

DOI: 10.5846/stxb201504280880

刘目兴, 吴丹, 吴四平, 廖丽娟. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和和导水率的影响. 生态学报, 2016, 36(11): - .

Liu M X, Wu D, Wu S P, Liao L J. Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges Reservoir Area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): - .

三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和和导水率的影响

刘目兴^{1,2,*}, 吴丹^{1,2}, 吴四平^{1,2}, 廖丽娟^{1,2}

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

摘要: 土壤大孔隙是土体内孔径较大能优先传导水分的根孔、洞穴或裂隙, 大孔隙内优先流的产生是土壤水分运动研究由均衡走向非均衡的标志。利用原状土柱的水分穿透试验, 对三峡库区山地不同林型覆盖下土壤的大孔隙结构进行了研究, 分析了温性阔叶林棕壤、针阔混交林黄棕壤、暖性针叶林黄壤及弃耕草地剖面内大孔隙的剖面分布特征及其对土壤饱和和导水率的影响。结果表明: 研究区内森林土壤的大孔隙当量孔径在 0.3—3 mm 之间, 占土壤总体积的 0.15%—4.72%。大孔隙中孔径 0.3—0.6 mm 的大孔隙密度最大, 占大孔隙总数量的 72.2%—90.4%; 而孔径 >1 mm 的孔隙仅占大孔隙总数量的 1.26%—8.55%。土壤大孔隙密度和大孔隙面积比的顺序为: 温性阔叶林棕壤 > 针阔混交林黄棕壤 > 针叶林黄壤 > 弃耕坡地。各孔径段的大孔隙密度在不同样点均呈现 A 层-B 层-C 层逐渐减小的趋势, 大孔隙密度与有机质含量呈显著正相关关系。土壤饱和和导水率与不同孔径大孔隙的密度、面积比均成显著正相关关系, 孔径 >1 mm 的大孔隙仅占大孔隙总数量的 1.26%—8.55%, 但决定了饱和和导水率 84.7% 的变异。此外, 森林土壤饱和和导水率与各土壤层的有机质含量成显著正相关关系, 有机质的增多有利于改善土壤的入渗性能。

关键词: 土壤大孔隙; 林型; 饱和和导水率; 当量孔径; 三峡库区

Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges Reservoir Area

LIU Muxing^{1,2,*}, WU Dan^{1,2}, WU Siping^{1,2}, LIAO Lijuan^{1,2}

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

Abstract: Soil macropores refer to pores with a larger diameter and higher hydraulic conductivity than those of the soil matrix; these macropores include root channels, caves, and fissures. The preferential flow of water to the soil macropores would result in non-uniform soil water transport, this indicates a need to study the mechanisms of soil water movement from homogeneous to heterogeneous fields. Water breakthrough experiments with undisturbed soil samples identified the structure of the macropores of four kinds of mountain soils covered by different forest types in the Three Gorges Reservoir Area (brown earth covered by subalpine temperate deciduous broad-leaved forest, yellow-brown earth covered by deciduous coniferous broad-leaved mixed shrubs, yellow earth covered by low-mountain warm coniferous forests, and abandoned farmland covered by herbaceous plants). The profiled soil macropore characterizations and their effects on saturated hydraulic conductivity were analyzed. The results indicated that the equivalent radii of the soil macropores in the study area ranged from 0.3 to 3.0 mm, accounting for only 0.15%—4.72% of the soil bulk volume. The proportion of macropores with the radii from 0.3 to 0.6 mm was the largest, accounting for 72.2%—90.4% of the total macropore amount, while the proportion of macropores

基金项目: 国家自然科学基金(41001125); 湖北省自然科学基金重点项目(2015CFA141)

收稿日期: 2015-04-28; 修订日期: 2015-11-30

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

with radii > 1 mm accounted for only 1.26%—8.55%. Soil macropore density and the proportion of the average area of the macropores in different soil types decreased in the following order: brown earth covered by subalpine temperate deciduous broad-leaved forest > yellow-brown earth covered by deciduous coniferous broad-leaved mixed shrubs > yellow earth covered by low-mountain warm coniferous forest > abandoned farmland covered by herbaceous plants. All macropores, regardless of radius, decreased with increasing soil depth, from the humus horizon (layer A) to the leaching illuvial horizon (layer B) to the parent material horizon (layer C), and a significant correlation was observed between soil macropore density and soil organic matter content. Significant correlations were also observed between the following pairs: saturated hydraulic conductivity and soil macropore density, and proportion of the average area of macropores and organic matter content. Macropores with a radius > 1mm, constituting only 1.26%—8.55% of the total amount of macropores, accounted for 84.7% of the variability in saturated soil hydraulic conductivity. Collectively, these results suggest that increased organic matter in forest soil layers can improve its infiltration capability.

Key Words: soil macropores; forest types; saturated hydraulic conductivity; equivalent radii; Three Gorges Reservoir Area

土壤大孔隙是孔径较大,能够优先传导地表降水或灌溉水的物理孔隙^[1]。大孔隙的存在使得地球关键带内水分或溶质绕过土壤基质,以优先流的形式,快速通过土体补给地下水^[2]。土体内连通的大孔隙为优先流的发生提供了路径,加快了壤中流的产生,是森林涵养水源和调蓄径流的主要方式^[3-6]。Watson^[3]、Hayashi^[4]、石辉^[5]、陆斌^[6]等研究发现大孔隙在山地森林土壤中普遍存在,虽然数量少,不及土壤总体积的5%,但是能够传导70%—85%以上的入渗水分通量。可见,土壤大孔隙是土壤水及溶质的运移的重要路径,大孔隙内优先流的发生可以增大土壤入渗率,减少地表径流和水土流失,是森林植被发挥涵养水源和保持水土等生态功能关键。目前,大孔隙结构可通过直接观察和间接测量获得,前者包括染色示踪、土壤切片、CT扫描和地透雷达探测等,后者包括张力入渗仪测量和穿透曲线法^[7]。直接测量能直观分析土壤孔隙结构,但并非土体内所有孔径较大的孔隙都有快速传导作用。Kodesova等^[8]发现未在地表开口或未形成连通路的大孔隙内没有优先流的出现,图像分析得到的大孔隙数量比实际传导水分的大孔隙更多。间接测量的张力入渗和穿透曲线法,两者均将大孔隙近似为管状,根据 Hagen-poiseuille 方程,建立大孔隙结构与水分通量间的关系^[9-11]。穿透曲线法根据出流的水分通量或标记物浓度变化,计算各孔径范围的大孔隙数量^[12-13]。国内学者石辉^[5]、时忠杰^[14]、王伟^[15]、田香姣^[16]、陆斌^[6]等曾利用水分穿透试验对不同土壤的大孔隙特征进行了观测与分析。由于试验环境和材料的差异,得出的大孔隙数据差异较大,在运用 Hagen-poiseuille 方程计算大孔隙半径时存在不一致,有必要展开更深入的研究。

三峡库区水土流失严重,森林植被在截留降雨、调蓄径流和保持水土的生态系统重建中处于不可替代的地位。国内许多学者对库区植被的生态水文功能进行了大量的研究,对花岗岩为主的土壤内根孔、洞穴产生的“管流”也进行了试验观测^[17]。这些观测更多是基于染色法的剖面观测,将大孔隙结构与入渗量相结合的研究较少^[15]。降雨入渗时大孔隙内优先流是森林涵养水源和保持水土的关键,是森林生态功能的重要组成部分。选取紧邻三峡大坝上游的邓村-大老岭为研究区,利用水分穿透曲线法对不同类型森林土壤的大孔隙结构及其传导水分能力进行分析,期望为土壤水分运动模型提供参数,为评价大孔隙流的传导功能提供依据。

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夷陵区和大老岭林区,属鄂西山地与秦巴山地的交界区,下游紧邻三峡大坝,海拔100—2000 m,基岩以酸性结晶岩为主,是三峡库区典型的地貌单元。地理位置为30°00′13″—31°28′30″N, 100°51′8″—111°39′30″E,具有亚热带季风性湿润气候特征,年平均气温16.7℃,年均降水量1101.1 mm,年均蒸发量950 mm,≥10℃的积温5403.7℃,无霜期283天。山地气候垂直地带性显著,中山以上气候冷湿,多云

雾,空气相对湿度较大^[18]。气候和人类活动的影响下植被-土壤垂直地带性分异明显,基带以红壤和黄壤为主,分布范围至 800—1200 m,原生的常绿阔叶林仅残存陡峭偏远的沟谷生境,地表被马尾松 (*Pinus massoniana*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、铁坚油杉 (*Keteleeria davidiana*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、板栗 (*Castanea mollissima*) 等暖性针叶林或落叶阔叶林覆盖。海拔 960—1 600 m 地段为山地黄棕壤,植被为常绿落叶阔叶混交林,优势种有短柄栎 (*Quercus glandulifera* var. *brevipetiolata*)、板栗、千筋树 (*Carpinus fargesiana*)、杜鹃 (*Rhododendron*)、冬青 (*Ilex*) 等落叶或常绿树种。海拔 1600 m 以上为山地棕壤,植被为温性落叶阔叶林,主要群落类型为米心水青冈林 (*Fagus engleriana*)、鹅掌楸 (*Liriodendron L.*)、板栗林、锥栗林 (*Castanea henryi*) 和华山松林 (*Pinus armandii*) 等^[18]。各垂直带内土壤发育程度差异大,海拔 1600 m 以上为大老岭林区,植被覆盖度 80%,腐殖质层厚 15—22 cm,土壤有机质较丰富;900—1600 m 之间为常绿落叶针阔混交林,土壤质地细,土层厚 30—40cm;800 m 以下为山地黄壤,土层薄,质地粗,砾石和砂砾含量高。

1.2 研究方法

沿图 1 中夷陵区邓村坪—大老岭林场一线,在大老岭(海拔 1700 m)、白水头(海拔 1173 m)和竹林湾(海拔 740.2 m),布设温性阔叶林山地棕壤、针阔混交林山地黄棕壤、暖性针叶林山地黄壤 3 种森林土壤样地,并在罗家岩(海拔 942 m)布设弃耕草地作为对照。每个垂直地带内选择 3 个重复样地,各样地内挖掘土壤剖面,用高 5 cm、直径 5 cm 的环刀采集原状土用于室内水分穿透实验和土壤容重测量,用滴管法分析土壤质地,重铬酸钾法测定土壤有机质含量,结果如表 1。

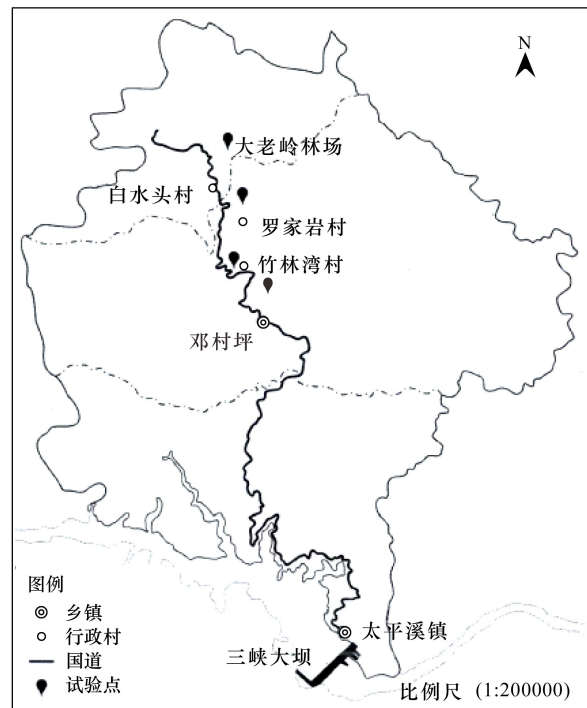


图 1 实验样地位置

Fig.1 Location of the experimental sites

表 1 研究区内不同类型土壤的性质

Table 1 Soil properties of various soil layers under different soil types in the study area

植被-土壤类型 Vegetation-soil types	土壤发生层 Soil layers	深度 Depth/cm	容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	砂粒	粉粒	粘粒	有机质含量 Organic matter content/(g/kg)
				Sand/% 0.05—2mm	Silt/% 0.002—0.05mm	Clay/% <0.002mm	
温性落叶阔叶林山地棕壤	A	0—20	0.81	23.95	58.86	17.19	54.83
Brown earth covered with subalpine	B	20—40	0.86	13.69	66.74	19.57	52.86
temperate deciduous broad-leaved forest	C	40—70	1.15	14.18	70.38	15.44	37.74
常绿落叶针阔混交林山地黄棕壤	A	0—10	0.85	29.4	50.78	19.82	47.36
Yellow brown soil covered with deciduous	B	10—40	0.93	36.06	46.6	17.34	31.38
coniferous broad-leaved mixed shrubs	C	40—60	1.35	25.86	49.57	24.57	27.72
暖性针叶林山地黄壤	A	0—5	1.26	60.04	21.28	18.68	14.25
Yellow earth covered with low-mountain	B	5—30	1.61	63.03	17.5	19.47	12.58
warm coniferous forest	C	30—50	1.63	79.36	7.71	12.93	6.88
弃耕草地	A	0—15	1.59	86.06	9.98	3.97	13.56
covered with herbaceous plants	B	15—30	1.60	86.14	6.52	7.34	9.01

* A、B、C 分别表示腐殖质层、淋溶淀积层和母质层 A、B、C refer to humus, leaching illuvial, parent material horizons respectively

1.2.1 水分穿透曲线法测量大孔隙的原理

Radulovich 等^[12]、石辉等^[5]、时忠杰等^[14] 研究中,将大孔隙界定为土壤田间持水量到饱和含水量之间的孔隙。饱和土柱入渗时水流首先从半径最大的大孔隙穿透土体,而后加入导水过程的大孔隙半径逐渐减小,至稳定出流时为孔径最小的导水大孔隙^[12]。土壤穿透试验中水分运动速率较慢,处于层流范围,假设土壤孔隙为圆形的情况下,可根据土壤水分穿透曲线理论,将流量方程:

$$Q = Av = \pi r^2 \tau L / t \quad (1)$$

与 Hagen-Poiseuille 方程:

$$Q = \pi r^4 \Delta P / (8 \eta \tau L) \quad (2)$$

联合求解,大孔隙的当量孔径:

$$r = \tau L [8 \eta / (t \Delta P)]^{1/2} \quad (3)$$

其中, Q 为单位流量 (cm^3/s); A 为孔隙面积 (cm^2); v 为流速 (cm/s); r 为孔隙半径; τ 为水流实际路径的弯曲系数,本研究取值 1.2; L 为土柱长度 (cm); η 为水的粘滞系数 ($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$); ΔP 为压力水头 (cm); t 为从首次加水开始计时的时间 (s)。对任意时间土样下出流量进行观测,利用公式 (3) 即可计算出对应的孔隙半径。将出流量对应的孔径按照一定的间隔划分出一个孔隙范围,以孔径平均值计算,当间隔排水量为 Q_e 时,根据公式 (4) 可计算对应的大孔隙数量 (N):

$$N = Q_e / (Av) = Q_e t / (\pi r^2 \tau L) \quad (4)$$

大孔隙面积比在假设孔隙为圆形前提下,根据公式 (3) 计算出的大孔隙半径和公式 (4) 得出的大孔隙数量,计算单位面积上各个孔径范围所有大孔隙的面积总和,即为该土壤发生层内大孔隙面积比。

1.2.2 供试土样采集与出流量测定

2014 年 7 月—9 月,用环刀(直径 5 cm、高 5 cm)分层采集不同垂直带的原状土样,不同样地各发生层采样深度如表 1,每种样地 3 个重复。采集的环刀样品尽量减少震动,带回室内后置于水中 12 h 以充分饱和,然后放置于粗砂上放置 12 h,使其达到田间持水量。在环刀上边缘与土壤样品接触的部分涂上凡士林,以保证水分不能通过土壤与环刀壁之间的孔隙直接流出。在原状土环刀上方对置一同样的空环刀,用玻璃胶粘结两个环刀,使之紧密结合。在空环刀内放置一张滤纸,以防止水分冲刷破坏表层土壤结构。原状土环刀下方放置滤纸并用多孔盖抵托。用马氏瓶控制水头 2 cm,从加水开始计时,当土柱下部有水流出时,每隔 5 s、10 s 或 20 s 收集出流量,测定其体积,直到水流通量达到稳定为止。然后根据测定的出流量作水分穿透曲线,确定其水流通量达到稳定的时间,再参照计算大孔隙的相关指标。根据水流稳定后的流量计算饱和导水率 (K_s),统一换算为 10℃ 的饱和导水率 (K_{10})。

2 结果与分析

2.1 不同类型森林土壤的大孔隙特征

研究区内 4 种类型森林土壤大孔隙的当量孔径在 0.3—3.0 mm 之间(表 2),其中最小孔径 0.3 mm 与水能够自由移动孔隙孔径的下限一致 ($d > 0.3 \text{ mm}$),显示土壤大孔隙的毛管作用较弱,大孔隙内水分以重力水为主,是降雨后水分快速穿透土体达到森林土壤深层的主要通道^[19]。

三峡库区温性阔叶林山地棕壤、针阔混交林山地黄棕壤和暖性针叶林山地黄壤 3 种人类活动扰动较小的森林植被覆盖的样地,土壤各发生层的大孔隙密度在 0.4×10^4 — 31.17×10^4 个/ m^2 之间,其中暖性针叶林山地黄壤 B 层最小,温性落叶阔叶林山地棕壤 A 层最大。3 种森林土壤的同一发生层内大孔隙密度相比较:亚高山温性阔叶林棕壤 > 中山针阔叶混交林黄棕壤 > 低山暖性针叶林黄壤。以腐殖质层为例,亚高山温性阔叶林棕壤样地最大,达到 31.17×10^4 个/ m^2 ,低山暖性针叶林黄壤最小,为 1.47×10^4 个/ m^2 ,不足棕壤密度的 5%。人类耕作后弃耕坡地的大孔隙平均密度 0.72×10^4 个/ m^2 ,比森林土壤大孔隙平均密度低两个数量级。其中,耕作层和犁底层内土壤大孔隙密度分别为 0.88×10^4 个/ m^2 和 0.56×10^4 个/ m^2 ,比亚高山温性阔叶林样地和中山针

阔叶混交林样地低了两个数量级,与低山暖性针叶林样地相差不大。人为耕作切断了根孔、洞穴,破坏了土壤结构,减少了大孔隙密度^[20]。同时,翻耕也会增加孔径较小的大孔隙密度,弃耕坡地下孔径为 0.3—0.6 mm 的大孔隙就比山地黄壤底层更多。此外,4 种样地内当量孔径 0.3—0.6 mm 的大孔隙密度最大,占大孔隙总数量的 72.2%—90.4%,而孔径>1.0 mm 的孔隙数量仅占大孔隙总数量的 1.26%—8.55%。罗家岩弃耕地孔径 0.3—0.6 mm 孔隙比例最大为 90.4%,竹林湾针叶林黄壤最小为 72.2%,孔径>1.0 mm 的孔隙比例则是弃耕地最小为 1.26%,针叶林黄壤最大为 8.55%。

表 2 不同类型森林土壤的大孔隙特征

Table 2 Soil macropore characteristic of various soil types covered with different forestlands

植被-土壤类型 Vegetation-soil types	土壤发生层 Soil layers	不同孔径大孔隙的密度/(个/m ²) Number of soil macropores in each radius interval					总大孔隙数/ Total soil macropores (个/m ²) (×10 ⁴)	大孔隙面积比 Area proportion of macropores/%	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity/ (mm/min)
		2.0—3.0 mm	1.2—2.0 mm	1.0—1.2 mm	0.6—1.0 mm (×10 ⁴)	0.3—0.6 mm (×10 ⁵)			
温性落叶阔叶林山地棕壤 Brown earth covered with subalpine temperate deciduous broad-leaved forest	A	471	2042	4036	3.72	2.68	31.17	7.16	8.94
	B	214	995	2160	1.92	1.91	21.36	4.51	6.12
	C	119	684	1338	1.16	1.00	11.37	2.50	4.70
常绿落叶阔叶混交林山地黄棕壤 Yellow brown soil covered with deciduous coniferous broad-leaved mixed shrubs	A	251	1265	2478	2.21	1.88	21.41	4.71	8.52
	B	229	1006	1470	1.20	1.68	18.27	3.73	6.58
	C	157	798	1316	1.03	1.32	14.46	2.97	5.50
暖性针叶林山地黄壤 Yellow earth covered with low-mountain warm coniferous forest	A	13	83	175	0.14	0.13	1.47	0.32	0.58
	B	0	175	786	0.20	0.01	0.40	0.23	0.06
	C	0	166	702	0.14	0.03	0.53	0.22	0.14
弃耕草地 Abandoned farmland covered with herbaceous plants	A	6	31	66	0.07	0.08	0.88	0.19	0.42
	B	4	31	44	0.05	0.05	0.56	0.11	0.24

* A、B、C 分别表示腐殖质层、淋溶淀积层和母质层 A、B、C refer to humus, leaching illuvial, parent material horizons respectively

土壤的大孔隙面积比,即土壤大孔隙断面面积与土柱总过水断面面积的百分比,能够综合反映大孔隙半径及密度等因素对土壤水分运动的影响^[6,14]。各样地大孔隙面积比平均为 2.42%,标准差为 2.31%,变异系数为 0.95。大孔隙面积比最大的为山地棕壤的 A 层,较小的为弃耕坡地的 A 层和 B 层。实际上,低山的暖性针叶林和弃耕坡地的大孔隙面积都较小,均不超过 0.4%。不同类型森林土壤腐殖质层和淋溶淀积层内大孔隙面积比的顺序为:亚高山温性阔叶林棕壤>中山针阔混交林黄棕壤>低山针叶林黄壤,而中山针阔混交林黄棕壤母质层的大孔隙面积比略大于亚高山温性阔叶林棕壤。山地棕壤的大孔隙面积比较大是由于土壤中植物根系密度大,土壤结构疏松,水分下渗路径较多,这在野外染色试验中得以证实^[21]。山地黄壤石砾含量较高,质地粗,硬度大,限制了根孔、虫洞等大孔隙的发育,大孔隙面积比仅为 0.26%。与弃耕坡地比较,森林土壤大孔隙密度和大孔隙面积比的变异系数较大,这可能与林分类型不同时根系数量与长度的差异所致,也与土壤各发生层内砾石分布不均匀有关^[14]。

2.2 大孔隙的垂直剖面分布规律

森林土壤垂直剖面的各发生层大孔隙相比较,温性阔叶林棕壤和针阔混交林黄棕壤下大孔隙密度:腐殖质层>淋溶淀积层>母质层,大孔隙数量随着土壤深度的增加而逐渐减小,同时大孔隙面积比也相应的明显减小(表 2)。这种随土壤深度增加大孔隙数量减少的趋势在孔径较大的大孔隙数量上表现得更加明显,比如亚高山温性阔叶林地 C 层的 2.0—3.0 mm 大孔隙密度只是 A 层的 1/4,而其他孔径的大孔隙密度比均在 30% 以上。这与随深层土壤中的动植物活动减少有关,缺少了植物根系和动物活动对土壤的疏松作用,林地土壤的下层通常比上层更加紧实,大孔隙数量减少,孔径越大的大孔隙受到的影响越大^[22]。

低山暖性针叶林地各发生层间大孔隙面积比的差值不超过 10%,A 层 2.0—3.0 mm 的大孔隙密度只有 13 个/m²,而 B、C 层没有该孔径段的大孔隙(表 2)。同时,竹林湾样地下 0.6—2.0 mm 大孔隙密度均为 B 层最大

而 A 层最小,0.3—0.6 mm 大孔隙密度则是 B 层最小而 A 层最大。这与低山针叶林黄壤质地粗、多砾石有关,大孔隙以裂隙、裂缝为主,不同孔径的大孔隙结构在剖面上的差异不大^[14]。与低山暖性针叶林地相似,弃耕坡地各发生层的大孔隙面积比和孔隙密度相差不大,B 层略低于 A 层。耕作或弃耕土壤中,犁底层由于长期耕作而被压实,同时间歇浇灌和降水过程中表层淋失的粘粒在底层淀积,导致犁底层土壤紧实,总孔隙度小且以毛管孔隙为主^[20]。

森林土壤垂直剖面上大孔隙的分布规律取决于土层内根系密度、动物孔穴和裂隙,而根系伸延和穴居动物活动与土壤有机质含量密切相关^[23]。利用多因素偏相关分析法对各当量孔径的大孔隙密度与对应有机质含量进行相关分析(表 3)。结果显示,当量孔径为 0.3—1.0 mm 的大孔隙密度与有机质含量具有极显著的正相关关系($P<0.01$),当量孔径为 1.0—3.0 mm 的大孔隙密度与有机质含量具有显著的正相关关系($P<0.05$)。

表 3 有机质含量、饱和导水率与不同当量孔径大孔隙密度的相关关系

Table 3 Correlation between the number of soil macropores and saturated water conductivity, organic matter content

土壤参数 Soil parameters	相关性 Correlation	不同当量孔径的大孔隙密度/(个/m ²) Number of soil macropores in each radius interval					大孔隙面积比 Area proportion of macropores/%	有机质含量 Organic matter content / (g/Kg)
		0.3—0.6 mm	0.6—1.0 mm	1.0—1.2 mm	1.2—2.0 mm	2.0—3.0 mm		
有机质含量 Organic matter content/(g/Kg)	相关系数 Spearman correlation coefficient	0.813 **	0.791 **	0.669 *	0.702 *	0.712 *	0.819 **	/
	显著性(双侧) Two-tailed significances	0.004	0.006	0.035	0.024	0.021	0.004	/
饱和导水率 Saturated water conductivity/ (mm/min)	相关系数 Spearman correlation coefficient	0.932 **	0.752 *	0.681 *	0.853 **	0.833 **	0.896 **	0.769 **
	显著性(双侧) Two-tailed significances	0	0.012	0.03	0.002	0.003	0	0.009

** $P<0.01$; * $P<0.05$

2.3 大孔隙结构对饱和导水率的影响

土壤饱和导水率是表述土壤渗透性能的重要参数,主要受土壤质地、容重、孔隙结构的影响^[19]。土壤大孔隙内运动的水流可以在较短的时间内渗透到土壤深层,并未与周围土壤基质的水分交换。研究区所有样地中土壤大孔隙面积比仅 0.11%—7.16%,但大孔隙对水分的入渗通量和再分布影响依旧十分明显。对各个当量孔径的大孔隙密度与有机质含量、饱和导水率进行多因素偏相关分析,发现当量孔径为 0.6—1.2 mm 的大孔隙密度对饱和导水率具有显著影响($P<0.05$),当量孔径为 0.3—0.6 mm、1.2—3.0 mm 的大孔隙密度与饱和导水率之间存在极显著的正相关关系($P<0.01$)(表 3)。当量孔径为 0.3—0.6mm 的大孔隙数量与密度,在不同类型土壤的不同土层中变化明显,故其对饱和导水率的空间变化影响较大。当量孔径为 1.2—3.0 mm 的大孔隙半径较大,孔隙体积较大,连通度高,也是饱和土壤内水流的主要通道。对当量孔径 >1.0 mm 的大孔隙密度与饱和导水率进行单因素回归分析,发现研究区各样地土壤饱和导水率与孔径 >1.0 mm 的大孔隙密度成线性关系,拟合度高(图 2)。孔径 >1.0 mm 的大孔隙密度仅占大孔隙总密度的 1.26%—8.55%,但决定了饱和导水率 84.7%的变异,这与陆斌在对秦岭火地塘林区的土壤大孔隙与饱和导水率的回归结果基本一致^[6]。

大孔隙面积比综合了孔隙孔径与密度两个参数,与土壤饱和导水率单因素相关系数高达 0.97,两者呈现极显著的正相关关系($P<0.01$),表明饱和导水率对土壤中有效大孔隙度的变化比较敏感(图 3)。此外,土壤有机质不仅是土壤中养分的重要来源,而且在改善土壤质地、容重、土壤结构等物理性质上效果明显。土壤饱和导水率与孔隙特征、有机质含量的偏相关分析显示,有机质含量与饱和导水率之间具有极显著的相关关系($P<0.01$),相关系数为 0.77(表 3)。有机质的增多能促进团粒状结构的形成,使土壤更加疏松,改善土壤的通透性,从而提高土壤的导水性。

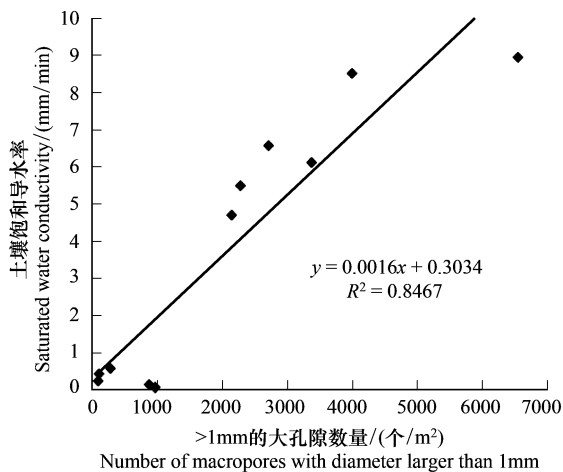


图2 土壤饱和导水率与>1mm大孔隙密度的相关关系

Fig.2 Correlation analysis between saturated water conductivity and density of macropore with diameter larger than 1mm

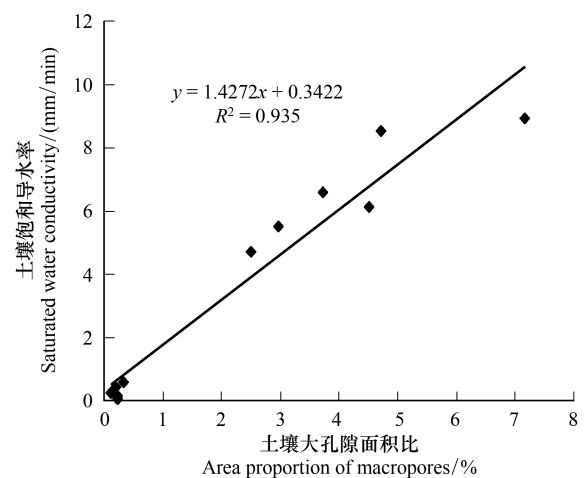


图3 土壤大孔隙面积比与饱和导水率的相关关系

Fig.3 Correlation analysis between the number of soil macropores and saturated water conductivity

3 结论与讨论

利用环刀土柱的水分穿透曲线法对三峡库区不同类型森林土壤的大孔隙特征及其分布与土壤饱和导水率的关系进行了研究。三峡库区土壤大孔隙主要是大于0.3 mm的自由导水孔隙,当量孔径在0.3—3.0 mm之间,孔径范围与Beven and Germann^[1]、王伟等^[15]的研究结果一致,比时忠杰等^[14]研究所得半径范围0.4—2.3 mm更宽,当量孔径上限比石辉等^[5]研究结果大0.6 mm,比陆斌等^[6]研究结果小0.8 mm。土壤大孔隙仅占土壤总体积的0.15%—4.72%,不足土体的5%,与石辉等^[5]在岷江上游的研究结果近似。大孔隙密度随当量孔径的增大而减小,当量孔径0.3—0.6 mm的孔隙密度最大,孔径>1.0 mm的孔隙数量仅占大孔隙总数的1.26%—8.55%。各类森林土壤的大孔隙密度及面积比相比较:温性阔叶林棕壤>针阔混交林黄棕壤>针叶林黄壤。另外,人为耕作破坏了土壤结构,大孔隙数量锐减,弃耕坡地的大孔隙密度仅为 7.2×10^3 个/m²,比棕壤、黄棕壤和黄壤的大孔隙平均密度(1.34×10^5 个/m²),低两个数量级。土壤垂直剖面上大孔隙分布呈现上层多,下层少的特点,森林土壤的大孔隙均呈现A层-B层-C层依次减少的趋势,大孔隙密度与有机质含量成显著正相关关系。石辉等^[5]在岷江上游,陆斌等^[6]在秦岭火地塘林区和王伟等^[15]在四面山阔叶林区对土壤大孔隙垂直分布的研究也得到类似结论,而李伟莉等^[13]对长白山的棕色针叶林土和山地苔原的研究却是大孔隙数量随土壤深度的增加而增大,这与试验观测的土壤垂直剖面结构存在较大变异有关。

土壤饱和导水率与不同孔径的大孔隙密度、大孔隙面积比均存在显著正相关关系,与陆斌^[6]、王伟^[15]等的研究结果基本一致。石辉等^[5]对岷江上游土壤的研究认为孔径>1.4 mm的孔隙决定了饱和导水率69%的变异,陆斌等^[6]研究对秦岭火地塘林区土壤的研究显示孔径>1.5 mm的大孔隙决定了饱和导水率84.4%的变异。三峡库区土柱实验显示,孔径>1 mm的大孔隙密度仅占大孔隙总密度的1.26%—8.55%,但决定了饱和导水率84.7%的变异。孔径范围更大(1.0—3.0 mm)的大孔隙对饱和导水率的变化影响更大。

综上所述,土壤大孔隙是山地土壤水分传导的主要路径,土壤饱和导水率与土壤大孔隙半径、密度和大孔隙面积比显著相关。大孔隙的形成与土壤性质、动植物活动等关系密切,森林土壤尤其是阔叶林和针阔混交林下有机质含量丰富,根系穿插形成的根孔改善了土壤渗透性能,而根系较浅的暖性针叶林黄壤大孔隙路径发育较弱,人为翻耕后土壤大孔隙更少。大孔隙内优先流的产生不仅与土壤本身性质有关,还与降水特征、初始含水量及斥水性砾石等边界条件有关,未来需要进一步讨论大孔隙内优先流产生的原因及变异,为土壤水分运动模型的构建和库区的生态建设提供参考。

参考文献 (References):

- [1] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resource Research*, 1982, 18(5): 1311-1325.
- [2] 牛健植, 余新晓, 张志强. 优先流研究现状及发展趋势. *生态学报*, 2006, 26(1): 231-243.
- [3] Watson K W, Luxmoor R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 578-582.
- [4] Hayashi Y, Ken'ichirou K, Mizuyama T. Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(1/2): 85-102.
- [5] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分流出速率的影响. *生态学报*, 2005, 25(3): 507-512.
- [6] 陆斌, 张胜利, 李侃, 马国栋. 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响. *生态学报*, 2014, 34(6): 1512-1519.
- [7] 高朝侠, 徐学选, 赵婀娜, 赵传普, 张少妮. 土壤大孔隙流研究现状及发展趋势. *生态学报*, 2014, 34(11): 2801-2811.
- [8] Kodešová R, Vignozzi N, Rohošková M, Hájková T, Kořínek M, Pagliai M, Kozák J, Šimunek J. Impact of varying soil structure on transport processes in different diagnostic horizons of three soil types. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1/4): 107-125.
- [9] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(1/2): 179-204.
- [10] Kutilek M, Germann P F. Converging hydrostatic and hydromechanic concepts of preferential flow definitions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, 104(1/4): 61-66.
- [11] Zhang Z B, Zhou H, Zhao Q G, Lin H, Peng X. Characteristics of cracks in two paddy soils and their impacts on preferential flow. *Geoderma*, 2014, 228-229: 114-121.
- [12] Radulovich R, Solorano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(2): 556-559.
- [13] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 裴铁璠, 关德新. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2179-2184.
- [14] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于澎涛, 郭浩, 徐大平. 六盘山森林土壤的石砾对土壤大孔隙特征及出流速率的影响. *生态学报*, 2008, 28(10): 4929-4939.
- [15] 王伟, 张洪江, 程金花, 吴煜禾, 杜士才, 王冉. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1217-1223.
- [16] 田香姣, 程金花, 杜士才, 李乾坤, 张欣, 魏虎伟. 重庆四面山草地土壤大孔隙的数量和形态特征研究. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 292-296.
- [17] 张洪江, 程云, 史玉虎, 王玉杰, 盛前丽, 陈宗伟. 长江三峡花岗岩坡面林地土管特性及其对管流的影响. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(1): 55-60.
- [18] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭植物区系的垂直梯度分析. *植物分类学报*, 2001, 39(3): 260-268.
- [19] 邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] 高朝侠, 徐学选, 宇苗子, 张少妮, 赵传普. 黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1578-1584.
- [21] 刘目兴, 王文德, 张海林, 杜文正. 三峡库区不同垂直带森林土壤大孔隙染色实验. *山地学报*, 2012, 30(2): 147-155.
- [22] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, Zeyer J, Blaser P. Preferential flow paths: biological 'hot spots' in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(6): 729-738.
- [23] Cheng J H, Zhang H J, Wang W, Zhang Y Y, Chen Y Z. Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China. *Soil Science*, 2011, 176(12): 652-660.