

DOI: 10.5846/stxb201812112706

娄淑兰, 刘目兴, 易军, 张海林, 李向富, 杨叶, 王秋月, 黄建武. 三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响. 生态学报, 2019, 39(13):

Lou S L, Liu M X, Yi J, Zhang H L, Li X F, Yang Y, Wang Q Y, Huang J W. Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the three gorges area. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13):

三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响

娄淑兰^{1,2}, 刘目兴^{1,2,3,*}, 易 军^{1,2}, 张海林^{1,2}, 李向富^{1,2}, 杨 叶^{1,2}, 王秋月^{1,2},
黄建武^{1,2,3}

1 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079

2 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079

3 华中师范大学可持续发展研究中心, 武汉 430079

摘要: 土壤层下渗和贮蓄水分的水文功能是森林保持水土、涵养水源的基础。以三峡山地大老岭林区为研究区, 采集常绿林、落叶林和草地覆盖下不同坡位的原状土样, 测定其饱和导水率和水分特征曲线, 分析植被类型和坡位对土壤水分参数和库容的影响。结果表明: 常绿林地的入渗性能最好, 饱和导水率为 7.80—322.81 cm/d, 大于落叶林地 (0.33—137.03 cm/d) 和草地 (0.84—115.80 cm/d); 坡位间差异表现为上坡高于下坡。不同样地的饱和含水量差异较小, 但毛管持水量和田间持水量差异明显, 草地最大, 为 20.77%—50.39%; 不同坡位比较表现为下坡高于上坡。不同样地土壤水库容量差异较大, 由田间持水量得到的库容量占总库容量的百分比以草地最大 (63.25%), 其次是落叶林地, 常绿林地最小; 坡位上表现为下坡的田间持水库容大于上坡。饱和导水率与土壤总孔隙度、有机质含量呈显著正相关, 与容重呈显著负相关; 饱和含水量、毛管持水量、田间持水量均与土壤总孔隙度、有机质含量和粉粒含量呈显著正相关, 与容重、砂粒含量呈显著负相关。综合以上, 草地持水性能最强, 利于保蓄水分, 常绿林地最弱, 更利于水分入渗, 补给地下水, 下坡位的持水性能强于上坡位。

关键词: 山地土壤; 饱和导水率; 土壤持水性能; 坡位; 三峡库区

Influence of vegetation coverage and topographic position on soil hydrological function in the hillslope of the three gorges area

LOU Shulan^{1,2}, LIU Muxing^{1,2,3,*}, YI Jun^{1,2}, ZHANG Hailin^{1,2}, LI Xiangfu^{1,2}, YANG Ye^{1,2}, WANG Qiuyue^{1,2}, HUANG Jianwu^{1,2,3}

1 Hubei Province Laboratory for Geographical Process Analyzing & Modeling, Wuhan 430079, China

2 College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

3 Research Institute of Sustainable Development, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract: Rainfall infiltration through soil profile forms a key process of water cycle in the critical zone of terrestrial ecosystem. The hydrological function of soil pedons on transporting and accumulating rainwater constructs the foundation of forestland on soil and water conservation in mountainous area. To study impacts of vegetation cover and topographic position on soil hydrologic features of mountain area, three separated hillslopes covered with different vegetation in a typical catchment of the the Dalaoling Forest Region were selected as the study area, where just located at 40km upstream of the Three Gorges Dam. Undisturbed soil cores were sampled with cutting rings from upslope and downslope positions. Saturated hydraulic conductivity and soil water characteristic curves of these soil cores were measured indoors, using constant water

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771261, 41601215); 湖北省自然科学基金重点项目 (2015CFA141)

收稿日期: 2018-12-11; **修订日期:** 2019-04-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liumuxing@mail.ccnu.edu.cn

head method and centrifugal method, to analyze the influence of vegetation cover and topographic position on soil hydrological parameters and water storage. The results indicated that soil infiltration ability of evergreen forest land was the largest, and its soil saturated hydraulic conductivity was 7.8—322.81 cm/d, which was relative greater than that of deciduous forest soil (0.33—137.03 cm/d) and grassland soil (0.84—115.80 cm/d). Variation between different topographic positions revealed that the saturated hydraulic conductivity of upslope sites were greater than that of downslope sites. Compared with the less difference between soil saturated water content, capillary moisture capacity and field capacity of six experimental sites varied significantly, and the two capacity parameters of grassland soil (20.77%—50.39%) were greater than that of forestland soil. Soil capillary moisture capacity, field capacity and wilting water content of upslope sites were less than those of downslope sites according to the comparison between the sites under the same vegetation coverage. Soil storage capacity varied apparently among six sites. The percentage of reservoir capacity obtained from field capacity accounting for total soil water storage capacity was largest in grassland sites, at 63.25%, while that of evergreen forestland sites was the least with only 55%. Comparison among topographic positions indicated the result of downslope sites was larger than that of upslope sites. Correlation analysis between soil water characteristic parameters and soil properties showed saturated hydraulic conductivity had significant positive relation with soil total porosity and organic matter content, and significant negative relation with soil bulk density. Soil saturated water content, capillary moisture content and field water capacity were significantly positively correlated with soil total porosity, organic matter content and silt particle content, and negatively correlated with soil bulk density and sand particle content. In conclusion, the soil water holding capacity of grassland was the largest among all observed sites, which was conducive to accumulate soil water, while evergreen forestland had the largest water infiltration rate which was prone to recharge underground water. For different topographic positions, downslope sites had larger soil water storage than upslope sites.

Key Words: Mountain soil; Saturated hydraulic conductivity; Soil water holding capacity; Topographic position; Three Gorges Reservoir Area

涵养水源、保持水土是森林生态系统的主要生态功能之一,而其调水、蓄水和持水功能则主要通过土壤层完成^[1,2]。土壤层调蓄降水的机制包括水分入渗和水分储存,调蓄能力因土壤理化性质的差异而不同。对于森林土壤的水文功能,国内外已有大量研究,如不同森林类型土壤的物理性质、入渗能力和持水蓄水能力^[3-4],不同土地利用类型的土壤渗透和持水能力^[5,6],坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率^[7]以及地形坡位对土壤水分变化的影响等^[8,9]。可见,森林生态系统的土壤理化性质和水文功能受到森林植被覆盖和地形坡位的共同影响。

三峡库区地处青藏高原与长江中下游平原的过渡带,库区 95%以上为山地丘陵区^[10],降水集中且多暴雨,水土流失问题十分严重。库区内地势起伏明显,植被类型多样,不同类型植被和坡位处的土壤理化性质差异显著^[11],进而影响土壤的入渗性能和水分储存能力,呈现出不同的土壤水文功能^[12]。余新晓等^[13]在四川贡嘎山,王玉杰等^[14]和成晨等^[15]在重庆缙云山,刘目兴等^[16]在坝区不同类型的林地分别对长江中上游或库区内主要森林类型土壤的水分入渗性能或持水能力进行了研究,李向富等^[17]在三峡库区不同海拔高度和王云琦等^[18]在重庆缙云山分别对三峡库区不同森林类型的土壤水文功能进行了综合研究,发现不同森林类型的土壤入渗性能和持水能力不同,且与土壤理化性质的差异密切相关。然而,这些研究主要集中在某些植被类型影响下的土壤入渗性能或持水能力,对森林土壤水文功能的综合研究较少。此外,地形作为影响山地土壤分布的重要因素,在当前三峡山地土壤水文功能的研究中需更多关注。因此,结合坡位和植被覆盖进行综合评价,才能解释山地不同景观部位土壤层水文功能的成因。本研究以长江三峡大老岭山地为研究区,在常绿林地、落叶林地和草地等 3 种植被覆盖下坡上、坡下共 6 个样地采集原状和扰动土壤样品,测定其基本理化性质和水文功能指标,定量评价不同植被类型和坡位土壤入渗性能和持水能力等水文功能,并揭示其主要影

响因子,为三峡山地水土流失防治提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市大老岭林区至夷陵区境内(30°00′13″N—31°28′30″N,100°51′8″E—111°39′30″E),海拔在 1180—1310 m,地质基础以酸性结晶岩为主。气候属于亚热带季风性湿润气候,降水集中且多暴雨,年平均气温 16.7℃,平均降水量 1101.1 mm,平均蒸发量 950 mm,≥10℃的积温 5403.7℃,无霜期 283 d。由于长期人类活动干扰,该地段植被已鲜有原生常绿阔叶林,现多为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、铁坚油杉(*Keteleeria davidiana* (Bertr.) Beissn.)、栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)和板栗(*Castanea mollissima*)等^[19]。

经野外调查,选取 3 种植被覆盖差异较为明显的坡地作为研究样地,在每个坡地的上、下坡位均设置样方进行植被调查。在常绿林地上、下坡各设置 1 个 20 m × 20 m 样方,植被以马尾松、杉木等常绿针叶树种为主;落叶林坡地由于地形限制,共设置 5 个 5 m × 5 m 样方,植被以枹栎、木姜子(*Liseapungens* Hemsl.)等落叶小乔木为主;草地样地是因营造防火带砍伐林木而形成的次生草地,地形呈梯田状,除坡上有少量灌木,坡地植被覆盖均为草本植物。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与实验土样采集

野外实验于 2017 年 6—8 月进行,经过多次样点勘察确定 6 个研究样地,分别是常绿林地、落叶林地、草地覆盖下的坡上、坡下样地。在各样地分别选取典型地段进行土壤初步调查,挖掘土壤剖面。对每一土壤发生层进行土壤样品采集,用容积为 100 cm³的环刀采集原状土样,每个土壤分层取 5 或 8 个样品,共采集 240 个环刀土样。同时,在每个土壤分层采集 10 cm × 10 cm × 10 cm 的扰动土。将所有样品带回实验室,测定土壤理化性质及水文功能。

1.2.2 土壤理化性质与水分特征参数

(1) 土壤理化性质的测定:将带回实验室的原状土样饱和以及扰动土样风干处理后测定相关土壤理化性质,其中土壤机械组成采用吸管法测定,有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定^[20],容重采用环刀法测定,各样地土壤理化性质和部分结构特征测定结果见表 1 和表 2。

(2) 土壤饱和导水率的测定:将原状土样饱和 24 h 后,使用土壤渗透率仪,采用定水头法测定土壤饱和导水率 K_s ^[20]。测定过程中,维持马氏瓶进气口内起泡点至渗透率仪出水口之间的距离 H 不变,测定总出流量和相应出流时间,计算 K_s (图 2)。

$$K_s = \frac{QL}{AtH} \quad (1)$$

式中, K_s 为饱和导水率,cm/min; Q 为出流量,cm³; L 为样品高度,即环刀长度,cm; A 为样品横截面积,即环刀底面积,cm²; H 为水头差,cm; t 为出流时间,min。

(3) 土壤水分特征曲线的测定:将原状土样饱和,采用离心机法测定土壤水分特征曲线。首先测定土样饱和时的土壤体积含水量,并记录不同转速离心实验后土样的含水量,根据转速计算对应的离心力,最大为 1 bar。将实验结果在 RETC 软件中利用 van Genuchten 模型进行拟合,绘制土壤水分特征曲线(图 3)。

(4) 土壤孔隙度:土壤中毛管孔隙内的水分受毛管力作用可以长时间保存,持续供给植物生长发育,而非毛管孔隙是土壤重力水移动的主要通道,非毛管孔隙多的土壤水分下渗快,渗透性好,蓄水的功能差。在数值上,土壤总孔隙度等于土样饱和时的土壤体积含水量,毛管孔隙度等于离心力 0.1 bar 时的土壤体积含水量^[21],则非毛管孔隙度等于总孔隙度减去毛管孔隙度(表 2)。

(5) 土壤持水量和水分库容的测定与计算:土壤饱和含水量(θ_s)、毛管持水量、田间持水量(θ_f)和凋萎含

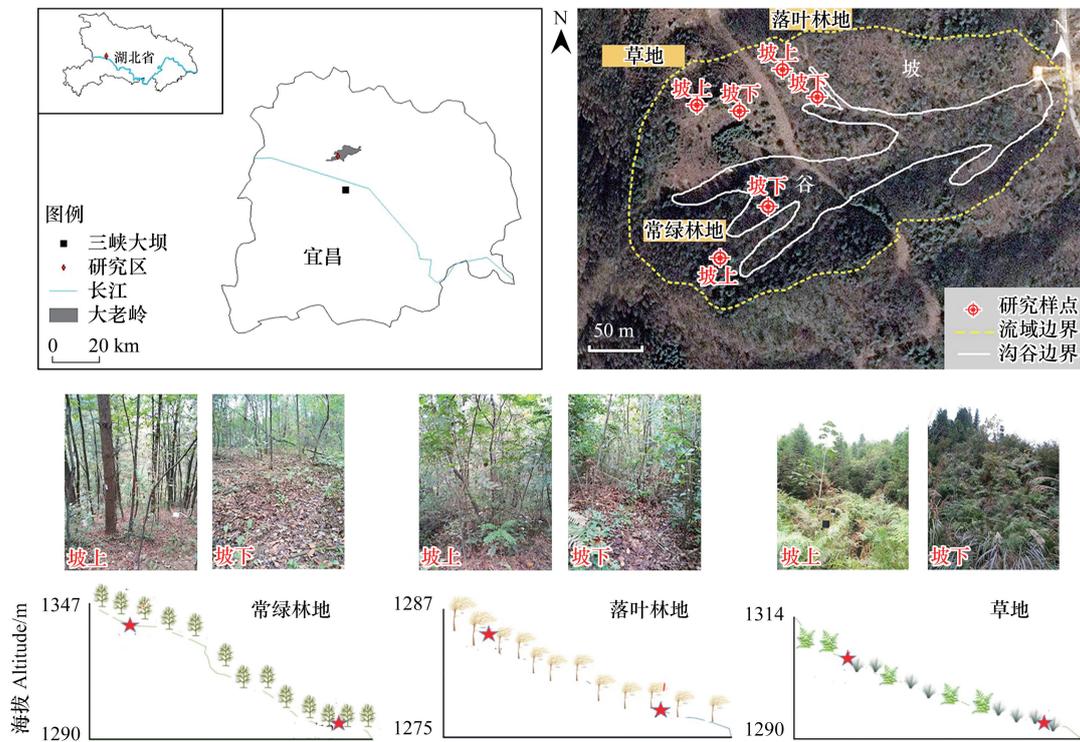


图 1 研究区位图及各样点图示

Fig.1 Location of the study area and the representation of the sites

表 1 各样地土壤基本理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties in different sites

样地 Sites	土壤层次 Soil horizons	深度 Depth/cm	砂粒 Sand/% 0.05—2 mm	粉粒 Silt/% 0.002—0.05 mm	粘粒 Clay/% <0.002 mm	土壤质地 Soil texture	有机质含量 Organic matter content/(g/kg)
常绿林地坡上 Evergreen forest land uphill	A	0—37	40.20	42.43	17.37	壤土	61.18
	E	37—63	69.72	16.68	13.60	砂质壤土	14.43
	C	>63	—	—	—	—	—
常绿林地坡下 Evergreen forest land downhill	A	0—20	28.41	46.39	25.20	壤土	54.84
	E	20—55	26.82	47.85	25.33	壤土	20.45
	EB	55—72	23.38	54.90	21.72	粉砂壤土	12.25
	C	72—90	65.72	23.14	11.14	砂质壤土	5.55
落叶林地坡上 Deciduous forest land uphill	A	0—15	24.48	51.70	23.82	粉砂壤土	78.16
	E	15—33	28.81	39.32	31.87	粘质壤土	18.78
	B	33—50	60.62	10.77	17.51	砂质粘壤土	7.91
	C	>50	63.72	17.60	18.68	砂质粘壤土	7.96
落叶林地坡下 Deciduous forest land downhill	A	0—20	13.14	63.44	23.43	粉砂壤土	55.13
	E	20—50	6.89	31.06	62.05	粘土	14.01
	B	50—70	12.20	35.34	52.46	粘土	9.93
	C	>70	18.39	46.84	34.76	粉粘壤土	7.73
草地坡上 Grassland uphill	A	0—35	46.13	34.19	19.5	壤土	49.85
	E	35—55	52.16	29.27	18.57	壤土	18.81
	C	55—100	60.95	27.61	11.44	砂质壤土	8.25
草地坡下 Grassland downhill	A	0—27	18.65	53.71	27.64	粉粘壤土	50.29
	E	27—60	21.74	44.54	33.72	粘质壤土	9.49
	B	60—85	26.08	38.55	35.37	粘质壤土	7.79
	C	85—100	36.23	32.83	30.93	粘质壤土	6.81

A、E、B、C 分别为腐殖质层、淋溶层、淀积层和母质层

水量(θ_w)分别以环刀土在离心实验 0 bar、0.1 bar、0.33 bar 和 15 bar 离心力下的土壤质量含水量表示^[21,22]。其中,各土样的毛管持水量、田间持水量均通过土样的离心实验测定,15 bar 时的凋萎含水量则利用吸湿系数进行计算^[20]:

$$\theta_w = 1.75 \times \theta_h \quad (2)$$

式中, θ_h 为吸湿系数。

表 2 各样地土壤结构特征(平均值±标准差)

Table 2 Soil structure characteristics in different sites (Average ± SD)

样地 Sites	深度 Depth/cm	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity/%
常绿林地坡上 Evergreen forest land uphill	0—37	0.88±0.20	54.43±7.40	29.03±5.60	25.40±3.73
	37—63	1.30±0.12	40.46±5.27	18.00±3.25	22.46±2.52
	>63	1.30±0.09	40.44±3.65	20.68±2.03	19.77±1.67
常绿林地坡下 Evergreen forest land downhill	0—20	0.76±0.11	61.60±2.95	36.38±2.93	25.22±3.12
	20—55	0.90±0.06	57.49±1.59	38.90±2.04	18.60±2.13
	55—72	1.05±0.13	55.10±2.28	42.26±1.71	12.84±3.30
	72—90	1.37±0.09	43.70±4.68	34.02±7.62	9.68±3.48
落叶林地坡上 Deciduous forest land uphill	0—15	1.13±0.06	52.68±1.85	32.20±3.93	20.48±2.51
	15—33	0.99±0.05	47.46±0.00	22.58±0.00	24.88±0.00
	33—50	1.09±0.11	44.88±0.90	21.15±2.02	23.73±2.93
	>50	1.26±0.05	43.56±0.76	27.46±0.71	16.10±1.47
落叶林地坡下 Deciduous forest land downhill	0—20	0.77±0.04	61.68±2.59	36.83±1.16	24.85±2.36
	20—50	1.15±0.09	52.24±1.46	41.40±1.68	10.85±2.94
	50—70	1.42±0.03	45.27±0.54	41.02±0.69	4.25±0.71
	>70	1.38±0.05	44.66±0.73	39.91±0.60	4.75±0.57
草地坡上 Grassland uphill	0—35	0.84±0.08	57.90±3.71	33.35±3.19	24.55±4.16
	35—55	1.20±0.16	49.80±6.47	32.96±3.82	16.84±3.97
	55—100	1.30±0.08	46.68±2.89	29.93±2.30	16.75±2.70
草地坡下 Grassland downhill	0—27	0.83±0.12	60.57±2.39	41.25±3.85	19.32±5.02
	27—60	1.40±0.02	46.35±1.50	40.21±2.12	6.13±2.94
	60—85	1.36±0.03	47.54±0.31	43.17±0.92	4.38±0.75
	85—100	1.40±0.05	47.58±0.88	43.03±0.48	4.55±0.55

土壤水分库容是反映土壤蓄水能力的一项重要指标,可通过不同的土壤水分常数计算得到。本文选用饱和含水量、田间持水量和凋萎含水量来计算不同层次的土壤水分库容。土壤总库容为利用饱和含水量得到的土壤蓄水量,为土壤所能容纳的水分总量。土壤死水库容为利用凋萎含水量得到的土壤蓄水量,无法供植物利用且难以参与水分循环,从而不具备调蓄径流的作用。利用田间持水量得到的水分库容为土壤所能稳定保持的最大水分容量。兴利库容为田间持水量与凋萎含水量之差对应的土壤蓄水量,表征土壤长时间的蓄水量^[23]。具体计算方法如下:

$$W_t = 10 \sum_{i=1}^n \theta_{si} h_i \quad (3)$$

$$W_f = 10 \sum_{i=1}^n \theta_{fi} h_i \quad (4)$$

$$W_d = 10 \sum_{i=1}^n \theta_{wi} h_i \quad (5)$$

$$W_y = W_f - W_d \quad (6)$$

式中: W_t 为某样地土壤的总库容 (mm); W_f 为田间持水量对应的库容, 相当于兴利库容和死水库容之和; W_d 为死水库容; W_y 为兴利库容; h 为土层的厚度 (cm); n 为土层数。研究中各库容参数以 0—100 cm 土层厚度计算。

采用 Excel、SPSS 22 软件进行实验数据的统计分析, 用 Origin 9.0 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同植被覆盖和坡位处土壤饱和导水率

三峡山地大老岭研究区各样地土壤饱和导水率总体均随土壤深度增加波动降低, 但各样地之间差异明显 (图 2)。不同植被类型比较, 常绿林地平均土壤饱和导水率为 128.22 cm/d, 远大于落叶林地 (57.83 cm/d) 和草地 (38.35 cm/d), 分别为落叶林地和草地土壤饱和导水率的 2.22 倍和 3.34 倍, 即常绿林地 > 落叶林地 > 草地, 表明常绿林地土壤渗透速率高于落叶林地和草地。相同植被类型的不同坡位样点比较, 土壤饱和导水率均表现为坡上 (99.27 cm/d) 高于坡下 (58.04 cm/d), 只有落叶林地坡下土壤表层 0—20 cm 深度范围内土壤饱和导水率 (113.53—137.03 cm/d) 大于坡上 (73.62—100.81 cm/d)。这主要是因为落叶林地坡上土壤表层容重 (1.13 g/cm^3) 大于坡下 (0.77 g/cm^3), 土壤致密, 不易透水。

由图 2 中土壤饱和导水率标准差 (直线长度), 可见各样地饱和导水率数据变异性差异明显。综合对比各样地土壤饱和导水率, 均表现为土壤表层变异性强于底层。植被类型上表现为常绿林地土壤饱和导水率变异性较强, 落叶林地和草地较弱; 相同植被类型不同坡位比较, 坡上土壤饱和导水率变异性强于坡下。这是因为土壤表层植物根孔和动物虫孔分布较多且不均匀, 土壤孔隙分布不均, 而随着深度增加动植物影响均逐渐减弱, 土壤孔隙减少, 因而土壤表层渗透速率较快且变异性较大, 而随着深度增加渗透速率减慢, 变异性减小。

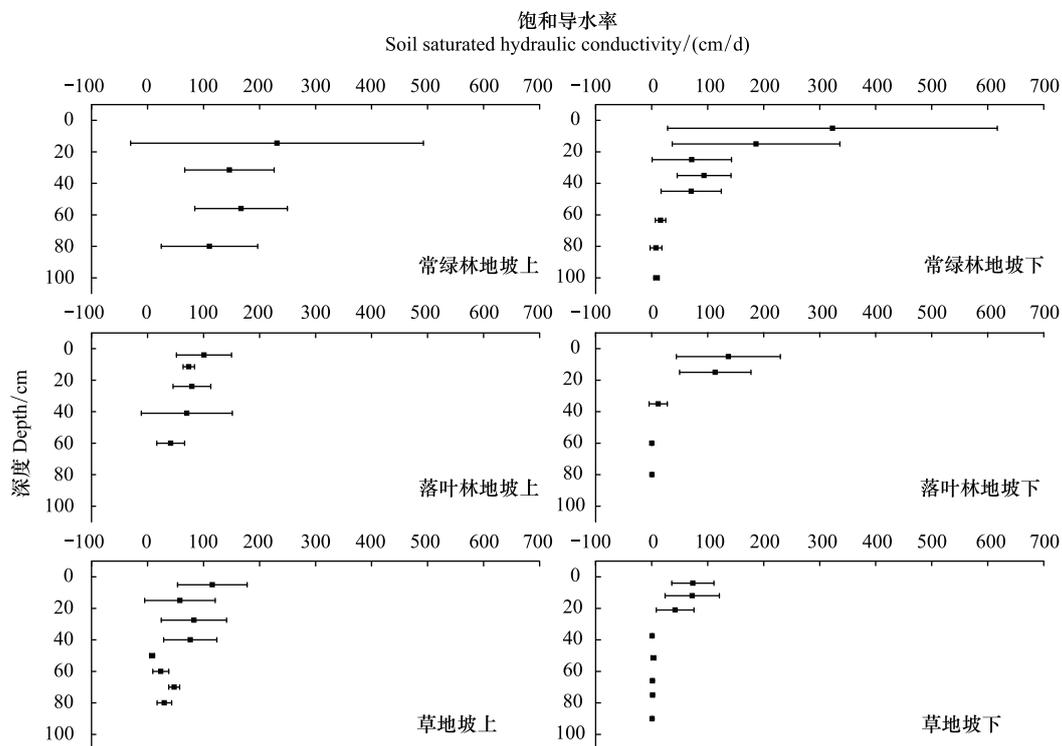


图 2 各样地土壤饱和导水率

Fig.2 Soil saturated hydraulic conductivity in different sites

2.2 不同植被覆盖和坡位处土壤水分特征曲线

RETc 拟合结果显示 R^2 在 0.95—0.99 之间, 相关系数高, 实验数据可信。各样地土壤含水量随着离心力

的增加逐渐降低。在吸力值从 0 增加至 0.1 bar 时, 土壤含水量迅速下降。不同植被类型比较, 常绿林地土壤体积含水量平均下降幅度最大, 为 36.24%, 分别为落叶林地 (32.46%) 和草地 (23.20%) 的 1.12 倍和 1.56 倍。其中, 常绿林地腐殖质层土壤含水量从 $0.58 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 下降至 $0.33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 下降幅度为 43.36%, 高于落叶林地 (39.96%) 和草地 (37.10%); 样地土壤淋溶层和淀积层的下降幅度以常绿林地最大, 为 23.31%—55.51%, 落叶林地降幅其次 (9.39%—52.87%), 草地最小 (9.20%—33.82%); 各样地母质层在 0—0.1 bar 吸力值段, 除常绿林地坡上样地下降幅度较大 (48.87%), 其余样地下降幅度均较小 (9.56%—36.95%)。相同植被类型不同坡位比较, 坡上土壤体积含水量平均下降幅度为 45.58%, 为坡下 (22.34%) 的 2.04 倍。坡上腐殖质层平均土壤体积含水量从 $54.78 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 下降至 $31.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 下降幅度为 42.96%, 高于坡下 (37.57%); 坡上淋溶层和淀积层平均土壤含水量下降幅度为 46.12%—52.87%, 高于坡下 14.51%—22.62%。随着吸力值的继续增加, 在 0.1—1 bar 吸力值段, 土壤含水量缓慢降低。比较不同植被类型样地, 常绿林地土壤体积含水量平均下降幅度为 27.04%, 高于落叶林地 (24.02%) 和草地 (21.65%)。相同植被类型不同坡位样地比较, 表现为坡上土壤体积含水量平均下降幅度 (28.53%) 高于坡下 (22.38%)。

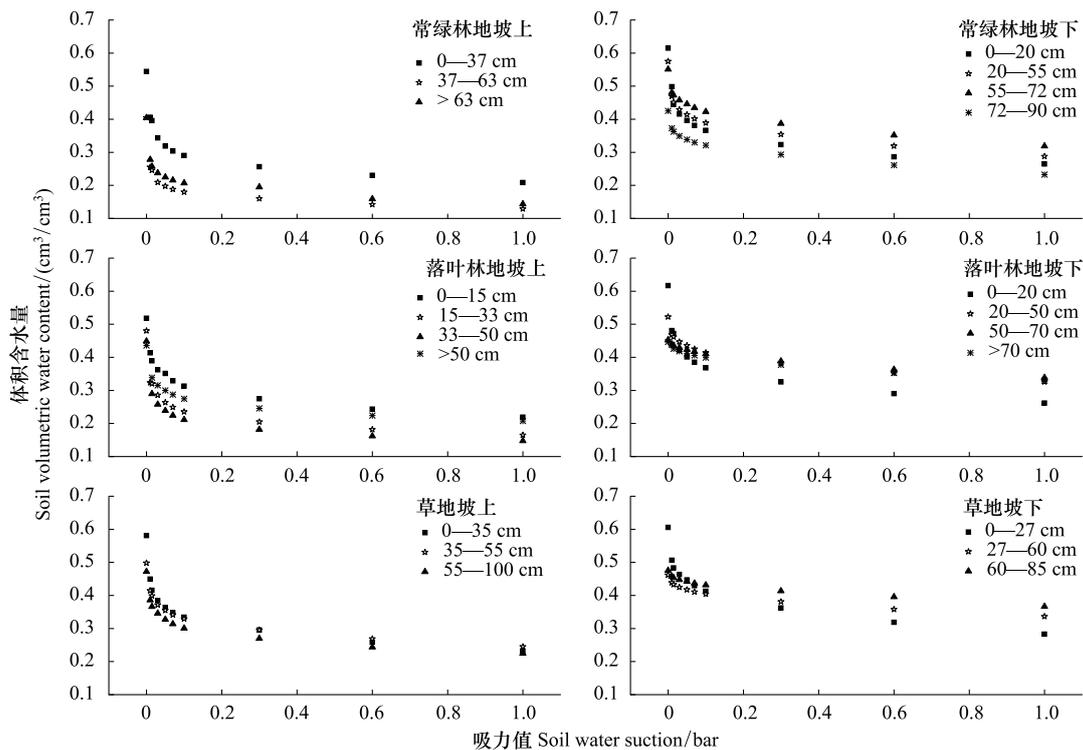


图 3 各样地土壤水分特征曲线

Fig.3 Soil water characteristic curves in different sites

在离心实验的相同吸力值下, 土壤体积含水量越高, 下降幅度越小, 表明其持水能力越强, 反之越弱^[24]。不同植被类型比较, 吸力值相同时, 3 种植被类型下土壤体积含水量表现为草地 > 落叶林地 > 常绿林地, 即草地土壤的持水能力最强, 其次是落叶林地, 常绿林地最弱; 相同植被类型不同坡位比较, 吸力值相同时, 坡下土壤体积含水量普遍高于坡上, 即坡下土壤的持水能力较强, 坡上土壤较弱。

2.3 不同植被覆盖和坡位处土壤持水性能参数和水分库容

不同植被类型土壤的饱和含水量差异较小 (45.28%—51.53%), 但毛管持水量和田间持水量差异明显。草地的毛管持水量和田间持水量为 20.77%—50.39%, 高于落叶林地 (16.69%—48.08%) 和常绿林地 (12.64%—49.04%)。对于相同植被类型不同坡位样地, 坡下土壤的各持水量均值为 40.18%, 是坡上土壤 (29.92%) 的 1.34 倍。同一样地的不同发生层比较, 饱和含水量均表现为表层大于下层。各样地土壤饱和含水量

从腐殖质层到母质层的下降幅度介于 25.73%—60.30%。毛管持水量和田间持水量随土壤深度的增加波动变化,腐殖质层至淀积层基本逐渐减小,母质层略有增加。各样地凋萎含水量随深度波动变化,无明显变化规律。

表 3 各样地土壤持水性能参数和水分库容(平均值±标准差)

Table 3 Parameters of soil water holding capacity and water storage in different sites (Average ±SD)

样地 Sites	深度 Depth/cm	饱和含水量 Saturated capacity/%	毛管持水量 Capillary capacity/%	田间持水量 Field capacity/%	凋萎含水量 Wilting water level/%	W_t / mm	W_f / mm	W_d / mm	W_y / mm
常绿林地坡上 Evergreen forest land uphill	0—37	66.31±21.19	35.11±11.27	30.96±9.75	8.23±0.36	444.46	203.84	52.99	150.85
	37—63	31.77±6.62	14.20±3.66	12.64±3.35	3.58±0.21				
	>63	31.49±4.97	16.10±2.60	15.25±3.97	—				
常绿林地坡下 Evergreen forest land downhill	0—20	81.05±12.93	49.04±7.21	43.26±6.16	6.12±0.16	568.52	353.28	50.07	303.21
	20—55	64.38±4.29	43.49±2.60	39.59±2.54	5.61±0.42				
	55—72	53.52±8.69	40.75±4.34	37.28±3.67	5.09±0.02				
	72—90	32.18±8.74	25.18±8.58	23.14±8.22	3.40±0.52				
落叶林地坡上 Deciduous forest land uphill	0—15	46.71±2.91	28.61±4.12	25.22±3.75	5.77±0.10	401.43	201.20	52.36	148.84
	15—33	48.59±2.91	23.86±2.13	20.75±1.71	4.10±0.45				
	33—50	41.44±3.14	19.44±0.58	16.69±0.28	4.34±0.06				
	>50	34.69±1.85	21.84±0.22	19.53±0.09	5.79±0.10				
落叶林地坡下 Deciduous forest land downhill	0—20	80.64±5.04	48.08±1.13	42.46±0.68	7.78±0.29	460.06	322.13	66.59	255.54
	20—50	45.92±4.99	36.20±1.65	33.48±1.31	6.53±0.34				
	50—70	31.82±0.74	28.83±0.23	27.28±0.14	6.07±0.40				
	>70	32.46±1.43	28.99±0.92	27.41±0.94	6.43±0.35				
草地坡上 Grassland uphill	0—35	69.32±8.29	39.70±3.46	35.14±2.94	6.46±0.70	491.58	267.05	56.34	210.71
	35—55	42.94±11.19	28.21±6.18	25.31±5.60	5.11±0.52				
	55—100	36.24±4.51	23.18±2.55	20.77±2.46	5.23±0.58				
草地坡下 Grassland downhill	0—27	75.06±13.15	50.39±4.70	44.19±3.72	5.83±0.27	450.62	328.93	59.07	269.87
	27—60	33.15±1.35	28.75±1.36	27.14±1.78	5.91±0.44				
	60—85	35.06±0.87	31.83±0.83	30.50±0.91	6.14±0.37				
	85—100	33.94±1.64	30.69±1.19	29.20±1.18	5.65±0.23				

不同样点 0—100 cm 深度土壤库容量差异较大。不同植被类型比较,表现为常绿林地的总蓄水量(W_t)最高,为 506.49 mm,其次为草地(471.10 mm),落叶林地最小(430.74 mm)。由田间持水量计算得到的土壤水分库容(W_f)为土壤能稳定保持的最大水分容量,3 种植被类型从大到小依次为草地、常绿林地和落叶林地。两水分库容量相比,3 种植被类型中由田间持水量得到的水分容量占总库容的百分比以草地最大,为 63.25%,高于落叶林地(60.75%)和常绿林地(55.00%)。各样地死水库容差异不大,在 50.07%—66.59% 范围内,以落叶林地坡下最高、常绿林地坡下最低。而兴利库容则以常绿林地坡下最高,落叶林地坡上最低。相同植被类型不同坡位比较,坡上土壤各平均库容量均小于坡下,其中坡下由田间持水量得到的水分库容占总库容的百分比为 67.90%,为坡上(50.25%)的 1.35 倍。

综合对比各样地土壤持水性能参数和水分库容,不同植被类型比较,草地的持水性能最强,更利于土壤保蓄水分,其次是落叶林地,最后是常绿林地。相同植被类型不同坡位比较,坡下土壤的持水性能强于坡上。

2.4 土壤理化性质对土壤水文功能的影响

土壤的入渗性能和持水能力取决于土壤质地、孔隙结构、有机质含量等土壤性质。对 6 个研究样地土壤的饱和导水率、饱和含水量、毛管持水量、田间持水量等土壤持水参数与总孔隙度、容重、有机质含量、砂粒、粉粒和粘粒含量等土壤理化性质参数分别进行了相关性分析。相关分析样本量在 40—200 个,分析方法为双变

量相关分析,选择 Pearson 简单相关系数,采用双尾检验法,显著性水平 $\alpha=0.01$,分析结果如表 4。饱和导水率与土壤总孔隙度、有机质含量呈显著正相关($P<0.01$),与容重呈显著负相关($P<0.01$)。饱和含水量、毛管持水量、田间持水量均与土壤总孔隙度、有机质含量和粉粒含量呈显著正相关($P<0.01$),与容重和砂粒含量呈显著负相关($P<0.01$)。

表 4 各样地土壤水文功能参数与土壤性质的相关分析

Table 4 Correlation analysis between soil hydrological parameters and soil properties

	总孔隙度 Total porosity	容重 Bulk density	有机质含量 Organic matter content	砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity	0.293 **	-0.436 **	0.607 **	-0.007	0.182	-0.214
饱和含水量 Saturated capacity	1.000 **	-0.858 **	0.777 **	-0.506 **	0.684 **	0.034
毛管持水量 Capillary capacity	0.908 **	-0.804 **	0.673 **	-0.605 **	0.744 **	0.126
田间持水量 Field capacity	0.889 **	-0.716 **	0.624 **	-0.640 **	0.759 **	0.168

** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

3 讨论

3.1 不同植被覆盖影响土壤水文功能的原因

研究区 6 个样地空间距离较近,气候特征差异小,土壤性质的差异主要源于样地间植被覆盖和坡位的不同。不同植被覆盖由于根系生长发育差异影响土壤的机械组成,进而影响土壤孔隙结构和容重。同时,植被类型的差异还导致了林下枯落物的组成和分解状况的差异,从而改变不同植被覆盖土壤的有机质含量,刘敏等^[25]在重庆缙云山的研究以及陈文静等^[26]在川西人工林的研究都发现了类似规律。样地共包含 3 种植被类型,其中常绿林地人为干扰强度小,树木种类复杂,植被茂密,土壤表层根系发育,土壤孔隙结构较好,非毛管孔隙度高,土壤容重小,有机质含量高;草地为人类营造防火带而砍伐植被形成,人类活动作用较强,地形呈梯田状,土壤孔隙结构较差,非毛管孔隙度低,土壤容重大,有机质含量低;落叶林地树龄普遍较小,植被根系发育一般,与常绿林地和草地相比,孔隙结构一般,非毛管孔隙度、土壤容重和有机质含量均属于中等。这与纪金华等人在哀牢山的研究结果相似,其指出植被较为发达的根系可有效改善森林土壤的孔隙结构^[27]。

饱和导水率是表征土壤入渗性能的重要指标,饱和导水率越高,降雨过程中水分入渗越快,越不易形成地表径流,从而减小土壤地表流失量^[25,28]。研究区 3 种植被覆盖下土壤饱和导水率大小依次为常绿林地>落叶林地>草地,各样地饱和导水率随深度增加波动降低。研究表明,饱和导水率受到土壤孔隙度、土壤容重、土壤机械组成等多种因素影响^[29-32]。其中常绿林地和落叶林地植被较为茂密,根系发达,导致土壤非毛管孔隙度高且容重小,水分更加便于入渗;而草地由于过去人类活动的影响,土壤紧实,孔隙度低,容重大,水分不易渗透。此外,由于土层越深,土壤有机质减少,土壤孔隙度也随着土层的加深而减小,容重增大,因此土壤饱和导水率随着土壤深度的增加波动降低。相关性分析结果表明,各样地土壤饱和导水率主要受土壤总孔隙度、容重和有机质含量影响,表明土壤结构是影响山地土壤饱和导水率的主要因素,这与余新晓等^[13]对长江上游亚高山暗针叶林土壤的水分入渗研究结果相一致。

土壤持水性能与土壤的孔隙状况密切相关,非毛管孔隙在吸水后将水分快速运移下渗,而毛管孔隙水运动速度较慢,可以长时间保存^[1,33]。研究区 3 种植被类型中,土壤非毛管孔隙度和毛管孔隙度大小相反,其中非毛管孔隙以常绿林地最高,草地最低,表明常绿林地土壤入渗速度快而持水性能差,草地土壤入渗速度慢而持水性能高。同一样地随着土壤深度增加,总孔隙度和非毛管孔隙度均逐渐减小,因此土壤入渗速度减慢而持水能力变强。水分库容则更能直接地表现土壤的持水性能,虽然常绿林地的总库容较大,但因为此时的库容是土壤达到饱和时的瞬时贮水量,受重力作用影响水分会不断向深层下渗;而田间持水量对应的水分库容为土壤可稳定保持的最大水分容量,其中草地土壤可稳定保持的最大水分容量占总库容的百分比最大,常绿

林地最低。因此草地土壤更易于保蓄水分,而常绿林地更易于将水分传递至下层用以补充地下水和调控河川径流,从而利于水源涵养^[33]。山地土壤持水能力主要受土壤容重、孔隙度、有机质含量和颗粒组成等因素的影响^[34,35]。相关分析结果表明,土壤饱和含水量、田间持水量和毛管持水量与总孔隙度、有机质含量和粉粒含量呈显著正相关,与容重和砂粒含量呈显著负相关。这是因为土壤容重越小,孔隙度越高,土壤持水量也就越多,这与以往对土壤含水量与容重的研究结果一致^[36,7]。而与砂粒含量呈负相关、与粉粒含量呈正相关,是因为毛管持水量对应的土壤水分保持主要是依靠细小毛管的强毛管力和土壤颗粒的吸附力作用,而砂粒含量越高,土壤颗粒比表面积越小,对水分的吸持越少。

3.2 坡位影响土壤水文功能的原因

山地地形影响土壤的形成和发育,不同坡位的水、热条件和侵蚀过程不同,土壤属性存在差异。样地坡上土壤非毛管孔隙度高,容重小,有机质含量高,这是因为坡上土壤在形成过程中受侵蚀较重,砂粒含量高,土壤质地粗;而坡下土壤长期接受上层堆积,土层厚且土壤颗粒较细,非毛管孔隙度低,容重大,有机质含量低。由于不同坡位土壤性质的不同,土壤饱和导水率也存在明显差异,即坡上土壤的饱和导水率大于坡下土壤。这是因为坡上土壤质地较粗,导水能力强,土壤入渗速度快,而坡下土壤质地紧实,不易透水,入渗速度慢,这与李军等^[37]在冀北山地不同坡位油松林所获取的结果一致。

由于坡上土壤的非毛管孔隙度高于坡下,因而坡上土壤入渗速率快而持水性能低,坡下土壤相反。6个样地不同坡位土壤的水分库容也具备相同特征,除了草地坡上土壤水分总库容高于坡下,其余两种植被类型均表现为坡下土壤水分总库容大于坡上。这是因为草地坡下受人为除草活动影响,土壤紧实,孔隙度低,难以储水,而坡上存在少量灌木,孔隙度高。同时坡下土壤可稳定保持的最大水分容量占总库容的百分比均高于坡上,即坡下土壤的持水能力强于坡上。这与李奕等^[38]和陈波等^[39]分别在大兴安岭山地和冀北山地的研究结果相一致。

4 结论

对三峡山地不同植被类型和坡位6个样地的研究表明,不同植被类型下土壤性质差异明显,土壤非毛管孔隙度和有机质含量均表现为常绿林地>落叶林地>草地,容重表现为草地>落叶林地>常绿林地;坡位对土壤性质也有较大影响,表现为坡上土壤的非毛管孔隙度和有机质含量均高于坡下,容重呈现相反的趋势。土壤饱和导水率在植被类型上表现为常绿林地最大,其次为落叶林地,草地最小;在坡位上表现为坡上>坡下。

不同样地土壤持水性能差异明显,草地土壤毛管持水量和田间持水量高于落叶林地和常绿林地。对于相同植被类型不同坡位样地,坡下土壤毛管持水量、田间持水量和凋萎含水量均高于坡上。综合土壤水分库容,草地土壤持水性能最强,其次是落叶林地,最后是常绿林地;坡位上表现为坡下土壤的持水性能强于坡上。

三峡山地土壤性质与土壤水文功能密切相关,相关分析结果表明,饱和导水率与土壤总孔隙度、有机质含量呈显著正相关($P<0.01$),与容重呈显著负相关($P<0.01$)。饱和含水量、毛管持水量、田间持水量均与土壤总孔隙度、有机质含量和粉粒含量呈显著正相关($P<0.01$),与容重、砂粒含量呈显著负相关($P<0.01$)。

参考文献 (References):

- [1] 黄荣珍, 杨玉盛, 张金池, 谢锦升, 王维明. 不同林地类型土壤水库蓄水特性研究. 水土保持通报, 2005, 25(3): 1-5.
- [2] 余新晓. 森林生态水文研究进展与发展趋势. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 391-402.
- [3] 薛立, 李燕, 屈明, 晏姝, 王相娥. 火力楠、荷木和黎蒴林的土壤特性及涵养水源的研究. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1623-1627.
- [4] 赵建生, 王永明, 杨新兵. 冀北山地森林土壤水文效应研究. 水土保持研究, 2013, 20(3): 201-205.
- [5] 赵锦梅, 张德罡, 刘长仲. 东祁连山土地利用方式对土壤持水能力和渗透性的影响. 自然资源学报, 2012, 27(3): 422-429.
- [6] Shwetha P, Varija K. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils. Aquatic Procedia, 2015, 4: 1142-1149.
- [7] 张川, 陈洪松, 张伟, 聂云鹏, 叶莹莹, 王克林. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征. 应用生态学报, 2014,

- 25(6): 1585-1591.
- [8] Lin H, Zhou X. Evidence of subsurface preferential flow using soil hydrologic monitoring in the Shale Hills catchment. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(1): 34-49.
- [9] Zhu Q, Nie X F, Zhou X B, Liao K H, Li H P. Soil moisture response to rainfall at different topographic positions along a mixed land-use hillslope. *Catena*, 2014, 119: 61-70.
- [10] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 雷静品, 王鹏程, 谭本旺. 三峡库区不同退耕还林模式水土流失特征及其影响因子. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(1): 146-152.
- [11] 葛晓改, 黄志霖, 程瑞梅, 曾立雄, 肖文发, 谭本旺. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3301-3308.
- [12] 徐丽宏, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山典型植被类型土壤水文生态功能研究. *林业科学研究*, 2012, 25(4): 456-463.
- [13] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 程根伟. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 15-19.
- [14] 王玉杰, 王云琦, 齐实, 朱金兆. 重庆缙云山典型林地土壤分形特征对水分入渗影响. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2): 73-78.
- [15] 成晨, 王玉杰, 潘玉娟, 吴云, 陈林. 长江三峡库区不同森林类型涵养水源能力比较研究. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 215-217.
- [16] 刘目兴, 杜文正, 张海林. 三峡库区不同林型土壤的入渗能力研究. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(3): 299-306.
- [17] 李向富, 刘目兴, 易军, 吴四平, 杨叶, 娄淑兰. 三峡山地不同垂直带土壤层的水文功能及其影响因子. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(8): 1809-1818.
- [18] 王云琦, 王玉杰. 三峡库区典型森林植被生态水文功能. *生态学杂志*, 2010, 29(10): 1892-1900.
- [19] 沈泽昊, 金义兴, 赵子恩, 吴金清, 黄汉东. 三峡大老岭地区森林群落的数量分类研究. *武汉植物学研究*, 2000, 18(2): 99-107.
- [20] 邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006: 84-85.
- [21] 冯杰, 解河海, 黄国如, 张东辉. *土壤大孔隙流机理及产汇流模型*. 北京: 科学出版社, 2012: 130.
- [22] Assouline S, Or D. The concept of field capacity revisited: defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resources Research*, 2014, 50(6): 4787-4802.
- [23] 黄荣珍, 杨玉盛, 谢锦升, 王维明, 张金池. 福建闽江上游不同林地类型土壤水库“库容”的特性. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 92-96.
- [24] 李航, 严方晨, 焦菊英, 唐柄哲, 张意奉. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力. *生态学报*, 2018, 38(11): 3889-3898.
- [25] 刘敏, 王玉杰, 赵洋毅, 吴得荣, 刘楠, 雷声坤. 重庆缙云山水源涵养林地土壤水文效应. *中国水土保持*, 2010, (5): 41-44.
- [26] 陈文静, 祁凯斌, 黄俊胜, 杨婷惠, 包维楷, 庞学勇. 川西不同树种人工林对土壤涵水能力的影响. *生态学报*, 2017, 37(15): 4998-5006.
- [27] 纪金华, 章永江, 张一平, 刘玉洪, 杨秋云, 宋亮, 巩合德, 鲁志云. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用. *生态学报*, 2012, 32(6): 1692-1702.
- [28] Yang J, Xu X L, Liu M X, Xu C H, Zhang Y H, Luo W, Zhang R F, Li X Z, Kiely G, Wang K L. Effects of “Grain for Green” program on soil hydrologic functions in karst landscapes, southwestern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 247: 120-129.
- [29] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53-56.
- [30] Papanicolaou A N, Elhakeem M, Wilson C G, Lee Burras C, West L T, Lin H S, Chark B, Oneal B E. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity at the hillslope scale: Understanding the role of land management and erosional effect. *Geoderma*, 2015, 243-244: 58-68.
- [31] Sun D, Yang H, Guan D X, Yang M, Wu J B, Yuan F H, Jin C J, Wang A Z, Zhang Y S. The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: A meta-analysis. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1394-1401.
- [32] Liu Z P, Ma D H, Hu W, Li X L. Land use dependent variation of soil water infiltration characteristics and their scale-specific controls. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 139-149.
- [33] 潘春翔, 李裕元, 彭亿, 高茹, 吴金水. 湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能. *生态学报*, 2012, 32(2): 538-547.
- [34] Gan M, Jia Y H, Shao M A, Guo C J, Li T C. Permanent gully increases the heterogeneity of soil water retention capacity across a slope-gully system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 272: 206-217.
- [35] Yang F, Zhang G L, Yang J L, Li D C, Zhao Y G, Liu F, Yang R M, Yang F. Organic matter controls of soil water retention in an alpine grassland and its significance for hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3086-3093.
- [36] 吕殿青, 邵明安, 刘春平. 容重对土壤饱和水分运动参数的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(3): 154-157.
- [37] 李军, 杨坤, 张泽光, 杨新兵, 高琛. 冀北山地不同坡位油松林土壤水文效应. *河北林果研究*, 2016, 31(1): 8-12.
- [38] 李奕, 满秀玲, 蔡体久, 盛后财. 大兴安岭山地樟子松天然林土壤水分物理性质及水源涵养功能研究. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 87-91, 96-96.
- [39] 陈波, 剪文灏, 吕发, 肖志军, 李淑春, 张建华, 杨新兵. 冀北山地蒙古栎天然林土壤物理性质及水源涵养功能研究. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 83-86, 92-92.