

降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响*

李桂芳^{1,2} 郑粉莉^{1,3} 卢嘉³ 安娟⁴

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100;
4. 临沂大学水土保持与环境保育研究所, 临沂 276005)

摘要: 通过室内模拟降雨试验,研究降雨强度和地形因子(坡度和坡长)对黑土区坡面土壤侵蚀过程的影响。试验处理包括2个降雨强度(50、100 mm/h),2个坡度(5°、10°),2个坡长(5、10 m)。结果表明:不同试验处理条件下,当降雨强度由50 mm/h增加到100 mm/h,坡面径流量增加1.4~12.4倍;当坡长由5 m增加到10 m,坡面径流量增加0.1~3.1倍;坡度对坡面径流量的影响较复杂,受降雨强度和坡长的综合影响。降雨强度、坡度和坡长皆对坡面侵蚀量有重要影响。当降雨强度由50 mm/h增加到100 mm/h时,坡面侵蚀量增加4.2倍;当坡度由5°增加到10°时,侵蚀量增加0.4倍;当坡长由5 m增加到10 m时,侵蚀量增加0.5倍,表明降雨强度增加对黑土区坡面侵蚀量影响最大。而当降雨强度、坡度和坡长均增大时,坡面侵蚀量增加18.0倍,说明这3个因素交互作用对坡面侵蚀的影响远大于各因素的单独影响或2个因素交互作用的影响。坡面径流量与降雨强度的关系最密切,其次是降雨强度-坡长交互作用和降雨强度-坡度-坡长交互作用;坡面侵蚀量与降雨强度-坡度-坡长交互作用的相关关系最显著,其次是降雨强度和降雨强度-坡长交互作用。分别建立了坡面径流量和侵蚀量与降雨强度、坡度和坡长的经验关系式。

关键词: 黑土坡面 土壤侵蚀 降雨强度 坡度 坡长

中图分类号: S157 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0147-08

Effects of Rainfall and Topography on Soil Erosion Processes of Black Soil Hillslope

Li Guifang^{1,2} Zheng Fenli^{1,3} Lu Jia³ An Juan⁴

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. Institute of Water and Soil Conservation and Environment Protection, Linyi University, Linyi 276005, China)

Abstract: Studying hillslope soil erosion processes in the black soil region is of great importance to black soil conservation and national grain production security. A rainfall simulation study was conducted to examine the effects of rainfall intensity and topography (slope gradient and slope length) on hillslope soil erosion processes. The experimental treatments included two rainfall intensities (50 and 100 mm/h) of representative erosive rainfalls in the black soil region, two common slope gradients (5° and 10°) and two slope lengths (5 and 10 m). Each treatment had two replications. The results showed that runoff was increased by 1.4~12.4 times and 0.1~3.1 times, respectively, when rainfall intensity or slope length was increased under different treatments. Effects of slope gradient on runoff were complex, which were affected by both rainfall intensity and slope length. Rainfall intensity, slope gradient and slope length had

收稿日期: 2014-12-04 修回日期: 2015-01-12

* 国家自然科学基金资助项目(41271299)

作者简介: 李桂芳, 博士生, 主要从事土壤侵蚀过程及机理研究, E-mail: lifangdyx@163.com

通讯作者: 郑粉莉, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和侵蚀环境效益评价研究, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

important effects on hillslope soil loss. Soil loss was increased by 4.2 times when rainfall intensity was increased from 50 mm/h to 100 mm/h, and it was increased by 0.4 times for increasing slope gradient from 5° to 10° and 0.5 times for increasing slope length from 5 m to 10 m, which indicated that rainfall intensity had the most significant effects on hillslope soil loss. When rainfall intensity, slope gradient and slope length were increased simultaneously, soil loss was increased by 18.0 times, which suggested that the comprehensive effects of three factors were much greater than those of each single factor or the combination of two factors. Runoff had the strongest correlation with rainfall intensity, followed by coupling effects of rainfall intensity – slope length and coupling effects of rainfall intensity – slope gradient – slope length. Soil loss had the strongest correlation with coupling effects of rainfall intensity – slope gradient – slope length, followed by rainfall intensity and coupling effects of rainfall intensity – slope length. According to these observed data, the empirical equations for predicting runoff and soil loss were also established.

Key words: Black soil hillslope Soil erosion Rainfall intensity Slope gradient Slope length

引言

东北黑土区作为我国主要的粮食产区和商品粮基地,对我国粮食生产安全起着重要作用。该区年降水量一般为 500 ~ 600 mm,主要集中在夏、秋两季;地形主要是山前波状起伏台地或漫岗地,坡度一般为 1° ~ 8° ,坡长一般为 500 ~ 2 000 m^[1]。当降水量和降水强度均较大时,较长坡长下易形成径流集中冲刷,造成严重的水土流失^[2]。刘宝元等^[3]对东北松嫩黑土区农地水土流失监测结果表明,其水土流失面积占该区坡耕地面积的 77.54%,表明坡耕地是东北黑土区水土流失治理的重点。因此有必要对黑土区坡耕地坡面侵蚀规律进行深入研究。

降雨是坡面水蚀最根本的动力来源,降雨因素中尤以降雨强度对坡面侵蚀的作用最为明显^[4]。众多研究表明^[5-9],随着降雨强度的增大,坡面径流量和侵蚀量均增加。坡度对坡面侵蚀的演变发展过程和侵蚀强度起着重要作用,其大小在一定程度上决定了径流的冲刷与搬运能力^[10]。黑土区坡面侵蚀过程研究表明,坡面侵蚀量随着坡度增加而增大,而坡面径流量随坡度的变化尚有争议^[11-12]。耿晓东等^[13]对黄土区、紫色土区和红壤区的研究认为随着坡度增加坡面侵蚀量增大,径流量降低,与黑土区坡面研究结果存在一定差异性。坡长对坡面汇水过程及径流量大小、侵蚀方式演变和产沙过程等有重要影响^[14-15]。目前关于坡长对地表径流量的影响存在争议,对侵蚀量影响的观点基本一致^[16-18]。坡长对坡面侵蚀过程的影响研究,国内主要集中在黄土高原地区^[17, 19-21],紫色土区^[22]以及红壤丘陵区^[23]也有一定研究。野外调查表明^[24],微地形起伏是造成黑土区坡面侵蚀较为严重的主要原因,范昊明等^[25]指出坡度和坡长对黑土区坡面土壤侵蚀

垂直分带的宽度和排列均有影响,崔明等^[26]对野外坡耕地小区的观测结果表明,坡面土壤侵蚀速率沿坡长呈强弱交替分布,侵蚀带的分布与坡长和降雨的组合有关。而现有黑土区坡面侵蚀影响因素的研究主要集中在降雨强度和坡度方面,对降雨和地形(坡度和坡长)交互作用下黑土区坡面侵蚀过程的研究仍是一项空白,且现有研究很少涉及坡长因子。由于黑土区坡长较长,坡面中下部侵蚀严重,加上自然条件下坡面水蚀受降雨和下垫面地形(坡度、坡长、坡形)条件的共同影响。因此,迫切需要开展降雨和地形对坡面侵蚀影响的研究。本文通过室内模拟降雨试验,分析降雨强度、坡度、坡长及其交互作用在黑土区坡面侵蚀过程中的作用机理,以期在黑土区坡面土壤侵蚀动态监测、预报及水土流失防治措施的布设提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。降雨设备为下喷式人工模拟降雨装置,可满足所有降雨雨滴达到终点速度,降雨高度为 18 m。降雨强度变化范围为 30 ~ 350 mm/h,降雨均匀度大于 80%^[27]。试验土槽为 10 m(长) × 3 m(宽) × 0.5 m(深)的可变坡式钢槽,坡度调节范围为 0° ~ 30° ,调节步长为 5° ,土槽下端设有集流装置用于采集降雨过程中的径流泥沙样。试验土壤采自东北典型黑土区——吉林省榆树市刘家镇合心村南城子屯(北纬 $44^{\circ}44'28''$,东经 $126^{\circ}11'47''$) 0 ~ 20 cm 坡耕地耕层土壤,土壤为研究区内典型黑土^[28-29],具有较好的代表性,坡耕地主要种植作物为玉米,采取人工取土方式,将土样装入编织袋后运回试验地点。试验土样风干后,剔除杂物(秸秆、玉

米根系等),将大土块沿自然纹理掰开成小于 4 cm 的土块。试验土壤颗粒分级划分标准采用美国制,土壤质地属于粉壤土,粘粒(小于 0.002 mm)含量 20.3%,粉粒(0.002~0.05 mm)含量 76.4%,砂粒(0.05~2 mm)含量 3.3%,有机质含量为 23.8 g/kg(重铬酸钾氧化外加热法),pH 值为 5.9(水浸提法,水土质量比为 2.5:1)。

1.2 试验设计与方法

典型黑土区高平原和山前洪积平原的坡度一般为 1°~5°;而山前冲积台地区域,地形复杂,起伏较大,地面坡度大部分为 3°~8°^[1];刘宝元等^[3]对黑土区坡耕地的调查研究指出当坡度大于 5°后,坡面土壤侵蚀强度达到中度或重度侵蚀;野外小区观测结果表明 7 m 坡长以下坡面侵蚀以溅蚀为主,而 7~15 m 坡长范围内坡面片蚀作用逐渐增强^[26];詹敏等^[30]指出黑土区土壤流失是由短历时高强度降雨所引起,且降雨持续时间一般不超过 1 h;张宪奎等^[31]指出黑土区中度侵蚀的降雨强度标准为 0.71 mm/min,其中实测短历时瞬时降雨强度最大达 1.72 mm/min。基于上述标准及试验实际情况,进行本研究试验设计,包括 2 个降雨强度、2 个坡度和 2 个坡长,降雨历时为 1 h,具体试验方案见表 1。

表 1 试验设计
Tab.1 Experimental treatments

降雨强度/(mm·h ⁻¹)	坡长/m	坡度/(°)
50	5	5
		10
	10	5
		10
100	5	5
		10
	10	5
		10

试验土槽填土时,在土槽底部铺设 10 cm 厚的细沙,以保证试验土槽具有良好的透水性。细沙层之上采用分层(每层 5 cm)填土的方式填充土槽,细沙层之上按容重 1.35 g/cm³填充 10 cm 厚的粘黄土,用于模拟坡耕地的犁底层。粘黄土层之上按容重 1.15 g/cm³填充 20 cm 厚的黑土层,模拟耕层。每层填土均采取边填充边压实方法,并将接触面打毛处理,减少边界效应的影响,使下垫面土壤条件的变异性达到最小。降雨试验前 1 d 对坡面进行降雨强度为 25 mm/h 的预降雨,至坡面即将产流为止,目的是保证各试验处理下垫面地表状况一致。正式试验降雨前测定坡面表层土壤(0~5 cm)的平均含水率为(0.277 5±0.010 3)g/g。为确保降雨均匀度和降雨强度均达到试验要求,每次降雨试验前对降

雨强度进行率定。降雨试验开始后,记录坡面产流时间,每间隔 2 min 采集一次径流泥沙样,坡面流速的测定方法为高锰酸钾溶液示踪法(钢尺精度为 0.1 cm,电子秒表显示精度为 0.01 s)。降雨试验结束后,将径流泥沙样称量(电子称量程为 60 kg,精度为 0.001 kg)后静置 5 h 以上,待泥沙沉淀后倾倒上清液,将泥沙样品干燥(105℃,24 h)并称量(天平精度为 0.1 g)。所有试验处理均进行 2 次重复,产流时间、径流量、侵蚀量及流速数据的显著性分析检验是利用重复数据进行 F 检验所得结果。

2 结果与分析

2.1 黑土区坡面径流和侵蚀过程

2.1.1 径流过程

尽管在正式试验降雨前进行了前期预降雨,但降雨强度对黑土区坡面产流时间仍有较大影响(表 2),随着降雨强度的增大,坡面产流时间提前 12.9~27.5 min。当坡长为 5 m、坡度为 5°和 10°时,随着降雨强度增加,坡面产流时间提前 20.7~27.5 min;而耿晓东等^[32]在相同的试验条件下对红壤区坡面的研究结果表明,增加相同的降雨强度,坡面产流时间仅提前 0.54~0.80 min。两者试验结果的差异说明黑土良好的团粒结构使其入渗能力大于红壤。表 2 还表明,随着降雨强度增加,坡面径流量显著增大;当坡长为 5 m、坡度为 5°和 10°时,降雨强度由 50 mm/h 增加为 100 mm/h 时,坡面径流量分别增加 7.3 和 12.4 倍,表明坡度越大,坡面径流量随降雨强度增加幅度越大。坡面径流强度在降雨初期迅速增加,降雨后期逐渐趋于平稳,且随着降雨强度的增加坡面径流强度明显增大(图 1)。李裕元等^[33]研究结果表明,降雨强度的增加对坡面径流强度有显著影响,且随着降雨强度增加,土壤入渗率明显减弱,由降雨转化的地表径流量随之增加。

随着坡度增加,坡面产流时间提前 2.2~9.0 min(表 2)。坡度越大,坡面径流汇集所需时间越短,越有利于地表径流的产生。坡面径流量随坡度变化较为复杂,受降雨强度和坡长的综合影响。在降雨强度为 50 mm/h、坡长为 5 m 以及降雨强度为 100 mm/h、坡长为 10 m 试验条件下,随着坡度的增加,坡面径流量基本保持不变;而在降雨强度为 50 mm/h、坡长为 10 m 以及降雨强度为 100 mm/h、坡长为 5 m 试验条件下,当坡度从 5°增加到 10°时,坡面径流量增加 32.6%~37.9%。坡面径流量随坡度变化是以下两方面共同作用的结果:一是坡面承雨面积随坡度的增加有所减小,导致坡面径流量减小;二是本试验进行了前期降雨,坡面初始含水率

(0.277 5 g/g)较高,土壤入渗能力较低,径流强度较大^[34]。降雨初期,10°坡面径流强度明显大于5°

(图1),但稳定阶段下不同坡度间坡面径流强度几乎一致,表明坡度在降雨初期可以加快坡面汇流过程。

表 2 坡面径流和侵蚀与降雨强度、坡度和坡长

Tab.2 Hillslope runoff rate and soil loss under different rainfall intensities, slope gradients and slope lengths						
降雨强度/(mm·h ⁻¹)	坡长/m	坡度/(°)	产流时间/min	径流量/mm	侵蚀量/(g·m ⁻²)	流速/(cm·s ⁻¹)
50	5	5	34.0±2.54 ^e	4.7±0.14 ^a	18.1±1.06 ^a	3.0±0.28 ^a
		10	25.0±2.84 ^d	4.0±0.10 ^a	25.8±0.91 ^b	4.6±0.56 ^b
	10	5	18.7±1.56 ^c	19.3±0.42 ^b	35.3±0.07 ^c	4.9±0.14 ^b
		10	15.3±0.57 ^c	25.6±0.99 ^c	48.9±1.40 ^d	5.1±0.42 ^b
100	5	5	6.5±0.42 ^{ab}	39.0±1.70 ^d	119.7±1.41 ^e	5.1±0.42 ^b
		10	4.3±0.57 ^{ab}	53.8±2.54 ^e	183.3±3.04 ^f	5.3±0.28 ^b
	10	5	5.8±1.13 ^b	63.6±0.85 ^f	184.5±0.64 ^f	6.4±0.42 ^c
		10	1.8±0.28 ^a	60.9±4.10 ^f	343.8±1.41 ^g	10.4±0.71 ^d

注:同列数值后不同字母表示各指标在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。流速为整个降雨过程中坡面平均径流流速。

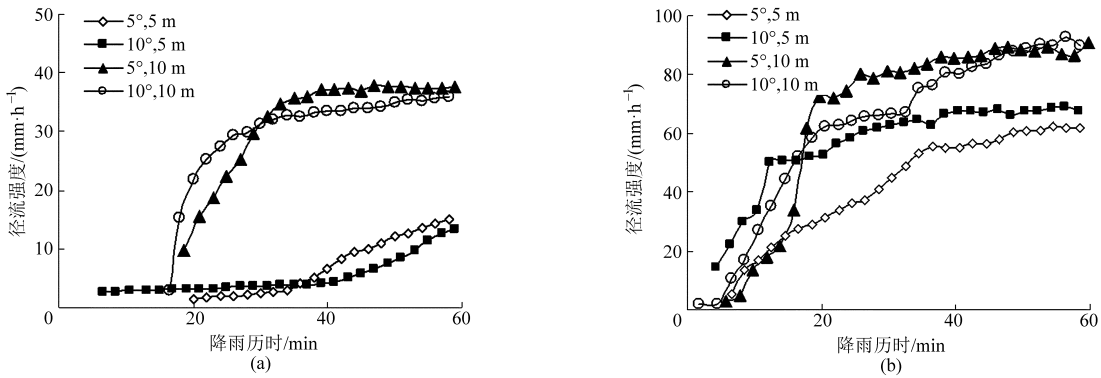


图 1 不同试验处理下坡面径流强度随降雨历时的变化过程

Fig.1 Runoff rate varied with rainfall duration under different treatments

(a) 降雨强度 50 mm/h (b) 降雨强度 100 mm/h

随着坡长的增加,坡面产流时间提前 0.7 ~ 15.3 min(表 2)。原因是坡长越长,坡面汇水面积越大,单位时间坡面径流量也越大,导致坡面产流提前。当坡长由 5 m 增加为 10 m 时,坡面径流量随着坡长增加而增大 0.1 ~ 3.1 倍。当降雨强度和坡度组合不同时,坡面径流量随坡长增加的幅度存在明显差异。当降雨强度为 50 mm/h、坡度为 5°和 10°、坡长由 5 m 增加为 10 m 时,坡面径流量分别增大 1.6 倍和 3.1 倍;降雨强度为 100 mm/h 时,坡长由 5 m 增加为 10 m,坡面径流量仅增加 0.6 倍和 0.1 倍。陈正发^[22]等对紫色土区的研究也表明,坡长对坡面径流量的增加效应在不同降雨强度和坡度下表现不一致;Chaplot 等^[15]的研究也发现,当降雨强度不同时,坡面径流量随坡长增加的增幅也不同。原因是当降雨强度为 50 mm/h 时,地表径流强度较小,坡长变化对径流强度影响较大^[8];降雨强度为 100 mm/h 时,坡面径流强度由降雨强度和坡长共同决定,坡长变化对坡面径流强度影响有所减小。

2.1.2 侵蚀过程

随着降雨强度的增加,坡面侵蚀量增加 4.2 ~

6.1 倍(表 2)。当坡度为 5°时,不同坡长下坡面侵蚀量随降雨强度增加分别增加 4.2 和 5.6 倍;当坡度为 10°,不同坡长处理下,坡面侵蚀量随降雨强度增加均增加 6.0 倍左右;表明降雨强度对坡面侵蚀的影响受坡度大小的影响。坡面侵蚀强度在降雨初期均迅速增加,降雨后期逐渐趋于平稳,且随着降雨强度的增加坡面侵蚀强度明显增大(图 2)。当降雨强度为 50 mm/h 时,坡面入渗量较大而径流量较小,在产流之前,坡面侵蚀以溅蚀为主,坡面产流后,坡面侵蚀以坡面薄层水流引起的片蚀为主,但坡面径流流速较小,最大仅 5.1 cm/s(表 2),因而地表径流侵蚀力也较小;当降雨强度增加为 100 mm/h 时,坡面径流量显著增大,径流流速也有所增加,最大增加 1.0 倍,使得坡面侵蚀量显著增大。在降雨后期,坡面径流强度逐渐趋于稳定,导致侵蚀强度的动态变化减弱,侵蚀强度的变化趋于平稳。同时也表明,在降雨过程中径流侵蚀是降雨侵蚀的主要组成部分,是坡面侵蚀的主要来源^[35]。

随着坡度增加,坡面侵蚀量增加 0.4 ~ 0.9 倍,且 50 mm/h 降雨强度下坡面侵蚀量随坡度增加幅

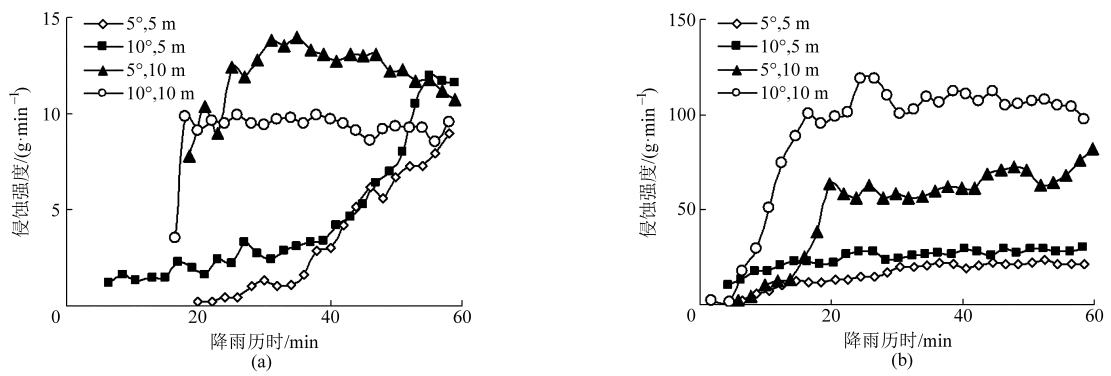


图 2 不同试验处理下坡面侵蚀强度随降雨历时的变化过程
Fig.2 Soil loss varied with rainfall duration under different treatments
(a) 降雨强度 50 mm/h (b) 降雨强度 100 mm/h

度要小于 100 mm/h 降雨强度下侵蚀量随坡度增加幅度(表 2),这与安娟等^[36]的研究结果相一致。坡度对坡面侵蚀的影响主要表现在对坡面薄层水流拖拽力的影响方面^[37],降雨强度越大,坡面径流量越大,坡度对坡面径流侵蚀的作用愈加明显。降雨过程中坡面侵蚀强度随着坡度增加略有增加,增加程度受降雨强度和坡长的制约。此外,当坡长为 5 m、降雨强度为 50 mm/h 和 100 mm/h 时,坡面侵蚀量随坡度增加分别增加 0.4 倍和 0.5 倍。在相同试验条件下,耿晓东等^[38]对紫色土区坡面研究结果表明,增加相同的坡度,坡面侵蚀量分别增加 0.4 倍和 5.1 倍。与本文结果相比,可知降雨强度为 50 mm/h 时,紫色土区和黑土区坡面侵蚀量随坡度增加的增幅一致,主要是 50 mm/h 降雨强度时,2 种土壤在 5°坡面下均以溅蚀和薄层水流引起的片蚀为主;而当降雨强度增大到 100 mm/h 时,黑土区 10°坡面下仍以溅蚀和片蚀为主,但紫色土区 10°坡面下开始有细沟侵蚀出现,导致侵蚀量迅速增加。结果还表明,坡面侵蚀方式不同,坡度对坡面侵蚀过程的影响存在明显不同。

随着坡长的增加,坡面侵蚀量增加 0.5 ~ 1.0 倍(表 2)。主要原因是随着坡长增加,坡面径流流路增加,有更多机会携带坡面泥沙流出坡面,导致坡面侵蚀量随坡长增加而增大。降雨初期,不同坡长下坡面侵蚀强度差异较小,随着降雨历时的增加,不同坡长间侵蚀强度差异有所增大;此外,当降雨强度为 50 mm/h 时,稳定状态下不同坡长间坡面侵蚀强度无明显差异,而在 100 mm/h 降雨强度下,不同坡长间坡面侵蚀强度存在明显差异(图 2)。这与 Bagarello 等^[39]的研究结果相似。付兴涛等^[23]研究指出,降雨强度越大,红壤区坡面侵蚀量随坡长增加的增幅越大,但其侵蚀量增加幅度大于黑土区坡面侵蚀量随坡长的增加幅度。在降雨过程中,随着降雨强度和坡长的增加,红壤区坡面下部有细沟侵蚀

产生,细沟的出现会导致坡面侵蚀量成倍增加^[40],而黑土区所有坡长处理下坡面均没有细沟侵蚀的发生,因而在 100 mm/h 降雨强度下黑土区坡面侵蚀量随坡长变化相对较小。此外,陈正发等^[22]对不同坡长下紫色土区坡面研究结果得出,当坡度为 10°时,坡长为 4 m 的紫色土小区上有细沟侵蚀出现。耿晓东等^[13]对黄土区坡面研究结果表明,50 mm/h 降雨强度、坡度为 5°和 10°时,5 m 黄土坡面下也有细沟发育。表明与其他土壤类型相比,黑土不易发生细沟侵蚀。黑土区坡面坡长一般为 500 ~ 1 000 m,受试验条件限制,本文试验设计坡长范围相对较小(最长仅 10 m),仅能得出坡长对黑土坡面土壤侵蚀规律的初步认识,对于黑土区长坡长坡面侵蚀规律的认识具有一定的局限性。长坡长坡面下,降雨强度和坡度综合作用对黑土区坡面侵蚀过程的研究,有待在后续试验中作进一步探讨。

综上所述,随降雨强度、坡度和坡长增加,坡面侵蚀量均有所增大。坡长为 5 m 时,当降雨强度从 50 mm/h 增加到 100 mm/h、坡度从 5°增加到 10°时,坡面侵蚀量增加 9.1 倍;在坡度为 5°时,当降雨强度从 50 mm/h 增加到 100 mm/h、坡长从 5 m 增加到 10 m 时,坡面侵蚀量增加 9.2 倍;在降雨强度为 50 mm/h 时,当坡度从 5°增加到 10°、坡长从 5 m 增加到 10 m 时,坡面侵蚀量增加 1.7 倍;当降雨强度为 100 mm/h、坡度为 10°、坡长为 10 m 时,坡面侵蚀量增加 18.0 倍,远大于降雨强度、坡度和坡长单独增加或任意两者增加时,坡面侵蚀量的增加量。表明坡面侵蚀过程是这 3 个因素共同作用的结果,且三者存在相互促进作用。此外,黄土、红壤、紫色土和黑土是我国 4 种主要的侵蚀性土壤,其侵蚀类型均以水力侵蚀为主,目前黑土区土壤侵蚀的研究相对较少。通过与其他 3 个土壤侵蚀区侵蚀特点的对比,有利于加深对黑土区坡面土壤侵蚀机理的认识。结果表明黑土坡面径

流和侵蚀过程与其他土壤类型存在明显不同。程琴娟等^[41]研究指出黑土的团粒稳定性要大于黄土、紫色土和红壤;刘瑞^[42]的研究也表明,黑土土壤有机质含量、粘粒含量都大于其他 3 种土壤。因此,黑土较高的团粒稳定性、有机质及粘粒含量是造成与其他土壤侵蚀差异的主要原因。

2.2 降雨强度、坡度和坡长对坡面侵蚀的综合影响

为了综合分析降雨强度、坡度和坡长相互作用对黑土区坡面侵蚀综合影响,分别对坡面产流时间、径流量、侵蚀量及流速与降雨强度(I)、坡度(S)、坡长(L)、降雨强度-坡度交互作用(I_{IS})、降雨强度-坡长交互作用(I_{IL})、坡度-坡长交互作用(I_{SL})以及降雨强度-坡度-坡长交互作用(I_{ISL})进行相关分析。由

表 3 可知,坡面产流时间与降雨强度的关系最为密切,坡度和坡长均对产流时间的影响均与降雨强度有关。坡面径流量与降雨强度关系最密切,其次是降雨强度-坡长交互作用和降雨强度-坡度-坡长交互作用。降雨过程中,坡面径流量是由降雨量和承雨面积决定,降雨强度的增大导致坡面降雨量增加,坡长增加显著增加坡面承雨面积,坡度是通过土壤入渗率和承雨面积对坡面径流量产生影响,三者对坡面径流过程均起到促进作用。王占礼等^[8]对黄土区裸坡的研究结果也表明,降雨强度、坡度和坡长均对坡面产流存在促进作用,但降雨强度对坡面径流的影响要大于坡度和坡长因子。

表 3 坡面径流和侵蚀与降雨强度、坡度和坡长及其交互作用的相关系数
Tab.3 Correlation coefficients between runoff rate and soil loss with coupling effects of rainfall intensity, slope gradient and slope length

	I	S	L	I_{IS}	I_{IL}	I_{SL}	I_{ISL}
产流时间	-0.870 **	-0.217	-0.329	-0.731 **	-0.766 **	-0.365	-0.711 **
径流量	0.907 **	0.098	0.376	0.700 **	0.877 **	0.313	0.738 **
侵蚀量	0.880 **	0.288	0.313	0.288	0.837 **	0.442	0.894 **
流速	0.588 *	0.368	0.539 *	0.368	0.832 **	0.658 **	0.936 **

注: * 表示 $P < 0.05$; **表示 $P < 0.01$ 。样本数 $n = 16$ 。

坡面侵蚀量与降雨强度-坡度-坡长交互作用最密切,其次是降雨强度和降雨强度-坡长交互作用。降雨强度的增加,一方面增加雨滴击溅能力,增加坡面松散物质,另一方面增加地表径流流动性,进而增加地表薄层水流侵蚀力;坡长主要通过增加坡面径流量和径流流速影响坡面径流侵蚀力。坡长对坡面流速存在显著的增加作用(相关系数为 0.539),降雨强度-坡长交互作用与坡面径流流速达到极显著相关关系(相关系数为 0.832);坡度对坡面径流量及流速均无显著影响,进而导致其对坡面侵蚀量影响也不显著,因此坡面侵蚀量主要与降雨强度、坡长及其二者的交互作用显著相关。李君兰等^[20]的研究表明,黄土区细沟间流速主要与降雨强度和坡度有关,与本文结果存在差异。坡面流速增加主要是由于坡面径流量的增大^[43],而本研究中坡度对坡面径流量增加程度有限,因而坡面径流流速主要与降雨强度、坡长及其交互作用有关。

根据李君兰等^[20]采用的交互分析方法,利用 SPSS 软件的回归分析模块,对坡面径流量和侵蚀量与降雨强度(I)、坡度(S)、坡长(L)、降雨强度-坡度交互作用(I_{IS})、降雨强度-坡长交互作用(I_{IL})、坡度-坡长交互作用(I_{SL})以及降雨强度-坡度-坡长交互作用(I_{ISL})之间关系进行回归分析,得到

$$D = 0.808I + 0.376L + 0.144I_{IS}$$

$$(R^2 = 0.973, n = 16) \tag{1}$$

$$S_L = 0.830I_{ISL} \quad (R^2 = 0.785, n = 16) \tag{2}$$

式中 D ——坡面径流量,mm

S_L ——坡面侵蚀量,g/m²

I ——降雨强度,mm/h

L ——坡长,m

拟合方程的 F 检验均达到 $P < 0.01$ 极显著水平,除参数 I_{IS} 的 t 检验为 $P < 0.05$ 显著水平外,其余各参数的 t 检验均达 $P < 0.01$ 的极显著水平。

式(1)为消除量纲影响后得到的坡面径流量与降雨强度、坡长及降雨强度-坡度交互作用的标准化方程,回归方程表明坡面径流量变化过程中,降雨强度和坡长均起到促进作用,而坡度对坡面径流量的影响则与降雨强度有关。式(2)为消除量纲影响后得到的坡面侵蚀量与降雨强度-坡度-坡长交互作用的标准化方程,回归方程表明 3 个因素对坡面侵蚀量的影响是多因素共同作用的结果,3 个因素综合作用的影响对坡面侵蚀量起主导作用。

3 结论

(1) 随着降雨强度、坡度和坡长的增加,坡面初始产流时间显著提前,其中降雨强度对坡面产流时间影响显著大于坡度和坡长。当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h,坡面径流量增加 1.4 ~

12.4 倍;当坡长由 5 m 增加到 10 m,坡面径流量增加 0.1~3.1 倍;随坡度增加,坡面径流量变化较为复杂,受降雨强度和坡长的综合影响。

(2) 坡面侵蚀量随降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 增加 4.2~6.1 倍,随坡长由 5 m 增加到 10 m 增加 0.5~1.0 倍,随坡度由 5°增加到 10°增加 0.4~0.9 倍。当降雨强度、坡度和坡长均有所增加时,坡面侵蚀量增加 18.0 倍,表明降雨强度、坡度和坡长对坡面侵蚀的影响存在彼此交互作用。

(3) 坡面径流量主要受降雨强度、坡长、以及降

雨强度-坡长交互作用的影响;而坡面侵蚀量主要受降雨强度-坡度-坡长交互作用的影响。分别建立了坡面径流量与降雨强度、坡长、降雨强度-坡度交互作用的经验关系式以及坡面侵蚀量与降雨强度-坡度-坡长交互作用的经验关系式。

(4) 分析了降雨、坡度和坡长对黑土区坡面侵蚀的影响。针对黑土区缓坡地形和长坡长的实际情况,今后仍需进一步分析坡长和上方汇水流量对坡面侵蚀的影响。

参 考 文 献

1 范昊明,蔡强国,王红闪.中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J].水土保持学报,2004,18(2):66-70.
Fan Haoming, Cai Qiangguo, Wang Hongshan. Condition of soil erosion in phaeozem region of Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(2): 66-70. (in Chinese)

2 孟令钦,李勇.东北黑土区坡耕地侵蚀沟发育机理初探[J].水土保持学报,2009,23(1):7-11.
Meng Lingqin, Li Yong. The mechanism of gully development on sloping farmland in black soil area, Northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 7-11. (in Chinese)

3 刘宝元,阎百兴,沈波,等.东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
Liu Baoyuan, Yan Baixing, Shen Bo, et al. Current status and comprehensive contra strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 1-8. (in Chinese)

4 唐克丽.中国水土保持[M].北京:中国科学出版社,2004:33.

5 琚彤军,刘普灵,徐学选,等.不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J].泥沙研究,2007(4):65-71.
Ju Tongjun, Liu Puling, Xu Xuexuan, et al. Experiment study on runoff and sediment process in primary-lands in loess gilly regions under different rainfall conditions [J]. Journal of Sediment Research, 2007(4): 65-71. (in Chinese)

6 贾莲莲,李占斌,李鹏,等.黄土区野外模拟降雨条件下坡面径流-产沙试验研究[J].水土保持研究,2010,17(1):1-5.
Jia Lianlian, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Study on rainfall runoff-sediment yield under modeling rain condition in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 1-5. (in Chinese)

7 马琨,陈欣,王兆骞.模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J].宁夏农学院学报,2004,25(1):1-4.
Ma Kun, Chen Xin, Wang Zhaoqian. The propertites of runoff, sediment and nutrient loss under simulated rainstorm in slope land of red soil area [J]. Journal of Ningxia Agricultural College, 2004, 25(1): 1-4. (in Chinese)

8 王占礼,黄新会,张振国,等.黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J].水土保持通报,2005,25(4):1-4.
Wang Zhanli, Huang Xinhui, Zhang Zhenguo, et al. Experimental study of runoff processes on bare loess hillslope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, 25(4): 1-4. (in Chinese)

9 杨明义,田均良.坡面侵蚀过程定量研究进展[J].地球科学进展,2000,15(6):649-653.
Yang Mingyi, Tian Junliang. Research process in erosion process on hillslope quantitatively [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 649-653. (in Chinese)

10 刘志,江忠善.降雨因素和坡度对片蚀影响的研究[J].水土保持通报,1994,14(6):19-22,61.
Liu Zhi, Jiang Zhongshan. Study on the effect of natural rainfall factors and slopes on sheet erosion [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1994, 14(6): 19-22, 61. (in Chinese)

11 安娟,卢嘉,郑粉莉,等.不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J].水土保持学报,2011,25(6):100-105.
An Juan, Lu Jia, Zheng Fenli, et al. Soil aggregate transport during soil erosion process under different soil surface conditions on black soil slope farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 100-105. (in Chinese)

12 李洪丽,韩兴,张志丹,等.东北黑土区野外模拟降雨条件下产流产沙研究[J].水土保持学报,2013,27(4):49-52.
Li Hongli, Han Xing, Zhang Zhidan, et al. Research on runoff and erosion sediment under simulated rainfall conditions of black soil in northeast China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 49-52. (in Chinese)

13 耿晓东.主要水蚀区坡面土壤侵蚀过程与机理对比研究[D].杨凌:中科院水利部水土保持研究所,2010.

14 张新和,郑粉莉,汪晓勇,等.上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(3):105-110.
Zhang Xinhe, Zheng Fenli, Wang Xiaoyong, et al. Effects of upslope runoff on loessial hillslope erosion pattern evolution process and erosion sediment [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(3): 105-110. (in Chinese)

- 15 Chaplot V A M, Le Bissonnais Y. Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope [J]. Soil Science Society of American Journal, 2003, 67(3): 844–851.
- 16 Lal R. Soil degradative effects of slope length on alfisols in western Nigeria. IV plots of equal land area [J]. Land Degradation & Development, 1997, 8(4): 343–354.
- 17 蔡强国. 坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J]. 泥沙研究, 1989(4): 84–91.
Cai Qiangguo. Soil erosion processes influenced by slope length on hillslope[J]. Journal of Sediment Research, 1989(4): 84–91. (in Chinese)
- 18 Bryan R B, Poesen J. Laboratory experiments on the influence of slope length on runoff, percolation and rill development [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1989, 14(3): 211–231.
- 19 汪晓勇, 郑粉莉. 黄土坡面坡长对侵蚀-搬运过程的影响研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(3): 1–4.
Wang Xiaoyong, Zheng Fenli. Effect of upslope runoff on detachment and transport process on loessial hillslope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(3): 1–4. (in Chinese)
- 20 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6): 8–13.
Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Analysis of interaction effects of rainfall intensity, slope degree and slope length on rill erosion [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(6): 8–13. (in Chinese)
- 21 孔亚平, 张科利, 唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 17–20.
Kong Yaping, Zhang Keli, Tang Keli. Impact of slope length on soil erosion process under simulated rainfall [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(2): 17–20. (in Chinese)
- 22 陈正发, 郭宏忠, 史东梅, 等. 地形因子对紫色土坡耕地土壤侵蚀作用的试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5): 83–87.
Chen Zhengfa, Guo Hongzhong, Shi Dongmei, et al. Experimental study on effect of topographical factors on purple cultivated slopes land soil erosion [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(5): 83–87. (in Chinese)
- 23 付兴涛, 张丽萍. 红壤丘陵区坡长对作物覆盖坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 91–98.
Fu Xingtao, Zhang Liping. Impact of slope length on soil erosion of sloping farmland with crop in red soil hilly region [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5): 91–98. (in Chinese)
- 24 崔明, 蔡强国, 张永光, 等. 漫岗黑土区坡耕地中雨季浅沟发育机制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 59–65.
Cui Ming, Cai Qiangguo, Zhang Yongguang, et al. Development of ephemeral gully during rainy season in the slope land in rolling-hill black-soil region of Northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 59–65. (in Chinese)
- 25 范昊明, 蔡强国, 崔明. 东北黑土漫岗区土壤侵蚀垂直分带性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 8–11.
Fan Haoming, Cai Qiangguo, Cui Ming. Soil erosion developed with the vertical belts in the gentle hilly black soil regions in Northeast China [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 8–11. (in Chinese)
- 26 Cui Ming, Cai Qiangguo, Zhu Axing, et al. Soil erosion along a long slope in the gentle hilly areas of black soil region in Northeast China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 17(3): 375–383.
- 27 郑粉莉, 赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 177–178.
Zheng Fenli, Zhao Jun. A brief introduction on the rainfall simulation laboratory and equipment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 177–178. (in Chinese)
- 28 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J], 中国水土保持, 2008(12): 26–30.
Yan Baixing, Yang Yuhong, Liu Xingtu, et al. Current status and evolution trend of soil erosion in Northeastern black soil area of China [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 26–30. (in Chinese)
- 29 孙永光. 吉林省榆树市黑土退化机理的差异性研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006.
- 30 詹敏, 厉占才, 信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J]. 黑龙江水专学报, 1998(1): 40–43.
Zhan Min, Li Zhancai, Xin Yulin. On the relationship between precipitation parameter and soil erosion [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 1998(1): 40–43. (in Chinese)
- 31 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1–9, 18.
Zhang Xiankui, Xu Jinghua, Lu Xiuqin, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 1–9, 18. (in Chinese)
- 32 耿晓东, 郑粉莉, 张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 39–43.
Geng Xiaodong, Zheng Fenli, Zhang Huiru. Effect of rainfall intensities and slope gradients on characteristics of rainfall infiltration, runoff and sediment on red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 39–43. (in Chinese)
- 33 李裕元, 邵明安. 降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J]. 水利学报, 2004(4): 48–53.
Li Yuyuan, Shao Ming'an. Experimental study on characteristics of water transformation on slope land [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(4): 48–53. (in Chinese)
- 34 王辉, 王全九, 邵明安. 前期土壤含水量对坡面产流产沙特性影响的模拟试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 65–68.
Wang Hui, Wang Quanjiu, Shao Ming'an. Simulation experiment of effect of antecedent soil moisture content on characteristics of runoff and sediment from two soil sloping lands [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(5): 65–68. (in Chinese)

- removal[J]. *Geoderma*, 2006, 134(3-4): 373-385.
- 13 Montero E, Martin M A. Holder spectrum of dry grain volume-size distributions in soil[J]. *Geoderma*, 2003, 112(3): 197-204.
- 14 Moreno R G, Alvarez M C D, Requejo A S, et al. Multifractal analysis of soil surface roughness[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 512-520.
- 15 Posadas A N D, Gimenez D, Quiroz R, et al. Multifractal characterization of soil pore systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(5): 1361-1369.
- 16 Ahmadi A, Neyshabouri M R, Rouhipour H, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3-4): 305-311.
- 17 Bakker M M, Govers G, Kosmas C, et al. Soil erosion as a driver of land-use change [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 105(3): 467-481.
- 18 Covalada S, Gallardo J F, Garcia-Oliva F, et al. Land-use effects on the distribution of soil organic carbon within particle-size fractions of volcanic soils in the Transmexican Volcanic Belt (Mexico) [J]. *Soil Use and Management*, 2011, 27(2): 186-194.
- 19 Szilassi P, Jordan G, van Rompaey A, et al. Impacts of historical land use changes on erosion and agricultural soil properties in the Kali Basin at Lake Balaton, Hungary[J]. *CATENA*, 2006, 68(2-3): 96-108.
- 20 白一茹, 汪有科. 黄土丘陵沟壑区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 43-48.
Bai Yiru, Wang Youke. Monofractal and multifractal analysis on soil particle distribution in hilly and gully areas of the Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 43-48. (in Chinese)
- 21 管孝艳, 杨培岭, 吕焯. 基于多重分形的土壤粒径分布与土壤物理特性关系[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3): 44-50.
Guan Xiaoyan, Yang Peiling, Lü Ye. Relationship between soil particle size distribution and soil physical properties based on multifractal[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3): 44-50. (in Chinese)
- 22 王德, 傅博杰, 陈利顶, 等. 不同土地利用类型下土壤粒径分形分析——以黄土丘陵沟壑区为例[J]. *生态学报*, 2007, 27(7): 3081-3089.
Wang De, Fu Bojie, Chen Liding, et al. Fractal analysis on soil particle size distribution under different land-use types: a case study in the loess hilly areas of the Loess Plateau, China[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2007, 27(7): 3081-3089. (in Chinese)
- 23 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成成分形分析[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 74-78.
Dang Yaai, Li Shiqing, Wang Guodong, et al. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau[J]. *Transaction of the CSAE*, 2009, 25(9): 74-78. (in Chinese)
- 24 Bittelli M, Campbell G S, Flury M. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(4): 782-788.
- 25 Bakker M M, Govers G, van Doorn A, et al. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: the importance of landscape pattern[J]. *Geomorphology*, 2008, 98(3-4): 213-226.

(上接第 154 页)

- 35 郑粉莉. 坡面降雨侵蚀和径流侵蚀研究[J]. *水土保持通报*, 1998, 18(6): 17-21.
Zheng Fenli. A study on rainfall erosion and runoff erosion [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(6): 17-21. (in Chinese)
- 36 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 杨凌: 中科院水利部水土保持研究所, 2012.
- 37 吴普特, 周佩华. 地表坡度与薄层水流侵蚀关系的研究[J]. *水土保持通报*, 1993, 13(3): 1-5.
Wu Pute, Zhou Peihua. Study on the relation between land slope and sheet flow erosion [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1993, 13(3): 1-5. (in Chinese)
- 38 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010(6): 48-53.
Geng Xiaodong, Zheng Fenli, Liu Li. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hillslopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010(6): 48-53. (in Chinese)
- 39 Bagarello V, Ferro V, Giordano G, et al. Effect of plot size on measured soil loss for two Italian experimental sites [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 108(1): 18-27.
- 40 郑粉莉, 高学田. 坡面汇流汇沙与侵蚀-搬运-沉积过程[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 134-139.
Zheng Fenli, Gao Xuettian. Up-slope runoff and sediment and down-slope erosion-transport-deposition processes [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 134-139. (in Chinese)
- 41 程琴娟, 蔡强国, 马文军. 我国水土流失典型区土壤表土结皮敏感性[J]. *地理研究*, 2008, 27(6): 1290-1298.
Cheng Qinjuan, Cai Qiangguo, Ma Wenjun. Study on sensitivity of soil surface crust formation in typical regions with serious soil and water loss, China [J]. *Geographical Research*, 2008, 27(6): 1290-1298. (in Chinese)
- 42 刘瑞. 我国四类典型土壤的表土结皮发育特征及区域差异研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- 43 和继军, 孙莉英, 蔡强国, 等. 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 862-870.
He Jijun, Sun Liying, Cai Qiangguo, et al. Characteristics of rill development on slope and theirs effects on flow velocity distribution [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 862-870. (in Chinese)