

六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响

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

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 中国环境科学研究院生态研究所, 北京 100012)

摘要: 为了解山地土壤中的砾石对土壤水文循环的影响, 测定了砾石土壤的贮水能力、渗透速率和蒸发速率。结果表明, 砾石含量与土壤有效贮水量呈正相关关系, 但与土壤最大贮水量无明显相关。在 0~40cm 土层, 当砾石体积含量小于 15%~20% 时, 稳渗速率随砾石含量增加而增大, 当砾石体积含量大于 15%~20% 时, 土壤稳渗速率随砾石含量增加而减小; 在 40cm 以下土层, 稳渗速率随砾石含量增加而提高。在土壤砾石含量为 0~20% 时, 土壤蒸发速率随砾石含量增加而降低, 但在砾石含量超过 20% 时, 土壤蒸发速率基本保持稳定。土壤蒸发速率随砾石粒径增大有升高的趋势。

关键词: 砾石; 土壤渗透; 土壤蒸发; 森林水文; 六盘山

文章编号: 1000-0933(2008)12-6090-09 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in the Liupan Mountains, China

SHI Zhong-Jie^{1,2}, WANG Yan-Hui^{1,*}, YU Peng-Tao¹, XU Li-Hong¹, XIONG Wei¹, GUO Hao¹

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

2 Research Institute of Ecology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6090~6098.

Abstract: The water-retaining capacity, percolation and evaporation of stony soil in the Liupan Mountains were observed in order to understand the effect of rock fragments on soil hydrological processes. The results indicated that the effective water-retaining capacity of soil is positively related with its volumetric content of rock fragments, but there is no relation between the saturated water-retaining capacity and rock fragment content. For the soil layers within 0—40cm, the steady-infiltration rate increases with increasing volumetric content of rock fragments until it reaches the range of 15%—20%, then it decreases with when the rock fragment content further increases. For the soil layers below 40cm, the steady-infiltration rate

基金项目: 国家重点基础研究资助项目(2002CB111501); 国家自然科学基金重点资助项目(40730631); 国家科技部“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD03A1803); 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联合资助

收稿日期: 2007-08-10; **修订日期:** 2008-04-09

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: 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, 贵州大学林学院的王轶浩, 沈阳农业大学的张雷燕在野外及室内分析中给予大力帮助, 特此致谢。

Foundation item: The project was financially supported by National Basic Research Priorities Program of China (No. 2002CB111501), the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 40730631), 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 (No. 2004DIB3J102) and the project of Introducing International Advanced Technology of the State Forestry Ministry (No. 2003-4-43) and the Forest Ecology and Environment Key Laboratory of the State Forestry Ministry

Received date: 2007-08-10; **Accepted date:** 2008-04-09

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

always increases increasing rock fragment content. The soil evaporation rate decreases with increasing volumetric rock fragment content when it varies in the range of 0% to 20%, however, the soil evaporation rate keeps basically stable, when the rock fragment content is higher than 20%. The soil evaporation rate shows a tendency of rising with increasing size of rock fragments.

Key Words: rock fragments; Infiltration; soil evaporation; forest hydrology; Liupan Mountains

土壤中的砾石是指粒径大于等于 2mm 的矿物颗粒^[1]。土壤中常存在大量砾石,它们不仅对土壤物理特性如土壤容重、孔隙度和含水量等产生重要影响,并且也影响着土壤的渗透、蒸发、径流等水文过程^[2~9]。符素华^[10]综述了土壤砾石对入渗的影响,表明影响较为复杂,砾石含量与入渗量之间既有正相关性,也有负相关性。Cerdà^[8]通过野外试验表明,砾石会增加土壤稳定入渗率,延迟地表积水和径流发生。Wilcox 等^[11]认为入渗量与砾石含量之间通常为正相关关系,并认为砾石存在可减少降雨直接打击土壤和避免形成地表结皮。此外土壤渗透性与砾石存在的位置和方式也有较大关系,如果砾石自由分布在土壤表面,能阻止土壤表面结皮并增加土壤入渗;若砾石镶嵌于土壤中,则有利于结皮并可能会阻止水分入渗^[12]。土壤砾石对蒸发也有重要影响,Kosmas 等^[13]比较了干旱年份有无砾石土壤的作物产量,表明砾石可降低土壤蒸发量。吕国安等^[14]研究认为增加土壤砾石含量能降低土壤水分蒸发损失,陈士辉等^[15]的研究表明,不同粒径的砾石覆盖能有效减少砂田土壤蒸发。因此,土壤的砾石对水文过程有重要影响,是森林水文过程研究中的关键问题之一。

我国的森林多集中分布在石质山地,因此山区森林土壤常具有很高的砾石含量,这必将对森林水文过程产生重要影响。然而,在过去的森林水文研究中很少重视这个问题,以至于它成为一个限制深入认识山地森林水文作用形成过程与机理的关键。

位于宁夏南部的六盘山是泾河等多条河流的源头,在黄土高原的水资源供给中具有重要作用。六盘山的岩石多是松散易碎的页岩等沉积岩,砾石含量高是其土壤的一个重要特征。本文在此研究了砾石对山地森林土壤的贮水性能、渗透性及蒸发的影响,探索了砾石在森林水文循环过程中的作用,试图为建立基于过程的森林流域分布式生态水文模型和土壤侵蚀模型提供一定的理论基础,为石质山区水资源管理和水源涵养型森林植被建设提供一定的指导依据。

1 研究区及样地概况

研究地点位于宁夏回族自治区南部的六盘山自然保护区,该区处在黄土高原的中西部,是暖温带半湿润区向半干旱区的过渡带。具体研究是在香水河小流域进行的,该小流域介于东经 106°09' ~ 106°30' 和北纬 35°15' ~ 35°41' 之间,海拔高度变化在 2060 ~ 2931m,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 591.6mm,多集中于 6 ~ 9 月份。香水河小流域内的植被保存相对完好,垂直带谱明显,主要以天然次生林如山杨(*Populus davidiana*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、华山松(*Pinus armandii*)为主,并有较多的华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)的人工林;在山体阳坡分布着大量灌丛;在 2700m 以上高海拔区则分布着亚高山草甸群落。流域内土壤以灰褐土为主,此外还分布着一定面积的亚高山草甸土。成土母质为沙质泥岩、页岩、灰岩风化的残积物和坡积物,土壤中砾石较多。

土壤中砾石径级多介于 2 ~ 30mm,主要集中分布于 2 ~ 10mm 之间;不同径级砾石的形状也有较大差异,通常粒径较小的砾石多呈圆粒或多面体状,而粒径较大的砾石多为长条形、板状或多面体形等;砾石在土壤中的分布呈随机状态,但在一些个别地区也有集聚分布,例如悬崖附近土壤中的砾石含量明显偏高。

本研究设置了 13 个样地,其中天然林样地 6 个、人工林样地 3 个、灌丛样地 3 个、亚高山草甸样地 1 个。各样地的具体特征见表 1。

表 1 不同样地的土壤及植被特征

Table 1 Basic characteristic of the vegetation and soil in the different plots

样地 Plots	坡度 Slope grade (°)	坡向 Slope aspect	海拔 Altitude (m)	坡位 Slope position	优势种 Dominant species	土层深度 Soil depth (cm)	砾石体积 含量 Volumetric content of rock fragment (%)	土石混合容重 Bulk density of soil with rock fragment (g/cm ³)
A	7	SE	2155	下 Lower	油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	100	23.37	1.20
B	35	NW	2200	中 Middle	红桦 <i>Betula albo-sinensis</i>	120	27.89	1.11
C	35	SW	2200	下 Lower	华山松 <i>P. armandii</i>	120	36.92	1.30
D	10	E	2150	下 Lower	华西四蕊槭 <i>Acer tetramerum Pax</i> , 石枣子, <i>Euonymus sanguineus</i> Loes	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</i> <i>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 <i>Subalpine meadow</i>	120	0.64	1.06
I	34	E	2080	下 Lower	辽东栎 <i>Quercus liaotungensis</i>	120	23.76	1.07
J	32	SE	2180	中下 Mid-lower	华北落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	120	21.60	1.18
K	35	NE	2120	下 Lower	山杨 <i>Populus davidiana</i>	120	11.42	1.03
L	33	S	2160	下 Lower	暴马丁香 <i>Syringa amurensis</i>	120	33.32	1.31
M	32	SE	2230	中 Middle	李 <i>Prunus</i> spp.	80	14.11	1.13

2 研究方法

2.1 土壤的水分物理性质测定

在各个样地的典型地点挖取土壤剖面,用内壁上均匀涂有少量凡士林的容积为 200cm³ (直径 7cm,高 5.2 cm)的环刀,按 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100、100~120 cm 的深度层次,分别采集 3 个土壤样品带回室内进行分析。土壤渗透性、持水能力和容重通过环刀法进行^[16],首先利用土壤环刀样品测定土壤的持水能力,再测定土壤的渗透性,然后测定土壤容重,待测定完土壤容重后,将环刀内的土壤过 2mm 土壤筛,然后用清水洗净砾石表面的土壤颗粒,再将其表面水分凉干后用量杯(精度 0.5ml)通过排水法测定砾石体积,用以计算土壤砾石的体积含量,最后烘干测定砾石的重量。

2.2 砾石影响土壤蒸发的测定

利用 2mm 的土壤筛,从辽东栎-少脉槲样地(F 样地)筛取精细土壤,并按粒径 2~6mm、6~10mm 和 >10mm 筛取砾石,然后按照表 2 的体积比例和粒径组成混入筛过的土壤后装填于蒸渗仪(内径 20cm,高 30cm)内。各蒸渗仪内土壤的砾石体积含量及粒径组成见表 2。

为了避免蒸渗仪内的土壤遭受雨滴击溅而损失,装填土壤要距离蒸渗仪的上缘至少 5cm。装填砾石的体积是通过排水法量取的。为了使装填土壤的容重尽量接近自然容重,需要将称重的湿土依土壤含水量计算成干土重后填装,并人工适当压实。蒸渗仪在填装土壤后被放置在西峡林场场部的空旷地,经历 3~4 场自然降雨使其内部土壤结构更加接近自然土壤。然后定期称重测定土壤蒸发过程,雨后若有下渗雨量则及时量取,通过水量平衡法计算获得土壤水分蒸发速率。

表 2 各蒸渗仪内填装土壤的砾石含量和粒径大小组成

Table 2 Composing characteristic of soil and gravel in the lysimeters

蒸渗仪编号 No. of lysimeters	a	b	c	d	e	f	g
砾石含量 Volumetric content of rock fragments(%)	0	5	5	5	5	10	10
径级 Diameter classes of rock fragments(mm)	—	2 ~ 6	6 ~ 10	> 10	混合 Mixed	2 ~ 6	6 ~ 10
容重 Bulk density(g cm ⁻³)	0. 89	0. 91	0. 91	0. 91	0. 91	1. 01	1. 01
蒸渗仪编号 No. of lysimeters	i	j	k	l	m	n	o
砾石含量 Volumetric content of rock fragments(%)	10	20	20	20	20	40	40
径级 Diameter classes of rock fragments(mm)	混合 Mixed	2 ~ 6	6 ~ 10	> 10	混合 Mixed	2 ~ 6	6 ~ 10
容重 Bulk density(g cm ⁻³)	1. 02	1. 13	1. 14	1. 14	1. 14	1. 28	1. 39

3 结果与分析

3.1 砾石的空间变异及其分布特征

六盘山土壤中砾石含量较高,且存在着较大空间变异。首先,砾石含量随土壤深度增加而增加,其标准差也呈增加趋势(表 3)。其次,不同样地之间差别较大,如华山松林(样地 C)土壤的砾石含量最高,其 0 ~ 120 cm 土层的砾石体积含量达 36. 92%;亚高山草甸(样地 H)的土壤砾石含量最低,0 ~ 120 cm 土层的砾石含量只有 0. 64%;华北落叶松(样地 G)的砾石体积含量也仅为 3. 73%。所有测定样地 0 ~ 120cm 土层的平均砾石含量为 20. 00%,标准差为 10. 53%。砾石的空间分布受立地条件的影响也较大,本研究中,位于上坡的砾石含量最低,平均为 2. 19%,中坡的平均为 21. 2%,下坡的含量最高,平均为 23. 92%。

对土壤所含砾石的径级分析表明(图 1),大径级砾石的含量随土壤深度增加呈增加趋势;在各土壤层次上,通常表现为较小半径(2 ~ 6 mm)的砾石含量最大,其次为 6 ~ 16mm 的砾石,大半径砾石的含量最小。

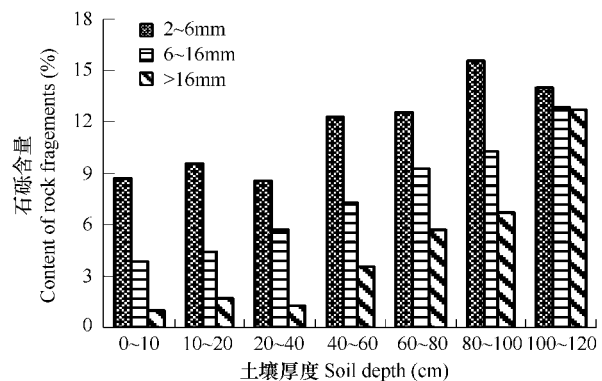


图 1 不同大小砾石含量随土壤深度的分布特征

Fig. 1 Particle diameter distribution of rock fragments in different soil depths, A1 ~ A7 in the abscissa denote the soil depths of 0 ~ 10, 10 ~ 20, 20 ~ 40, 40 ~ 60, 60 ~ 80, 80 ~ 100, 100 ~ 120cm, respectively. A1, 0 ~ 10; A2, 10 ~ 20; A3, 20 ~ 40; A4, 40 ~ 60; A5, 60 ~ 80; A6, 80 ~ 100; A7, 100 ~ 120cm

表 3 不同土壤深度上的砾石含量的空间变异

Table 3 Variance of the volumetric content of rock fragment in different soil depths

项目 Item	土壤深度 Soil depth (cm)						
	0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	100 ~ 120
平均 Mean(%)	13. 97	14. 50	15. 94	19. 74	22. 43	25. 51	27. 88
标准差 Std. Dev. (%)	8. 66	9. 03	10. 17	11. 35	10. 34	14. 27	15. 16
变异系数 C. V. (%)	61. 98	62. 26	63. 80	57. 49	46. 09	55. 93	54. 37

3.2 土壤贮水能力及其与砾石含量的关系

土壤贮水能力是评价不同群落所在生态系统的水源涵养及水分循环调节能力的一个重要指标,根据吸持和调节水分能力的不同,可分为最大贮水能力和有效贮水能力。最大贮水能力指土壤中的全部孔隙都充满水分时的贮水量;而有效贮水能力则指土壤中的非毛管孔隙中所能填充的水分贮量,它反映了土壤的持水能力。

土壤贮水能力的计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n (10000 \times h_i \times p_i)$$

式中, S 为土壤的贮水能力 (t/hm^2); h_i 为第 i 层土壤的厚度 (m); p_i 为第 i 层土壤的总孔隙度 (对应土壤最大贮水能力) 或非毛管孔隙度 (对应土壤有效贮水能力) (%), n 为土壤层次。

表 4 为不同植被类型样地 0 ~ 100 cm 土壤的贮水能力。结果表明, 各植被类型典型样地 0 ~ 100 cm 土层的土壤最大贮水能力变化在 486.5 mm ~ 604.8 mm 之间。就不同植被类型来看, 最大贮水能力 (mm) 表现为亚高山草甸 (582.7) > 灌丛 (564) > 天然林 (553.7) > 人工林 (513.1)。各植被类型典型样地 0 ~ 100 cm 土层的有效贮水能力介于 61.0 ~ 292.1 mm 之间。就不同植被类型来看, 有效贮水能力 (mm) 表现为灌丛 (245.6) > 天然林 (184.7) > 人工林 (126.2) > 亚高山草甸 (85.2)。不论是土壤的最大贮水能力还是有效贮水能力, 其顺序看来并不完全是主要由植被类型决定的, 与平常所说的森林土壤好于灌丛和草地土壤并不一致, 说明还有其它因素在起作用。

研究表明, 砾石含量对土壤非毛管孔隙度具有增大效应^[17]。本流域土壤砾石含量高, 它作为非生物因素可能使土壤中的非毛管孔隙度增加, 从而使土壤有效贮水能力增强。砾石含量对有效贮水能力有较大影响, 但对最大贮水能力影响很小, 几乎无相关性。对各植被类型典型样地土壤 0 ~ 100 cm 土层的有效贮水能力与砾石体积分含量的回归分析表明 (图 2), 砾石含量是决定土壤有效贮水能力的关键因素之一, 其决定系数达 0.6194。

表 4 主要植被类型典型样地土壤 0 ~ 100 cm 土层的贮水能力

Table 4 Water-retaining capacity of soil layer of 0 ~ 100 cm for the different vegetation

样地号 No. of plots	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
最大贮水能力 Saturated water-retaining capacity (mm)	530.2	540.9	506.3	604.8	558.3	559.4	486.5	582.7	573.1	522.7	584.0	521.9	567.0
有效贮水能力 Effective water-retaining capacity (mm)	109.3	160.9	292.1	260.2	159.6	127.2	61.0	85.2	205.5	208.3	162.6	265.7	210.8

3.3 土壤渗透特征及其与砾石体积分含量的关系

图 3 以辽东栎样地为例说明了土壤的渗透速率变化过程, 在渗透初期渗透速率变化剧烈, 迅速下降, 然后逐渐趋于平缓, 最后达到稳定状态。一般来说, 表层或较上层土壤的渗透速率变化较剧烈, 而较深层次的土壤渗透速率变化较平缓, 且达到稳渗速率的时间相对也较短。但由于流域内的土壤异质性较大, 不同植被类型典型样地的土壤渗透速率在不同土层深度的变化也较大。

相对于初渗速率而言, 稳渗速率不受土壤含水量和土壤孔隙吸水的影响, 更能反映土壤大孔隙的影响。对 13 个典型样地不同土壤深度时的稳渗速率研究表明 (图 4), 从土壤表层至 60 ~ 80 cm 土壤层, 其稳渗速率随土壤深度增加呈减小趋势, 但在 60 ~ 80 cm 土壤层以下稳渗速率有一定程度的增加。

土壤表层的渗透速率更多地反映和决定着土壤的下渗能力, 也是能否产生地表径流的决定性条件。从不同植被类型来看, 表层土壤稳渗速率以灌丛土壤最大, 平均达 10.19 mm/min, 天然林土壤次之, 平均为 10.15 mm/min, 人工林土壤平均为 6.80 mm/min, 亚高山草甸土壤的稳渗透速率最小, 仅为 2.71 mm/min, 此顺序与各个样地的土壤有效贮水能力相一致。

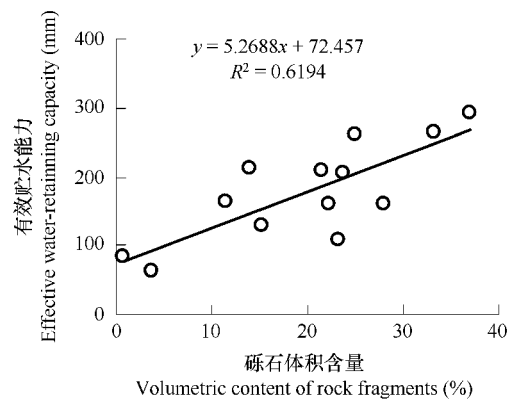


图 2 砾石体积分含量对 0 ~ 100 cm 土层的有效贮水能力的影响

Fig. 2 Effect of the volumetric rock fragments content on the soil effective water-retaining capacity of 0 ~ 100 cm depths

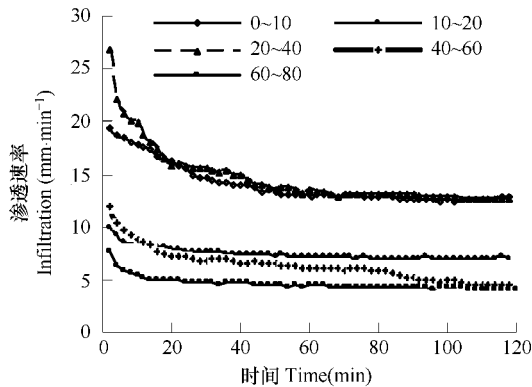


图3 渗透速率随时间的变化-以辽东栎为例

Fig. 3 Change of infiltration rate with time- e. g. *Quercus liaotungensis*

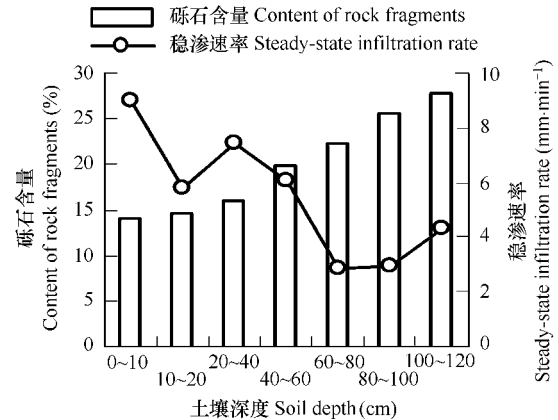


图4 稳渗速率和砾石含量随土壤深度的变化

Fig. 4 Change of infiltration rate and content of rock fragments with soil depth

土壤渗透性受许多因素的共同影响,对于六盘山石质土壤来说,砾石是影响渗透的重要因素之一。图5分析了砾石体积含量对土壤稳渗速率的影响,结果表明,在0~10cm、10~20cm、20~40cm 土层,土壤砾石体积含量与稳渗速率呈抛物线形变化,即当砾石体积含量小于15%~20%时,稳渗速率具有随砾石含量增加而增加的趋势;当砾石体积含量大于15%~20%时,土壤稳渗速率呈随砾石含量增加而减小趋势。在40cm以下的土壤深度(40~60cm、60~80cm、80~100cm、100~120cm),土壤砾石体积含量与稳渗速率呈指数函数关系,砾石含量增加导致稳渗速率增大。

3.4 砾石对土壤蒸发的影响

研究表明(图6),砾石含量对土壤蒸发有重要影响,首先,土壤蒸发量随土壤砾石含量在一定范围内(0~20%)的增加而降低,但当砾石含量超过20%时,砾石含量对土壤蒸发的抑制作用很快变弱或基本保持稳定,土壤日平均蒸发量变化很小。

分析其原因,认为当土壤中不含有砾石时,土壤中的孔隙以毛管孔隙为主,土壤中存贮的水可通过毛管孔隙上升到地表用于蒸发。随砾石含量增大,土壤中的非毛管孔隙度增大,毛管间的联通性也下降,土壤存贮的水有一部分不能随毛管上升,或者上升困难,所以日蒸发量就渐渐变小。但在土壤砾石体积含量达到20%以上时,可能由于砾石在土体中的排列方式、砾石占据土壤断面比例、毛管的联通性、砾石对表面土壤的遮盖作用的综合影响,使土壤水分蒸发速率维持在一个低而稳定的水平,表现为20%或40%的砾石含量对土壤水分蒸发速率的抑制作用没有显著差别。

另外,砾石的粒径大小对土壤蒸发也有一定影响,图7表明,在砾石含量较低时(如5%),土壤日均蒸发量有随砾石粒径增大而升高的趋势,可能原因是在相同砾石含量条件下较大的砾石导致了砾石块数减少从而使毛管的联通性提高。在砾石含量为10%时,土壤日均蒸发量也表现为随砾石径级增大而增加。在砾石含量为20%和40%时,砾石大小的影响也基本如此,但可能由于难以控制的砾石排列方式的影响,规律性相对变差了一些。在砾石含量为10%尤其是20%的处理中,按照1:1:1的体积比例混合填装3种粒径砾石的处理的土壤日均蒸发量比其他单一粒径处理的显著减小,其原因仍然可能是砾石排列方式改变的某种作用,有待深入研究。但是,砾石含量5%时的混合填装处理反而稍微提高了土壤蒸发量,说明在砾石含量较低的范围混合砾石粒径的影响不大。

4 讨论

4.1 砾石与土壤渗透

土壤渗透是一个非常复杂的过程,除很多土壤物理性质以外,它还受到土壤中砾石存在的影响。Cousin等^[18]研究表明,含砾石土壤的渗透速率均比无砾石土壤的要高。Cerdà^[8]通过野外试验研究表明,砾石会增

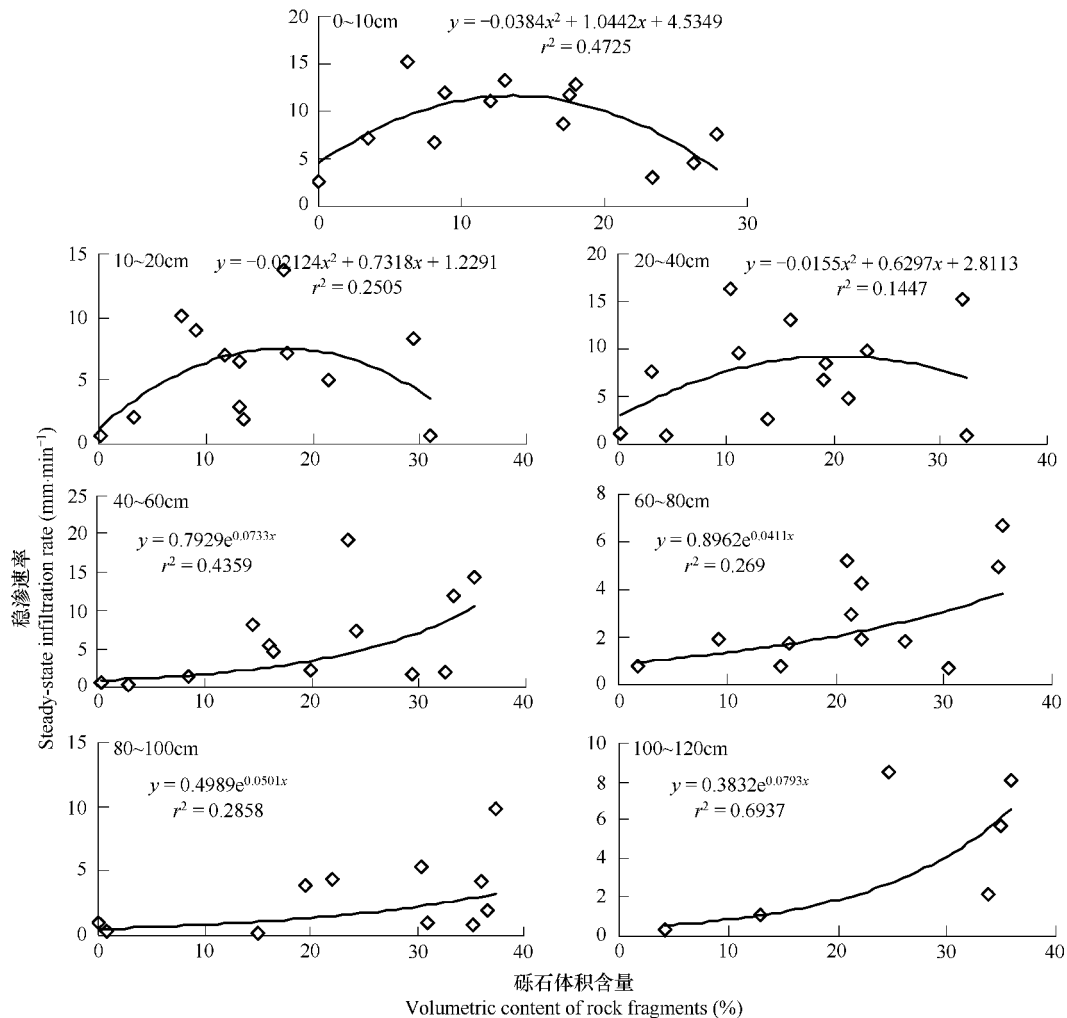


图5 不同土壤深度的砾石体积含量对稳渗速率的影响

Fig. 5 Effect of volumetric content of rock fragments on the steady-state infiltration rate for different soil depth

加土壤水分的渗透量;但 Abrahams 等^[19]通过人工降雨试验发现,土壤渗透速率与砾石的覆盖度呈负相关关系。这些说明,土壤的砾石含量即可增加渗透速率,也可降低渗透速率^[6,10],本研究也表明,在 0~40cm 土层,砾石含量较小时可增大土壤渗透速率,砾石含量较大时会减小土壤渗透速率,而在 40cm 以下的各土层,砾石含量增加可增大土壤渗透速率,这说明砾石对土壤渗透速率的影响很复杂。

砾石影响土壤渗透性的因素很多,如砾石的覆盖度、含量、在土壤中的位置、大小和形状等^[6]。Valentin 等^[3]发现,砾石土/砾质土的渗透性随小砾石增多而增加。本研究发现,随土层深度增加,大粒径砾石含量增加有使土壤渗透速率减少的趋势,这与 Valentin 等^[3]的研究结果基本相似。砾石排列方式对土壤渗透也有重要影响,本区的砾石多为板状或多面体状,它们在土壤中的排列方式是决定渗透速率的重要因素之一,如果砾石平铺于细土中,可能会阻挡土壤水分渗透,如竖立于细土中有可能加速土壤水分渗透。但本研究中并未考虑砾石排列方式的影响,因此还无法量化其影响,有待加强研究。

Rawls 等^[20]对具有较大砾石覆盖的样地周围和其下的生物活性观测表明,砾石是影响土壤大孔隙度的因素之一。Eriksson 等^[21]则进一步指出,砾石能通过影响土壤基质中的大孔隙进而影响其水文特性。杨忠等^[22]研究指出,石质山地的非毛管孔隙度高,通透性较好,是土壤饱和和渗透系数高的主要原因。Valentin 等^[3]还发现镶嵌在土壤中的砾石盖度与泡状孔隙度 (visicular porosity) 存在正相关性,自由分布的砾石盖度与之呈负相关关系。研究发现^[17],本地区土壤中的砾石与细土颗粒混合分布,可能形成大量结构性孔隙,砾石体

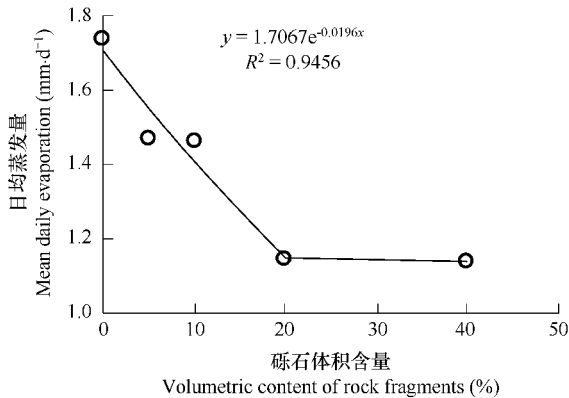


图6 砾石体积含量对土壤蒸发的影响,图中公式为砾石含量0~20%范围时的关系式

Fig.6 Effect of the soil mean daily evaporation on the volumetric content of rock fragments, the equation in the figure is the formula that the volumetric content of rock fragment ranges from 0 to 20%

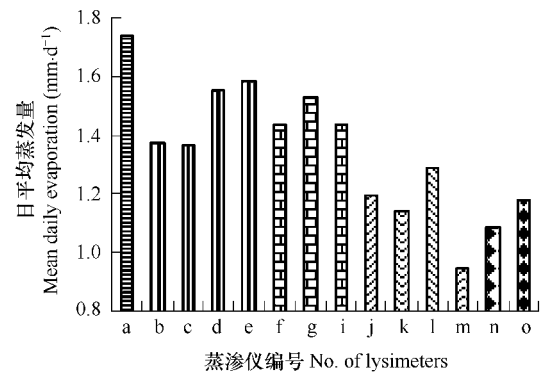


图7 砾石径级对土壤蒸发的影响,图中a为对照,b~e的砾石含量为5%,f~i的为10%,j~k的为15%,n和o的为20%

Fig.7 Effect of the soil mean daily evaporation on the diameter class of rock fragments, the content of rock fragments in different lysimeters follows as: a, 0%; b~e, 5%; f~i, 10%; j~k, 15%; n and o, 20%

积含量增加导致土壤大孔隙平均半径增大,特别是半径大于1.4mm的大孔隙密度增加,此外还会使大孔隙体积呈增大趋势,且砾石对大孔隙度的影响随土层加深呈增强趋势。这说明砾石对土壤渗透速率的影响在一定程度上可能是通过影响土壤孔隙的大小和数量发挥作用的。当然,砾石的存在对土壤孔隙的联通性也产生重要影响,有待于进一步研究。

4.2 砾石与土壤蒸发

Pérez^[5]认为砾石改变了土壤表面的蒸发条件,从而影响着土壤水分特性。Kemper等^[23]发现表面覆盖5cm大小砾石的土壤的年蒸发量减少85%。陈士辉等^[15]认为覆盖砂砾石能有效减少土壤蒸发,未覆盖砂砾石的土壤蒸发量占总蒸散的40.7%,而覆盖砂砾石的仅占总蒸散的17.8%~25%。本研究中,砾石含量为5%、10%、20%和40%的砾质土壤的蒸发速率分别比细土土壤减少了15.33%、15.65%、34.09%和34.61%,本研究结果较前面研究结果要小,这可能是砾石在土壤中的位置不同的缘故。

已有研究表明^[9],土壤蒸发要经过3个阶段:表土蒸发强度保持稳定的阶段(土壤水分供给充足,蒸发强度主要受外界条件控制)、表土蒸发强度随含水率变化的阶段(蒸发强度随表土含水率降低而递减)、水汽扩散的阶段(蒸发强度由土层内水汽扩散的能力和干土层厚度所控制)。与没有砾石的土壤相比,砾质/砾石土壤有较多大孔隙和较少毛管孔隙、较高的饱和导水率和土壤温度,砾石土的高导水率和小水库容积又有利于土壤水分的排泄,这就可能缩短稳定蒸发阶段,使土壤水分含量迅速降低,其蒸发速率也迅速降低。从本研究看,土壤砾石含量越大,土壤有效贮水量就越小,土壤大孔隙越多,毛管孔隙度越少,导致土壤蒸发速率越小,但这个减少是有一定限度的,当砾石含量高到一定程度后,继续增加土壤砾石含量,它对蒸发速率的影响将不大。

砾石大小也影响土壤蒸发速率,陈士辉等^[15]研究发现,粒径2~5mm砾石覆盖的土壤蒸散量显著低于5~20mm和20~60mm砾石覆盖的土壤,但与不覆砂的对照没有显著差异,本研究结果与此基本相似。

5 结论

(1) 六盘山土壤中的砾石含量较高,平均砾石含量为20.00%,土壤砾石含量随土壤深度增加而增大,砾石中以直径2~6mm的最多,大粒径的砾石含量随土壤深度增加而提高。

(2) 六盘山香水河小流域主要植被类型0~100cm土层的土壤有效贮水量介于61.0~292.1mm之间,土壤有效贮水量与砾石含量呈正相关关系,而与土壤最大贮水量无明显相关。

(3) 砾石含量对土壤渗透速率影响较大。在0~40cm土层,当砾石体积含量小于15%~20%时,稳渗速

率随砾石含量增加而增加;当砾石体积含量大于 15% ~ 20% 时,土壤稳渗速率随砾石含量增加而减小。在 40cm 以下土层,稳渗速率随砾石含量增加而增加。

(4) 在砾石体积含量 0 ~ 20% 范围内,土壤蒸发速率随砾石含量增加而降低,但在砾石体积含量超过 20% 时,土壤蒸发率基本保持稳定。土壤蒸发速率有随砾石径级增大而升高的趋势,但影响相对不很明显。

References:

- [1] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: significance and processes. *Catena*, 1994, 23: 1 — 28.
- [2] Torri D, Poesen J, Monaci F, *et al.* Rock fragment content and fine soil bulk density. *Catena*, 1994, 23: 65 — 71.
- [3] Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragment covers in West Africa. *Catena*, 1994, 23: 87 — 97.
- [4] Ingelmo F, Cuadrado S, Ibañez A, *et al.* Hydric properties of some Spanish soils in relation to their rock fragment content: implications for runoff and vegetation. *Catena*, 1994, 23: 73 — 85.
- [5] Pérez F L. Conservation of soil moisture by different stone covers on alpine talus slopes (Lassen, California). *Catena*, 1998, 33: 155 — 177.
- [6] Brakensiek D L, Rawls W J. Soil containing rock fragments: effects on infiltration. *Catena*, 1994, 23: 99 — 110.
- [7] 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.
- [8] Cerdà A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 59 — 68.
- [9] Li Y, Gao M, Wei C F, *et al.* Spatial distribution of rock fragment and its influences on soil hydrological processes. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22 (5): 271 — 276.
- [10] Fu S H. Effect of soil containing rock fragment on infiltration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (1): 171 — 175.
- [11] Wilcox B P, Wood M K. Factors influencing interrill erosion from semiarid slopes in New Mexico. *Journal of Range Management*, 1988, 42: 66 — 70.
- [12] Poesen J, Ingelmok-Sanchez F, Mucher H. The hydrological response of soil surface to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes Landforms*, 1990, 15: 653 — 671.
- [13] Kosmas C S, Danalatos N G. The impacts of parent material and landscape position on drought and biomass production of wheat under semiarid conditions. *Soil Technology*, 1993, 6: 337 — 349.
- [14] Li G A, Chen M L, Wang C C. Study on the soil water characteristics of the Lithosol in the Danjiangkou Reservoir Basin. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2000, 19(4): 342 — 345.
- [15] Chen S H, Xie Z K, Wang Y J, *et al.* Moisture storage effect of gravel mulch with different grain size on watermelon field. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 433 — 436.
- [16] Department of Sci&Tech. Ministry of Forestry. The fix position research methods of forestry ecology. Beijing: Chinese Sci&Tech. Press, 1994. 91 — 92; 98 — 100.
- [17] Shi Z J, Wang Y H, Xiong W, *et al.* Effect of rock fragments on the formation of soil macroporosity of typical vegetation in Liupan Mountains of westworth, China. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(5): 541 — 547.
- [18] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 2003, 53: 97 — 114.
- [19] Abrahams A D, Parsons A J. Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 1991, 122: 49 — 59.
- [20] Rawls W J, Stone J J, Brakensiek D L. Infiltration. In: USDA-Water Erosion prediction project: hillslope profile version. NSER1 Report Number 2, National soil erosion research laboratory, USDA-ARS, West Lafayette, IN, Ch. 4, 1989. 47.
- [21] Eriksson C P, Holmgren P. Estimating stone and boulder content in forest soils-evaluating the potential of surface penetration methods. *Catena*, 1996, 28: 121 — 134.
- [22] Yang Z, Xiong D H, Zhou H Y, Zhang X B. Forest growth and rainfall infiltration on the slopes of the arid and hot valleys with different composing of soil and rock fragments. *Science in China. Ser. E Technological Sciences*, 2003, 33 (supplement): 85 — 93.
- [23] Kemper W D, Nick A D, Corney A T. Accumulation of water in soils under gravel and sand mulches. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 56 — 63.

参考文献:

- [9] 李燕,高明,魏朝富,刘吉振. 土壤砾石的分布及其对水文过程的影响. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 271 ~ 276.
- [10] 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.
- [14] 吕国安,陈明亮,等. 丹江口库区石渣土土壤水分特性研究. *华中农业大学学报*, 2000, 19(4): 342 ~ 345.
- [15] 陈士辉,谢忠奎,王亚军,等. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 433 ~ 436.
- [16] 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. 91 ~ 92; 98 ~ 100.
- [17] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等. 六盘山典型植被类型土壤中砾石对大孔隙形成的影响. *山地学报*, 2007 年第 5 期.
- [23] 杨忠,熊东红,周红艺,张信宝. 干热河谷不同岩土组成坡地的降水入渗与林木生长. *中国科学 (E 辑)*, 2003, 33 (增刊): 85 ~ 93.