

村镇水源地土壤中砾石对水分运动的影响

龚久平¹, 李燕^{1*}, 刘吉振², 高静¹, 洪云菊¹, 易志坚¹, 柴勇¹

(1. 重庆市农业科学院 农业质量标准检测技术研究所, 重庆 400055; 2. 重庆市农业科学院 蔬菜花卉研究所, 重庆 400055)

摘要:对重庆水库水源地坡地土壤中砾石对土壤水分运动的影响进行研究。结果表明:随砾石含量增加,扰动土水分特征曲线的幂函数拟合式的 a 值逐渐减小, b 值逐渐增大。在垂直入渗和水平扩散中,随砾石含量增加,累计入渗(扩散)量逐渐减少,总入渗(扩散)时间先减后增,总入渗(扩散)率则相反;垂直入渗的饱和含水重量、沥水后含水重量、开始下漏时间、下漏稳定时间逐渐减少;任意时刻的入渗(扩散)率按 Kostiakov 入渗模型进行拟合,系数 k 随砾石含量的增加而增大,指数 a 则相反。在土壤蒸发中,砾石覆盖土样的初始含水量和累计蒸发量最小;61 h 前,混合土样平均含水量随砾石含量的增加而减小;61 h 后,砾石含量为 30% 土样的累计蒸发量增加相对缓慢,砾石覆盖土样的含水量下降相对减弱;蒸发结束时,累计蒸发量随砾石含量的增加呈减少趋势;砾石覆盖土样的含水量小于无砾石土样,约等于砾石含量为 10% 的土样。

关键词:土壤砾石;水分入渗(扩散);水分蒸发

中图分类号: S152.7⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2286(2010)03-0621-07

Effect of Rock Fragment on Soil Water Movement of Water Source of Villages and Small Towns

GONG Jiu-ping¹, LI Yan^{1*}, LU Ji-zhen²,
GAO Jing¹, HONG Yun-ju¹, YI Zhi-jian¹, CHAI Yong¹

(1. Institution of Agricultural Quality Standard and Testing Technology, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 400055, China; 2. Institute of Vegetables and Flowers, Chongqing Academy of Agricultural Science, Chongqing 400055, China)

Abstract: The effect of rock fragment content on soil water movement of water source around reservoir in Chongqing was studied. The results showed that the values of simulating formula of power functions for water retention characteristic curves of disturbed soils were opposite to rock fragment contents and the values were in accordance with rock fragment contents. In vertical infiltration and horizontal diffusion, with rock fragment increasing, the accumulative infiltration (diffusion) quantities dropped, the total infiltration (diffusion) times first decreased then increased, the total infiltration (diffusion) rates were opposite. In vertical infiltration, the saturated water weight, the draining weight, the beginning leaky time and the stable leaky time dropped. The Kostiakov infiltration model was used to simulate infiltration (diffusion) in any time, and the coefficient increased with rock fragment increasing, but the exponents were opposite. In the soil evaporations, the initial water contents and accumulate evaporations in the soils recovered with rock fragments were the least. Sixty one hours before, the average water contents decreased with rock fragments increasing. Sixty one hours later, the

收稿日期: 2009-12-15 修回日期: 2010-05-04

基金项目: 国家水专项饮用水主题项目 (2009ZX07425-003)

作者简介: 龚久平 (1967-), 男, 副研究员, 硕士, 主要从事农产品分析测试技术与农业资源环境研究, E-mail: gongjiuping@yeah.net; *通讯作者: 李燕, E-mail: Lian3403@163.com

accumulate evaporation of the sample with 30% rock fragments had relatively slow increase, the water content of the soils recovered with rock fragments had relatively weak drop. The end, accumulate evaporation had reduced trend with rock fragments increasing, the water content of the soils recovered with rock fragments was about equal to the samples with 10% rock fragments and less than the soil without rock fragments

Key words: soil; rock fragment; water infiltration (diffusion); water evaporation

砾石 (>2 mm 的碎石)广泛存在于世界的部分土壤中^[1-3],根据砾石多少将含有砾石的土壤分为砾质土(砾石含量 <30%)和砾石土(砾石含量 ≥30%)^[4]。这些砾石影响着土壤的物理、化学和农学特性^[5]。砾石具有持水性,对土壤的持水性和水分运动有较大影响^[6-7]。砾石土 砾质土的持水性受到砾石来源、大小、体积百分比、存在位置以及土壤孔隙度的影响^[8-13]。砾石在土壤表面能增加或降低土壤水的入渗性能^[14-15],在土壤侵蚀严重区域,砾石覆盖能提高导水率、减少水分蒸发和土壤侵蚀,增大水分入渗和土壤温度,还能改变土壤的生物活性和肥力^[16-18],为植物生长提供一个更好的环境条件。

国外研究者对砾石土的研究取得了一定成果,但对砾质土研究较少。国内能种植作物的含有砾石的土壤大部分为砾质土,这种土壤的研究少见报道^[19-20]。紫色土是紫色砂、页、泥岩遭受到强烈的物理风化作用和微弱的化学作用后产生的一种停留在粗骨性阶段的肥沃土壤,含有较多的砾石^[3]。长期以来,对紫色土的研究基本上都忽略了土壤中的砾石,仅研究土壤的细颗粒部分,这就不能正确了解紫色砾石土 砾质土的各种特性。近年,随着山地土壤的开发与利用,砾石土 砾质土的研究受到广泛重视^[21-24]。本文研究了重庆村镇典型水源地紫色土中砾石对土壤持水性和水分运动的影响,对含砾石土壤的水分循环和土壤侵蚀性有重要意义,为理解污染物的迁移途径和模拟供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验土壤材料采自重庆市巴南区界石镇成功桥水库周围山坡上的紫色土,选取山坡的坡顶、坡腰和坡脚 3 个坡位进行布点,每个坡位布 6 个点,每台土的前后方各 3 个。山顶土层浅薄,土体松散,夹有大量岩石碎屑;山腰耕层松泡,心土和底土紧实,山脚整个土层较紧实。每个取样点分 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 3 个层次取样,其中测定砾石的取样体积为 10 cm ×10 cm ×10 cm。测定扰动土水分特征曲线和水分运动的土壤采自于被选山坡的坡腰,每个样点在 0~20 cm 土层取样,取样重量约为 50 kg 左右。

扰动土样品的处理:坡腰每个表层土样先混合后自然风干,再研磨过 2 mm 筛,得到试验所需的细颗粒土。根据测出的土壤砾石含量,将扰动土分为 5 个处理:(1)细颗粒土;(2)细颗粒土 + 10% 的砾石;(3)细颗粒土 + 20% 的砾石;(4)细颗粒土 + 30% 的砾石;(5)细颗粒土 + 3 cm 厚的砾石。其中细颗粒土的容重固定为 1.28 g/cm³,砾石含量为体积含量。处理 (1)为无砾石土样,中间 3 个处理为混合土样,处理 (5)为砾石覆盖土样。

1.2 样品分析

1.2.1 砾石重量百分含量测定 采用水洗风干称重法^[5]。

1.2.2 原状土常规性质的测定 土壤 pH 用酸度计电位法;土壤有机质用重铬酸钾容量法(水合热法);土壤颗粒组成用比重计法;土壤自然含水量用酒精灼烧法;土壤饱和含水量和田间持水量用环刀法^[15]。

1.2.3 扰动土水分特征曲线试验 取前 4 个处理,将处理好的土样装在 100 cm³ 的环刀里,完全饱和后放在高岭土平板仪上,在 1.0、1.5、3、6、10、30 kpa 的吸力下分别测定各个土样的含水量,每个处理做 3 个重复。

1.2.4 扰动土垂直入渗试验 整个试验在垂直放置的有机玻璃管内进行,垂直玻璃管总长是 100 cm 左右,内径为 8 cm,填土室为 60 cm。为保证土柱的密度较为均匀,将前 4 个处理的土样按 10 cm 分层装土。通过马利奥特瓶的通气管控制土柱上的水层高度为 3.5 cm。水分入渗前称整个土柱的总重量,水分入渗后,湿润锋到达 5 cm 时,记录第 1 次时间和下渗水量,后再每隔 5 cm,记录下一次时间和下渗

水量,直到土柱渗透完,此时开始记录土柱下端有水开始下漏的时间、下漏量稳定的时间和稳定的下漏量。当测完稳定的下漏量后,关闭供水阀,倒出土柱上方的水,称量整个土柱的总重,然后用纸盖住土柱上方,让土柱自然沥水 1 d 后,再次对土柱进行称重,得到自然含水量。

1.2.5 扰动土水平扩散试验 利用一个半无限长水平土柱的吸渗装置,玻璃管总长为 100 cm,内径为 5 cm,土柱长为 60 cm,贮水室和滤水室均为 10 cm。取前 4 个处理,装土方法同垂直土柱,进水端水室采用马利奥特瓶供水装置来控制进水量。水分入渗后,湿润锋到达 5 cm 时,记录第 1 次时间和下渗水量,后再每隔 5 cm,记录下 1 次时间和下渗水量,直到土柱渗透完,关闭供水阀,从湿润峰开始迅速取土,测定土柱的土壤含水率的分布。

1.2.6 扰动土水分蒸发试验 蒸发试验容器是直径为 8 cm、高为 10 cm 的小圆柱杯子。具体测定方法为:将所有处理的土样分别装入杯内,称量整个杯子的总重,然后在每个杯内加入足够的水让其渗透完全直到下部有水沥出,在沥水 1 d 后再称重。将称重后的整个杯子放入 40 ℃ 的恒温条件下进行蒸发,前 25 h 内,每隔 8、16 h 称 1 次重;25 h 后,每隔 24 h 称 1 次重,记录在不同时段的蒸发量。

2 结果与分析

2.1 砾石的分布

土壤中的砾石在自然和人为活动下变动着^[24]。在坡腰和坡脚,砾石含量很低,山腰 2~5 mm 的砾石含量随土层的加深有增加的趋势;5~10 mm 和 >10 mm 的相对砾石含量有下降趋势,这些与 Poesen 的研究结论较为一致^[24]。砾石在坡面上的分布受到成土作用、风化程度和地形的影响,在不同坡位的砾石含量分布变化较大。在每一台土,台坎后耕地由于有土坎岩石的滑落和上坡砾石的滚落,砾石含量显然高于台坎前耕地的砾石含量。土壤中砾石含量随坡度增加呈增加趋势,坡顶的土层浅薄,含有较多的砾石,而坡腰和坡脚的砾石含量非常低。从坡顶到坡脚,2~5 mm 的砾石含量呈下降的趋势;5~10 mm 的砾石含量呈上升的趋势;大于 10 mm 的砾石含量在山腰最大,这可能与坡位及耕作的筛分活动有关。

2.2 原状土的基本性质和含水量

土壤总容重等于砾石容重和细颗粒土容重的加权值^[19]。从表 1 可看出,坡腰和坡脚的砾石含量 < 10%,容重与物理性粘粒含量的变化趋势一致,与砾石含量关系不明显;pH 值随土层加深而增大,土壤有机质随土层加深而减少,与紫色岩石风化形成土壤的过程和耕作有关,与砾石含量关系不明显;土壤自然含水量、土壤饱和含水量和田间持水量受到土壤物理性粘粒和砾石含量的双重影响。从坡面上分析,3 种含水量与砾石含量变化趋势相反,与物理性粘粒含量变化趋势一致;从剖面上分析,坡腰和坡脚的平均砾石含量 < 10%,3 种含水量与土壤物理性粘粒含量变化趋势一致,与砾石含量关系不明显。

表 1 土壤的基本性质和含水量

Tab 1 The basic properties and the water contents of soils

参数 Parameters	坡顶 Slope tip		坡腰 Slope middle		坡脚 Slope feet		
	0~20 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
砾石含量 /% Rock fragment	20.2	2.63	1.49	1.22	3.30	5.80	5.43
土壤容重 / (g·cm ⁻³) Soil bulk density	1.31	1.35	1.42	1.48	1.50	1.48	1.43
物理性粘粒 /% Physical clay	35.42	36.53	35.50	33.48	47.32	45.46	42.14
有机质 /% Organic matter	1.05	1.00	0.65	0.48	1.86	1.78	1.65
pH 值	7.23	7.05	7.14	7.30	6.55	7.08	7.25
自然含水量 /% Natural water content	19.54	22.76	22.13	20.87	25.79	24.64	24.57
饱和含水量 /% Saturated water content	33.96	35.84	35.25	34.66	37.23	36.76	36.29
田间持水量 /% Field capacity	22.49	24.40	24.26	23.92	28.24	27.25	25.68

2.3 扰动土的水分特征曲线

小于 100 kpa 低吸力段的土壤水分主要受毛管力支配,运动能力强,有效程度高,对旱作土壤有重要意义。对于同一质地的土壤,不同结构会影响土壤水分特征曲线,尤其在低吸力段范围内^[25]。

图 1 表明,在 0~30 kpa 吸力段,扰动土的脱水曲线趋势非常相似,土壤含水量随砾石含量逐渐减少,且无砾石土样与砾石含量为 10% 土样之间的曲线间距明显大于其它 2 个土样之间的曲线间距。在

0 ~ 6.0 kpa 吸力段,砾石含量为 20% 和 30% 土样的平均脱水量比无砾石土样和砾石为 10% 土样的小 1.36%; 在 6.0 ~ 10 kpa 吸力段,砾石含量为 20% 和 30% 土样的平均脱水量比无砾石土样和砾石为 10% 土样的大 1.83%; 在 10 ~ 30 kpa 吸力段,砾石含量为 20% 和 30% 土样的脱水量较少,曲线较为平缓。这说明同质地同容重细颗粒土中的不同砾石含量会影响土壤在不同吸力段的脱水量大小。用幂函数对不同砾石含量扰动土的水分特征曲线进行拟合,拟合式的平均相关系数为 0.9518, *a* 值随砾石含量增加而减小, *b* 值随砾石含量增加而增大。

2.4 扰动土水分的垂直入渗

随砾石含量的增加,土壤的累计垂直入渗量、饱和含水重量、沥水后含水重量、从土柱被渗透完到水开始下漏以及从水开始下漏到水下漏稳定所需时间逐渐减少。最大稳定下漏率先增后减,转折点为砾石含量为 10% 的土样,说明砾石含量到一定程度后会减小土壤的下漏率(表 2)。

表 2 扰动土的水分垂直入渗参数

Tab 2 The water parameters of vertical infiltration in disturbed soils

砾石含量 / % Rock fragment content	累计入渗量 / mL Total infiltration quantity	饱和含水重量 / g Total water weight	沥水后含水重量 / g Net water weight	开始下漏时间 / min Beginning infiltration time	稳定下漏时间 / min Stable infiltration time	最大下漏率 / (mL · min ⁻¹) Maximum infiltration rate
0	1 246	1 415	1 182	1 023	1 121	0.514
10	1 152	1 340	1 051	914	984	0.551
20	1 085	1 245	909	905	947	0.486
30	996	1 172	831	947	969	0.472

用二次多项式来拟合扰动土样垂直入渗的时间和距离的散点图(图 2):拟合的相关系数均大于 0.99,对无砾石土样拟合最好,随砾石含量的增加,拟合的准确性有减弱趋势,说明砾石含量通过影响土壤结构影响水分入渗的稳定性。到相同距离湿润锋,无砾石土样所需时间最长,随砾石含量的增加,所需时间先减后增,转折点是砾石含量为 10% 的紫色土,这与 Govers^[26] 和 Poesen^[27] 的研究结果一致。说明在相同容重细颗粒土中加入一定砾石量后,土壤孔隙度和非毛管孔隙增多,增强了水分的入渗能力,缩短了入渗时间。若再增加砾石含量,太多的大孔隙阻断了细小孔隙的连续性,增加了水分运动的弯曲路径^[27-30],再因为砾石的弱透水性减慢了水分的入渗速度,故下渗时间随砾石含量的再增加反而延长了。

根据公式(1)计算出任意时刻的垂直入渗率,再将任意时刻垂直入渗率与入渗时间的变化关系按公式(2)(即 Kostiakov 入渗模型)进行拟合,拟合结果见表 3。

$$i = 10 \times (H - H_0) \times A_1 / A_s \times t \tag{1}$$

$$i = k t^f \tag{2}$$

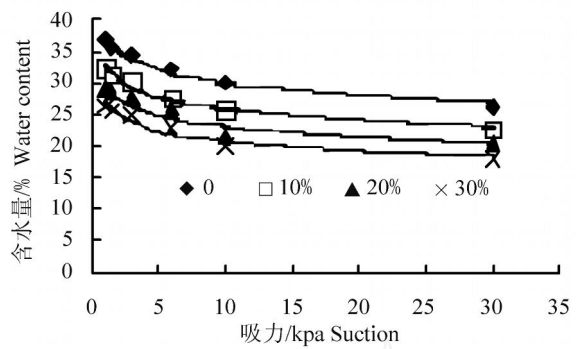


图 1 扰动土的水分特征曲线

Fig 1 The water retention characteristic curves of disturbed soils

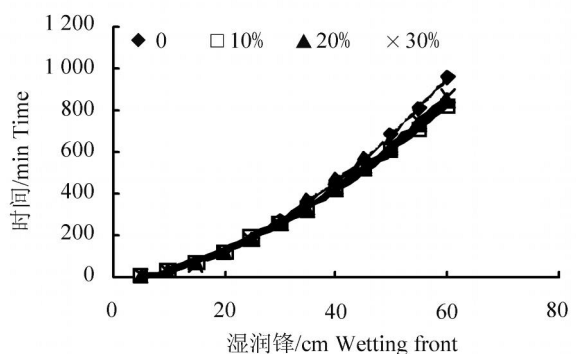


图 2 扰动土垂直下渗的湿润锋和时间的关系

Fig 2 The relations between wetting front and time of vertical infiltration in disturbed soils

式中: i_f 为 t 时刻的土壤入渗率 (mm/m in); H 为入渗开始后马氏瓶在任意时刻 t 的水位读数 (cm); H_0 为实验开始前 ($t=0$) 马氏瓶的水位读数 (cm); A_1 为马氏瓶的断面面积 (cm^2); A_s 为土柱的断面面积 (cm^2); k 为入渗系数 (mm/m in); a 为入渗指数。不同砾石含量扰动土的拟合式的平均相关系数为 0.975 & 入渗系数 k 随砾石含量的增加而增大, 入渗系数的物理意义是入渗第一单位时段末的入渗率, 砾石含量对入渗系数的影响, 实际上是对入渗初始第一单位时段末入渗率的影响; 入渗指数 a 反映了入渗过程的时效性, 因为本试验细颗粒土质地、机械组成和初始含水量都相同, 故入渗指数 a 只受砾石的影响, 随砾石含量的增加而逐渐减小。

表 3 扰动土在任意时刻水分垂直入渗参数

Tab 3 The water parameters of vertical infiltration in disturbed soils at any time

砾石含量 / % Rock fragment content	总入渗时间 / min Total infiltration time	总入渗率 / (mL · min ⁻¹) Total infiltration rate	$T = A \cdot X_f^2 + B \cdot X_f + C$				$i_f = k t^a$		
			A	B	C	R ²	k	a	R ²
0	958	0.259	0.219 8	2.964 8	-13.932	0.999 7	2.973 6	-0.346 9	0.967 6
10	810	0.283	0.151 5	5.052 5	-29.75	0.999 5	3.980 1	-0.380 4	0.975 3
20	849	0.254	0.180 1	3.792 9	-23.25	0.999 6	5.083 5	-0.415 9	0.981 7
30	864	0.230	0.187 9	3.658 2	-24.14	0.999 6	5.068 8	-0.446 5	0.978 7

2.5 扰动土水分的水平扩散

由表 4 可知, 水平扩散与垂直入渗相似, 总扩散量随砾石含量的增加减少 113 mL, 水分扩散到相同湿润锋处所需平均时间大于垂直入渗的平均时间。总扩散时间随砾石含量的增加先减后增, 最短时间是砾石含量为 10% 的处理。

由图 3 可看出, 不同砾石含量扰动土水平扩散时间的平方根和扩散距离的散点图呈直线关系, 用直线函数 $X_f = A t^{1/2}$ 进行拟合 (表 4), 平均相关系数为 0.998 2。拟合式的斜率 A 值随砾石含量的增加先升后降, 与总扩散时间变化规律相反, 最大值是含砾石为 10% 的土样。拟合式的斜率, 即水平扩散的距离和时间平方根的比值, 反映了土壤水分扩散的快慢, 直线斜率越小, 土壤水分扩散得越慢, 在相同时间内扩散的距离就小于直线斜率大的处理。

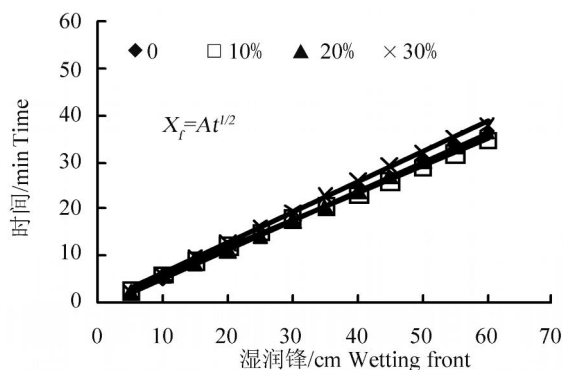


图 3 扰动土水平扩散的湿润锋与时间的关系

Fig 3 The relations between wetting front and time of horizontal diffusion in disturbed soils

用公式 (1) 计算出的不同砾石含量扰动土在任意时刻的水平扩散率与湿润锋距离的散点图仍然用 Kostikov 入渗模型来进行拟合 (表 4), 平均相关系数为 0.998 2。系数 k 随砾石含量的增加而增加, 指数 a 随砾石含量的增加而减小, 系数和指数的变化规律与垂直入渗的变化规律相符。

表 4 扰动土水平扩散的水分参数

Tab 4 The water parameters of horizontal diffusion in disturbed soils

砾石含量 / % Rock fragment content	总扩散时间 / min Total diffusion time	总扩散量 / mL Total diffusion quantity	总扩散率 / (mL · min ⁻¹) Total diffusion rate	$X_f = A t^{1/2}$		$i_f = k t^a$			
				A	R ²	k	a	R ²	
0	1.290	583	0.232 2	1.670 5	1.682 5	0.998 5	8.652 5	-0.506 3	0.999 4
10	1.223	561	0.235 3	1.715 6	1.716 2	0.999 2	9.775 3	-0.531 3	0.995 1
20	1.368	503	0.192 8	1.622 2	1.672 2	0.996 9	14.62 5	-0.605 4	0.998 6
30	1.435	470	0.165 7	1.583 8	1.561 6	0.998 7	20.45 5	-0.662 3	0.999 8

2.6 扰动土蒸发时间与含水量

通过不同时间段的蒸发量计算出在不同时间的土壤含水量, 并作时间与土壤含水量的散点图 (图 4)。

初始含水量最小的是砾石覆盖土,其余土样的初始含水量随砾石的增加逐渐降低,这是因为砾石含水量小于细颗粒土壤含水量,细颗粒土壤越多,土样的初始含水量就越大。在整个蒸发过程,随砾石含量的增加,混合土样的含水量逐渐下降,且土壤中砾石含量越大,土壤含水量减少得越慢。61 h前,砾石覆盖土样的含水量最小;61 h后,砾石覆盖土样的含水量下降相对减慢;蒸发结束时,砾石覆盖土样的含水量小于无砾石土样,约等于砾石含量为 10%的土样。砾石覆盖土样在整个蒸发过程中平均含水量下降 13.82%,低于其他土样减少的含水量。这说明砾石覆盖层增加了土壤上部“干层”的厚度,在蒸发后期,降低的土壤蒸发率大于其他处理。

2.7 扰动土蒸发时间与累计蒸发量

图 5 表明,累计蒸发量最小的是砾石覆盖土,这是因为砾石覆盖土样与其他土样相比,能较快地形成干土层,减少土样的累计蒸发量。混合土样的累计蒸发量随砾石含量的增加而减少,前 15 h 蒸发强度主要受到外界能量的影响,不同处理的累计蒸发量差异相对较小;15 ~ 61 h 时段,累计蒸发量是砾石含量为 30% 的土样最大。这是因为含有砾石的土壤有较多的大孔隙、较高的饱和导水率和日温,这些因素有利于水蒸气运输到大气中,进而增加蒸发率;61 h 后,蒸发强度受土层上部的“干层”厚度影响,累计蒸发量的增加速度随砾石含量增加逐渐减弱。这是因为砾石含量越大,土壤的大孔隙越多,越能加快土壤水表层的排泄形成干土层,越厚的干土层减缓水分蒸发率越强,所以在蒸发后期,混合土样累计蒸发量随砾石含量的增大呈减少趋势。

61 h 后,蒸发强度受土层上部的“干层”厚度影响,累计蒸发量的增加速度随砾石含量增加逐渐减弱。这是因为砾石含量越大,土壤的大孔隙越多,越能加快土壤水表层的排泄形成干土层,越厚的干土层减缓水分蒸发率越强,所以在蒸发后期,混合土样累计蒸发量随砾石含量的增大呈减少趋势。

3 讨论与结论

土壤中砾石含量随坡度增加呈增加趋势,2 ~ 5 mm 的砾石含量百分比随土层的加深有增加的趋势,5 ~ 10 mm 和 >10 mm 的相对砾石含量有下降趋势。土壤自然含水量、饱和含水量和田间持水量与土壤物理性粘粒含量变化趋势一致,在坡面上与砾石含量变化趋势相反;在剖面上与砾石含量关系不明显。扰动土的脱水曲线趋势非常相似,砾石含量影响土壤在不同吸力段的脱水量大小。在垂直入渗和水平扩散中,随砾石含量的增加,累计入渗(扩散)量逐渐减少,总入渗(扩散)时间先减后增,总入渗(扩散)率则相反;垂直入渗的饱和含水重量、沥水后含水重量、开始下漏时间、下漏稳定时间逐渐减少。在土壤蒸发中,砾石覆盖土的初始含水量和累计蒸发量最小;61 h 前,混合土样平均含水量随砾石含量的增加而减小;61 h 后,砾石含量为 30% 土样的累计蒸发量增加相对缓慢,砾石覆盖土样的含水量下降相对减弱;蒸发结束时,累计蒸发量随砾石含量的增加呈减少趋势,砾石覆盖土样的含水量小于无砾石土样,约等于砾石含量为 10% 的土样。

该试验针对重庆村镇典型水源地含有砾石的土壤的水分性质进行了系统的研究,试验所采取的方法主要是根据紫色土的性质,借鉴改进国外砾质土的研究方法而成;研究的结果与国外研究人员对砾质土的研究结果相似。由于原装土中砾石分布的不均匀性和扰动土装土的不均匀性对试验结果产生一定的误差,希望在以后砾石(质)土的研究中能通过方法的改进进一步减小误差,为理解污染物的迁移途径和模拟提供更精确的理论依据。

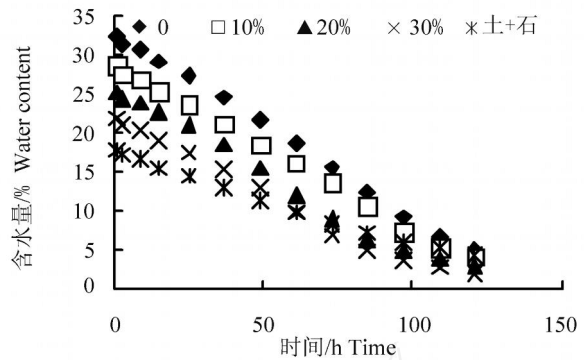


图 4 扰动土的蒸发时间和含水量的关系

Fig 4 The relations between water content and times in disturbed soils

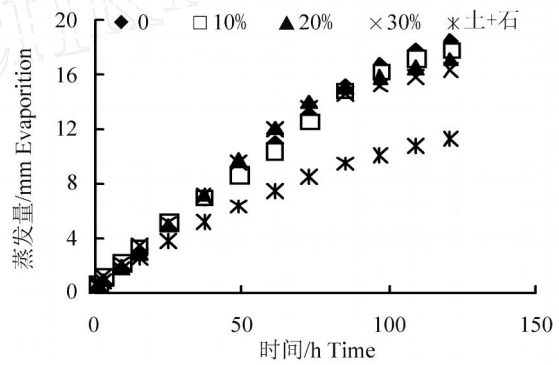


图 5 扰动土的蒸发时间和累计蒸发量的关系

Fig 5 The relations between evaporation and times in disturbed soils

参考文献:

- [1] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in topsoils: significance and processes[J]. *Catena*, 1994, 23: 1 - 28.
- [2] 符素华, 段淑怀, 刘宝元. 密云石匣小流域土地利用对土壤粗化的影响[J]. *地理研究*, 2001, 20(6): 697 - 702.
- [3] 鄯向红, 孙西欢, 马娟娟. 乔灌篱沟蓄沟道土壤水分运动数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7): 93 - 97.
- [4] Dane J H, Topp G C. *Methods of Soil Analysis Part 4: Physical methods*[M]. Soil Science Society of America Inc Madison Wisconsin, USA, 2002.
- [5] Nyssen J, Poesen J. Spatial distribution of rock fragments in cultivated soils in northern Ethiopia as affected by lateral and vertical displacement processes[J]. *Geomorphology*, 2002, 43: 1 - 16.
- [6] Poesen J, Luna D E, Franca A. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content[J]. *Catena*, 1999, 36: 315 - 329.
- [7] Kosmas C S, Moustakas N, Danalatos N G. The effect of rock fragments on wheat biomass production under highly variable moisture conditions in Mediterranean environments[J]. *Catena*, 1994, 23: 191 - 198.
- [8] Ravina I, Magier J. Hydraulic conductivity and water retention of clay soils containing coarse fragments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48: 736 - 740.
- [9] Hanson C T. Soil water in coarse fragments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, 43: 819 - 820.
- [10] Kemper W D, Nick A D, Corey A T. Accumulation of water in soils under gravel and sand mulches[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 56 - 63.
- [11] Danalatos N G, Kosmas C S, Moustakas N C. Rock fragments: II Their impact on soil physical properties and biomass production under Mediterranean conditions[J]. *Soil Use and Management*, 1995, 11: 121 - 126.
- [12] Valentin C. Surface sealing as affected by various rock fragment covers in west Africa[J]. *Catena*, 1994, 23: 87 - 97.
- [13] Cousin I, Nicoullaud B. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J]. *Catena*, 2003, 53: 97 - 114.
- [14] Cerda A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 59 - 68.
- [15] Certini G, Colin D. Rock fragments in soil support a different microbial community from the fine earth[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(7): 1119 - 1128.
- [16] Jerry C, Mark A, Mary H. Patterns of soil erosion and redeposition on lucky hills watershed, Walnut gulch experimental watershed, Arizona[J]. *Catena*, 2005, 61: 122 - 130.
- [17] Li Xiaoyan. Gravel-sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China[J]. *Catena*, 2003, 52: 105 - 127.
- [18] Li Xiaoyan, Shi Peijun, Liu Lianyou. Influence of pebble size and cover on rainfall interception by gravel mulch[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 312: 70 - 78.
- [19] 符素华. 土壤中砾石存在对入渗影响研究进展[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 171 - 175.
- [20] 李军健, 吕刚, 黄建国. 紫色土旱坡地土壤水分时空分布特征[J]. *西南农业大学学报:自然科学版*, 2006, 28(1): 161 - 164.
- [21] Poesen J, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review[J]. *Catena*, 1994, 23: 141 - 166.
- [22] Abrahams A D, Parsons A J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desert surfaces[J]. *Catena*, 1994, 23: 111 - 140.
- [23] 吕国安, 蔡崇法. 丹江口库区石渣土土壤水分有效性研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(3): 106 - 109.
- [24] Poesen J, Van Wesemael B. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion[J]. *Geomorphology*, 1997, 18: 183 - 197.
- [25] 詹如坤. *土壤农业化学分析方法* [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [26] Govers G, Poesen J. Field experiments on the transport of rock fragments by animal trampling on scree slopes[J]. *Geomorphology*, 1998, 23: 193 - 203.
- [27] Poesen J, Ingelmo - Sanchez F. Runoff and sediment yield from topsoils with different porosity as affected by rock fragment cover and position[J]. *Catena*, 1992, 19: 451 - 474.
- [28] 时忠杰, 王彦辉, 于澎湃, 等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6090 - 6098.
- [29] 梁海军, 刘作新, 王振营, 等. 地下渗灌土壤水分运动数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 11 - 14.
- [30] 李燕, 高明, 魏朝富, 等. 土壤砾石的分布及其对水文过程的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 271 - 276.