

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.004

坡度对扰动黄棕壤土壤侵蚀的影响

李 叶¹, 吴玉柏^{1,2}, 俞双恩¹, 金 秋², 黄明逸¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要: 通过人工模拟降雨试验, 研究坡度对扰动黄棕壤的土壤侵蚀规律。结果表明: 在坡度 20° 以内, 随着坡度的增大, 入渗量逐渐减少, 径流量逐渐增大; 坡度在 $20^\circ \sim 26.5^\circ$ 范围时, 入渗量和径流量趋于平稳。土壤侵蚀量与径流量基本同步, 在一定坡度内随着坡度的增大, 侵蚀量增大; 当降雨强度为 40 mm/h 和 60 mm/h 时, 供试土壤侵蚀的临界坡度在 $20^\circ \sim 26.5^\circ$ 之间; 当降雨强度增加至 80 mm/h 时, 临界坡度大于 26.5° 。在试验坡度范围内, 径流量、侵蚀量与降雨量均存在显著的线性关系。

关键词: 模拟降雨; 扰动条件; 黄棕壤; 临界坡度; 土壤侵蚀

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)01-0020-05

Influence of slope on disturbed yellow-brown soil erosion

LI Ye¹, WU Yubai^{1,2}, YU Shuang'en¹, JIN Qiu², HUANG Mingyi¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: In this study, the influence of the slope on disturbed yellow-brown soil erosion was investigated through a simulated rainfall experiment. The experimental results show that, when the slope is 20° or less, the infiltration volume decreases with the increase of the slope and the runoff increases with the increase of the slope. The infiltration volume and runoff level off when the slope is between 20° and 26.5° . The soil erosion amount is basically synchronous with the runoff and increases with the increase of the slope within a certain range of the slope. When the rainfall intensity is 40 mm/h or 60 mm/h , the threshold slope of the tested soil erosion is between 20° and 26.5° . The threshold slope is greater than 26.5° when the rainfall intensity increases to 80 mm/h . There are significant linear relationships between the runoff, erosion amount, and rainfall within the range of the test slope.

Key words: simulated rainfall; disturbed condition; yellow-brown soil; threshold slope; soil erosion

随着我国城市化的发展,大量的建设项目在施工建设和生产运行过程中占压、扰动和破坏了土地及植被,造成严重的土壤侵蚀,致使土壤侵蚀防治形势日益严峻。通常来说,土壤侵蚀是社会经济因素和自然因素共同作用的结果。社会经济因素主要是人们为追求利益的最大化,不合理地利用土地、破坏植被;而影响土壤侵蚀的自然因素有气候、土壤、地形、地质、植被等^[1-2]。众多因素中,坡度是对土壤侵蚀量影响最大的指标^[3],国内外对坡度与径流和土壤侵蚀的关系进行了大量研究^[4-9]。然而,目前国内针对建设项目扰动土壤侵蚀规律的研究不多。扰动土的堆积方式与自然坡面不同,可以人为调控,从而降低其侵蚀强度,达到有效减少土壤侵蚀的目的。因此,研究人工堆土的侵蚀规律,特别是坡度对降雨侵蚀的影响,对指导施工过程中堆土方式及进行堆土防护具有重要意义。本文以江苏省宁镇丘陵山区黄棕壤为例,采用人工模拟降雨方法研究不同坡度下的扰动土侵蚀规律。

收稿日期: 2015-10-15

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(200801025);江苏省水利科技重点项目(201402)

作者简介: 李叶(1991—),男,江西新余人,硕士研究生,主要从事水土保持、水土资源规划研究。E-mail: jxxyliye@163.com

通信作者: 俞双恩,教授。seyu@hhu.edu.cn

1 研究方法

1.1 试验设计

试验在江苏省水利科学研究院人工模拟降雨大厅完成,降雨设备为降雨高度 6 m、有效降雨面积 30 m² 的下喷式人工降雨器,降雨均匀度在 85% 以上。试验土槽为移动式变坡钢槽,尺寸为 2 m×3 m×0.3 m。钢槽下部设有小孔,用来模拟水分下渗。坡度调节范围为 0~45°。根据施工工地堆土的堆放情况,设计 5°、10°、15°、20°、26.5°(1:2 坡度) 5 个坡度。试验设计的降雨量为 10 mm、20 mm、40 mm、60 mm,降雨强度分别为 40 mm/h、60 mm/h、80 mm/h,每个处理重复 2 次,取平均值进行计算和分析。

1.2 试验准备

试验土壤为宁镇丘陵山区黄棕壤,取自南京溧水,有机质质量分数为 1.88%,土壤各粒径质量分数:大于 0.05 mm 为 36.32%,0.01~0.05 mm 为 18.66%,0.001~0.01 mm 为 32.13%,小于 0.001 mm 为 12.89%。为最大限度地模拟工程堆土情况,把试验用的土壤在自然条件下风干,去除其中的树叶、石块等杂质。在钢槽底部铺 3 层细纱布,然后分层装土,装满后将表面整理平整,每层厚 5 cm,总厚度为 20 cm,逐层压实,尤其注意边壁处,以减少边壁效应对试验的影响,土壤密度控制在 1.35 g/cm³。每次试验的前一天下午将钢槽坡度调整为 10°,提前进行人工降雨,基本保证每次试验的下垫面条件一致,减少试验土槽的空间变异性,当坡面刚好产流时即停止降雨。每次降雨前在钢槽出口处放置水桶,以收集径流产物。

1.3 试验过程

降雨开始后,利用水桶采用体积法测定径流量。从坡面开始产流时每隔 2 min 采集 1 次径流泥沙样,每次采样体积为 200 mL。降雨结束后,测定总径流量和每一个径流泥沙样的含沙量,然后将径流产物充分搅匀,迅速取出 1 L 径流产物,用烘干法测量总的含沙量,根据总径流量计算出总侵蚀量。文中径流量均为地表径流,入渗量为降雨量与径流量之差。

2 试验结果及分析

2.1 坡度对入渗量和径流量的影响

为了直观地表达坡度对入渗量的影响,并减少土壤外界因素对试验的影响,以 60 mm 降雨量为研究对象,根据试验结果得出坡度与入渗量之间的关系(图 1),用于分析坡度对入渗量的影响。从图 1 可以看出:降雨量为 60 mm 时,40 mm/h、60 mm/h、80 mm/h 这 3 种雨强条件下,坡度为 5° 时对应的入渗量分别为 19.86 mm、16.04 mm、12.59 mm;坡度为 10° 时,对应的入渗量分别为 17.46 mm、14.45 mm、12.03 mm;坡度为 15° 时,对应的入渗量分别为 9.65 mm、7.24 mm、4.79 mm;坡度为 20° 时对应的入渗量分别为 7.18 mm、5.54 mm、3.96 mm;坡度为 26.5° 时,对应的入渗量分别为 9.51 mm、8.20 mm、6.73 mm。以上结果表明:在降雨量一定的情况下,当坡度小于 20° 时,入渗量随坡度的变化趋于一致,呈负相关;当坡度大于 20° 时,入渗量随坡度变化略有上升,但变化不明显。

产生这种现象的原因如下:(a) 当坡度小于 20° 时,随坡度的增加,坡面流速增加,径流在坡面上的停留时间较短,入渗时间亦短,累计入渗量减少。(b) 当坡度大于 20° 时,径流流速随坡度增加而增加,但承雨面积随之减小,二者相互抵消,导致入渗量随坡度变化不明

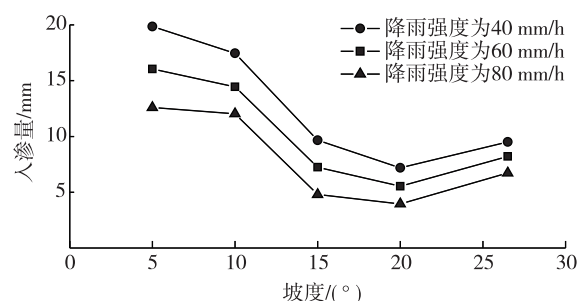


图1 坡度与入渗量的关系(降雨量 60 mm)

Fig. 1 Relationships between slope and infiltration volume with rainfall of 60 mm

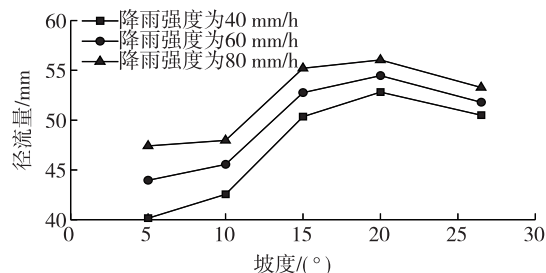


图2 坡度与径流量的关系(降雨量 60 mm)

Fig. 2 Relationships between slope and runoff with rainfall of 60 mm

显。同时,如图2所示,当坡度小于 20° 时,坡度增加则径流量增大,坡度在 $20^{\circ} \sim 26.5^{\circ}$ 范围时,随着坡度增大,径流量略有减少,但变化不明显。

坡度影响降雨入渗量和地表滞水能力,进而影响坡面的径流量,地表径流又是侵蚀的主要外营力之一^[10-11]。有学者认为坡度对土壤侵蚀的影响是通过影响土壤入渗而实现的。入渗量随坡度的增大而减小,坡度越大,土壤入渗量越小,径流量越大,因而土壤侵蚀量越大^[12]。因此,随着坡度的增大,径流量增大,入渗量减少,而当坡度大于临界值,径流量、入渗量变化不明显,与以往研究结论一致。

2.2 坡度与土壤侵蚀量的关系

以降雨强度 40 mm/h 为研究对象,分析坡度与土壤侵蚀量的关系。由图3可以看出,在降雨强度为 40 mm/h 时,不同降雨量产生的土壤侵蚀量随坡度的变化趋势基本一致,坡度小于 20° 时土壤侵蚀量均随坡度的增加而增加;坡度大于 20° 以后,随着坡度的增加,侵蚀量反而减小。进一步分析,在 40 mm/h 雨强、 $40 \sim 60\text{ mm}$ 的较大降雨量下:当坡度小于 15° 时侵蚀量随坡度增加而缓慢增加;当坡度由 15° 变为 20° 时,侵蚀量会迅速增加。 $10 \sim 20\text{ mm}$ 降雨量下,坡度在 20° 以内时,侵蚀量随坡度增加而缓慢增加。当坡度由 20° 变化到 26.5° 时,在 $10 \sim 60\text{ mm}$ 降雨下,侵蚀量没有增加,反而出现减小的趋势,4个降雨量对应的侵蚀量分别减小 19.88 g/m^2 、 15.50 g/m^2 、 185.64 g/m^2 、 142.46 g/m^2 。以上结果表明,扰动土在 40 mm/h 降雨强度下的坡度界限在 $20^{\circ} \sim 26.5^{\circ}$ 之间。

对坡度和土壤侵蚀量的关系进行回归分析,结果(表1)表明,降雨量为 10 mm 和 20 mm 时侵蚀量与坡度的相关性不显著,降雨量为 40 mm 时侵蚀量与坡度的相关性显著,当降雨量升至 60 mm 时侵蚀量与坡度的相关性极显著。由此可见,随着降雨量的增加,侵蚀量与坡度的相关性增大。降雨量较小时产生的径流量较小,土壤侵蚀量亦较小,外部因素对土壤侵蚀产生较大的影响;当降雨量较大时,外部因素对土壤侵蚀的影响则相对较小。

表1 土壤侵蚀量与坡度的回归分析结果

Table 1 Results of regression analysis for soil erosion amount and slope

降雨量/ mm	乘幂回归					指数回归				
	回归方程	R^2	F值	F检验	显著性	回归方程	R^2	F值	F检验	显著性
10	$y = 24.172x^{1.4904}$	0.7892	4.786	$F < F_{0.05}$	不显著	$y = 16.932e^{0.5944x}$	0.7873	8.655	$F < F_{0.05}$	不显著
20	$y = 52.75x^{1.4376}$	0.8206	8.762	$F < F_{0.05}$	不显著	$y = 35.838e^{0.5877x}$	0.8256	9.136	$F < F_{0.05}$	不显著
40	$y = 175.1x^{1.1870}$	0.9015	27.960	$F > F_{0.05}$	显著	$y = 131.44e^{0.4745x}$	0.9277	25.442	$F > F_{0.05}$	显著
60	$y = 334.04x^{1.0150}$	0.9445	97.550	$F > F_{0.01}$	极显著	$y = 262.83e^{0.4039x}$	0.9416	46.676	$F > F_{0.01}$	极显著

2.3 土壤侵蚀临界坡度的研究

上述研究表明,扰动土在 40 mm/h 降雨强度下的临界坡度在 $20^{\circ} \sim 26.5^{\circ}$ 之间。下面对 40 mm/h 、 60 mm/h 、 80 mm/h 这3种降雨强度情况临界坡度的问题进行研究。由图4可以看出,在 40 mm/h 、 60 mm/h 降雨强度下:当坡度小于 20° 时,土壤侵蚀量均随坡度的增加而增加;当坡度大于 20° 时,随着坡度增加,土壤侵蚀量出现减小趋势。以上结果表明:降雨强度为 40 mm/h 和 60 mm/h 时,供试土壤临界坡度在 $20^{\circ} \sim 26.5^{\circ}$ 之间;当降雨强度增加至 80 mm/h 时,坡度在 26.5° 以内侵蚀量均随坡度的增加而增加,说明 80 mm/h 降雨强度下的临界坡度大于 26.5° 。

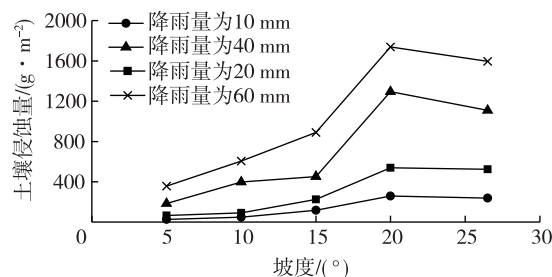


图3 坡度与土壤侵蚀量的关系(降雨强度 40 mm/h)

Fig.3 Relationships between slope and soil erosion amount with rainfall intensity of 40 mm/h

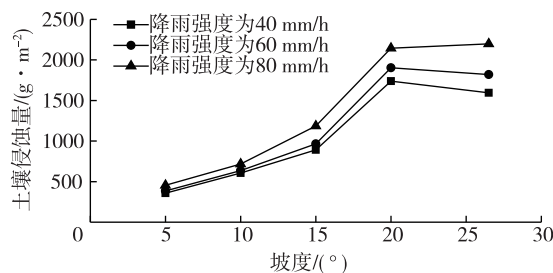


图4 不同降雨强度下坡度与土壤侵蚀量的关系(降雨量 60 mm)

Fig.4 Relationships between slope and soil erosion amount under different conditions of rainfall intensity with rainfall of 60 mm

研究表明^[13-15],土壤侵蚀量在某一坡度范围内随坡度的增加而增加,超过该坡度时侵蚀量反而会随坡度的增加呈现减小趋势,这个坡度被称为临界坡度。国内外给出的坡度界限值波动较大,说明影响坡度与土壤侵蚀关系的因素十分复杂,对于不同的土壤质地和降雨条件,可能结果不一。出现坡度增加到一定限度时土壤侵蚀量反而呈下降趋势这一现象的原因很复杂,许多学者对此进行了大量的研究^[16-18]。一般而言,坡度越小则径流在坡面上停滞的时间越长,其渗入土壤的机会也越多;反之,若坡度较大,径流还来不及入渗即沿坡面流走,产流量就会很大,产沙量也较大,并且随着坡度增大,雨滴的溅蚀作用逐渐明显^[16],土壤颗粒容易向下滚动或移动,因此侵蚀量增加。但是,从承受雨滴击打的角度分析,坡度越大其承雨面积越小,承接的雨水量相应减少,并且随着坡度增大,径流速度加快,径流对土壤表面的摩擦作用减小,所造成的土壤流失量也减少^[18]。以上因素综合作用的结果,可能是导致上述规律的原因。

2.4 不同坡度下降雨量与径流量、土壤侵蚀量的关系

以 40 mm/h 降雨强度为例,研究不同坡度下降雨量与径流量、土壤侵蚀量的关系。图 5、图 6 表明,不同坡度情况下径流量和土壤侵蚀量皆随着降雨量的增大而增加,该结果与以往研究结论相吻合^[13]。

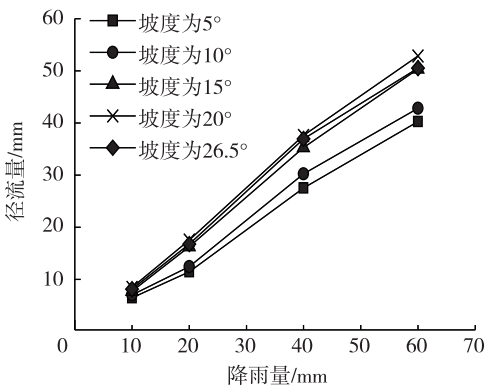


图 5 不同坡度下降雨量与径流量的关系
Fig. 5 Relationships between rainfall and runoff under different conditions of slope

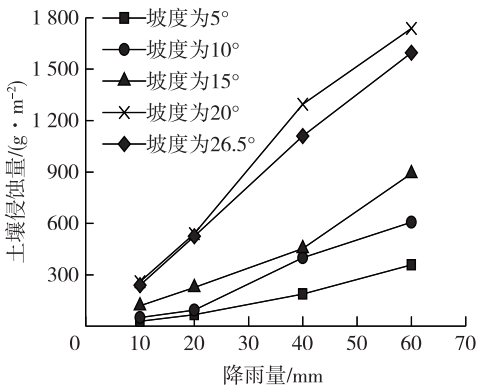


图 6 不同坡度下降雨量与土壤侵蚀量的关系
Fig. 6 Relationships between rainfall and soil erosion amount under different conditions of slope

将不同坡度下历次观测的土壤侵蚀量与同期降雨量进行回归分析,得到表 2。由表 2 可以看出:坡度为 15°时,土壤侵蚀量与降雨量相关性达到显著水平,径流量与降雨量达到极显著相关水平;其他坡度下侵蚀量、径流量与降雨量均达到极显著相关水平。从图 6 及表 2 的分析结果还可以看出,不同坡度产生土壤侵蚀时其降雨量的临界值不同,即在该试验条件下各坡度的启动雨强相异。

表 2 不同坡度下径流量、土壤侵蚀量与降雨量的回归分析结果

坡度/ (°)	径流量与降雨量					土壤侵蚀量与降雨量				
	回归方程	R^2	F 值	F 检验	显著性	回归方程	R^2	F 值	F 检验	显著性
5	$y=0.6984x-1.4741$	0.9956	455.884	$F>F_{0.01}$	极显著	$y=6.6348x-55.719$	0.9821	109.619	$F>F_{0.01}$	极显著
10	$y=0.7430x-1.2161$	0.9936	308.857	$F>F_{0.01}$	极显著	$y=11.7890x-96.002$	0.9829	115.222	$F>F_{0.01}$	极显著
15	$y=0.8661x-0.9114$	0.9975	807.640	$F>F_{0.01}$	极显著	$y=15.1710x-70.917$	0.9682	60.928	$F>F_{0.05}$	显著
20	$y=0.9035x-0.4076$	0.9964	557.880	$F>F_{0.01}$	极显著	$y=30.4550x-31.662$	0.9879	162.817	$F>F_{0.01}$	极显著
26.5	$y=0.8690x-0.3161$	0.9927	273.741	$F>F_{0.01}$	极显著	$y=27.2900x-19.657$	0.9981	1032.850	$F>F_{0.01}$	极显著

3 结 语

对于扰动条件下的丘陵山区黄棕壤,采用人工模拟降雨试验方法,研究不同坡度条件下降雨量与径流量、土壤侵蚀量之间的关系,结果表明:(a)降雨量一定情况下,当坡度小于 20°时,入渗量随坡度的增大而减小,径流量随着坡度的增大而增大;而坡度大于 20°时,入渗量、径流量趋于稳定。(b)在坡度未达到临界坡度时,随着坡度的增加,土壤侵蚀量增大;当超过临界坡度时,土壤侵蚀量反而呈现减小趋势。在降雨量大于 40 mm、坡度小于 15°时,土壤侵蚀量随坡度增加而缓慢增加;坡度大于 15°后土壤侵蚀量随坡度增加而迅速增加,因此扰动土坡面控制在 15°以内对减少土壤侵蚀十分重要。(c)扰动土在 40 mm/h、60 mm/h 降雨强度

下的临界坡度在 $20^{\circ} \sim 26.5^{\circ}$ 之间,在 80 mm/h 降雨强度下的临界坡度大于 26.5° 。(d) 不同坡度情况下,径流量、土壤侵蚀量与降雨量均存在显著的线性关系。

参考文献:

- [1] 彭珂珊.中国土壤侵蚀影响因素及其危害分析[J].水利水电科技进展,2000,20(4):15-18,64.(PENG Keshan. Analysis of factors affecting soil erosion in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2000,20(4):15-18,64.(in Chinese))
- [2] 姚文艺,肖培青.黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J].水利水电科技进展,2012,32(2):73-78.(YAO Wenyi,XIAO Peiqing. Research direction of the study of soil erosion in the Loess Plateau[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012,32(2):73-78. (in Chinese))
- [3] MEYER L D. Evaluation of the universal soil loss equation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1984,39:99-104.
- [4] 覃莉,刘凤仙,杨智.喀斯特地区不同坡度径流小区水土流失特征分析[J].中国水土保持,2015(8):63-65.(QIN Li,LIU Fengxian,YANG Zhi. Analysis of characteristics of karst area in different slope runoff plots of soil and water loss[J]. Soil and Water Conservation in China, 2015(8):63-65.(in Chinese))
- [5] 黄鹏飞.黄土区工程堆积体水蚀特征及坡度因子试验研究[D].杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2013.
- [6] 王恒松,熊康宁,张芳美.地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J].水土保持通报,2015,35(4):1-7.(WANG Hengsong,XIONG Kangning,ZHANG Fangmei. Mechanism study on effects of terrain on soil erosion of karst slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(4):1-7. (in Chinese))
- [7] 樊登星,余新晓,贾国栋,等.北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J].中国水土保持科学,2014,12(2):24-30.(FAN Dengxin,YU Xinxiao,JIA Guodong,et al. Characteristics of soil and water loss and its influencing factors on slope scale in rocky mountain area of Beijing[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2014,12(2):24-30.(in Chinese))
- [8] 冯慧敏,王电龙,胡振华.风化煤矸石坡面水土流失规律模拟[J].中国水土保持科学,2013,11(2):39-44.(FENG Huimin,WANG Dianlong,HU Zhenhua. Soil erosion and water loss laws of mine waste slope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013,11(2):39-44. (in Chinese))
- [9] 赵莹,耿灵生,陈凤琴,等.山东壤土坡面人工降雨水土流失规律研究[J].水土保持应用技术,2015(1):1-4.(ZHAO Ying,GENG Linsheng,CHEN Fengqin, et al.The research of soil and water loss law by rainfall in loam slope in Shandong[J]. The Application Technology of Soil and Water Conservation, 2015(1):1-4.(in Chinese))
- [10] 王秀英,曹文洪,陈东.土壤侵蚀与地表坡度关系研究[J].泥沙研究,1998(2):36-41.(WANG Xiuying,CAO Wenhong,CHEN Dong. Study on relationship between soil erosion and land slope[J]. Journal of Sediment Research, 1998(2):36-41.(in Chinese))
- [11] 马栋和,王常明,黄如卉,等.辽西黄土缓坡冲刷破坏及雨水入渗规律[J].水利水电科技进展,2013,33(6):29-32,51.(MA Donghe,WANG Changming,HUANG Ruhui, et al. Erosion damage and rainfall infiltration characteristics of loess gentle slope in western Liaoning[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(6):29-32,51. (in Chinese))
- [12] 靳长兴.坡度在坡面侵蚀中的作用[J].地理研究,1996,15(3):57-63.(JIN Changxing. The role of slope gradient on slope erosion[J]. Geographical Research, 1996,15(3):57-63.(in Chinese))
- [13] 陈法扬.不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J].中国水土保持,1985(2):24-30.(CHEN Fayang. Effect of different slope on soil erosion amount[J]. Soil and Water Conservation in China, 1985(2):24-30. (in Chinese))
- [14] 靳长兴.论坡面侵蚀的临界坡度[J].地理学报,1995,50(3):234-239.(JIN Changxing. A theoretical study on critical erosion slope gradient[J]. Journal of Geographical Sciences,1995,50(3):234-239. (in Chinese))
- [15] 刘青泉,陈力,李家春.坡度对坡面土壤侵蚀的影响分析[J].应用数学和力学,2001,22(5):449-457.(LIU Qingquan,CHEN Li,LI Jiachun. Influences of slope gradient on soil erosion[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2001,22(5):449-457.(in Chinese))
- [16] 王占礼,王亚云,黄新会,等.黄土裸坡土壤侵蚀过程研究[J].水土保持研究,2004,11(4):84-87.(WANG Zhanli,WANG Yayun,HUANG Xinhui,et al. Soil erosion process research of the loess bare slope[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004,11(4):84-87.(in Chinese))
- [17] 李凤英,何小武,周春火.坡度影响土壤侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2008,15(6):229-231.(LI Fengying,HE Xiaowu,ZHOU Chunhuo. Advances in researches on slope gradient factor in soil erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008,15(6):229-231. (in Chinese))
- [18] 张以森,郭相平,吴玉柏,等.扰动高沙土侵蚀规律的试验研究[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):522-526.(ZHANG Yisen,GUO Xiangping,WU Yubai,et al. Experimental study on erosion rules of disturbed sandy soil[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2010,38(5):522-526. (in Chinese))