

岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对 水分出流速率的影响

石 辉^{1,2}, 陈凤琴³, 刘世荣²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 西安 710055; 2. 中国林业科学研究院
森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 3. 西南师范大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要:大孔隙是森林土壤中常见的现象,对土壤壤中流的产生有重要的影响。但由于大孔隙研究方法的不成熟,各种方法得到的大孔隙半径范围并不一致。一般认为田间持水量和饱和含水量之间的土壤孔隙为大孔隙,利用水分穿透曲线和 Poiseuille 方程研究了岷江上游不同植被下土壤的大孔隙状况,这种方法一方面与传统的研究方法相衔接,另一方面所得到的大孔隙与土壤水分运动有关,反映了土壤大孔隙的研究目的,因而是一种相对合理的研究方法。岷江上游几种主要植被下土壤大孔隙半径主要集中于 0.3~2.4mm 之间,平均在 0.48~1.17 mm 之间,均值为 0.84 mm,均方差为 0.226;且随着剖面的发育表现出上部土层多,下部土层少的特点。同时,半径在 2.4~1.4mm 之间的特大孔隙较少,<1.0 mm 的小孔隙较多。大孔隙的平均半径对于水分出流速率有重要的影响,特别是半径>1.4mm 的孔隙数量影响最大,虽然其数量仅占大孔隙数量的 5%以下,但决定了稳定出流速率 70%的变异。大孔隙所占过水断面的最高比例为 21.22%,最低为 2.6%;在大孔隙所占过水断面的比例小于 20%的条件下,稳定出流速率随大孔隙的增多而增大。

关键词:大孔隙;Poiseuille 方程;水分穿透曲线;半径范围与数量

Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River

SHI Hui^{1,2}, CHEN Feng-Qin³, LIU Shi-Rong² (1. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 3. School of Resource and Environments, Southwest China Normal University, Chongqing 400715). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 507~512.

Abstract: Macropore structure in forest soils is very important to soil subsurface water flow. In the soil layer thinning region, large amounts of water can breakthrough the macropores and form underground runoff after rain. As a result, storm peak flow is decreased, the ratio of surface water and underground water is changed, and river water fluctuation more slowly and remains more stable. Although there are many methods to be used to research soil macropores, macropores radii measurements by different methods are often inconsistent because these methods are immature. The common macropore definition is the porosity between saturated water content and field water content. The objective of this study was to determine the radii of soil macropore as commonly defined and its impacts on soil water effluent. The macropores of forest soil were studied using the water breakthrough curve and Poiseuille formula method of Radulovich *et al.*. This was done for soils under the coniferous fir forest, alpine oak and alpine meadow environments in the upper reaches of Minjiang River. The radii of soil macropores under different vegetations in upper reaches of Minjiang River ranged from 0.3~2.4 mm, with mean varying from 0.48~1.17 mm.

基金项目:国家重点基础研究规划资助项目(2002CB111504);国家杰出青年基金资助项目(30125036);国家自然科学基金资助项目(40471078)

收稿日期:2004-05-22;**修订日期:**2004-11-10

作者简介:石辉(1968~),陕西眉县人,教授,主要从事环境生态学教学与科研工作。E-mail: h-shi@sohu.com

致谢:美国 Regional plant Introduction Station, USDA~ARS 的农学家 Richard Johson 博士对英文摘要作了仔细的修改,特此致谢

Foundation item: Supported by the National Key Basic Research Project (No. 2002CB111504) and National Natural Sciences Foundation of China (No. 30125036 and No. 40471078)

Received date: 2004-05-22; **Accepted date:** 2004-11-10

Biography: SHI Hui, Professor, mainly engaged in environmental ecology. E-mail: h-shi@sohu.com

The overall mean value was 0.84 mm and standard deviation was 0.226. Soil macropores are more frequent in upper soil layers and less frequent in the lower soil profile. The large macropores with radii from 2.4~1.4 mm are less common, and small macropores with radii less than 1.0 mm are more common. The mean radius of macropores has very important effects on water inflow rate, especially those macropores with radii larger than 1.4 mm. Although these macropores make up only 5% of the total, they contribute 70% to the variance of steady effluent rate. The ratio of macropores ranged from 0.3~2.4 mm in a section of water flow can be as high as 21.22% and as low as 2.6%. The steady effluent volume increases along with the ratio of macropores in a water flow section enlarge when the ratio below 20%. The water breakthrough curve method complements traditional method of macropore diameter measurement but also reflect the water flow properties of macropores, so it is a useful method for understanding water flow in soils.

Key words: soil macropore; poiseuille law; water breakthrough curve; radius range and quantity

文章编号:1000-0933(2005)03-0507-06 中图分类号:S157.5 文献标识码:A

长江上游森林生态系统在减缓自然灾害、维护生态安全和社会经济可持续发展中发挥着不可替代的作用,是长江流域的天然屏障。长江上游的天然林保护工程、退耕还林还草工程则是保护、恢复和重建长江流域森林生态系统的有效措施。森林植被对水文过程的影响是森林植被的重要生态功能^[1],而森林土壤是形成森林植被水文功能的核心地带,是森林植被水文功能形成的关键^[2],是水分储存和调节器,因此研究森林土壤的水分动力过程是认识森林水文功能的一个重要环节。

在传统的森林土壤研究中,经常根据土壤水分的类型将土壤孔隙分为毛管孔隙和非毛管孔隙,这里的非毛管孔隙一般对应着土壤物理中的大孔隙,主要指田间含水量与饱和含水量之间的孔隙,虽说具体的孔径指标由于毛管势的大小、孔隙功能、水动力学特征和图象处理的精度而划分的标准不同^[3],一般指孔径 0.03~3mm 的孔隙,这些大孔隙是森林土壤中存在的普遍现象,具有重要的生态水文学意义。森林土壤大孔隙的形成是植物根系腐烂和动物穴道、干湿交替作用和冻融作用、人为活动以及土壤质地等因素的综合作用结果,其中植物根系的作用是最主要的因素。由于大孔隙的存在,水流在运动过程中不能与土体发生充分的相互作用,而是直接快速地进入土壤深层,以至于部分学者认为大孔隙所形成的优势流(preferential flow)是土壤深层水分可能来源的唯一通道^[4]。Beasley^[5]曾发现在森林坡地上,降水 20 分钟后出现了壤中流,而此时土壤上层剖面并没有达到饱和;Mosley^[6]计算之后,发现 40% 的降水沿着大孔隙迅速入渗;Harr^[7]发现在一些陡坡流域上,壤中流提供了暴雨径流的 97%。传统的土壤物理理论认为,非饱和流的运动特别慢,除非下部土壤达到饱和,否则壤中流不可能成为当次降水的主要径流来源^[8]。De Vries 和 Chow 等^[9]研究后认为,在相同水力导度下,大孔隙产生的优势流可比基质势引起的水分运动更快,入渗深度更深,大孔隙是壤中流快速出现的主要因素。Wilson 等^[10]在森林坡地上研究表明,坡地大孔隙是壤中流的主要机制,特别是那些直径大于 1mm 的孔隙,虽然数量很少,但对传导水流有着重要的因素,大中孔隙的不同组合有着不同的导水速率^[11]。因此,研究森林土壤的大孔隙结构特征及时空变异规律,对于进一步认识森林植被与水关系的问题有重要意义。

1 原理和方法

1.1 理论基础

本文仍然采用田间持水量到饱和含水量之间的土壤孔隙作为大孔隙的标准,但具体的孔径范围则是研究的重点。达到田间持水量以后,土壤的基质势几乎为 0,水分的入渗速率主要受供水强度控制。由于土壤水分运动的速率较慢,处于层流的范围,在假设土壤孔隙为圆形的情况下可利用 Poiseuille 方程^[12]建立流量和孔径之间的关系:

$$Q = \pi r^4 \Delta p / (8 \eta \tau L) \quad (1)$$

对于稳态水流,有:

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

由土壤学基本原理可知,在田间持水量到饱和含水量之间水分的排水过程首先是大孔隙排水,然后排水孔隙的孔径逐渐减少。这样对某一固定土样,最大孔隙半径就是第 1 次出水时的半径;而土样的最小半径就是当水流开始达到稳定时的半径。这样,结合方程(1)、(2)即可计算出大孔隙的当量孔径:

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

式中, Q 为单位流量(cm^3/s); r 为孔隙半径(cm); τ 为水流实际路径与土柱长度的比值,一般取 1.2; L 为土柱长度(cm); η 为水的粘滞系数($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$); Δp 为压力水头(cm); t 为从第 1 次加水开始记时的时间(s)。因此通过对任意时间排水量进行观测,可利用(3)式计算出相应的孔隙半径,将两个孔隙半径之间按照 0.1~0.5 之间的间隔,形成一个孔隙范围,而计算值则为其平均值。假设,某个孔径的孔隙面积为 $A(\text{cm}^2)$,水流速率为 $V(\text{cm}/\text{s})$,则与流量之间存在(4)式的关系:

$$Q = nAV = n\pi r^2 V \quad (4)$$

因此,在知道了当量孔径后,可用(4)式计算大孔隙的数量 n 。Radulovich 等将这种方法称作水分的穿透曲线法^[13]。

1.2 研究区域概况与土样采集

采样地位于岷江流域内的卧龙自然保护区。该区位于四川盆地向青藏高原东部过渡的高山峡谷区。东经 $102^{\circ}52'\sim 103^{\circ}21'$,北纬 $30^{\circ}45'\sim 31^{\circ}25'$ 。东西长52km,南北宽62km,总面积约70万 hm^2 。地势自西向东南倾斜,中亚热带季风湿润气候,年降雨量1100mm,相对湿度80%。平均气温 9.8°C ,1月份平均气温 -1.7°C ,7月份平均气温 17°C 。植被保存完好,垂直带谱明显。植被以暗针叶林、高山栎和高山草甸为主。

表1 采样点的基本情况							
Table 1 The basically conditions for the sample							
编号 No.	取样点位置 Sample location	坡度 Slope	海拔高度 Elevation(m)	植被类型 Vegetation	取样编号和深度 Sample number and depth		
I	邓生山阴坡 Lack sunshine slope	30°	2781	暗针叶林下的林窗,以箭竹为主 Gap of dark coniferous fir forest	I-A 6.5cm	I-B 18cm	I-BC 30cm
II	邓生山阴坡 Lack sunshine slope	57°	2758	暗针叶林 Coniferous fir forest	II-A 5cm	II-B 15cm	
III	巴朗山阳坡 Sunshine slope	35°	2878	高山栎 Alpine oak	III-A 14cm	III-BC 22cm	
IV	巴朗山阳坡 Sunshine slope	35°	2948	高山栎 Alpine oak	IV-A 14cm	IV-BC 32cm	
V	巴朗山阳坡 Sunshine slope	15°	4204	高山草甸 Alpine meadow	V-AC	3cm	
VI	巴朗山阳坡 Sunshine slope	15°	4208	高山草甸 Alpine meadow	VI-AC	4cm	
VII	巴朗山阳坡 Sunshine slope	60°	4077	高山草甸 Alpine meadow	VII-AC	7cm	
VIII	巴朗山阳坡 Sunshine slope	60°	4057	高山草甸 Alpine meadow	VIII-A 9cm	VIII-AC 17cm	

利用 $118\text{cm}^2(\Phi 3.1\text{cm}\times 3.9\text{cm})$ 的环刀,按照发生学层次采取不同自然植被下的土壤样品。其中原始暗针叶林下的山地棕色暗针叶林土壤样品2个,高山栎林地土壤样品2个,高山草甸土样品3个(表1)。该地主要的土壤类型及其特征见《森林土壤生态管理》一书^[14]。

1.3 试验方法

按照《森林生态系统地位研究方法》^[15],将采取的原状土样进行饱和,然后放置12h使其达到田间持水量。用马氏瓶控制水头1.5cm,当土柱下部有水流出时每间隔5s收集出流量,直到水流通量达到稳定为止。

2 结果与分析

2.1 不同植被下土壤水分穿透曲线的比较

根据流速和时间,做出各剖面的土壤水分穿透曲线,3种典型植被下土壤的水分穿透曲线见图1。从图中可以看出,由于在3种植被下土壤剖面层次发育的不同,其水分穿透曲线也表现出明显的差异,暗针叶林土和高山栎林土的剖面层次水分穿透曲线差异明显,而草甸植被下的草甸土剖面水分穿透曲线差异基本重合。说明了由于土壤发育程度的不同,暗针叶林土和高山栎林土的大孔隙在剖面上存在分化,而草甸土的大孔隙在整个剖面上比较均一。暗针叶林土稳定出流速率A层为 0.66 ml/s 、B层 0.83 ml/s 、BC层 0.3 ml/s ;高山栎林土稳定出流速率A层为 0.9 ml/s 、BC层为 0.58 ml/s ;草甸土A层和BC层差异并不明显,均为 0.6 ml/s 。出现这种现象的原因,主要由于暗针叶林土的A层虽说根系较多,但是由于土壤分化强烈,土粒较小,而B层一方面存在一些根系,且作为成土母质的砂岩、板岩、片岩、千枚岩等都易破碎,土层多基岩碎石,形成一些垂直向下的大孔隙,BC层由于分化弱、根系少,因而形成的孔隙更少。高山栎林土的剖面发育比暗针叶林土差,A层由于根系、土壤动物活动和

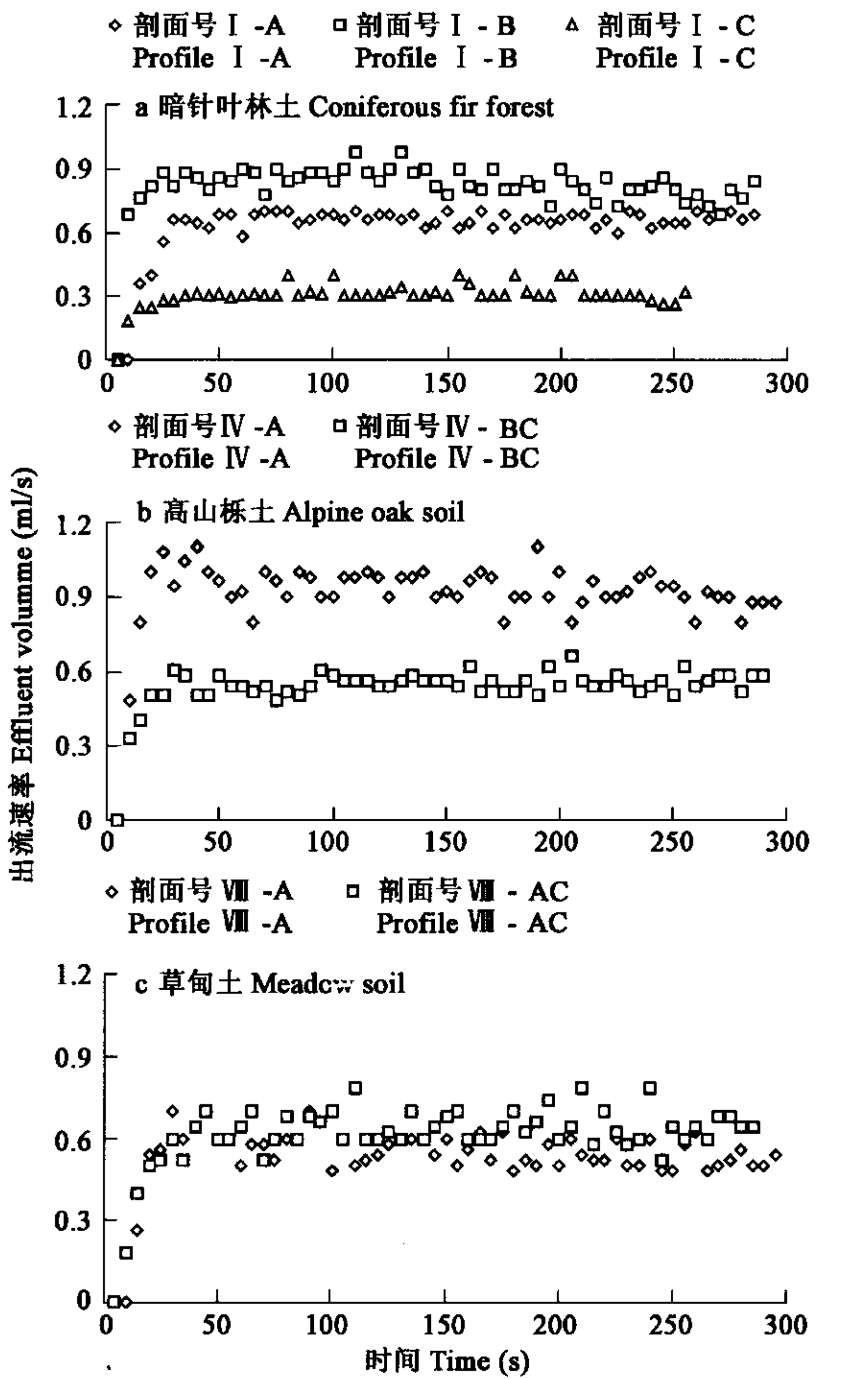


图1 3种典型植被下土壤的水分穿透曲线

Fig.1 The water breakthrough curve of soil under 3 typical vegetations in the upper of Minjiang

分化作用,孔隙较多;而下层由于这些作用微弱,孔隙较少。草甸土由于成土环境的恶劣,植物的根系主要集中在 30cm 以上,剖面发育不明显,因此层次间的孔隙差异较小。同时,从图中还可以看出,在田间持水量和饱和含水量之间,水流在大约为 40s 左右很短时间内就达到了稳定,说明了这之间的大孔隙对水流运动的阻力小,对流速的影响很大。

2.2 不同植被下土壤大孔隙的范围与数量

根据土壤的水分穿透曲线和 Poiseulle 方程计算出不同植被下土壤大孔隙的半径范围和个数,具体结果见表 2。从中可以看出,同样是在田间持水量到饱和含水量之间的孔隙,其孔隙的最小半径范围并不相同,分别为 0.5~0.3mm、0.7~0.3mm、0.7~0.5mm 和 1.0~0.7mm。这主要由于田间持水量是将原状土样进行饱和后放置 12h 所得到的一个土壤水分参数,受土壤质地、有机质含量和团聚体组成等一系列因素的影响,本身并不为一个常数,没有特征的水势值与之对应,根据毛管理论缺乏与之对应的特征孔隙半径。得到大孔隙最小半径范围的不同也说明了这一点,但最小孔隙半径范围有一个共同的特征,孔隙的最小半径大于 0.3mm,与土壤学中土壤通气孔中的粗孔隙半径范围(孔径大于 0.3 或 0.2mm)一致^[16],这说明了在研究的森林土壤中,大孔隙主要是孔径大于 0.3mm 的粗通气孔隙。这种孔隙的排水过程更为迅速,因而对于土壤饱和时水分运动影响更为剧烈,可成为壤中流的一个主要水分来源,对于森林涵养水源有着重要的意义。

表 2 森林土壤大孔隙范围及数量

Table 2 The numbers and radius of macropores about forest soils in Wolong of the upper Minjiang Watershed								
样品编号 No.	剖面层次 Profile	大孔隙半径范围(mm)及数量(个/dm ²) Macropore radius range (mm) and amounts per dm ²					大孔隙平均半径(mm) Av. Radius	
		半径 radius	数量 amounts	半径 radius	数量 amounts	半径 radius	数量 amounts	半径 radius
I	I-A	半径 radius	1.6~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7		0.97
		数量 amounts	20	26	60	235		
	I-B	半径 radius	2.0~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7	0.7~0.3	0.59
		数量 amounts	33	17	23	60	798	
	I-BC	半径 radius	1.9~1.4	1.4~1.0	1.0~0.7	0.7~0.5	0.5~0.3	0.48
		数量 amounts	13	20	50	123	749	
II	II-A	半径 radius	2.2~1.6	1.6~1.0	1.0~0.7	0.7~0.3	0.71	
		数量 amounts	20	89	258	550		
	II-BC	半径 radius	1.4~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7	0.7~0.3		0.64
		数量 amounts	13	7	40	142		
III	III-A	半径 radius	2.2~1.6	1.6~1.4	1.4~1.0	1.0~0.7		1.16
		数量 amounts	20	30	70	93		
	III-BC	半径 radius	2.4~1.6	1.6~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7	1.17
		数量 amounts	13	17	106	60	79	
IV	IV-A	半径 radius	2.3~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7		0.93
		数量 amounts	17	33	73	116		
	IV-BC	半径 radius	1.9~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7	0.7~0.3	0.62
		数量 amounts	23	13	50	83	639	
V	V-AC	半径 radius	1.2~1.0	1.0~0.7	0.7~0.5			0.72
		数量 amounts	3	73	86			
VI	VI-AC	半径 radius	1.6~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7	0.7~0.5		0.82
		数量 amounts	20	344	53	505		
VII	VII-AC	半径 radius	1.7~1.2	1.2~1.0	1.0~0.7			1.16
		数量 amounts	43	30	33			
VIII	VIII-A	半径 radius	1.4~1.0	1.0~0.7	0.7~0.5			0.82
		数量 amounts	63	315	149			
	VIII-AC	半径 radius	1.6~1.4	1.4~1.0	1.0~0.7	0.7~0.5		0.79
		数量 amounts	7	33	46	116		

* 大孔隙的平均半径为数量的加权平均结果 Macropore average radius is the average value of amounts

从岷江上游几种植被下土壤大孔隙的统计特征看,其大孔隙的半径主要集中于 0.3~2.4mm 之间,平均半径为 0.48~1.17mm 之间,均值为 0.84mm,均方差为 0.226,均值为粗通气孔隙标准的 2 倍以上;且均值半径随着剖面的发育,表现出上部孔隙大、下部剖面孔隙小的特点。不同坡度的两个暗针叶林土壤剖面(I、II),随着坡度从 30°增加到 57°,表层的大孔隙半径由 0.97mm 降低到 0.71mm,上部差异不大,这与坡上部植物根系多、土壤动物活动频繁有关;坡度相同、海拔高度相同的两个高山栎林土剖面(III、IV),表层的大孔隙半径一个为 1.16mm、另一个为 1.06mm,相差不大;然而下部大孔隙半径差异较大,分别为 1.17mm 和 0.62mm;特别是样品 III,整个剖面之间无差异,这可能由于下层剖面碎裂基岩形成而层次没有分化,受基岩碎屑影响大,因而大孔隙半径较大,而剖面 VIII 相对较低,剖面有一定的分化,剖面的碎屑少,因此孔隙半径较少。

从数量上看,无论哪个土壤样品,一般表现出大半径孔隙(2.4~1.4mm)较少,小半径孔隙较多的特点,这一特点在剖面发育良好的土壤中表现更为明显;如样品 I-B 和 I-BC 中,0.7~0.3mm 每平方米数量高达 800 个,而 1.4mm 以上半径的孔隙最

多的也仅有 30 多个。

2.3 土壤大孔隙与出流速率的关系

根据 Poiseulle 公式可知,水分通量与孔径的 4 次方成比例,将表 2 中得到的平均大孔隙半径与出流速率之间的关系进行了研究,发现正像 Poiseulle 公式所描述的那样,平均大孔隙半径的 4 次方与稳定出流速率之间存在极显著的关系,在影响稳定出流速率的诸多因素中,大孔隙的平均半径可解释 43% 的变异,说明大孔隙对稳定出流速率有显著影响(图 2)。在所有的大孔隙当中,尤其是半径大于 1.4mm 的孔隙数量对稳定出流速率影响最大,其数量仅占大孔隙数量底 5% 以上,但决定了稳定出流速率 70% 的变异,说明土壤排水过程中,半径大于 1.4mm 的孔隙数量对水分运动有着重要的影响(图 3)。

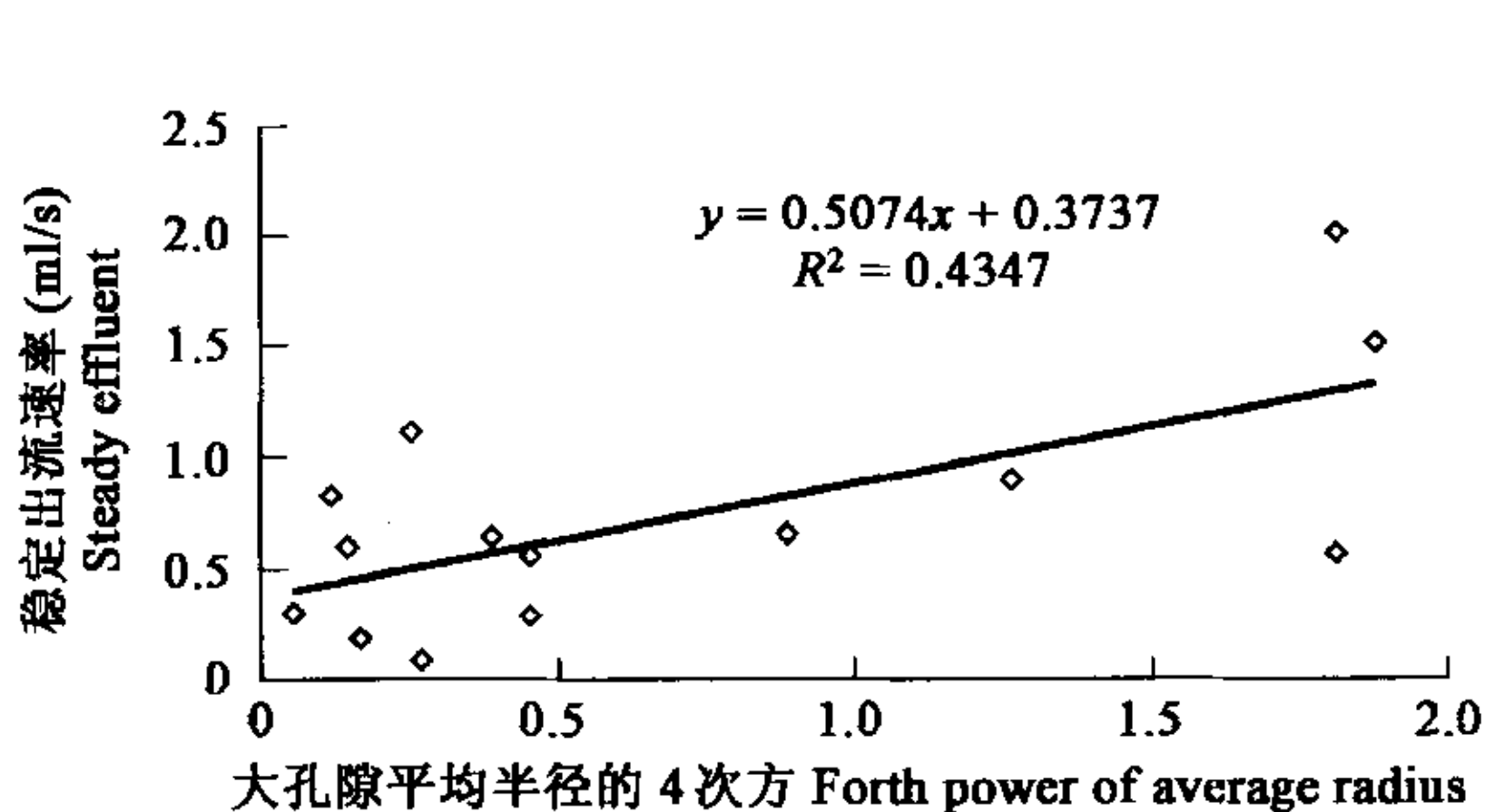


图 2 大孔隙平均半径与稳定出流速率之间的关系

Fig. 2 The relationship between radius of mean soil macropores and steady effluent volume

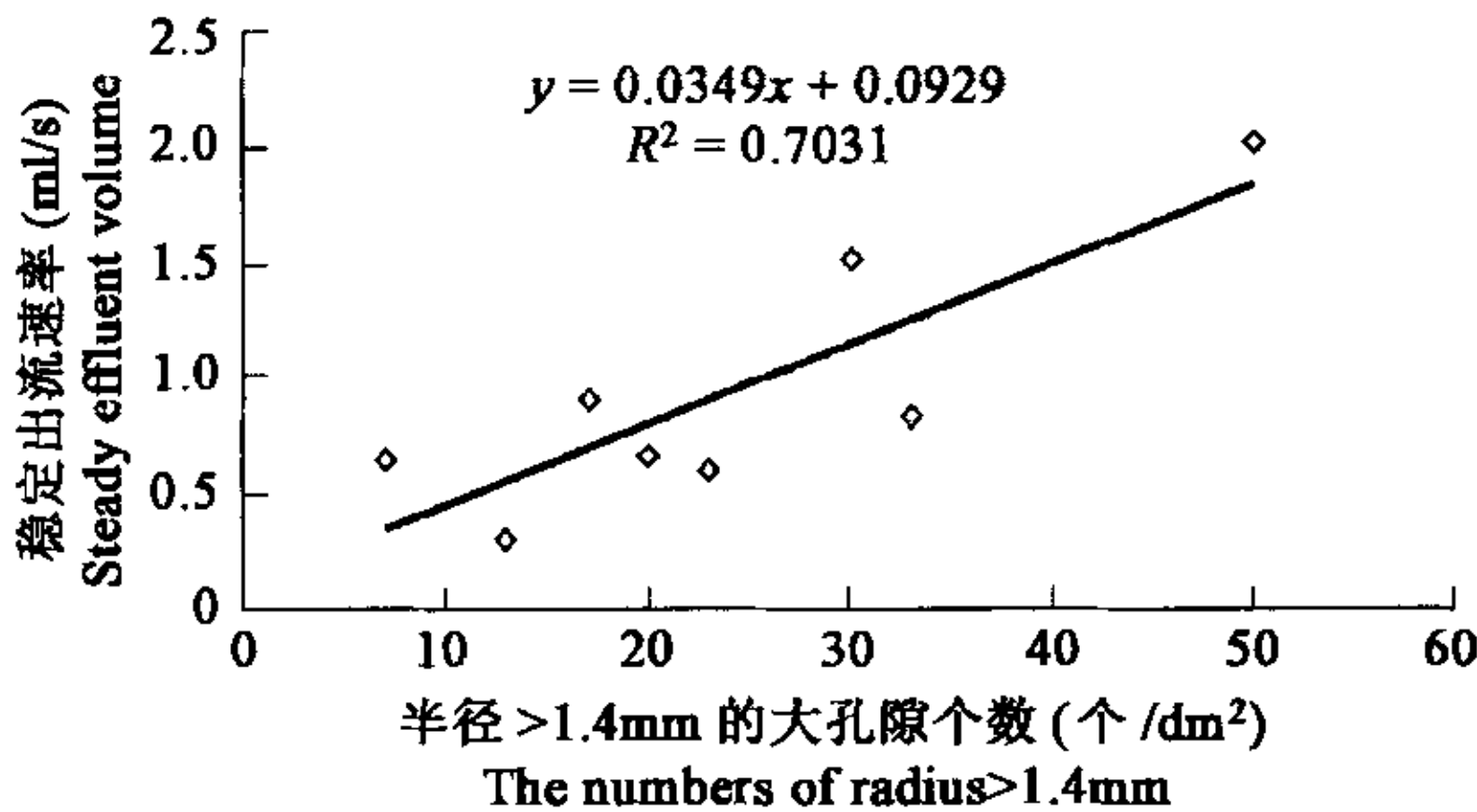


图 3 半径>1.4mm 的大孔隙数量对稳定出流速率的影响

Fig. 3 Influence of the numbers of soil macropore>1.4mm to soil steady effluent volume

土壤孔隙是水流运动的主要通道,为了进一步研究大孔隙对水分运动的影响,根据表 2,计算了大孔隙占过水断面的比例,大孔隙所占比例最高的为Ⅵ样品,高达 21.22%,最低的为Ⅱ-BC 和Ⅴ为 2.6%和 2.7%;平均为 9.2%,均方差为 4.88%,变异系数为 50%以上(图 4)。由于土壤的孔度一般不超过水断面的 60%,从结果得知,大孔隙最小接近土壤孔隙 5%,最高达到 30%,平均为 15%,可能由于岷江上游天然植被条件下,土壤大孔隙的成因多样,发育良好所致。将大孔隙占过水断面的比例与出流速率之间的关系进行了分析,得到图 5 的结果。从图 5 种可以看出,如果不考虑样品Ⅵ时,表现出流速率随着大孔隙所占比例的增加呈幂函数增大;相反它们之间是一个二次抛物线的关系,大孔隙所占比例增加到一定程度出流速反而下降。如何认识这种现象? 一个可能是样品Ⅵ的误差产生了抛物线变化,实质上是出流速率随着大孔隙所占比例的增加呈幂函数增大;另一个可能实际却存在着出流速率随着大孔隙所占比例的增加呈二次抛物线变化;这有待于进一步研究。但无论哪一种变化,在大孔隙占过水断面面积小于 20% 的条件下,均表现出稳定出流速率随大孔隙比例增大的趋势。当大孔隙增大到一定程度时,决定其排水能力的主要因素转化为大孔隙连通性而非其数量的多少。以致于一些学者认为,对于大孔隙产生的优势流而言,孔隙的功能和连通程度比孔隙的大小更为重要^[17],这也是有可能导致抛物线变化的一个原因。

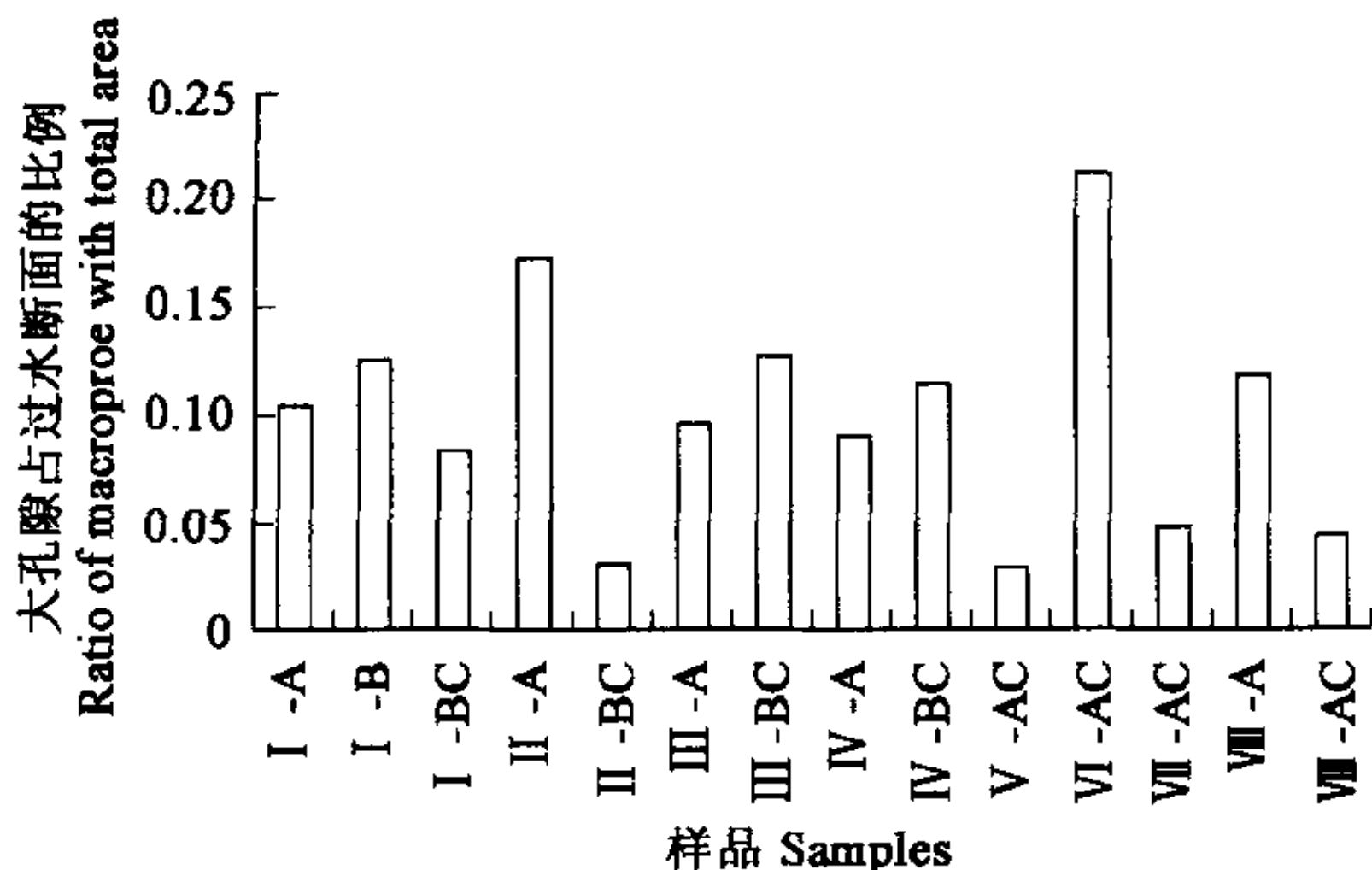


图 4 土壤样品的大孔隙所占过水段面的比例

Fig. 4 The ration between soil macropore area and the water breakthrough area

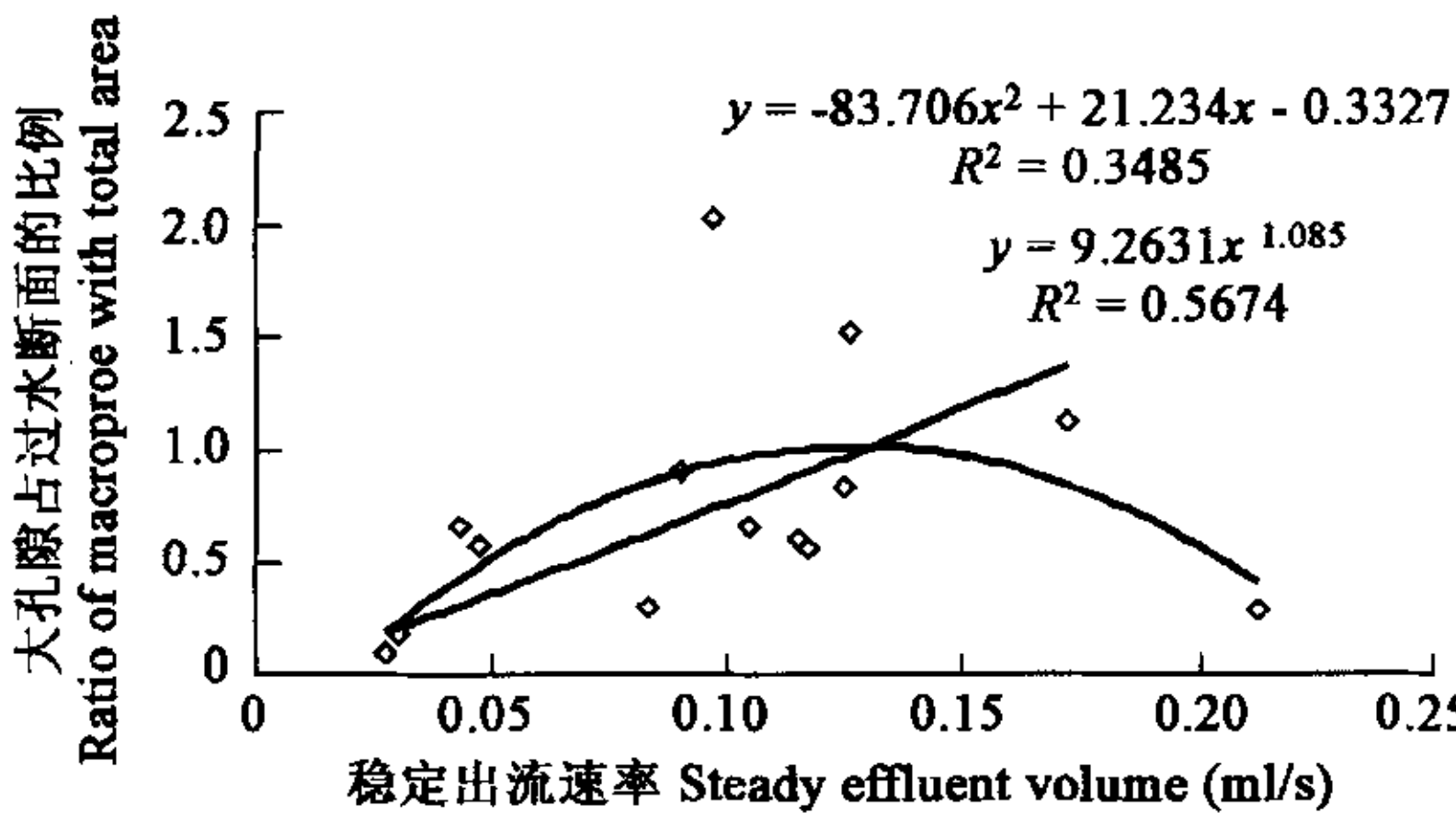


图 5 土壤样品的大孔隙占过水段面的比例与稳定出流速率之间的关系

Fig. 5 The relationship between ration of macropore with water breakthrough area and steady effluent volume

3 小结

林地土壤层是森林生态系统中主要的水分储存和调节器,森林土壤的透水蓄水性能的研究是森林涵养水资源和保持水土

研究的重要组成部分,是认识森林水文功能的一个重要环节。这一特征主要与土壤大孔隙有关。通过对岷江上游不同植被下的土壤进行分层取样(原状土),进行室内分析绘制了土壤水分穿透曲线,应用 Poiseulle 方程计算大孔隙的范围和个数,研究了该地区大孔隙的分布情况。结果表明:

(1) 将田间持水量和饱和含水量之间的孔隙定义为大孔隙,利用水分穿透曲线和 Poiseulle 公式研究土壤大孔隙的孔径分布范围和数量特征,一方面与传统的森林生态系统定位方法相衔接,另一方面所得到的大孔隙与水分运动有关,反映了大孔隙研究的目的,因而是一种相对合理的方法。

(2) 岷江上游几种典型植被类型下土壤大孔隙半径主要集中于 0.3~2.4mm 之间,平均半径为 0.48~1.17mm 之间,均值为 0.84mm,均方差为 0.226;且随着剖面的发育表现出上层多、下层少的特点。同时,半径在 2.4~4.4mm 之间的特大孔隙较少,小于 1.0mm 的小孔隙较多。

(3) 大孔隙的平均半径对水分出流速率有重要的影响,特别是半径大于 1.4mm 的孔隙数量影响最大,虽然数量影响最大,虽然数量仅占大孔隙数量底 5% 以下,但决定了稳定出流速率 69% 的变异。大孔隙所占过水断面的比例最高为 21.22%,最低的为 2.6%;在大孔隙所占过水断面的比例小于 20% 的条件下,稳定出流速率随大孔隙的增多而增大。

森林植被涵养水源的生态功能一直是社会关注的重大问题,也是当今生态科学研究的热点。强化森林土壤的大孔隙研究,可深化森林涵养水源机理的研究,不仅在理论上可加深对森林调节水文过程的认识;在实践上用于预测土地利用变化对水资源和水环境的影响,为退耕还林、天然林保护工程的植被恢复重建提供理论与决策依据。该研究结果仅是一些初步的尝试,有关森林土壤大孔隙的研究还有待与进一步深入。

References:

- [1] Shi H, Liu S R, Sun P S. The mechanism of forest adjusting and controlling agriculture environment: A Review. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, **11**(3): 31~36.
- [2] Bonell M. Progress in the understanding of runoff generation dynamics in forest. *J. Hydrol*, 1993, **150**: 217~275.
- [3] Liu W, Ou Z Q, Ying P F. Soil macropore and its studying methodology. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(6): 465~468.
- [4] Germann P, Medwards W, Mowens L. Profiles of bromide and bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropore. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1984, **48**: 237~244.
- [5] Breasely R. S. Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watershed to channel flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1976, **40**: 955~957.
- [6] Mosley M P. Subsurface flow velocities through selected forested soils, South Island, New Zealand. *J. Hydrol.*, 1982, **55**: 65~92.
- [7] Harr R D. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *J. Hydrol*, 1977, **33**: 37~58.
- [8] Weyman D R. Measurements of the downslope flow of water in a soil. *J. Hydrol.*, 1973, **20**: 267~288.
- [9] De Vries J, Chow T L. Hydrologic behavior of a forested mountain soil in Coastal British Columbia. *Water Resour Res.*, 1978, **5**: 935~942.
- [10] Wilson G V, Jardine P M, Luzmoore R J, *et al.* Hydrology of a forested hillslope during storm events. *Geoderma.*, 1990, **46**: 119~138.
- [11] Luxmoore R J, Jardine P M, Wilson G V, *et al.* Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma.*, 1990, **46**: 138~154.
- [12] Hillel D. *Intriduction to soil physics*. London: Academic Press, 1982.
- [13] Radulovieh R, Solorzano E, and Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1989, **53**: 556~559.
- [14] Zhang W R. *Ecological management of forest soils*. Beijing: Chinses Sci. & Tech. Press, 1994.
- [15] Department of Sci & Tech., Ministry of forestry. *The fix position research methods of forestry ecology*. Beijing: Chinese Sci. & Tech. Press, 1994.
- [16] Zhu Z X. *Pedology*. Beijing: Agriculture Press, 1983.
- [17] Logsdon S D, Mccoy E L, Allmaras R R, *et al.* Macropore characterization by indirect methods. *Soil Scil.*, 1993, **155**(5): 316~324.

参考文献:

- [1] 石辉,刘世荣,孙鹏森. 森林植被对农业生态环境的调控机理评述. *水土保持研究*, 2004, **11**(3): 31~36.
- [3] 刘伟,区自清,应佩峰. 土壤大孔隙及其研究方法. *应用生态学报*, 2001, **12**(6): 465~468.
- [14] 张万儒. *森林土壤生态管理*. 北京:中国科学技术出版社, 1994.
- [15] 林业部科技司编. *森林生态系统定位研究方法*. 北京:中国科学技术出版社, 1994.
- [16] 朱祖祥. *土壤学(上册)*. 北京:农业出版社, 1983.