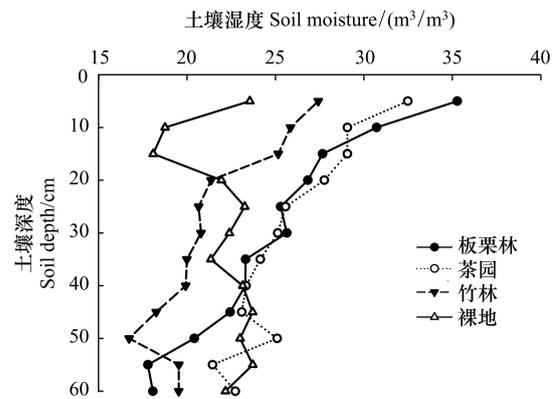


图7 不同种林地含水率随土壤剖面变化的对比

Fig.7 Comparison of water content in different forest lands with changes in soil profile

2.3.2 研究区最大蓄水量估算

根据安吉林业局资料获取其山林种类分布,其中竹林占比72.1%,板栗林占比11.9%,茶园占比2.5%,杉木林占比13.0%,分别对应模拟覆盖中的上层覆盖、上下层覆盖、下层覆盖、上层覆盖,则我们取各林地所占比例乘以相应覆盖条件下入渗率的加和后,得到示范区入渗率的估算值为0.538。安吉县年均降雨量为1413.2 mm,本研究的核心示范区合计汇水面积约为97.3 km²,估算得植被覆盖度为70.4%^[23],根据(1)式计算林地水源涵养全年理论最大蓄水量为5.21×10⁷ m³。

3 结论

(1)得到了不同覆盖度及相应坡长下的入渗系数,且入渗系数随植被覆盖度和坡长变化的拟合效果较好。通过多元回归模型,可用于估算相应植被覆盖度下的区域整体入渗系数。

(2)具有多层结构的林相,林下土层的蓄水量会呈现出直线型大幅增加。蓄水最好的是上下层覆盖,与裸坡比较累积蓄水量增加百分数:上层覆盖为23%,下层覆盖为29%,上下层覆盖为37%。

(3)野外测量与室内模拟实验结果总体规律较为一致,蓄水能力次序分别为板栗林、茶园、竹林。估算得示范区内林地水源涵养量最大值为5.21×10⁷ m³。

参考文献 (References):

- [1] Ellison D, Morris C E, Locatelli B, Sheil D, Cohen J, Murdiyoso D, Gutierrez V, van Noordwijk M, Creed I F, Pokorny J, Gaveau D, Spracklen D V, Tobella A B, Ilstedt U, Teuling A J, Gebrehiwot S G, Sands D C, Muys B, Verbist B, Springgay E, Sugandi Y, Sullivan C A. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 2017, 43: 51-61.
- [2] 窦增宁, 胡夏高, 刘昌义, 徐志闻. 模拟降雨条件下黄土区边坡植物护坡效应. *人民黄河*, 2018, 40(3): 83-87.
- [3] 王林华, 汪亚峰, 王健, 林青涛, 吴发启. 地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响. *农业工程学报*, 2018, 34(5): 120-128.

- [4] Wilcox B P, Breshears D D, Turin H J. Hydraulic conductivity in a piñon-juniper woodland. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (4): 1243-1249.
- [5] 李桂静, 周金星, 崔明, 闫帅. 南方红壤区马尾松林冠对降雨雨滴特性的影响. *北京林业大学学报*, 2015, 37(12): 85-91.
- [6] 刘贤德, 张学龙, 金铭, 等. 祁连山北坡灌木林涵养水源机理的研究[C]//甘肃省 2009 年学术年会论文集. 张掖: 甘肃省科协, 2009.
- [7] Guimarães D V, Silva M L N, Curi N, Martins R P, de Oliveira Melo Neto J. Modeling of soil losses on a yellow Argisol under planted forest. *Floresta e Ambiente*, 2019, 26(1): e20160292.
- [8] 胡健, 吕一河, 张琨, 陶蕴之, 李婷, 任艳娇. 祁连山排露沟流域典型植被类型的水源涵养功能差异. *生态学报*, 2016, 36(11): 3338-3349.
- [9] Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, Yu K. Effects of different vegetation restoration on soil water storage and water balance in the Chinese Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 206: 85-96.
- [10] 刘凯, 贺康宁, 田赆, 王先棒, 董喆. 青海高寒山区 5 种林分的土壤特性及其水源涵养功能. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 141-146.
- [11] 齐特, 李玉婷, 何会宾, 张雪峰, 赵廷宁. 冀北地区丰宁县水源林地水源涵养能力. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3): 60-67.
- [12] 刘璐璐, 邵全琴, 刘纪远, 杨存建. 琼江河流域森林生态系统水源涵养能力估算. *生态环境学报*, 2013, 22(3): 451-457.
- [13] Zhang J, Bruijnzeel L A, Quiñones C M, Tripoli R, Asio V B, van Meerveld (Ilja) H J. Soil physical characteristics of a degraded tropical grassland and a 'reforest': Implications for runoff generation. *Geoderma*, 2019, 333: 163-177.
- [14] 单胜道, 黄祖辉, 单时义, 叶晓朋. 长乐林场林地综合效益评估. *山地学报*, 2000, 18(4): 377-381.
- [15] 朱志芳, 龚固堂, 陈俊华, 慕长龙. 基于水源涵养的流域适宜森林覆盖率研究——以平通河流域(平武段)为例. *生态学报*, 2011, 31(6): 1662-1668.
- [16] 张华嵩. 植被恢复过程与防止水土流失效果的研究. *林业科学*, 1989, 25(1): 40-50.
- [17] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, Zhou P, Liu X D, Xiao Y, Sun G, Scott D F, Zhou S Y D, Han L S, Su Y X. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, 6: 5918.
- [18] 钱婧, 张丽萍, 王文艳, 刘俏. 浙江红壤坡面菜地养分流失模拟试验及模型建立. *自然灾害学报*, 2016, 25(3): 114-123.
- [19] 余新晓. *水文与水资源学(第二版)*. 北京: 中国林业出版社, 2010: 17-77.
- [20] 李长宝, 太史怀远. *土壤基础理论学*. 北京: 中国林业出版社, 2010: 132-142.
- [21] 赵洪书. 土壤总孔隙度经验公式. *土壤*, 1978, (2): 49-50.
- [22] 刘仕咄, 谢乔武. 毛竹的生长特性与竹林采伐. *林业与生态*, 2009, (5): 26-27.
- [23] 吉增宝. 用数码照片和 Photoshop 计算植被覆盖度的简易方法. *水土保持应用技术*, 2015, (5): 10-11.