

崩岗堆积土体渗透特性及剖面水分特征

——以广东省五华县莲塘岗崩岗为例

张大林, 刘希林

(中山大学 地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: [目的] 崩岗内部堆积土体是侵蚀的主要物质来源。通过对其渗透过程进行研究,揭示其中的规律性,探索崩岗的侵蚀机理。[方法] 采用自制双环渗水试验装置,结合 PR2/6 土壤剖面水分测定仪,在广东省五华县莲塘岗崩岗野外现场进行渗水试验。[结果] (1) 崩积锥稳渗率在 0.58~2.41 mm/min 之间,3 个试验点平均稳渗率为 1.37 mm/min,沟道土体平均稳渗率高达 5.58 mm/min,渗透过程以重力流为主,土体结构稳定;(2) 入渗速率与时间成负指数幂函数关系,符合 Kositakov 模型;(3) 初始含水率越高,湿润锋移动速度越快,影响范围越深,稳渗时湿润锋深度在 600~1 000 mm 及以上;(4) 土体剖面含水率分布受土体非均质性的影响,自上而下呈波动式下降。[结论] 崩岗堆积土体最大失稳深度至少为 600~1 000 mm,甚至可以达到 1 000 mm 以上,崩积锥的非均质性具有阻渗作用,易形成滞水层并发生潜蚀,对崩岗侵蚀过程产生影响,是渗透研究的重点。

关键词: 崩岗; 崩积锥; 非均质土体; 渗透特性; 剖面水分特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0251-06

中图分类号: S152.7, S157.1

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.048

Permeability and Sectional Moisture Characteristics of Deposits in Collapse Hill

—An Example of Liantanggang Collapse Hill in Wuhua County of Guangdong Province

ZHANG Dalin, LIU Xilin

(School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: [Objective] The internal deposits of collapse hill is the main material source of erosion. This paper aimed to reveal the infiltration regularity in that hill, and to explore the erosion mechanism on collapse hill by studying the infiltration process. [Methods] Field experiments of infiltration were conducted in site of Liantanggang collapse hill in Wuhua County of Guangdong Province using a self-made double circle infiltration device and soil moisture were measured with PR2/6 profile probe. [Results] (1) Soil steady infiltration rate of colluvial cone was between 0.58~2.41 mm/min with an average value of 1.37 mm/min. The average infiltration rate of channel soil was up to 5.58 mm/min. The infiltration process was dominated by gravity flow and soil structure was stability. (2) The infiltration rate showed a negative exponential power function relationship with infiltration time as the dependent variable, which conformed to Kositakov model. (3) The higher initial moisture content, the faster wetting front moved, meanwhile, the deeper of affected region, and its depth went down to 600~1 000 mm or even more when infiltration rate attained steady state. (4) The sectional moisture content showed a varied decline from profile top to bottom as affected by the heterogeneity of the soil. [Conclusion] The maximum depth of instable deposits in collapse vulnerable mount is at least 600~1 000 mm or even over 1 000 mm. Heterogeneity of colluvial cone soil can resist infiltration and form a stagnant water layer, which can potentially lead to subsurface erosion and hence has a great impact on erosion process of collapse hill. Therefore, the colluvial cone of that hill should be the focus of permeability study.

Keywords: collapse hill; colluvial cone; heterogeneous soil; permeability; sectional moisture characteristics

收稿日期:2014-07-05

修回日期:2014-07-24

资助项目:国家自然科学基金项目“华南崩岗溯源侵蚀与泥石流启动和形成的试验研究”(41071186)

第一作者:张大林(1987—),男(汉族),山东省济南市人,博士研究生,研究方向为地质灾害评估和预测预报。E-mail:zdl87@aliyun.com。

通信作者:刘希林(1963—),男(汉族),湖南省邵阳县人,博士,教授,博士生导师,主要从事地貌灾害过程及评估和预测研究。E-mail:liuxilin@mail.sysu.edu.cn。

我国南方崩岗侵蚀模数巨大,危害严重,是《国家水利发展“十一五”规划》确定的水土流失重点治理项目。加强崩岗防治,对保护和增加耕地资源、改善区域生态环境、促进农村经济社会发展,具有重要意义。我国崩岗主要分布在广东、江西、福建、湖南、广西等省的花岗岩丘陵山区,大于 60 m^2 的崩岗总数达 2.4×10^5 处,侵蚀面积约 $5.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ [1]。自 20 世纪 60 年代开始,我国学者经过不懈努力,对崩岗的形成发展 [2]、形态类型 [3]、土体特性 [4-5] 等多方面开展研究,取得了有益成果。随着崩岗研究的拓宽和加深,多学科技术方法相互融合,近年崩岗研究关注的问题更加多样化和具体化,例如侵蚀产沙来源 [6],崩岗侵蚀与地下水的关系 [7],三维激光扫描技术对崩岗侵蚀过程的监测和定量表达 [8] 等研究成果,为进一步揭示崩岗侵蚀过程和机理打下了坚实基础。

土体渗透特性是径流计算和水土保持效益评价的重要指标,也是降水再分配和地表径流形成的重要环节,对崩岗侵蚀过程具有显著影响。目前有关崩岗土体水分入渗的研究还比较少,林敬兰等 [9] 通过野外双环渗水试验,探讨崩岗花岗岩风化壳不同层次的水分入渗特性和机理,结果表明,各土层的渗透性能为:红土层 > 砂土层 > 碎屑层。蒋芳市等 [10] 采用环刀法测定崩积体不同部位的渗透性能,结果表明,崩积体土体较崩壁风化壳土体稳渗时间短,渗透速率大。崩岗通常由崩壁、崩积锥、沟道、洪积扇等多种地貌单元构成,除崩壁为原生的花岗岩风化壳以外,其余部分多为次生的搬运堆积土体,受崩塌、滑坡、流水侵蚀和沉积多种作用的强烈扰动和改造,结构复杂,属于非均质土体。非均质土体渗透过程更为复杂,Miller 等 [11] 最早发现渗透过程中,当湿润锋下移到非均质土体的层面后,无论间层质地比表土层粗还是细,渗透速率都将明显下降。王文焰等 [12] 对夹层土体的渗透特性进行了室内一维土柱水分入渗试验,发现在黄土中设置砂层夹层,具有良好的阻水和减渗作用,可将下渗的非线性过程转换为线性过程。甘永德等 [13] 通过室内模拟降雨入渗试验,表明在垂直入渗条件下,分层土壤的渗透特性由土壤分层的组合方式来决定,其累计入渗量与湿润锋移动距离之间呈线性相关关系。本研究采用自制双环渗水试验装置,结合 PR2/6 土壤剖面水分测定仪,在野外现场,对广东省五华县莲塘岗崩岗的非均质堆积土体的渗透特性及其对剖面水分的影响进行分析,以揭示其中的规律性,探索崩岗的侵蚀机理。

1 材料与方法

1.1 研究对象

试验在广东省五华县莲塘岗崩岗小流域内进行,地理坐标为 $24^{\circ}06'10.5''\text{N}$, $15^{\circ}34'57''\text{E}$,该区属亚热带季风气候,年平均气温 20°C ,年平均降雨量 1547.5 mm 。风化壳深厚,以燕山侵入旋回花岗岩为主。莲塘岗崩岗为典型的瓢形崩岗,规模较大,侵蚀面积 5125 m^2 ,相对高差 55 m ,各种崩岗地貌类型发育完整,目前正处于活跃阶段,侵蚀模数高达 $269268 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ [8]。崩岗内部切沟发育,3 条较大的支沟呈爪状分布,将崩积锥分为左、中、右 3 部分,崩积锥表面坡度 30° 左右。支沟在崩口处交汇形成主沟,与丘陵间沟谷相连。本研究选取 4 处崩岗堆积土体进行野外现场渗水试验,4 个试验点分别位于崩口外主沟沟道(1 号试验点)、中部崩积锥(2 号试验点)、右侧崩积锥(3 号试验点)、左侧崩积锥(4 号试验点)。具体及试验点位置如图 1 所示。



图 1 试验点位置示意图

1.2 试验设计

采用 PR2/6 土壤剖面水分测定仪与双环渗水试验进行联合测定,试验装置如图 2 所示。双环渗水试验结构简单,操作方便,可在野外进行原位测试,避免试验土体的人为扰动,应用比较广泛 [14]。试验选用自制设备,外环直径 300 mm ,起保护作用,内环形成一维垂直自由入渗水流,直径 150 mm 。两环入土深度 100 mm ,采用 50 mm 定水头入渗,内环入渗水量由量杯提供,通过流量阀调节水头高度。PR2/6 土壤剖面水分测定仪由英国 Delta-T Devices 公司生

产,水分传感器内置于直径 25 mm 的密封集成杆中,可将输出的模拟直流电压信号转变为土壤体积含水率(文中含水率均采用体积含水率%),测量精度 $\pm 3\%$,能够监测地表以下 100,200,300,400,600,1 000 mm 这 6 个层面的土壤水分含量。使用土钻打孔,将传感器套管预先埋设于试验点,为避免对入渗土体造成干扰,套管设置于内、外环之间。

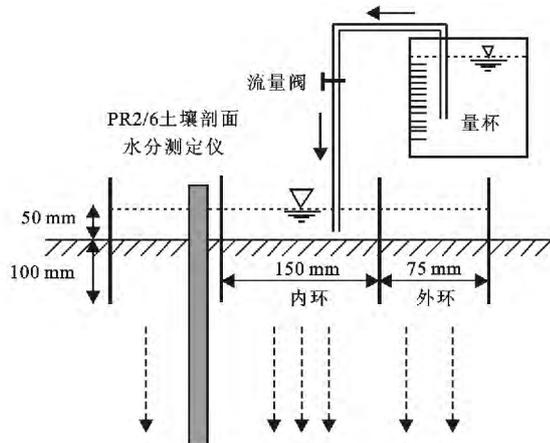


图 2 双环渗水试验装置示意图

试验开始前对试验点表层土体取样,带回实验室进行理化性质分析,并对土壤表面初始含水率进行测定。渗水试验全程采用秒表计时,记录量杯内下降单位体积水量所需时间,根据公式(1)求得内环渗水速率。

$$i = 10 \Delta Q / (F \Delta t) \quad (1)$$

式中: i ——渗水速率 (mm/min); ΔQ ——渗水量 (ml); F ——内环面积 (cm^2); Δt ——渗水时间 (min)。

表 1 莲塘岗崩岗各试验点表层土体物理性质

编号	比重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙 度/%	有机质 含量/%	塑限/ %	液限/ %	砾粒 含量/%	砂粒 含量/%	粉砂 含量/%	黏粒 含量/%	中值 粒径/mm
1	2.64	1.53	42	0.70	17.4	30.6	18.14	73.49	5.97	2.41	0.962
2	2.63	1.32	50	2.41	29.1	49.8	23.83	39.42	23.68	13.08	0.525
3	2.67	1.32	51	1.69	26.0	45.8	20.13	39.44	31.48	8.95	0.196
4	2.65	1.37	48	2.77	27.6	46.8	30.54	36.83	22.21	10.43	0.701

2.2 土体渗透特征

渗透速率随时间呈递减趋势,两者具有负指数的幂函数关系(图 3)。初始阶段为渗润阶段,水分下渗速率较快且迅速递减;渗漏阶段由于土体含水量增加,水分下渗速率明显减小;当土体含水率达到田间持水量(饱和含水量)时,水分下渗速率趋于稳定,并最终达到稳渗阶段。土体的非均质性会对水分入渗过程产生一定影响,当湿润锋到达差异土层界面时,

当渗水速率趋于平稳,土体达到稳渗状态时,测定此时土壤剖面含水率并停止试验。初次试验于 2012 年 11 月 6 日(旱季)进行,试验前一周当地无降水事件。重复试验于 2013 年 7 月 14 日(雨季)进行,据相邻约 4 km 的河子口气象站监测资料记录,重复试验前 24 h 有 13.5 mm 的累积降雨量。

2 结果与分析

2.1 土体物理性质

1 号试验点位于崩口主沟沟道,其组成物质主要为流水侵蚀和搬运形成的沟道堆积物,土体特性与其余各点差异明显。1 号试验点干容重 1.53 g/cm^3 ,有机质含量仅为 0.70%,物质组成较粗,2~0.075 mm 的砂砾含量占 73.49%,粉砂黏粒含量较低,仅为 2.41%,导致其塑限和液限也较低,平均分别为 17.4% 和 30.6%,总孔隙度为 42%,非毛管空隙比重较大。2—4 号试验点均位于崩积锥上,土体性质差异不大,平均干容重为 1.34 g/cm^3 ,总孔隙度在 50% 左右,物质组成以砂粒和粉砂为主,<0.005 mm 的黏粒含量较 1 号点明显偏高,平均为 10.82%,平均塑限和液限分别为 27.6% 和 47.5%(表 1)。1—4 号试验点均为崩岗堆积土体,受外力作用改造,结构上与崩壁的原生风化壳土体具有明显区别,属非均质土体。1 号试验点沟道堆积物是流水搬运和堆积作用的产物,受水流分选作用影响,表面形成以砂粒为主的粗化层,下部物质相对较细。2—4 号试验点为崩积锥崩坡积物,其形成过程既有崩壁重力崩塌作用,也有坡面流水侵蚀作用。物质来源包括风化壳表土层、红土层、砂土层以及碎屑层等。

若下层为粗质土层,首先上层细质土体基质的吸附力和毛管力大于下层土体,水分聚集在土层交界处,随着下层粗质土体大孔隙充水,水力传导度逐渐增大,使得入渗速率呈现先下降后上升的趋势;若下部为细质土层,因土质黏重,导水率小,入渗速率迅速降低^[15]。1—3 号试验点 2 次测试的稳渗率和渗透速率变化趋势一致,表明试验可信度较高,能够反映自然条件下崩岗土体水分入渗状况。4 号试验点初试与

重试的稳渗率不同,但渗透速率变化趋势一致,重试的稳渗率大,可能是雨季的降雨作用,改变了渗水试

验前土体内部的微结构和含水量或其它偶然因素所致。

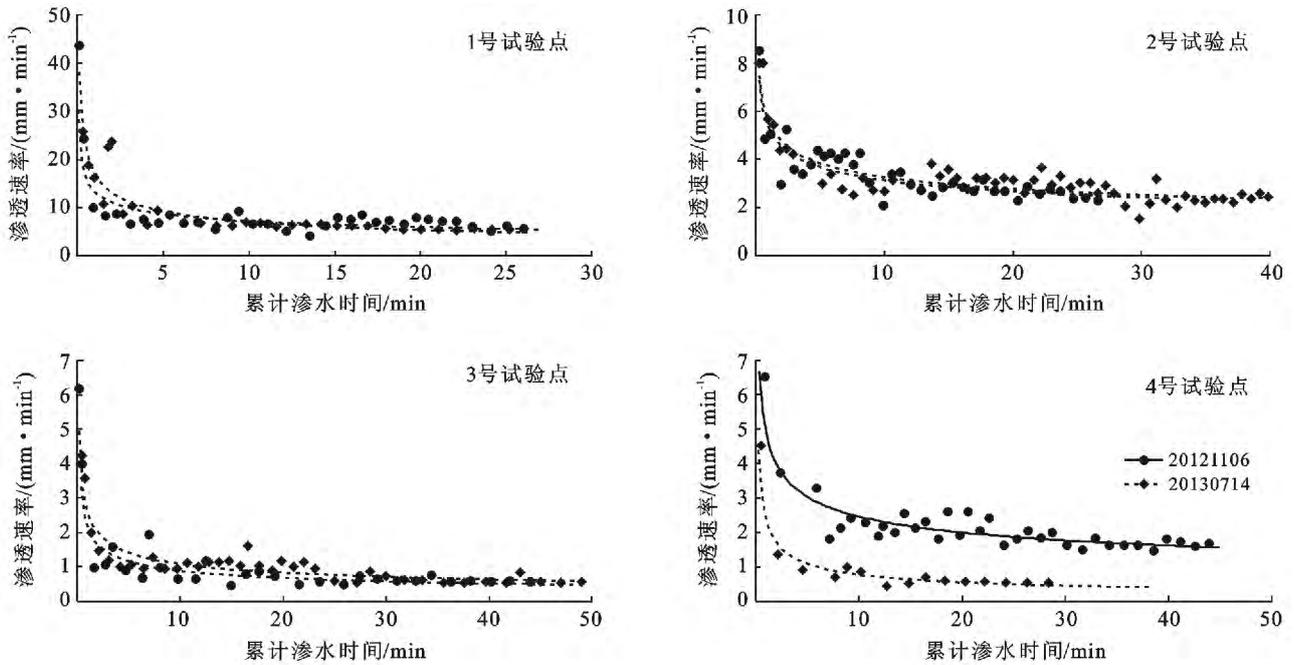


图 3 莲塘岗崩岗各试验点入渗速率与入渗时间的关系

Kostiakov 模型^[16]为幂函数回归分析经验模型,是根据实测的渗透数据进行统计分析后得出的。该模型简便,应用广泛。研究^[10]表明,Kostiakov 模型能够较好地模拟崩积土体的水分入渗过程,其基本形式为

$$i(t) = at^n$$

式中: i ——渗透速率 (mm/min); t ——渗透时间 (min); a, n ——经验常数。

利用 Kostiakov 模型对渗透过程进行拟合,相关系数均达到极显著水平。莲塘岗崩岗土体渗透参数见表 2。其中参数 n 表示渗透速度随时间减小的程度,取决于湿润后土体结构的变化,湿润后膨胀、孔隙密闭的不透水土体, n 值较小。崩岗堆积土体拟合 n 值一般都大于 0.6,说明渗透过程以重力流占优势,土体结构稳定^[15]。

表 2 莲塘岗崩岗土体渗透参数

日期	编号	拟合方程	a	n	R^2	表土初始 含水率/%	初渗率/ (mm·min ⁻¹)	稳渗率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·min ⁻¹)	渗水量/ ml
2012 1106	1	$i = 13.395t^{-0.2712}$	18.379 5	0.728 8	0.621 1	10.31	10.01	5.68	6.96	3 200
	2	$i = 5.337 2t^{-0.230 4}$	6.935 0	0.769 6	0.717 9	19.07	4.50	2.34	3.15	1 480
	3	$i = 2.160 5t^{-0.382 7}$	3.499 9	0.617 3	0.754 1	16.04	1.69	0.59	0.75	580
	4	$i = 4.934 7t^{-0.300 9}$	7.058 6	0.699 1	0.752 0	20.94	4.75	1.68	1.99	1 540
2013 0714	1	$i = 17.235t^{-0.39}$	28.254 1	0.610 0	0.880 2	19.81	15.82	5.48	7.41	3 300
	2	$i = 5.580 3t^{-0.231 9}$	7.265 1	0.768 1	0.740 2	24.67	5.37	2.47	3.02	2 130
	3	$i = 2.604 3t^{-0.378 1}$	4.187 7	0.621 9	0.827 9	26.38	2.23	0.56	0.90	780
	4	$i = 2.415 5t^{-0.488 2}$	4.719 6	0.518 8	0.874 0	35.00	2.09	0.56	0.76	380

表 2 同时给出了土体表层初始含水率、初渗率、稳渗率等数据,其中初渗率的计算采用试验开始后最初 3 min 的平均入渗率,稳渗率则选用稳渗阶段试验结束前最后 3 组入渗率的平均值。根据 Poiseuille 定律,流体在细管中流动的平均速度与细管半径的平方成正比,故质地较粗的 1 号试验点的沟道堆积土体

导水率明显高于其它各试验点,渗透速率较大,稳渗率平均高达 5.58 mm/min。崩积锥上各点渗透速率亦有差异,2 号试验点渗透速率较快,平均稳渗率为 2.41 mm/min,3 号试验点渗透速率相对较慢,平均稳渗率为 0.58 mm/min,4 号试验点 2012 年 11 月 6 日初次试验时渗透速率较慢,2013 年 7 月 14 日重复

试验时渗透速率加快,两次平均稳渗率为 1.12 mm/min。一般来讲,崩积锥形成时间越久,紧实程度越高,渗透率越低。2 号试验点为中部崩积锥,两侧均有沟道下切形成的临空面,压实程度较差,因此渗透率较大。受前期降水影响,2013 年 7 月 14 日土体初始含水率比 2012 年 11 月 6 日土体表层初始含水率高(表 2)。一般而言,土体初始含水率越低,水分初渗率越快,但试验结果并非如此。究其原因,试验开始时,由于土体含水率较低,水分入渗较快,渗透速率变化较大,能否快速调节水头,达到所需恒定的水深深度并准确计时,成为减小误差的关键,由于整个过程均属手工操作,因此操作人员的熟练程度对初渗率

的测定具有较大影响。此外,以上现象也可能是由土壤不易浸润或土体表层结皮程度差异所致。

2.3 剖面水分特征

为了研究渗水试验对土体剖面含水率变化的影响,试验设计时增加了渗水前后 PR2/6 土壤剖面水分测定仪的联合测定,监测地表以下 100,200,300,400,600,1 000 mm 共 6 个层面的土体含水率的变化,表层土体初始含水率采样后在实验室用烘干法测定。渗水试验后,由于表层土体有积水,可以认为此时表土层处于饱水状态,其体积含水率近似等于总孔隙度。渗水试验前后土体剖面含水率分布状况如图 4 所示。

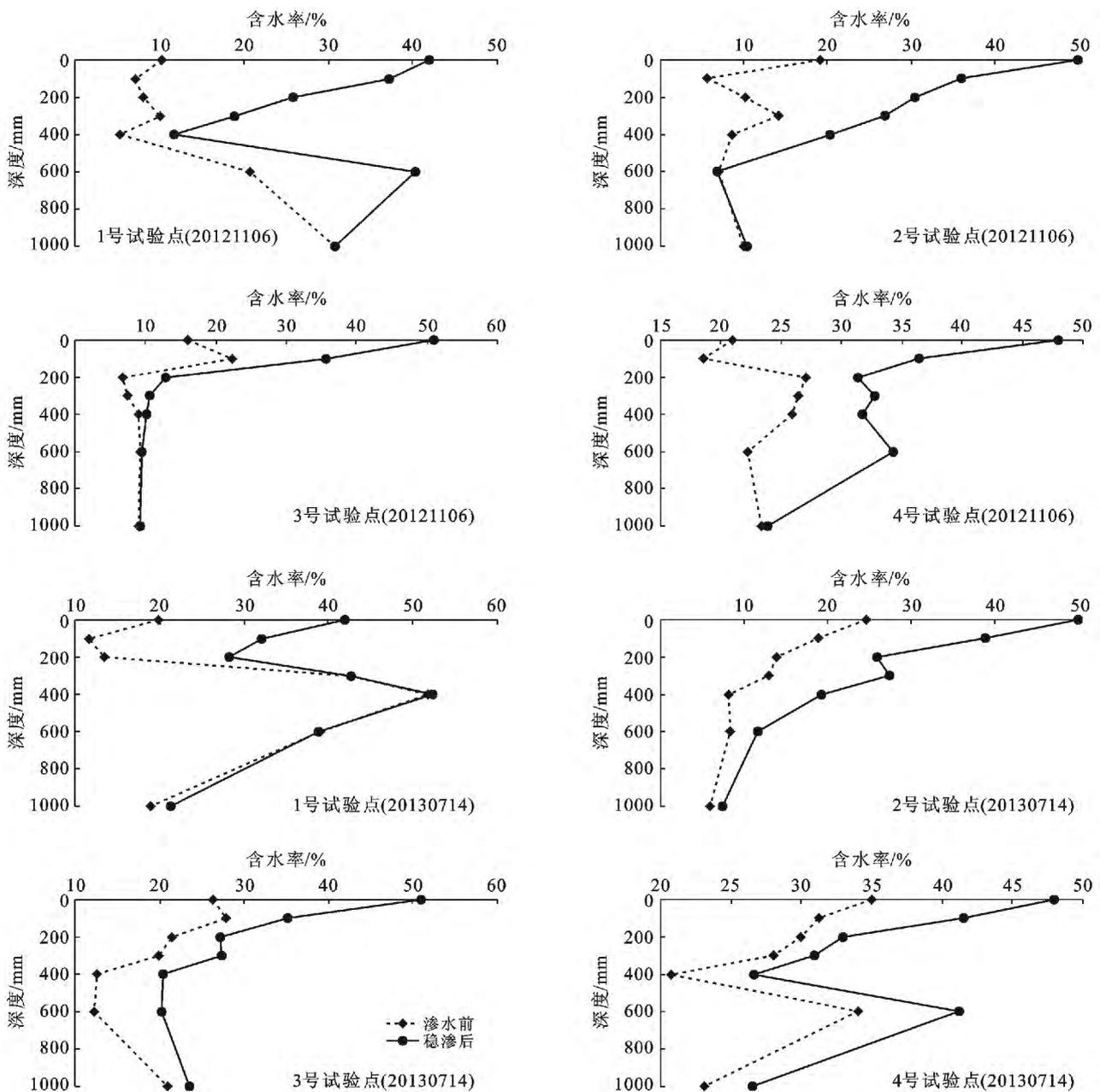


图 4 莲塘岗崩岗各试验点土体剖面水分变化

由于 2013 年 7 月 14 日渗水试验前 24 h 有 13.5 mm 的降雨,故其测定的表层土体初始含水率较 2012 年 11 月 6 日的渗水试验测定结果平均高出 9.88%。两次渗水试验结果表明,除位于主沟沟道的 1 号试验点外,其余位于崩积锥上的 2—4 号试验点,共同显示出一些规律性特征:(1)无论是渗水试验前还是渗水试验后,土体剖面含水率自上而下呈递减趋势,渗水试验前土体剖面含水量呈波动递减,渗水试验后土体剖面含水量则急剧递减。(2)渗水试验后,土体剖面含水率明显增大,表层土体达到饱水状态,平均含水率高达 50%,比渗水试验前的平均含水率高出约 26%,但随着深度的加大,含水量增大的趋势减缓。(3)渗水试验过程中,土体剖面含水量不断增大,同时不断向下和向四周浸润。影响湿润锋深度的因素较多,不仅与土体结构和颗粒组成有关,也与土体初始含水量有关,还与降雨强度与降雨总量有关。渗水试验中达到稳渗状态后,湿润锋下移速度较慢,如果渗水试验继续进行,灌注的水主要以横向扩展的方式向四周缓慢浸润,以增大周围土体的含水量。初试时 2—3 号试验点湿润锋深度为 600 mm,4 号试验点湿润锋深度为 1 000 mm。重试时由于有前期降雨的影响,2—4 号试验点湿润锋深度均在 1 000 mm 以上。湿润锋深度意味着降雨可能导致的崩积锥最大失稳深度。由此可以认为,莲塘岗崩岗崩积锥土体的最大失稳深度至少为 600~1 000 mm,甚至可以达到 1 000 mm 以上。

土体的非均质性对水分下渗过程中土体剖面水分的分布特征具有一定影响。理论上,均质土体渗透过程自上而下可分为饱和区、过渡区、传导区以及浸润区,含水率依次降低^[15]。莲塘岗崩岗堆积土体剖面含水率分布受土体非均质性的影响,自上而下呈波动式折线下降,波动变化尤以 1 号试验点最为明显(图 4)。1 号试验点位于崩岗崩口以外海拔高度 100 m 的主沟沟道沟头部位。旱季初试和雨季重试的剖面水分曲线都有最小和最大含水率两个明显拐点,旱季的最小含水率在地下 400 mm 的深度,最大含水率在地下 600 mm 的深度,表明地下 400~600 mm 含水量呈逆向增加,是地下富含水层;雨季的最小含水率出现在地下 200 mm 的深度,最大含水率出现在地下 400 mm 的深度,表明地下 200~400 mm 这一带是富含水层;相对于旱季,雨季这一地下富含水层向上移动了 200 mm。地下富含水层的上下变化,主要与旱季和雨季的交替直接相关,也暗示着崩岗底部可能存有季节变动的含水层。现场考察调研发现,崩岗主沟沟道平时没有常流水,只在雨季降雨期间有短暂的泥

砂流产生^[17],似乎从另一侧面印证了崩岗流域的集水一部分由地表径流——泥砂流带走,另一部分则渗入地下,以富含水带的形式储存。

崩积锥土体的非均质性在降雨入渗过中具有阻渗作用,层面交界处可形成滞水层。前期降水的影响可使细质土层之上的粗质土体形成潜水面,导致下渗过程产生内排水。粗质土体中大孔隙较多,饱和导水率大,水分在斜面产生的重力梯度作用下可发生横向流动,形成地下潜流。当崩积锥被崩岗内部的沟道切开时,坡脚形成临空剖面,为潜流提供了流出通道,是崩积锥侵蚀破坏最为剧烈的部位。潜蚀伴随潜流过程同时发生,可将土层中的细粒物质带出,降低了土体的结构性以及液限和塑限,产生软弱面,造成崩积锥滑塌。因此,崩积锥是崩岗堆积土体渗透研究的重点,是决定崩岗侵蚀产流和产沙的关键要素。

3 结论

(1) 莲塘岗崩岗堆积土体水分入渗速率与时间呈负指数幂函数关系,符合 Kositakov 模型,下渗过程以重力流占优势,土体结构稳定。沟道堆积土体水分入渗速率最快,平均稳渗率高达 5.58 mm/min;崩积锥土体水分入渗速率相对较慢,稳渗率变化于 0.58~2.41 mm/min 之间,3 个试验点平均稳渗率为 1.37 mm/min。

(2) 前期降雨可提高土体初始含水率,使含水率升高,湿润锋移动速度变快,影响深度更深。旱季初试时 2—3 号试验点湿润锋深度为 600 mm,4 号试验点湿润锋深度为 1 000 mm;雨季重试时由于有前期降雨,2—4 号试验点湿润锋深度均在 1 000 mm 以上。湿润锋深度表明降雨可能导致的崩积锥最大失稳深度。由此可以认为,莲塘岗崩岗崩积锥土体的最大失稳深度至少为 600~1 000 mm,甚至可达 1 000 mm 以上。

(3) 莲塘岗崩岗堆积土体剖面含水率分布受土体非均质性的影响,自上而下呈波动式折线下降,波动变化尤以 1 号试验点的沟道堆积土体最为明显,旱季和雨季监测结果的差异暗示着崩岗底部可能存有季节变动的含水层,而崩积锥土体的非均质性在渗透过程中对其稳定性具有一定影响,是渗透研究的重点。

致谢:参与本研究项目并对研究成果有贡献的人员有尚志海、黄德全、潘志新、闫罗彬、许叙源、余琛、连海清、黄琴情、唐波、贾瑶瑶、赵翊婷、汪佳、田春山、王召侠、范国雄、李闯、梁德伟、蔡文慧。统志于此,深表感谢!

(下转第 262 页)

- 129-134.
- [2] 郭维栋,马柱国,姚永红.近 50 a 中国北方土壤湿度的区域演变特征[J].地理学报,2003,58(S):83-90.
- [3] 孙凤华.东北气候变化与极端气象事件[M].北京:气象出版社,2008.
- [4] 廉毅,高枞亭,任红玲.20 世纪 90 年代中国东北地区荒漠化的发展与区域气候变化[J].气象学报,2001,59(6):730-736.
- [5] 张强,鞠笑生,李淑华.三种干旱指标的比较和新指标的确定[J].气象科技,1998,28(3):248-252.
- [6] 车少静,李春强,申双和.基于 SPI 的近 41 年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J].中国农业气象,2010,31(1):137-143.
- [7] 陈社明,卢文喜,罗建男.吉林西部气象干旱的多尺度分形特征[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(1):245-249.
- [8] 王媛媛,张勃.基于标准化降水指数的近 40 年陇东地区旱涝时空特征[J].自然资源学报,2012,27(12):2136-2142.
- [9] 曹文静,李强子,蒙继华.基于 GIS 的气温插值方法比较[J].中国农业气象,2007,28(S):175-178.
- [10] 黄丙湖,孙根云.等雨量线自动提取的分析与实现[J].计算机工程与设计,2010(15):3499-3502.
- [11] 史建国,严昌荣.气象干旱指数研究方法概述[J].中国农业气象,2007(S):191-195.
- [12] 王静爱.中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究[J].资源科学,1999,21(5):19-24.
- [13] 何学娟.东北地区农牧交错带的产生与可持续发展[J].大连民族学院学报,2008,10(2):136-141.
- [14] 刘贤赵,张安定,李嘉竹.地理学数学方法[M].北京:科学出版社,2009.
- [15] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. Drought Monitoring with Multiple Time Scales[C]. Boston:9th AMS Conference on Applied Climatology, 1993:179-184.
- [16] 汤国安,杨昕.地理信息系统空间分析试验教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [17] 何红艳,郭志华,肖文发.降水空间插值技术的研究进展[J].生态学杂志,2005,24(10):1187-1191.
- [18] Jeffrey S J, Carter J O, Moodie K B. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australia climate data[J]. Environ. Model. Softw., 2001,16(4):309-330.
- [19] 苏伟,郭日生.气候变化对中国的影响评估及其适应对策[M].北京:科学出版社,2012.
- [20] 李敏敏,延军平.华北段农牧交错带气候变化特征及其响应[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):100-106.
- [21] 谭学志,粟晓玲,邵东国.基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):224-229.
- [22] 车少静,李春强.基于标准化降水指数的石家庄干旱时空特征[J].气象科技,2010,38(1):65-70.
- [23] 韩晓敏,延军平.东北地区气候生产力对气候变化的时空响应[J].江西农业学报,2013,25(7):69-74.

(上接第 256 页)

[参 考 文 献]

- [1] 刘希林,连海清.崩岗侵蚀地貌分布的海拔高程与坡向选择性[J].水土保持通报,2011,31(4):32-36.
- [2] 张淑光,钟朝章.广东省崩岗形成机理与类型[J].水土保持通报,1990,10(3):8-15.
- [3] 丘世钧.红土坡地崩岗侵蚀过程与机理[J].水土保持通报,1994,14(6):31-40.
- [4] 吴志峰,王继增.华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J].水土保持学报,2000,14(2):31-35.
- [5] 任兵芳,丁树文,吴大国,等.鄂东南崩岗土体特性分析[J].人民长江,2013(3):93-96.
- [6] 林金石,黄炎和,张旭斌,等.南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析[J].水土保持学报,2012,26(3):53-57.
- [7] 卢冬,胡耀国,彭四清,等.应用浅层地温测量法分析崩岗侵蚀与地下水分布关系[J].生态环境学报,2011,20(2):208-216.
- [8] 张大林,刘希林.应用三维激光扫描监测崩岗侵蚀地貌变化:以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J].热带地理,2014,34(2):133-140.
- [9] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等.崩岗土体的渗透性能机理研究[J].水土保持学报,2013,27(2):53-56.
- [10] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J].水土保持学报,2013,27(3):49-54.
- [11] Miller D E, Gardner W H. Water infiltration into stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962,26(2):115-119.
- [12] 王文焰,张建丰,旺志荣,等.黄土中砂层对入渗特性的影响[J].岩土工程学报,1995,17(5):34-41.
- [13] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等.降雨条件下分层土壤入渗特性[J].水土保持学报,2012,26(5):217-219.
- [14] 冶运涛,伍靖伟,王兴奎.双套环测定土壤渗透系数数值模拟分析[J].灌溉排水学报,2007,26(3):14-18.
- [15] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [16] Kostikov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Trans, 1932, 6: 17-21.
- [17] 张大林,刘希林.崩岗泥砂流粒度特性及流体类型分析:以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J].地球科学进展,2014,29(7):810-818.