

# 崩岗不同土层渗透差异及其影响因素研究

张 燕, 黄炎和, 林金石, 葛宏力, 蒋芳市, 朱高立, 林超鹏

(福建农林大学 资源与环境学院, 福州 350002)

**摘 要:**崩岗不同土层的水分渗透性能对其土壤侵蚀特征具有重要影响。研究采用“环刀法”对崩壁垂直剖面 22 个不同深度土层的渗透特性进行了研究。结果表明:崩岗垂直剖面的渗透特性存在较大差异,红土层的渗透性能总体上优于砂土层和碎屑层,表层 0.1 m 以下存在一层厚度约 1 m 的弱透水层。对不同土层影响渗透的因子进行回归分析可知,弱透水层影响渗透的主要因子为容重和机械组成,砂土层影响渗透的主要因子为黏粒含量,碎屑层影响渗透的因子主要为机械组成。

**关键词:**崩岗; 渗透; 垂直剖面; 弱透水层

**中图分类号:**S157.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)03-0037-04

## Study on Permeability Discrepancy and Influence Factors of Different Soil Layers in Collapsing Hill

ZHANG Yan, HUANG Yan-he, LIN Jin-shi, GE Hong-li, JIANG Fang-shi, ZHU Gao-li, LIN Chao-peng

(College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Soil erosion is influenced by permeability of different soil layers in collapsing hill. In this study, 22 soil samples in different layers were collected, and the permeability of each layer was measured by the metal cylinder method. Results showed that: there were large differences of permeability in various soil layers, red soil layer had a higher permeability than the other two soil layers, There is a relatively impermeable layer about 0.1 meter below the soil surface, and its thickness is about 1 meter. Stepwise regression was used to analyze influence factors on permeability of different soil layers. The main influence factors are bulk density and soil mechanical composition for relatively impermeable layer, and the factors for sandy soil layer and debris layer were clay contents and soil mechanical composition, respectively.

**Key words:** collapsing hill; permeability; vertical soil profile; relatively impermeable layer

崩岗是山坡土石体受破坏而发生崩塌和受冲刷的侵蚀现象<sup>[1]</sup>,尤其在南方花岗岩地区发育十分普遍<sup>[2-3]</sup>。崩壁是崩岗的重要组成部分,是土体崩塌后形成的垂直陡壁,从上到下依次分为红土层、砂土层、碎屑层和球状风化层<sup>[4]</sup>,各土层在岩土特性、抗蚀、抗冲性能等方面存在较大差异<sup>[5]</sup>。吴志峰等<sup>[6]</sup>研究表明华南花岗岩风化壳不同层次岩土特性差异对崩岗的形成和发育具有重要的影响。诱发崩岗发生的因素很多<sup>[7-8]</sup>,但其内因都是在降雨作用下,崩壁土体受径流冲刷和土体吸水失稳造成的。而渗透决定了径流的多寡和水分在崩岗剖面的分布及其再分配,因此,十分有必要对崩壁不同土层的水分渗透特性进

行研究。李思平<sup>[5]</sup>认为,红土层透水性差易被径流冲刷,且其吸水保水能力强容易增重崩塌,对崩岗的发生发展起着决定性的作用。魏多落<sup>[9]</sup>、林敬兰等<sup>[10]</sup>研究表明,红土层的渗透性能要好于砂土层和碎屑层,红土层的累计入渗量要远大于砂土层和碎屑层。王维勇<sup>[11]</sup>研究认为,崩岗剖面释水能力的强弱顺序为:母质层>淋溶层>淀积层。任兵芳等<sup>[12]</sup>对鄂东南崩岗土体特性研究表明,淋溶层渗透系数较大,淀积层渗透系数最小。

虽然已有研究开始关注崩岗不同土层的水分渗透特性,但都是基于典型层次进行分析,对过渡层的土壤渗透特性、弱透水层的位置及深度等崩岗水分研

收稿日期:2014-01-08

修回日期:2014-02-20

资助项目:国家自然科学基金资助项目(41001169,40671113);国家科技支撑项目(2014BAD15B03)

作者简介:张燕(1987—),女,河南信阳人,硕士生,研究方向:土壤侵蚀与治理。E-mail:zhangyan3130@126.com

通信作者:黄炎和(1962—),男,广东饶平人,博士,教授,研究方向:土壤侵蚀与治理。E-mail:yanhehuang@163.com

究的关键问题尚未解决,而这些层次的渗透特性对于研究崩岗发生具有重要意义。因此,为了深入研究崩壁不同深度土体渗透特征,本研究对崩壁垂直剖面不同土层进行密集采样,分析崩岗土体的渗透过程,并对垂直剖面的渗透特性及对影响不同土层渗透的主要因素进行研究,将为崩岗侵蚀发生机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省安溪县,该县崩岗数量 12 828 个,占全省崩岗总数的 49.28%,是南方崩岗侵蚀最为严重的区域之一,具有较好的代表性。研究区属于

表 1 崩岗土体采样点信息说明

层次	采样层数	采样说明
红土层	9	0~1.8 m,每隔 0.3 m 设置一个采样点,在 0.1 m 处、0.2 m 处、0.4 m 处各增加一个采样点,共取 9 个采样点
砂土层	8	1.8~5.8 m,每隔 0.5 m 设置一个采样点,取 8 个采样点
碎屑层	5	5.8~10.8 m,每隔 1 m 设置一个采样点,取 5 个采样点

1.3 土体渗透特性的测定

采用“环刀法”测定土样渗透特性<sup>[13]</sup>,将环刀采回的土样进行从上到下预饱和处理。为提高实验精确度,在环刀下面放置电子天平,下渗水量直接用电子天平称重,通过重量与体积换算得到下渗水的体积。从滴下第一滴水开始计时,前两分钟每隔 30 s 记一次重量,然后每隔 1 min 记录一次,到 30 min 后每隔 2 min 记录一次,60 min 后每隔 5 min 记录一次,至渗透达到稳定入渗为止。

1.4 土壤理化性质的测定和相关指标的确定方法

(1) 土壤理化性质的测定方法。土壤容重和孔隙度采用环刀法<sup>[14]</sup>;有机质采用重铬酸钾消煮法<sup>[14]</sup>,>0.25 mm 水稳性团聚体采用干筛法和湿筛法<sup>[15]</sup>。土壤质地分析方法:>0.25 mm 粒径的土粒采用筛分法<sup>[14]</sup>,<0.25 mm 粒径的土粒采用粒度仪分析,设备为丹东百特仪器有限公司生产的 BT-9300ST 激光粒度分布仪。

(2) 水稳系数  $K=a/b$   
式中: $a$ ——大于 0.25 mm 水稳性团聚体的百分含量; $b$ ——大于 0.25 mm 干筛团聚体的百分含量。

(3) 分形维数<sup>[16]</sup>  
$$D=3-\lg\left[\frac{W(\delta\leq\overline{d_i})}{W_0}\right]/\lg\frac{\overline{d_i}}{d_{\max}}$$
式中: $\overline{d_i}$ ——两筛分粒级  $d_i$  与  $d_{i+1}$  间粒径的平均值, ( $d_i>d_{i+1},i=1,2,\cdots$ ); $d_{\max}$ ——最大粒径土粒的平均值(mm); $W(\delta\leq d_i)$ ——小于  $d_i$  的累积土粒重量;

亚热带季风气候区,年均温 16~22℃,年均降雨量 1 600~2 000 mm,降雨的季节分配不均匀,每年的 3—6 月份为梅雨季节,7—9 月份受台风影响大,暴雨增多。本研究选取安溪县龙门镇洋坑村活动型崩岗为研究对象<sup>[10]</sup>,该崩岗从上到下红土层、砂土层和碎屑层发育完整,以长石类矿物为主,其次是石英和云母,土体属于花岗岩类,整个崩壁高度为 32.5 m。

1.2 野外选点及土壤样品的采集

在典型崩岗上选取近 11 m 的崩壁进行采样,共采集 22 层土样进行相关实验。由于红土层渗透过程较为复杂<sup>[8-10]</sup>,所以对红土层加密取样,砂土层和碎屑层采取等间距取样,具体采样方法见表 1。土样采集和分析都在 2013 年 8 月进行。

$W_0$ ——土壤各粒级重量的总和。

2 结果与分析

2.1 崩岗土体渗透特性

2.1.1 崩岗土体不同土层渗透稳定过程 渗透是水分在重力作用下的垂直运移,土壤渗透特性是影响其水分运动和抗蚀性能的重要指标。图 1—3 分别是红土层、砂土层和碎屑层土体的渗透速率和时间的关系趋势图,从图中可以看出,除表层 0.1 m 土层外,崩岗土体整体渗透性能较差。

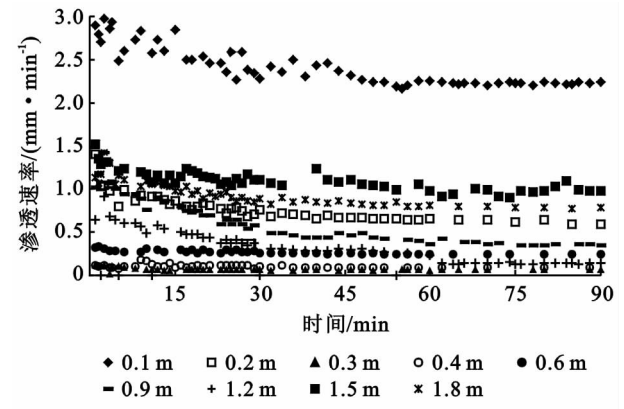


图 1 红土层渗透速率随时间变化

从图中可以看出,红土层(0~1.8 m)渗透速率波动相对较大,在 10~15 min 渗透速率相对稳定,其次为碎屑层(6.8~10.8 m),在 5~10 min 渗透速率相对稳定,砂土层的渗透过程最为平缓,且红土层的稳定渗透速率要大于砂土层和碎屑层。袁东海等<sup>[17]</sup>对

鄂东南红壤水分扩散和入渗的研究也表明表土层的水分入渗要大于心土层和底土层,这说明红土层的蓄水空间要大于砂土层和碎屑层,也更容易吸水达到重量极限而产生崩塌。

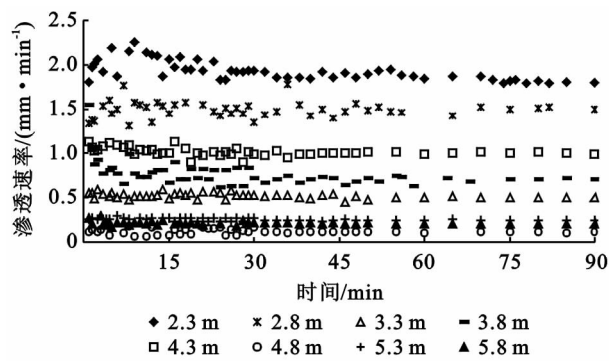


图 2 砂土层渗透速率随时间变化

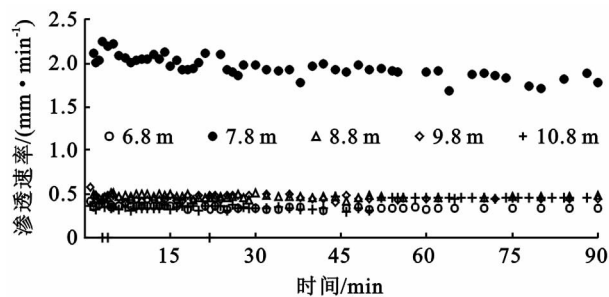


图 3 碎屑层渗透速率随时间变化

**2.1.2 崩岗垂直剖面饱和导水率  $K_s$  变化规律** 饱和导水率  $K_s$  是土壤孔隙全部充满水,在单位梯度作用下,垂直于水流方向的单位面积土壤的水流量<sup>[18]</sup>,饱和导水率  $K_s$  在数值上等同于土壤在饱和状态下的稳定渗透系数。崩壁是崩岗的重要组成部分,其饱和导水率  $K_s$  变化直接影响崩壁的崩塌。图 4 是崩壁垂直剖面饱和导水率  $K_s$  随土层深度的变化特征,可以看出,表层 0.1 m 土层  $K_s$  较大,为 1.2 mm/min,  $K_s$  在 0.2 m 处陡然降低到 0.43 mm/min,降低了 64.17%,在 0.3~1.2 m 土层,  $K_s$  的值非常低,基本在 0.10 mm/min 上下,到砂土层  $K_s$  稍微增大,但明显小于红土 0.1 m 处的饱和导水率,到碎屑层基本维持在 0.5 mm/min 以下。从整个剖面来看个别点稍微异常,如 7.8 m 处  $K_s$  达到 0.76 mm/min,可能是因为大颗粒含量较大,石砾和砂砾含量达到了 87.13%,也可能是个别土层微节理的存在,导致其饱和导水率偏大。

从崩壁土体饱和导水率  $K_s$  的变化情况可以得出,表土层 0.1 m 处入渗性能较好,但在 0.1 m 表层以下,尤其是在 20—40 cm 土层,土体渗透性能较差,饱和导水率  $K_s$  维持在较低水平,所以这一层为弱透水层。弱透水层是指透水性相当差的岩层,没有具体的量化指标,是一个相对的概念<sup>[19]</sup>。水分进入弱透

水层,很难向下入渗。弱透水层的存在可能是因为土体容重较大,水分难以下渗,加之弱透水层上部的土体在雨滴打击下,致使土体分散,细颗粒随水流向下入渗,堵塞水分进入土壤的通道。弱透水层向下,土体入渗能力增强,然后降低,最后逐渐趋于平缓。

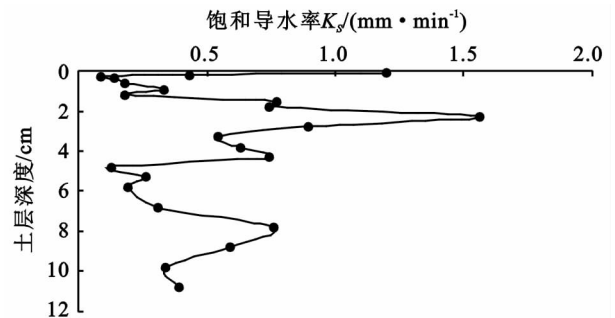


图 4 饱和导水率  $K_s$  随土层深度的变化

**2.1.3 崩岗垂直剖面饱和导水率  $K_s$  对崩壁崩塌的影响** 在一定的降雨入渗条件下,表层水分渗透性能优于弱透水层,导致表层土体不断遭到冲刷剥蚀,随着入渗时间的延长,水分由不透水层向下入渗进入砂土层,由于砂土层的饱和导水率  $K_s$  大于弱透水层和碎屑层,所以水分由砂土层向碎屑层纵向运移受阻,开始侧向运移,产生侧向的应力,这样在弱透水层和碎屑层之间,形成了潜在的崩塌体。一旦侧向应力大于土体的抗剪强度,潜在崩塌体就会沿着断裂面产生崩塌。此时,崩塌体上部的弱透水层形成临空面,在持续小型降雨条件下,临空面不断吸水增重,导致土体质量增大,如果超过土体承载极限,就会发生坍塌。

林敬兰等<sup>[10]</sup>在研究崩岗的渗透特性时指出,砂土层的位置可能存在弱透水层,阮伏水<sup>[20]</sup>在崩岗沟侵蚀机理探讨时认为抗侵蚀能力较弱的砂土层是导致花岗岩崩岗侵蚀特别严重的重要原因,通过对崩壁垂直剖面密集采样,得出崩岗的发生发展是因为弱透水层和软弱砂土层存在的缘故。在表层 0.1 m 以下的红土层存在弱透水层,弱透水层的存在使水分向下运移的通道被堵,在大暴雨情况下,降雨量大于水分渗透速率,地表径流增大,表土很容易被冲刷,崩岗侵蚀的概率增大。加上软弱砂土层的存在,在梅雨期间夹杂高强度的暴雨,更容易发生崩岗侵蚀危害。

## 2.2 崩壁土体渗透影响因素研究

渗透是水分进入土壤的初级过程,土壤理化性质对其具有重要影响。选取容重、有机质含量、分形维数、 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量、水稳系数、石砾含量、砂砾含量、粉粒含量、黏粒含量、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度为指标对渗透影响因素进行研究,各指标土体性质的统计特征值见表 2。

表 2 崩壁土体性质统计特征值

统计量 影响因素	最大值	最小值	平均值	标准差	变异 系数
容重	1.506	1.302	1.405	0.061	0.043
有机质	6.541	0.426	2.379	1.520	0.639
分形维数	2.872	2.396	2.600	0.121	0.046
>0.25 mm 水稳性团聚体	0.289	0.033	0.165	0.097	0.591
水稳系数	0.310	0.041	0.187	0.102	0.546
石砾含量	57.173	12.788	23.419	6.208	0.265
砂砾含量	57.173	22.457	43.505	9.200	0.211
粉粒含量	42.671	12.788	27.867	8.937	0.321
黏粒含量	11.342	0.555	3.437	3.129	0.910
总孔隙度	50.978	44.250	47.579	2.000	0.042
毛管孔隙度	35.515	23.766	29.873	3.716	0.124
非毛管孔隙度	22.381	13.561	17.706	2.783	0.157

注:砂土层 2.3~5.8 m、碎屑层 6.8~10.8 m 土层>0.25 mm 水稳性团聚体为 0,表中>0.25 mm 水稳性团聚体和水稳系数的各项统计指标为红土层 0~1.8 m 统计值。

将容重、有机质、分形维数、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、水稳系数、石砾、砂砾、粉粒、黏粒、总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度分别设为  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$ , 稳定渗透系数为  $Y$ , 考虑到红土层弱透水层占整个红土层层次的 2/3 和其特殊性, 在分析不同土层渗透影响因素时, 红土层分析弱透水层 0.2~1.2 m、砂土层 2.3~5.8 m、碎屑层 6.8~10.8 m, 通过对不同土壤指标因子和稳定渗透系数进行逐步回归分析, 定量研究各因子对崩岗渗透性能影响的相对重要性。进行回归方程分析时, 采用回归系数的调整系数  $R^2_{adj}$  和回归方程每增加一个因素时回归系数的改变量  $R^2_C$  为判定各因子对渗透性能影响程度的指标。通过对弱透水层、砂土层和碎屑层渗透影响因素和饱和导水率  $K_s$  进行回归分析, 三个层次的回归模型分别为:

$$Y_{\text{弱透水层}} = 4.854X_1 + 1.095X_3 + 0.12X_{12} - 9.689$$
$$Y_{\text{砂土层}} = 0.777X_9 - 0.294$$
$$Y_{\text{碎屑层}} = 0.144X_1 - 19.097X_3 - 0.037X_9 + 1.808$$

表 4 是各因子进入回归方程时,  $R^2_{adj}$  和  $R^2_C$  的统计值。可以看出弱透水层最先进入回归方程的是容重, 能解释弱透水层渗透影响因素的 68.9%, 然后是分形维数和非毛管孔隙度, 分别解释了影响因素的 28.6% 和 2.4%。说明弱透水层的存在可能是因为容重较大, 土壤质地比较紧实, 导致水分下渗的通道被堵塞。砂土层进入回归方程的因子是黏粒, 能解释该层渗透影响因素的 66.3%, 适当的黏粒含量有助于土壤团粒结构的形成, 团粒结构好的土壤, 相应的土壤孔隙增大, 水分运动的通道增加, 导水率提高, 渗透性能增加。而崩岗砂土层的黏粒含量较少, 有机质和团聚体

缺乏, 渗透性能较差。碎屑层进入回归方程的因子依次为分形维数、黏粒含量和容重, 而分形维数能解释该入渗影响因素的 99.1%, 黏粒含量和容重只有 6.0%。分形维数反映了土壤质地情况, 和黏粒含量密切相关<sup>[21]</sup>, 崩岗碎屑层<sup>[22]</sup> 土壤花岗岩原生构造, 以石砾和砂砾含量为主, 抗冲、抗蚀性能非常低。

表 3 不同土层渗透影响因素回归方程判定系数输出结果

土体层次	影响因素	$R^2_{adj}$	$R^2_C$
弱透水层 0.1~1.2 m	容重	0.689	0.689
	分形维数	0.976	0.286
	非毛管孔隙度	0.999	0.024
砂土层 2.3~5.8 m	黏粒	0.663	0.663
	分形维数	0.991	0.996
碎屑层 6.8~10.8 m	黏粒	1.000	0.006
	容重	1.000	0

3 结 论

对崩壁土体的渗透性能研究表明: 总体上崩壁土体渗透性能较差, 且红土层渗透性能优于砂土层和碎屑层, 在表层 0.1 m 以下存在弱透水层, 弱透水层的厚度大约 1 m。分别对影响弱透水层、砂土层和碎屑层渗透的主要因子进行回归分析, 三个土层主要渗透影响因子不同, 且同一因子对不同土层的影响程度也存在差异。影响弱透水层渗透的主要因子是容重和土壤颗粒分布情况, 二者能解释拟合回归方程的 97.6%, 影响砂土层渗透的主要因子是黏粒含量, 能解释拟合回归方程的 66.3%, 影响碎屑层渗透的主要因子是颗粒分布情况, 能解释拟合回归方程的 99.4%。

本研究选取完整的崩壁垂直剖面对不同土层的渗透特征和影响渗透的因素进行研究, 为进一步认识崩壁土体的水分特征提供了一定参考。但在崩岗剖面水分的分布和运移规律方面, 有待进一步探讨。

参考文献:

[1]

唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 80-82.

[2]

王礼先, 孙保平, 余新晓, 等. 中国水利百科全书: 水土保持分册[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 48-49.

[3]

梁音等. 南方红壤区崩岗侵蚀的特点与治理[J]. 中国水土保持, 2009(1): 31-34.

[4]

曾昭璇, 黄少敏. 中国自然地理[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 139-150.

[5]

李思平. 崩岗形成的岩土特性及其防治对策的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 29-35.

[6]

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.

风沙天气较多。第四阶段:1985—2010年,风沙作用较弱,浮尘天气出现频繁,相对来说风沙天气出现较少,风沙天气与浮尘天气交替出现。

## 5 结论

(1) 塔克拉玛干沙漠南缘地区的红柳沙包沙物质主要来源于沙漠腹地,沙物质组成以细沙为主。沙物质的粒度参数、粒级分布、粒度概率累计特征等都具有较强的相似性。

(2) 沙物质粒度变化序列表明,1801年以来该地区的气候从干旱逐步转向湿润。

(3) 塔南地区的风沙环境变化阶段包括:1801—1872年,风沙作用较弱;1872—1902年,风沙作用明显变强;1903—1984年,风沙作用强度一般;1985—2010年,风沙作用明显回落。

### 参考文献:

- [1] 夏训诚,赵元杰,王富葆,等.红柳沙包的层状特征及其可能的年代学意义[J].科学通报,2004,49(13):1337-1338.
- [2] 夏训诚,赵元杰,王富葆,等.罗布泊地区红柳沙包年层的环境意义探讨[J].科学通报,2005,25(20):2176-2177.
- [3] 成都地质学院陕北队.沉积岩(物)粒度分析及其应用[M].北京:地质出版社,1976.
- [4] 吉启慧.粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应用[J].中国沙漠,1996,16(2):173-179.
- [5] 赵元杰,宋艳,夏训诚,等.近150年来罗布泊红柳沙包沉积纹层沙物质粒度特征[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):103-107.
- [6] 张立运,夏阳.塔克拉玛干沙漠南缘生态环境的特点及治理问题[J].干旱区资源与环境,1994,8(1):72-79.
- [7] 宋艳.罗布泊红柳沙包沙物质粒度特征及其环境信息记录[D].石家庄:河北师范大学,2008.
- [8] 赵元杰,夏训诚.新疆罗布泊红柳沙包与环境研究[M].北京:科学出版社,2011.
- [9] Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment[J]. Catena, 1978, 5(1): 1-8.
- [10] 吴正.风沙地貌学[M].北京:科学出版社,1987.
- [11] 刘源鑫,焦峰.黄土高原丘陵区景观特征与景观指数粒度效应研究[J].水土保持研究,2013,20(3):26-27.
- [12] 霍文,何清,杨兴华,等.中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究[J].水土保持研究,2011,18(6):7-11.
- [13] 朱震达,陈治平,吴正,等.塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M].北京:科学出版社,1981.
- [14] 穆桂金.塔克拉玛干沙漠的形成时代及发展过程[J].干旱区地理,1994,17(3):1-9.
- [15] 王宵月.昌黎黄金海岸沙丘沉积特征及形成演变[J].地理学与国土研究,1996,12(3):60-64.
- [16] 陈渭南,董治宝,杨佐涛,等.塔克拉玛干沙漠的起沙风速[J].地理学报,1995,50(4):360-367.
- [17] 殷志强,秦小光,吴金水,等.中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J].沉积学报,2009,27(2):343-351.
- [18] 朱筱敏.沉积岩石学[M].北京:石油工业出版社,2008.
- [19] 孙增英.利用红柳落叶  $\delta^{13}\text{C}$  揭示塔克拉玛干沙漠南缘地区气候变化[D].石家庄:河北师范大学,2013.
- [20] 李玄姝,常春平.承德沙尘天气空间分布特征、成因及防治措施[J].水土保持研究,2012,19(4):271-273.
- [7] 张萍,查轩.崩岗侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2007,14(1):170-176.
- [8] 林敬兰,黄炎和.崩岗侵蚀的成因机理研究与问题[J].水土保持研究,2010,17(2):41-44.
- [9] 魏多落.南方花岗岩区崩岗剖面特征研究[D].福州:福建农林大学,2009.
- [10] 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.
- [11] 王维勇.鄂东南花岗岩崩岗区土壤水分特征研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [12] 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,2013,44(3):93-96.
- [13] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [15] 依艳丽.土壤物理研究法[M].北京:北京大学出版社,2009.
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [17] 袁东海,陈明亮.红壤水分扩散率和入渗性能的研究[J].安徽农业大学学报,1994,21(2):161-166.
- [18] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [19] 肖长来,梁秀娟,王彪.水文地质学[M].北京:清华大学出版社,2010.
- [20] 阮伏水.福建崩岗沟侵蚀机理探讨[J].福建师范大学学报:自然科学版,1999:24-31.
- [21] Perfect E, Kenst A B, Diaz-Zorita M, et al. Fractal analysis of soil water desorption data collected on disturbed samples with water activity meters[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1177-1184.
- [22] 李思平.广东省崩岗侵蚀规律和防治的研究[J].自然灾害学报,1992,1(3):68-74.

(上接第40页)