

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

时忠杰^{1,2}, 王彦辉^{2,*}, 徐丽宏², 熊 伟², 于澎涛², 郭 浩², 徐大平¹

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520; 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)

摘要:石砾广泛分布于山地林区的土壤中,它对土壤的大孔隙及水分运动特征具有重要影响,是还较少研究的与森林水文过程有关的重要因素。基于对田间持水量与饱和含水量之间的土壤孔隙为大孔隙的定义,在宁夏六盘山南侧香水河小流域调查分析了典型植被样地土壤的石砾体积含量和大孔隙特征(半径、密度、面积比)及其之间的关系,并评价了它们对水分出流速率的影响。结果表明,土壤大孔隙的平均半径和密度都对水分出流速率影响显著,特别是半径 $> 1.4\text{mm}$ 的大孔隙密度的影响格外显著,虽然其密度仅占大孔隙总密度的 6.86%,但可解释稳定出流速率变异的 67.4%;作为综合反映大孔隙半径与密度的参数,土壤断面的大孔隙面积比能更好地解释稳定出流率变化,稳定出流速率随大孔隙面积比增大而线性增加,线性回归关系式的确定系数高达 0.8361。石砾含量与稳定出流速率的关系比较复杂,在 0~60cm 土层内,石砾含量 $< 15\%$ 时,稳定出流速率随石砾含量增大而增加,之后转而减少;但在 60~80cm 土层,则呈相反的变化趋势。石砾含量增加能导致土壤大孔隙半径增大,特别是半径大于 1.4mm 的较大孔隙的密度增大,但对较小半径的大孔隙密度影响较弱,说明石砾在一定程度上通过影响土壤大孔隙的半径和密度特征来影响土壤水分出流速率。土壤稳定出流速率随土层深度而变化,在作为主根系层的 0~60cm 土层随土壤加深而降低,在 $> 60\text{cm}$ 土层则随土壤加深而提高,这是因为土壤大孔隙和稳定出流速率在主根系层更多地受植物改良土壤作用影响,在深层土壤则更多地受石砾含量增加的影响。

关键词:六盘山; 森林土壤; 石砾; 大孔隙; 稳定出流速率

文章编号:1000-0933(2008)10-4929-11 中图分类号:S714.7, S715.3, S718 文献标识码:A

The influence of rock fragments on the characteristics of macropore and water effluent of forest soils in the Liupan Mountains, Northwest China

SHI Zhong-Jie^{1,2}, WANG Yan-Hui^{2,*}, XU Li-Hong², XIONG Wei², YU Peng-Tao², GUO Hao², XU Da-Ping¹

1 Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China

2 Research Institute of Forestry Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

基金项目:国家重点基础研究资助项目(2002CB111501); 国家科技部“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD03A1803); 国家科技部社会公益研究专项资助项目(2004DIB3J102); 国家林业局引进国际先进技术资助项目(2003-4-43); 国家林业局森林生态环境重点实验室

收稿日期:2007-05-21; **修订日期:**2007-10-03

作者简介:时忠杰(1975~),男,山东临沂人,博士,主要从事森林生态、水文与水资源及生理生态研究。E-mail: shijie1204@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangyh@caf.ac.cn

致谢:西安建筑科技大学的石辉研究员,山东省水利科学研究院的徐凤琴女士和贵州大学林学院的王轶浩、中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所的冷冷、内蒙古农业大学的魏文俊、刘海龙,沈阳农业大学的张雷燕等老师和同学在野外及室内分析中给予指导与帮助,特此致谢。

Foundation item: The project was financially supported by the National Basic Research Priorities Program of China (No. 2002CB111501), the National Key Technology R&D Program of the Eleventh Five-year Plan of the Ministry of Science and Technology of China (No. 2006BAD03A1803), the Special Project of Social Commonweal Research of the Ministry of Science and Technology, China (No. 2004DIB3J102) and the project of Introducing International Advanced Technology of the State Forestry Ministry, China (No. 2003-4-43) and the Forest Ecology and Environment Key Laboratory of the State Forestry Ministry, China

Received date:2007-05-21; **Accepted date:**2007-10-03

Biography: SHI Zhong-Jie, Ph. D., mainly engaged in forest ecology, hydrology and water resource and eco-physiology. E-mail: shijie1204@163.com

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4929 ~ 4939.

Abstract: The rock fragment which is widespread in the mountain forest soils, deeply affects the characteristics of soil water movement and soil macropores. However, this has been less studied in forest hydrology, although it is an important factor related with hydrological process. Based on the definition that macropores include the soil pores between field capacity and saturated water content, the rock fragments content and the macropore characteristics (radius, density, and area proportion of macropores) as well as their relations were studied, and their effects on the water effluent were evaluated in the plots with typical vegetation forms in a small watershed of Xiangshuihe, south side of Liupan Mountains in northwest China. The results indicate that the steady effluent rate is markedly affected by the mean radius and the density of macropores, especially the density of macropores with radii > 1.4 mm. Though the macropores with radii > 1.4 mm make up only 6.86% of the total density, they contribute 67.4% of the variability of the steady effluent rate. The area proportion of macropores, as a parameter synthetically reflecting the effects of radius and density of macropores, can better explain the variability of steady effluent rate. The steady effluent rate is markedly related with the area proportion of soil macropores, in a linear relation with a high determination coefficient ($R^2 = 0.8361$). However, the relation between the content of rock fragments and steady effluent rate is complicated. In the main root zone of soil layer of 0—60cm, the steady effluent rate increases with the volumetric content of rock fragments until it reaches 15%, and then decreases with the rock fragments content; while the relation in the soil layer of 60—80cm is opposite. The increase of the volumetric content of rock fragments in soils induces a increased mean radius of macropores, especially the increased density of macropores with radius > 1.4 mm, but less effect on the density of macropores with radius < 1.4 mm. This means the effect of rock fragments on water effluent rate (macropore flow) is operated by affecting the characteristics of soil macropores in a certain extent, such as the radius and density of macropores. The steady effluent rate varies with soil depth: firstly it decreases from soil surface to deeper layer in the main root zone of 0—60cm, and then increases with soil depth in the layers of > 60 cm. This is because the macropores and steady effluent rate are more affected by the soil improvement effect of vegetation in the main root zone, while more affected by the increasing rock fragment content in deeper soil layers.

Key Words: Liupan Mountains; forest soil; rock fragment; macropore; steady effluent

由于动物活动、根系腐烂或土壤膨胀收缩等因素形成的土壤大孔隙为水分快速运动提供了通道,即形成大孔隙流^[1]或称优先流,森林土壤大孔隙及优先流具有重要的生态水文效应。近年来开展了大量研究^[2~4],包括大孔隙对水分运动、溶质运移、养分传输等的影响^[5~7]。大孔隙是壤中流快速出现的基本条件,Beasley^[8]曾发现森林坡地上降水 20 min 后出现了壤中流,而此时土壤上层并没有达到饱和;在 Mosley^[9]的研究中,计算表明有 40% 的降水沿着大孔隙迅速入渗;Harr^[10]在一些陡坡流域上的研究表明,壤中流组成了暴雨径流的 97%;De Vries 和 Chow 等^[11]认为,在相同水力导度下,大孔隙优先流可比基质势引起的水分运动更快,入渗更深。甚至部分学者认为大孔隙优先流是土壤深层水分可能来源的唯一通道^[12]。Wilson 等^[13]研究表明,大孔隙流是森林坡地壤中流的主要形成机制,特别是那些直径大于 1mm 的孔隙,虽然数量很少,但对水流传导有重要影响,大中孔隙的不同组合将导致不同的导水速率^[14]。

由于大孔隙的形成影响因素多样^[15],从而使不同地区不同森林的大孔隙影响具有不同特色,而且对土壤水分运动的影响也有较大差异,目前有关研究还很不够,如甚至不同学者对大孔隙的定义仍差别较大^[2,16],目前一般认为大孔隙孔径范围大致为 0.03 ~ 3mm^[17];其次,有关研究还很少考虑土壤石砾含量对大孔隙的影响以及它们共同对土壤出流速率的影响,而多石砾正是山区森林土壤的重要特征。所以,要深入开展林地土壤水分运动、森林水文影响、流域生态水文过程等研究,必须加强对土壤石砾影响土壤大孔隙和土壤水分运动的理解和研究。

本研究选择在位于我国西北黄土高原中西部的宁夏南部六盘山东南侧的香水河小流域进行,它在气候、

土壤、植被等方面均具有代表性,尤其是在土壤多石砾方面具有典型性。选择了当地典型的森林植被类型,旨在研究土壤石砾含量如何通过影响土壤的大孔隙特征(密度、大小、大孔隙面积比等)来影响土壤水分运动,以便加深对石砾含量及土壤大孔隙等因素在森林水文循环中作用的认识,为基于过程的森林流域分布式生态水文模型的研制、发展和参数确定提供一定的理论基础,为石质山区水土保持与资源开发提供一定的指导依据。

1 研究区及研究样地概况

研究地点处在宁夏南部六盘山自然保护区的香水河小流域,位于黄河支流泾河的源头,海拔变化在 2060 ~ 2931m,地理位置介于东经 106°09' ~ 106°30'、北纬 35°15' ~ 35°41' 之间,属于暖温带半湿润区向半干旱区的过渡带,具有暖温带大陆性季风气候,年均温度 5.8℃,7 月平均气温 17.4℃,1 月平均气温 -7.0℃,年均降水量为 591.6mm(泾源站),多集中于 6 ~ 9 月份。香水河小流域植被保存相对完好,垂直带谱明显,森林覆盖率为 70% ~ 80%,主要是天然次生林,如山杨(*Populus davidiana*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、华山松(*Pinus armandii*)等;其次是人工林,如华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*);在山体阳坡还分布着大量灌丛;在高海拔(2700m 以上)地带则分布着亚高山草甸群落。

该小流域内的成土母质为沙质泥岩、页岩、灰岩风化的残积物和坡积物。土壤以灰褐土为主,此外还分布着一定面积的亚高山草甸土。土壤中砾石较多,石砾径级多介于 2 ~ 30mm,主要集中分布于 2 ~ 10mm 之间;不同径级石砾的形状也有较大差异,通常粒径较小多呈圆粒或多面体状,而粒径较大多为长条状、板状或多面体状等;石砾在土壤中呈随机分布,但在一些个别地区也有集聚分布,例如悬崖附近土壤中的石砾含量明显较高,石砾在土壤中多呈集聚状态。

本研究选择当地的典型植被类型设置了 8 个样地,包括 6 个森林样地,1 个灌丛样地和 1 个亚高山草甸样地。具体特征见表 1。

表 1 不同样地的土壤及植被特征

Table 1 Basic characteristics of vegetation and soil in the investigated plots

样地 Plots	坡度 Slope degree (°)	坡向 Slope aspect	海拔 Altitude (m)	坡位 Slope location	植被类型 Vegetation types	土壤厚度 Soil depth (cm)	石砾体积含量 Volumetric content of rock fragment (%)	土石混合容重 Bulk density of soil mixed with rock fragments (g/cm ³)
A	7	SE	2155	下 Lower	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	100	17.88	1.20
B	35	NW	2200	中 Middle	红桦 <i>Betula albo-sinensis</i>	120	26.73	1.11
C	35	SW	2200	下 Lower	华山松 <i>P. armandii</i>	120	34.53	1.30
D	10	E	2150	下 Lower	灌丛 Shrub	100	25.04	1.03
E	35	E	2220	下 Lower	白桦 <i>B. platyphylla</i>	100	22.22	1.06
F	31	N	2060	下 Lower	辽东栎、少脉槲 <i>Quercus liaotungensis</i> & <i>Tilia paucicostata</i>	100	15.33	1.15
G	45	SE	2286	上 Upper	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	100	3.73	1.22
H	25	N	2900	上 Upper	亚高山草甸 Subalpine meadow	100	0.64	1.06

2 研究方法

2.1 样品收集

2005 年 7 ~ 9 月,用环刀(直径 7 cm,高 5.2 cm)分层(0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 80 和 80 ~ 100 cm)采集土壤样品,平放并尽量减少颠簸以保持土样的原状。每种植被类型设 3 个样点。

2.2 土壤出流速率的室内测定

将采集的原状土壤样品置于水中 12h 以充分饱和,然后于粗砂上放置 12h,使其达到田间持水量,并在环刀上缘与土壤样品接触部分涂上凡士林,以保证水分不能通过土壤与环刀壁之间的孔隙流出。在土柱上部放置一张滤纸,以防止加入水分时冲刷破坏表层土壤结构,其上连接一个高度 2cm 的铁环以备盛水。土柱下部过滤板的出流孔密度为 5 个 $\cdot\text{cm}^{-2}$ 。用马氏瓶控制水头 2cm,从加水开始计时,当土柱下部有水流出时每隔 5s 收集出流量,直到水流通量达到稳定为止。

2.3 大孔隙半径与密度计算

鉴于目前对大孔隙的认识仍不一致,本文定义土壤大孔隙为介于田间持水量与饱和持水量之间的孔隙^[19];在达到田间持水量以后,土壤的基质势几乎为零,野外自然条件下的土壤水分入渗速率主要受降雨强度的供水控制。由于土壤水分运动的速率较慢,处于层流范围,在假设土壤孔隙为圆形的情况下可利用 Poiseuille 方程建立流量和孔径之间的关系,计算出孔隙的当量孔径,然后根据当量孔径计算出单位面积上的土壤大孔隙密度。具体计算原理与计算方法见 Radulovich 等^[18]和石辉等^[19]的文献,这种方法称为水分穿透曲线法。

2.4 石砾含量测定

将上述试验完成后的土壤烘干,待测定完土壤容重后,分别过 2、4、6、8、10、12、14、16、20、30mm 土壤筛,洗出石砾,将其表面水分凉干,然后用量杯(精度 0.5ml)通过排水法测定不同砾径的石砾体积,并计算其体积含量。

3 结果与分析

3.1 土壤石砾含量特征

本文中石砾指直径大于或等于 2mm 的岩石^[20]。六盘山土壤的石砾含量较高,且存在着很大空间变异。首先,石砾含量随土壤深度而增加,其标准差也基本呈增大趋势,说明变异程度加大(表 2)。其次,不同样地之间存在很大差别(表 1),如 C 样地(华山松林)土壤(0~120 cm 土层)石砾含量最高,其体积含量达 34.53%;H 样地(亚高山草甸)土壤(0~100 cm 土层)石砾含量最低,只有 0.64%;其次 G 样地(华北落叶松)的体积含量仅为 3.73%。所有测定样地的 0~100cm 土层石砾平均含量为 16.02%,标准差为 10.00%。

表 2 不同土壤深度上的石砾含量的空间变异

Table 2 Variability of the volumetric content of rock fragment in different soil depths

土壤深度 Soil depth (cm)	0~10	10~20	20~40	40~60	60~80	80~100
平均 Mean (%)	10.30	10.71	11.99	16.42	20.09	21.11
标准差 Std. Dev. (%)	8.32	7.08	8.83	11.89	11.12	14.81
变异系数 C. V. (%)	80.74	66.09	73.59	72.45	55.33	70.15

分析不同石砾径级的含量(图 1)表明,在各土壤层次上,通常表现为较小粒径半径(2~6mm)的石砾的含量最大,其次为 6~16mm 的石砾,大粒径石砾的含量最小。此外,随土层加深,较小粒径半径(2~6mm)的石砾在总石砾的含量中呈减小趋势。

3.2 土壤大孔隙特征

研究发现(表 3),流域内森林土壤大孔隙半径分布在 0.4~2.3mm 之间,但主要集中于 0.7~1.8mm 范围内;各土层土壤大孔隙的密度加权平均半径变化在 0.57~1.21mm 之间,总的平均值为 0.89mm;土壤大孔隙密度变化在 57~1117 个 $\cdot\text{dm}^{-2}$ 之间,平均为 408 个 $\cdot\text{dm}^{-2}$,变异系数为 66.26%。半径 >1.4mm 的大孔

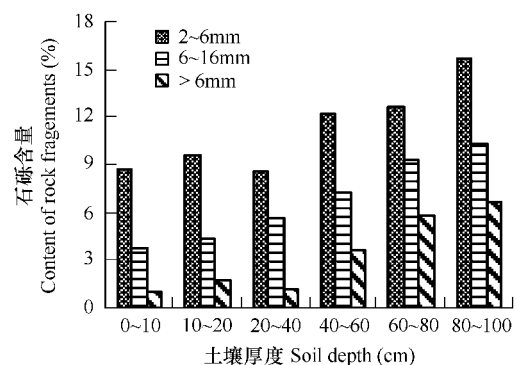


图 1 不同径级砾石体积含量分布特征

Fig. 1 Particle size distribution of rock fragments in different layers of soil

隙密度较小,其密度占总大孔隙密度的 6.86%。土壤断面的大孔隙面积比介于 0.76%~31.26% 之间,平均为 10.82%,标准差为 7.73%,变异系数为 71.41%;相反,半径 <1.4 mm 的大孔隙密度较大^[21]。

表 3 六盘山典型植被类型土壤大孔隙特征

Table 3 Characteristics of soil macropores of typical vegetation in the Liupan Mountains

土壤深度 Soil depths (cm)	指标 Indexes	样地 Plots							
		A	B	C	D	E	F	G	H
0~10	半径范围 Radius range (mm)	0.7~2.3	0.5~1.7	0.5~1.4	0.7~1.8	0.7~2.1	0.7~1.8	0.6~1.8	0.7~1.6
	平均半径 Mean radius (mm)	1.07	1.06	0.83	1.11	1.05	0.93	1.10	1.04
	密度 Density (个·dm ⁻²)	348	637	728	289	512	197	98	143
	大孔隙面积比 Area proportions of macropores(%)	13.73	25.85	17.05	12.10	19.67	5.57	4.23	5.14
10~20	半径范围 Radius range (mm)	0.7~1.9	0.6~1.4	0.5~2.3	0.8~2.1	0.6~1.9	0.6~1.9	0.8~1.0	0.6~0.8
	平均半径 Mean radius (mm)	1.03	1.04	0.77	1.21	0.86	0.96	0.87	0.68
	密度 Density (个·dm ⁻²)	150	619	273	176	133	279	162	275
	大孔隙面积比 Area proportions of macropores(%)	5.57	22.59	5.89	8.99	3.49	9.19	3.76	4.08
20~40	半径范围 Radius range (mm)	0.5~1.7	0.7~2.1	0.7~1.2	0.7~1.4	0.6~1.9	0.5~1.4	0.7~1.5	0.7~1.0
	平均半径 Mean radius (mm)	0.82	0.72	0.87	1.03	0.82	0.81	0.81	0.86
	密度 Density (个·dm ⁻²)	90	262	104	240	576	1118	127	361
	大孔隙面积比 Area proportions of macropores(%)	2.08	18.38	2.51	8.28	13.47	25.43	2.80	8.48
40~60	半径范围 Radius range (mm)	0.7~0.9	0.7~1.3	0.5~2.2	0.7~1.8	0.6~1.0	0.4~2.2	0.5~1.1	0.4~0.8
	平均半径 Mean radius (mm)	0.78	1.00	0.75	1.06	0.81	0.61	0.67	0.57
	密度 Density (个·dm ⁻²)	569	429	856	198	151	698	233	743
	大孔隙面积比 Area proportions of macropores(%)	10.84	14.00	3.70	7.59	3.16	10.34	3.53	8.03
60~80	半径范围 Radius range (mm)	0.6~1.9	0.5~1.9	—	0.7~1.6	0.5~1.1	0.7~1.6	0.6~0.8	0.4~0.7
	平均半径 Mean radius (mm)	0.82	0.83	—	1.00	0.65	1.17	0.66	0.60
	密度 Density (个·dm ⁻²)	302	783	—	663	369	701	57	844
	大孔隙面积比 Area proportions of macropores(%)	7.07	19.32	—	21.76	5.08	31.26	0.76	9.50
80~100	半径范围 Radius range (mm)	0.7~1.7	—	—	0.7~1.7	—	0.5~1.3	—	—
	平均半径 Mean radius (mm)	1.07	—	—	1.09	—	0.83	—	—
	密度 Density (个·dm ⁻²)	535	—	—	227	—	878	—	—
	大孔隙面积比 Area proportions of macropores(%)	19.99	—	—	8.95	—	21.19	—	—

A: 油松 *Pinus tabulaeformis*; B: 红桦 *Betula albo-sinensis*; C: 华山松 *P. armandii*; D: 灌丛 Shrub; E: 白桦 *B. platyphylla*; F: 辽东栎(少脉槲 *Q. liaotungensis* & *T. paucicostata*); G: 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*; H: 亚高山草甸 Subalpine meadow

3.3 不同植被类型样地的土壤水分穿透曲线比较

根据出流速率随时间的变化过程,做出各样地土壤的水分穿透曲线(图 2)。可以看出,大孔隙出流量总体上表现为开始时先增加,至 50 s 左右时出流量逐渐稳定,稳定之前的这部分出流量即为土壤大孔隙的出流量。此外,不同样地之间的水分穿透曲线差异明显。石砾含量很低的样地(亚高山草甸和华北落叶松林)的土壤水分稳定穿透速率均较低,不同土层的稳定穿透速率均在 0.3 ml·s⁻¹ 以下;而石砾含量高的样地土壤稳定穿透速率一般都比较大,如辽东栎-少脉槲、红桦、白桦、油松、华山松、灌丛等。而且,不同土层的稳定穿透速率变异也较大,其中以辽东栎-少脉槲混交林的 60~80 cm 土层(1.93 ml·s⁻¹) 和红桦林的 0~10 cm 土层(2.0 ml·s⁻¹) 最大。同时发现,各样地的土壤穿透速率最大值出现的土层深度不同。

对所有 8 个样地,土壤稳定出流速率随土壤深度增加的变化都基本表现为先减小后增加的趋势,在 40~

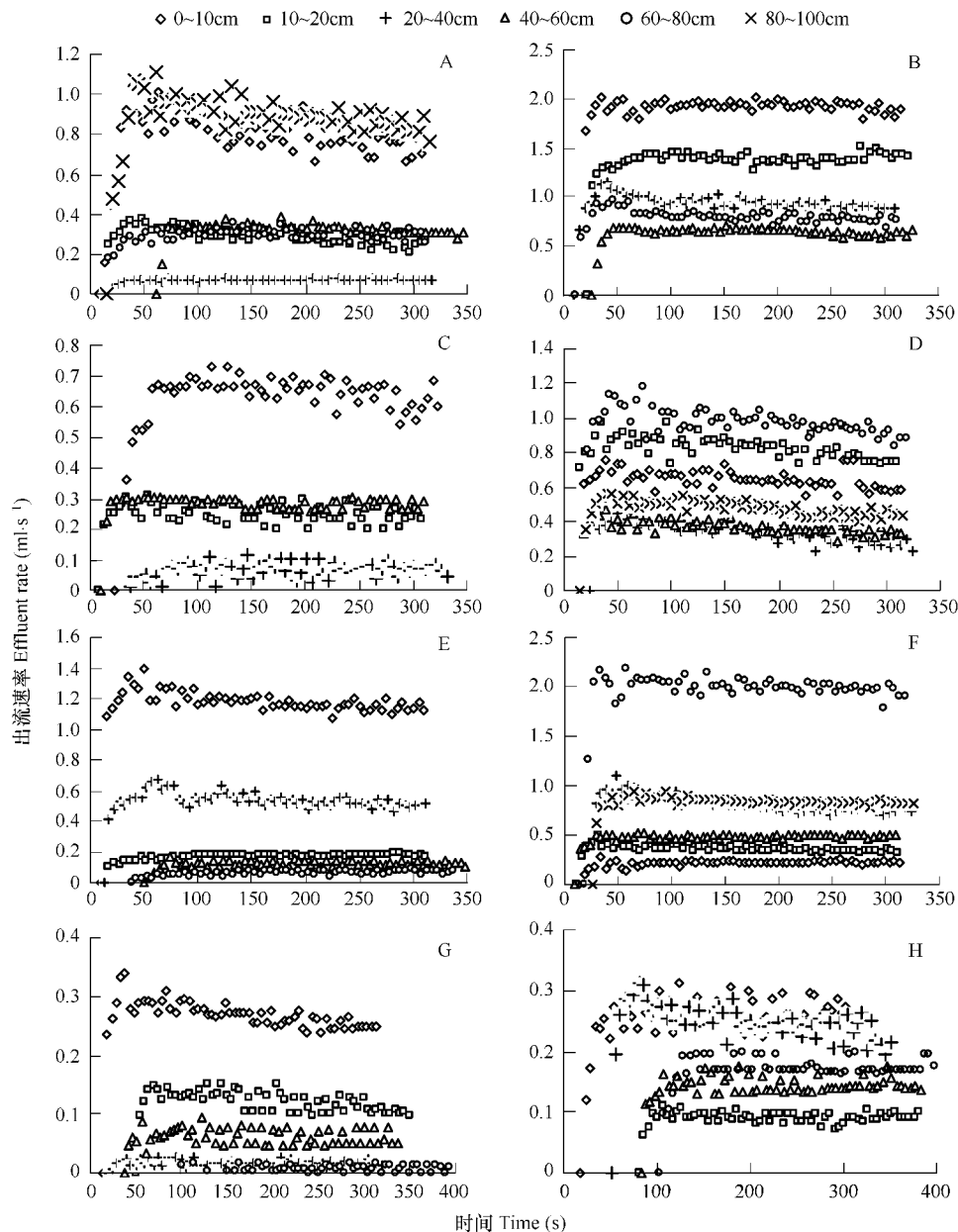


图2 不同植被样地土壤水分穿透曲线

Fig. 2 Soil water breakthrough curves in the different plots

A: 油松 *Pinus tabulaeformis*; B: 红桦 *Betula albo-sinensis*; C: 华山松 *P. armandii*; D: 灌丛 Shrub; E: 白桦 *B. platyphylla*; F: 辽东栎(少脉槲 *Q. liaotungensis* & *T. paucicostata*; G: 华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*; H: 亚高山草甸 Subalpine meadow

60cm 土壤深度时平均稳定出流速率最小,8 个样地平均仅为 $0.31\text{ml}\cdot\text{s}^{-1}$;而 $0\sim 10\text{cm}$ 土壤深度时的平均稳定出流速率最高,平均达 $0.74\text{ml}\cdot\text{s}^{-1}$ (图3)。这表明有很多因素在影响土壤稳定出流速率,开始时从地表向下的减小可能主要受随植物改良土壤作用减弱导致的土壤大孔隙减少影响,其后的增加可能主要受随着土层加深石砾含量增加导致的大孔隙增多影响,是植物改良土壤作用和石砾含量的深度分布共同发挥着影响。

3.4 土壤出流速率与石砾含量的关系

对不同土层中石砾含量影响水分稳定出流速率的分析(图4)表明,所有 60cm 以上土层的水分稳定出流速率与石砾体积分数的关系变化趋势基本上都呈二次抛物线形,表现为稳定出流速率随石砾体积分数提高先增大再减小的趋势,在 $0\sim 10\text{cm}$ 土层,拟合关系的决定系数较低,仅 0.1 左右,而在 $10\sim 20\text{cm}$ 、 $20\sim 40\text{cm}$ 、 $40\sim$

60cm 3 个土层的决定系数相对较高,位于 0.4~0.5 之间。在 60~80cm 土层,稳定出流速率随石砾体积含量提高的变化表现为在石砾含量 15% 以前轻微减小或基本没有变化,但之后快速增大的趋势;在 80~100cm 土层,由于数据点少,未能清楚地看出其变化趋势。

石砾含量对土壤水分运动的影响是复杂的。Cerdà^[22]的研究表明,土壤表面的石砾会延迟地表径流流速,增加入渗量,减小地表径流和土壤流失;Descroix 等^[23]研究认为,在山区坡面土壤中嵌套于土壤内部的石砾导致出现较大的径流与土壤侵蚀速率,而分布于土壤表面的石砾会减小地表径流和土壤侵蚀;而 Brakensiek 等^[24]认为,土壤内的石砾会减小入渗量,而土壤表面的石砾可能增加也可能减小入渗量,并认为较小粒径的石砾减小而较大粒径的石砾增加入渗量。符素华^[25]在综述土壤中石砾对入渗影响时认为,砾石的存在对入渗的影响较为复杂,砾石覆盖/含量与入渗量之间既有正相关关系,也有负相关关系,这与土壤类型、砾石在土壤中的位置以及砾石附近的土壤孔隙类型等都有关系。从本研究结果来看,在 0~60cm 土层,石砾含量 <15% 左右时,水分稳定出流速率随石砾含量增加基本呈增大趋势,即正相关关系;而当石砾含量 >15% 左

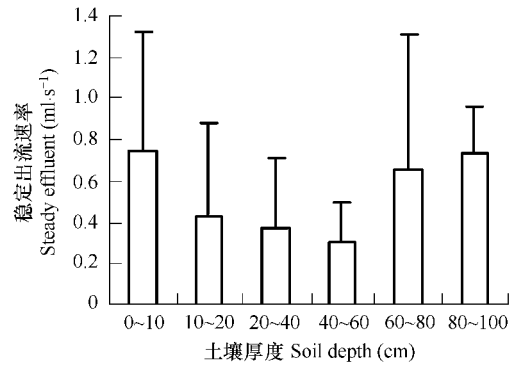


图3 8 个样地不同土壤深度上的平均稳定出流速率差异表现

Fig. 3 Variability of mean steady effluent among 8 investigated plots in the different soil depths

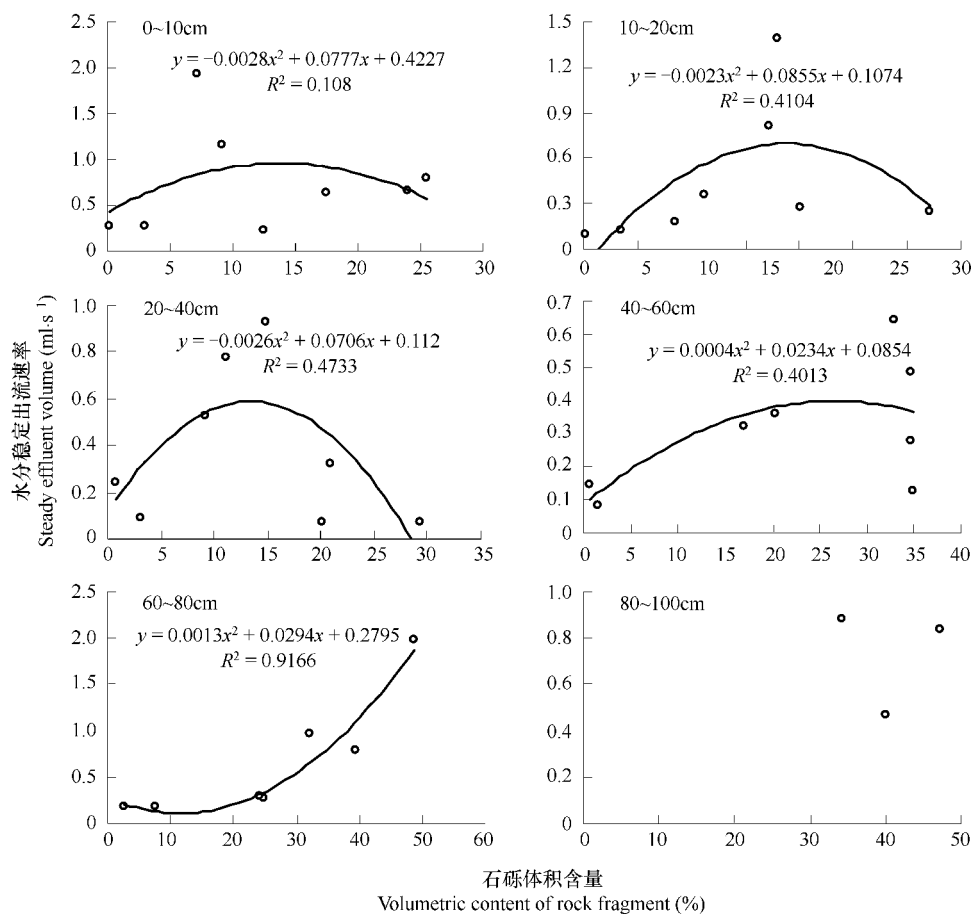


图4 石砾体积含量对水分稳定出流速率的影响

Fig. 4 Effect of volumetric content of rock fragment on the water steady effluent volume

右时,则基本呈减小趋势,即负相关关系;在 60 ~ 80cm 土层的关系则与上面土层完全不同,先轻微减小或基本不变,之后快速增加。总体上这与前人研究结果相一致,但与 Brakensiek 等^[24]关于嵌套于土壤内部的石砾影响渗透的研究结果只是部分地一致,这可能与石砾含量大小有关。石砾对土壤水文过程的影响是复杂的,对其作用机理目前了解还较少,需进一步加强相关研究。

3.5 出流速率与大孔隙特征的关系

3.5.1 半径

在 Poiseuille 公式中,水分通量与孔径的 4 次方呈线性正相关关系,在本研究中也存在这样的关系(图 5),但大孔隙平均半径只能解释稳定出流速率变异的 30% 左右,说明虽然大孔隙半径对稳定出流速率有显著影响($r = 0.549, n = 41, R_{0.01} = 0.254, p = 0.01$),但只是影响因素之一,还有其它多种影响因素。

3.5.2 密度

土壤孔隙体系可分为两种孔隙结构域,即大孔隙域(macropore domain)和基质域(matrix domain),大孔隙域优先流可以通过 Chezy-Poiseuille 方程描述,而基质域水流运动传统上是通过 Darcy 或 Richards 方程描述的^[26~28],即在不同孔隙结构域的水分运动机理是不同的。即使是在大孔隙域,不同孔径的大孔隙的水文影响也不同,以 1.4mm 半径为界限将大孔隙划分为两组^[19],结果发现大于 1.4mm 的孔隙密度虽然较小(平均为 28 个/dm²,占总密度的 6.86%),但却能解释稳定出流速率变异的 67.4% ($r = 0.821, n = 29, R_{0.01} = 0.478, p = 0.01$),说明半径大于 1.4mm 的大孔隙密度对土壤水分运动有十分重要的影响(图 6);而半径小于 1.4mm 的大孔隙尽管占数量比例很大,但对稳定出流速率的影响较小(图 7)。本研究与石辉等^[19]和 Wilson 等^[13]的研究结果基本一致。

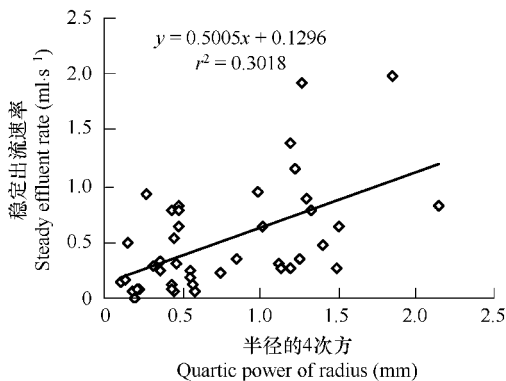


图 5 大孔隙半径对稳定出流速率的影响

Fig. 5 Effect of radius of mean macropores on the steady effluent rate

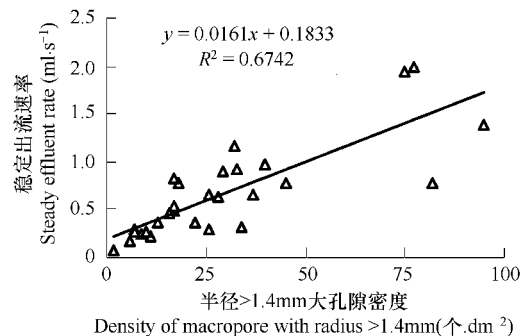


图 6 半径 > 1.4mm 的大孔隙密度对稳定出流速率的影响

Fig. 6 Effect of density of macropores with radii > 1.4mm on the steady effluent rate

3.5.3 面积比

石辉等^[19]在川西岷江流域卧龙自然保护区的研究表明,半径 > 1.4mm 的大孔隙面积占总的大孔隙面积的比例变化在 2.6% ~ 21.22% 之间,并发现稳定出流速率与大孔隙面积比呈幂函数或二次抛物线关系;但在大孔隙面积比增加到一定程度时(20%)出流速率下降,认为这时起决定作用的主要因素可能为大孔隙的联通性。而 Allaire-Leung 等^[29]的研究也证明土壤大孔隙的联通性对水分与溶质运移有着重要影响。本研究发现,稳定出流速率随大孔隙面积比增加呈极显著的线性增加,二者决定系数达 0.8361, ($R = 0.9143, N = 41, R_{0.01} = 0.254, p = 0.01$) (图 8),这与石辉等^[19]的研究结果并不一致,其原因可能是由于六盘山地区的土壤多含石砾,且多呈镶嵌状分布,容易在土壤与石砾之间形成大孔隙,土壤大孔隙间的联通性较好,水流能比较容易地通过。对石砾土壤大孔隙联通性的土壤物理学研究,有待于进一步开展。

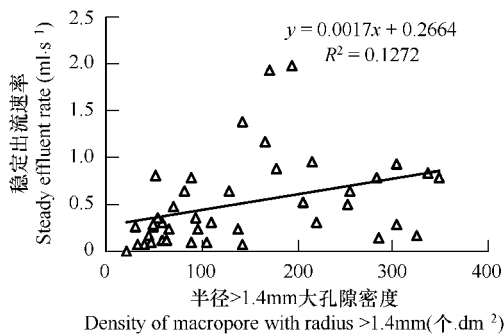


图7 半径<1.4mm的大孔隙密度对稳定出流速率的影响

Fig.7 Effect of the density of macropores with radius < 1.4mm on the steady effluent rate

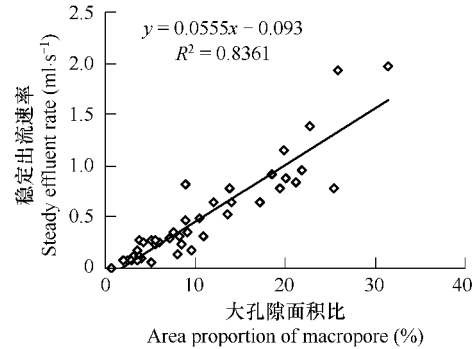


图8 大孔隙面积比对稳定出流速率的影响

Fig.8 Effect of the area proportion of macropores on the steady effluent rate

3.6 石砾含量与土壤大孔隙特征的关系

本研究发现,石砾对土壤大孔隙的半径、密度都有重要影响,不同样地的土壤大孔隙加权平均半径随石砾体积含量增加显著地线性增大($R=0.789, n=8, R_{0.05}=0.707, p=0.05, R>R_{0.05}$)(图9)。

对石砾体积含量影响半径大于1.4mm的大孔隙密度的分析表明,二者也具有显著正相关性($R=0.546, n=27, R_{0.01}=0.487, p=0.01, R>R_{0.01}$)(图10),但图中椭圆形框内的部分数据的石砾含量虽较高,大孔隙数量却不是很大,这可能是由于石砾作用形成的单个大孔隙的体积较大,致使其密度降低。如果剔除这几个数据点,石砾含量与半径大于1.4mm的大孔隙的密度间将表现出更强的相关性。此外发现,石砾含量对大孔隙总密度的影响不大,说明石砾可能主要影响较大半径的大孔隙密度,而对较小半径的大孔隙密度影响较弱。

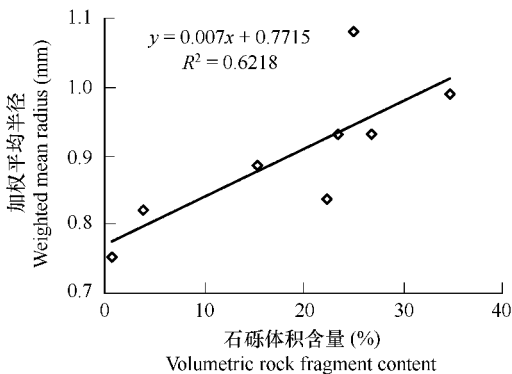


图9 不同样地石砾体积含量对大孔隙半径的影响

Fig.9 Influence of the volumetric rock fragment content upon weighted mean radii of macropores between different plots

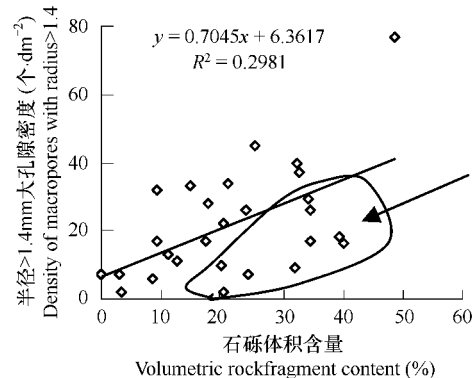


图10 石砾含量对半径大于1.4mm的大孔隙密度的影响

Fig.10 Influence of the volumetric rock fragment content upon the density of macropores with radius > 1.4mm

4 结论和讨论

土壤中的大孔隙对壤中流有重要影响。研究发现水分稳定出流速率随大孔隙的平均半径和密度增大而增加,但半径<1.4mm的大孔隙密度对水分出流速率影响相对较小,而半径>1.4mm的大孔隙密度的影响非常显著,虽然它只占总大孔隙密度的6.86%,却能解释稳定出流速率变异的67%。土壤断面的大孔隙面积比是个综合指标,能够同时反映土壤大孔隙的半径与密度特征,与孔径和密度单个特征相比,它能更好地解释稳定出流速率的变化。

石砾作为山地森林土壤的重要特征和组成部分,对土壤水分运动有重要影响。在0~60cm的土壤深度

范围,水分稳定出流速率随石砾体积分含量的增加先增大再减小;而在 60 ~ 80cm 的土壤层次则基本先减小后增大;所有土层的出流速率变化方式发生转折时对应的土壤体积分石砾含量基本都在 15% 左右,这种现象是否具有普遍性? 其影响机理为何? 都有待进一步研究,但至少可以肯定,石砾含量会通过一定程度地影响土壤大孔隙的密度、半径、断面积和通透性而影响水分运动。如果要获得更加深入的了解,可能需要在未来的研究中注意定量区分石砾的形状、排列方式、分布状态的影响。

石砾对土壤水分运动的影响与植物根系和土壤动物改良土壤增加大孔隙的影响交织在一起,共同构建了土壤水分稳定出流速率沿土壤深度的变化。在作为主根系层的表层和上层土壤(0 ~ 60cm),根系集中分布,石砾含量相对低而稳定,土壤大孔隙的产生更多地受植物改良土壤作用影响,所以土壤出流速率随土壤加深而降低;但在深层土壤(>60 cm),植物改良土壤作用逐渐变弱,而石砾含量明显增加,对出流速率的影响显著加强,表现为土壤出流速率随土层加深而提高。

土壤水分运动的影响因素和机理非常复杂,除本文研究的土壤孔隙特征、石砾含量以外,还受土壤水分含量、生物活动(植物根系、土壤动物)、石砾排列方式、土壤孔隙通透度等的综合影响,但本研究由于技术原因没以考虑进来,在以后的研究中需加强综合研究,把石砾及其它因素的影响分离出来。此外,未来还需要研究石砾对土壤水分入渗、壤中流、蒸发等的影响,为石质山区水土资源保护利用和构建生态水文模型等提供理论基础。

References:

- [1] Germann P F, ed. Rapid and far-reaching hydrologic processes in the vadose zone. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1988, 3: 115 — 382.
- [2] Flury M, Flühler H, Jury W A, *et al.* Susceptibility of soils to preferential flow of water: a field study. *Water Resources Research*, 1994, 30: 1945 — 1954.
- [3] Wang Z, Feyen J, Ritsema C J. Susceptibility and predictability of conditions for preferential flow. *Water Resources Research*, 1998, 34: 2169 — 2182.
- [4] Dekker L W, Ritsema C J, Wendroth O, *et al.* Moisture distributions and wetting rates of soils at experimental fields in the Netherlands, France, Sweden and Germany. *Journal of Hydrology*, 1999, 215: 4 — 22.
- [5] Kluitenberg G J, Horton R. Effect of solute application method on preferential transport of solutes in soil. *Geoderma*, 1990, 46: 283 — 297.
- [6] Cote C M, Bristow K L, Ross P J. Increasing the efficiency of solute leaching: impacts of flow interruption with drainage of preferential flow paths. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 43: 191 — 209.
- [7] Larsson M H, Jarvis N J. Evaluation of a dual-porosity model to predict field-scale solute transport in a macroporous soil. *Journal of Hydrology*, 1999, 215: 153 — 171.
- [8] Beasley R S. Contribution of subsurface flow from the upper slopes of forested watershed to channel flow. *Soil Science Society of America Journal*, 1976, 40: 955 — 957.
- [9] Mosley M P. Subsurface flow velocities through selected forested soils, South Island, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 1982, 55: 65 — 92.
- [10] Harr R D. Water flux in soil and subsoil on a steep forested slope. *Journal of Hydrology*, 1977, 33: 37 — 58.
- [11] De Vries J, Chow T L. Hydrological behavior of a forested mountain soil in Coastal British Columbia. *Water Resources Research*, 1978, 5: 935 — 942.
- [12] Germann P, Edwards W M, Owens L M. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropore. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 237 — 244.
- [13] Wilson G V, Jardine P M, *et al.* Hydrology of a forested hillslope during storm events. *Geoderma*, 1990, 46: 119 — 138.
- [14] 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.
- [15] Bouma J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy*, 1991, 46: 1 — 39.
- [16] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Research*, 1982, 18: 1311 — 1325.
- [17] Liu W, Ou Z Q, Ying P F. Soil macropore and its studying methodology. *Chines Journal of Applied Ecology*, 2001, 12 (6): 465 — 468.
- [18] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves. *Soil Science society of America Journal*, 1989, 53: 556 — 559.
- [19] Shi H, Chen F Q, Liu S R. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River. *Acta*

Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 507—512.

- [20] Miller F T, Guthrie R L. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States. Soil Science Society America Journal Spec. 1984, 13: 1—6.
- [21] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, *et al.* Soil macropore characteristics under typical vegetations in Liupan Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2675—2680.
- [22] Cerdà A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. European Journal of Soil Science, 2001, 52: 59—68.
- [23] Descroix L, Viramontes D, Vauclin M. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). Catena, 2001, 43: 115—135.
- [24] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration. Catena, 1994, 23: 99—110.
- [25] Fu S H. Effect of soil containing rock fragments on infiltration. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19: 171—175.
- [26] Chen C, Wagenet R J. Simulation of water and chemicals in macropore soils. Part I. Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil water flow. Journal of Hydrology, 1992, 130: 105—126.
- [27] Chen C, Wagenet R J. Simulation of water and chemicals in macropore soils. Part II. Representation of the equivalent macropore influence and its effect on soil water flow. Journal of Hydrology, 1992, 130: 127—149.
- [28] Roberto G. Preferential flow in macroporous swelling soil with internal catchment: model development and applications. Journal of hydrology, 2002, 269: 150—168.
- [29] Allaire-Leung S E, Gupta S C, Moncrief J F. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics 1. Macropore continuity. Journal of Contaminant Hydrology, 2000, 41: 283—301.

参考文献:

- [17] 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.
- [19] 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出流速率的影响. 生态学报, 2005, 25(3): 507~512.
- [21] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 等. 六盘山典型植被下土壤大孔隙特征. 应用生态学报, 2007, 18(2): 2675~2680.
- [25] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展. 水土保持学报, 2005, 19(1): 171~175.