

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0724

李建明 秦伟 左长清 等. 2014. 黄土高原土质路浮土径流产沙模拟降雨试验研究[J]. 环境科学学报, 34(9): 2337-2345

Li J M, Qin W, Zuo C Q, et al. 2014. Runoff and sediment yielding for earth road regolith on the Loess Plateau with simulated rainfall[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(9): 2337-2345

黄土高原土质路浮土径流产沙模拟降雨试验研究

李建明¹, 秦伟², 左长清², 王文龙^{1,3,*}, 郭明明¹

1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100

2. 中国水利水电科学研究院泥沙研究所 北京 100044

3. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100

收稿日期: 2014-04-09

修回日期: 2014-05-04

录用日期: 2014-05-04

摘要: 目前关于道路侵蚀的研究较多, 但针对土质路浮土侵蚀规律的研究尚未见报道, 且浮土侵蚀由于浮土颗粒的特殊性质, 与农地、撂荒地及道路侵蚀等有较大区别. 因此, 本文采用室内人工模拟降雨的方法, 研究了黄土高原土质路浮土侵蚀规律. 结果表明: ①大坡度、大雨强时产流起始时间随浮土厚度的增大差异较小, 并与雨强、坡度呈显著线性关系, 坡度 2° 时产流时间较其他坡度滞后 36.23%~52.57%, 随雨强增大, 产流起始时间可缩短 38.57%~72.89%, 开始侵蚀土质路路面发生在小区出口处. ②径流量在产流开始后 3 min 内显著递增, 增幅可达 692.59%, 该过程主要发生在单独浮土侵蚀时段, 达到混合侵蚀时段后径流量趋于相对稳定, 随雨强增大而递增, 幅度可达 29.84%~177.81%. 开始侵蚀路面临界时间点随雨强的增大而提前, 随浮土厚度的增大而滞后. ③侵蚀速率在产流开始后 9 min 时出现转折, 在此之前的单独浮土侵蚀时段波动剧烈, 混合侵蚀时段在大坡度下随降雨过程持续递增, 小坡度下趋于相对稳定. ④21 min 时总径流量随雨强增大而递增, 坡度对 21 min 时总侵蚀量影响显著, 递增幅度可达 15.44%~229.00%. 本研究结果阐明了土质路浮土侵蚀规律, 可为综合治理道路及浮土侵蚀, 改善当地环境质量提供科学依据.

关键词: 浮土; 土质路; 径流; 产沙; 模拟降雨

文章编号: 0253-2468(2014)09-2337-09

中图分类号: S157.1 X522

文献标识码: A

Runoff and sediment yielding for earth road regolith on the Loess Plateau with simulated rainfall

LI Jianming¹, QIN Wei², ZUO Changqing², WANG Wenlong^{1,3,*}, GUO Mingming¹

1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100

2. Department of Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100

Received 9 April 2014;

received in revised form 4 May 2014;

accepted 4 May 2014

Abstract: Erosion process for earth road regolith is rarely reported. Due to their special characteristics of regolith particles, erosion processes on earth road regolith are different from those on farmland, wasteland and road. In this study, the regolith erosion processes were investigated with indoor artificially simulated rainfall. Results showed that ① at high rainfall intensity and large slope degree, runoff generating time changed little with increasing regolith thickness and had a significantly linear relationship with rainfall intensity and slope degree. Compared with other slope degrees, runoff generating time lagged behind by 36.23%~52.57% on 2° slope. Moreover, with increasing rainfall intensity, runoff generating time was reduced by 38.57%~72.89% and surface erosion on earth road occurred first near plot outlet. ② Runoff volume increased significantly 3 minutes after runoff generating and its increment rate was up to 692.59%. This increase occurred mainly in the regolith erosion alone stage. In the earth road and regolith erosion mixed stage, runoff volume tended to be relatively stable and its increment rates were 29.84%~177.81% with increasing rainfall intensity. The critical time for road surface erosion was advanced with increasing rainfall intensity, but lagged behind with increasing regolith thickness. ③ Erosion rate changed 9 min after runoff generating.

基金项目: 水利部公益性行业专项(No.201201047 201201048); 中国科学院西部行动计划项目(No.KZCX2-XB3-13); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(No.10502-T1)

Supported by the Nonprofit Industry-Specific of the Ministry of Water Resource(No. 201201047 201201048), the Western Academy of Sciences Action Plan Project(No.KZCX2-XB3-13) and the State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateaus Special Fund(No.10502-T1)

作者简介: 李建明(1989—) 男, E-mail: hahaljianming@126.com; * 通讯作者(责任作者) E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

Biography: LI Jianming(1989—), male, E-mail: hahaljianming@126.com; * **Corresponding author** E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

It fluctuated prominently and belonged to the "regolith erosion alone stage". In the mixed erosion stage, however, it showed a continuous increase with time at large slope degree and tended to be relatively stable at small slope degree.④ The total runoff volume within 21 min increased with increasing rainfall intensity. Slope had a significant effect on the total erosion within 21 min, with the increment rates up to 15.44%~229.00%. The results illustrated the erosion processes on earth road regolith and provided scientific reference for the comprehensive management of road and regolith erosion and the improvement of local environmental quality.

Keywords: regolith; earth road; runoff yield; sediment yield; simulated rainfall

1 引言(Introduction)

目前,全国各地区道路网系密集,主要包括农村土质道路、公路及高速公路等.在经济快速发展的同时,道路建设也带来了诸多环境问题,包括区域水土流失加剧,城市道路扬尘使得空气中颗粒物含量增多等,这些都对人类健康造成了威胁(Ziegler *et al.*, 2000; 王晓燕等, 2011),尤其是农村土质生产路及各类开发建设中的施工便道.国外关于道路侵蚀的研究较早,在 20 世纪 70 年代初就有相关报道(Duncan *et al.*, 1985),主要集中在道路侵蚀特点及影响因子、道路侵蚀预报及引起水文与泥沙过程变化等方面(Ziegler *et al.*, 2001; Jacky *et al.*, 2001; Wemple *et al.*, 1996).我国在这方面的研究起步较晚,但也取得了一些重要成果.例如,张科利等(2008)研究认为,道路侵蚀为发生在道路路域内的各种侵蚀过程,以及由于路网存在对流域自然水沙过程改变所引起的侵蚀变化量.郑世清等(1994)采用定位观测方法对次降雨道路侵蚀模数进行了估测;徐宪利等(2006)提出了次降雨公路边坡径流泥沙估算公式;邢宁婷等(2011)提出了高速公路建设中水土流失预测的加速侵蚀系数法.关于道路浮土,国内学者并未给出其粒度范围,课题研究中一般采用粒径 $<1\text{ mm}$;而美国环保署明确提出道路路面浮土颗粒物的粒度范围在 200 目(约 $75\ \mu\text{m}$)以下,并指出浮土不仅对人体健康产生影响,引发各种呼吸系统病变,提高癌症发病率,同时对环境质量也有一定影响,使空气中扬尘数量增加,能见度降低(如现在人们常用 $\text{PM}_{2.5}$ 来反映空气质量);也会增加道路清扫保洁的难度(王晓燕等, 2011).近期,随着雾霾给人们生产生活带来的诸多不便,研究人员还对城市道路浮土的粒度、浮土中重金属元素铅同位素特征及来源、大颗粒物来源进行了相关研究,并取得了一定的成果(王晓燕等, 2011; 高博等, 2011; 杨绍晋等, 1987).而国外关于浮土的报道则多见于矿区产生的粉煤灰排放等方面,如 Fabiano 等(2014)通过现实案例分析发现,为控制环境风险至最小,粉煤灰最好通过地下管道排放; Witt 等(2002)通过

实验研究风向、速度对粉尘流失的影响,进而提出采用计算机流体力学模型预测粉尘流失.

综上,目前对于道路侵蚀、道路浮土的危害等均有报道,但对于土质路浮土在降雨作用下的侵蚀特征、流失规律的研究还相对较少.因此,本文在野外调查的基础上,采用室内人工模拟降雨的方法研究浮土流失规律,以及浮土侵蚀与道路侵蚀的区别,以期治理道路浮土侵蚀,改善环境质量提供科学依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

2.1 野外调查

为使室内模拟实验尽可能符合野外实际情况,本文首先进行野外调查.选取陕西省长武县、神木县和内蒙古永利煤矿作为 3 个调查点,分别代表道路浮土的不同典型类型:长武县是陕西省的苹果种植基地,境内土质生产路车流量大;神木县与内蒙古永利煤矿均属晋陕蒙特大型煤田核心区,运煤道路分布广泛,车流量远大于普通土质路面,道路上常覆盖黄土与粉煤灰混合的浮土.各地区均调查典型主干道,对于较长的道路分成 2~3 段分别记录,其中,长武县、神木县和永利煤矿分别选择 6、5 和 9 条道路,调查内容包括道路名称、经纬度、海拔、坡度及浮土厚度的最大值、最小值和平均值.各调查点分别选取 28、11 和 9 个取样点,土质路坡度在 $0^\circ\sim 20^\circ$ 之间,平均值在 $4^\circ\sim 10^\circ$ 的占 80% 以上;浮土在道路车辙两侧分布较厚,其他部位较薄,主要集中在几 mm 至 2 cm 之间;道路容重在 $1.54\sim 1.83\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间,其中,长武、神木和永利煤矿区土质路的平均容重分别为 1.72 、 1.66 和 $1.61\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,三地土质路的平均容重为 $1.68\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.采用人工筛分法分析浮土颗粒的组成,测得三地 $>0.25\ \text{mm}$ 的细颗粒质量百分比平均为 67.65%, $\leq 0.25\ \text{mm}$ 的细颗粒质量百分比平均为 32.35%,浮土平均容重为 $1.20\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$.虽然各地土壤类型不同,但浮土主要由道路表层土经长期碾压粉碎形成,二者在本质上是同一种物质.在影响侵蚀的机制研究中,土壤颗粒机械组成是一项主要的指标,本试验将不同地区不同土壤类型的道

路、浮土概化为质地这一指标,并用陕西关中壤土作为模拟道路、浮土的试验用土,按照野外调查结果,模拟道路、浮土的容重分别为 $1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,具有一定的可行性与代表性。

2.2 试验方法

依据调查数据,本试验共设计了 4 个道路坡度,分别为 2° 、 4° 、 8° 和 16° ,涵盖了黄土高原土质路坡度的变化范围;浮土厚度选取 1、2 和 4 cm,覆盖了实际道路的浮土厚度。由于试验所需的浮土量较大,本文采用人工配比的方法:过 6 mm 网筛筛分后,经过 3~5 d 晒干,达到干燥状态,随后人工捣碎并经过 2 mm 和 0.25 mm 网筛,按照 2~0.25 mm 细颗粒的质量百分比为 70% 和 <0.25 mm 细颗粒的质量百分比为 30% 进行配比。

试验槽为中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅的可移动式变坡钢槽,尺寸为 $2 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$ (长×宽×高)。由于道路容重较大,为达到试验要求,壤土过 6 mm 网筛,分 5 层填装,用铁饼持续敲打夯实,以达到试验设计容重。试验槽填装完后,表层覆盖一薄层干土,置于室外风干,使道路表土干燥,并不发生干裂。试验前,调整试验槽到设计坡度,将称重好的浮土均匀铺在模拟道路表层,将集水口处的浮土刮成一定圆弧状,防止浮土在试验前进入集流槽。计算可知,1、2 和 4 cm 厚浮土的质量分别为 13.4、26.8 和 53.6 kg。在集流槽出口道路与浮土之间放置一 3 mm 宽的白色尼龙线,以作为判定浮土被侵蚀殆尽道路侵蚀开始的起始时间。

根据黄土高原多年降雨特征,雨强设置为 1.0 、 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。以梅花桩法布设率定雨强,多次率定至误差控制在 5% 内。然后迅速揭开土槽上的遮雨布并开始计时,至坡面形成股流并流出集流槽,记录产流起始时间。在每场试验中配备一名人员专门负责试验现象的观测、拍照并记录时间特征点。在集流槽出口处收集泥沙样,采用烘干法测定泥沙样。坡度为 2° 、 4° 、 8° 、 16° 对应的降雨总时间分别为 39、33、27、21 min,产流开始后 3 min 内每 1 min 接 1 个径流泥沙样,3 min 后每隔 3 min 重复 1 次上述过程。因此,本次试验共计降雨 $4 \times 2 \times 3 = 24$ 场次。

3 结果与分析(Results and analysis)

3.1 浮土侵蚀的产流起始时间与开始侵蚀路面时间特征

土质路侵蚀特征区别于农地、荒坡地,主要在

于道路经过车辆长期碾压,表层容重增大,大孔隙减小,入渗率降低,径流系数增大。有研究指出,引起土质路严重侵蚀的一个原因在于土质路表层覆盖了一层浮土,在降雨初期便会随着径流流失(史志华等 2009)。在试验过程中,产流起始时间(T_0)和开始侵蚀路面时间(T_1)是两个关键点(均从降雨开始计时),二者之间的时间差则代表单独浮土侵蚀时段。

T_0 可以反映出降雨初期坡面径流形成过程,是指降雨开始至坡面形成股流且流出集流槽出口的时间。当道路表面覆一层浮土后,浮土颗粒细小、疏松,雨水落至坡面表层,首先湿润浮土,导致产流相对于普通道路滞后。表 1 为各场次降雨下 T_0 和 T_1 的观测结果,可以看出,在各场次降雨中,只有在 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下坡度为 2° 时的 T_0 随浮土厚度的增大先迅速递增随后递减;当浮土厚度由 1 cm 增至 2 cm 时,雨水浸湿浮土过程延长导致 T_0 先增大;而当浮土厚度由 2 cm 增至 4 cm 时, T_0 减小是由于浮土厚度大、雨强小,降雨初期表层浮土互相粘结,形成致密薄膜,阻碍雨水下渗,导致 T_0 提前。其它条件下 T_0 随浮土厚度的增大变化不显著,雨强为 1.0 、 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时分别为 $4.36 \sim 6.22 \text{ min}$ 、 $1.50 \sim 2.95 \text{ min}$,造成其差异较小的原因是浮土表层结皮形成导致雨水落至坡面直接形成径流。2 种雨强下 T_0 变化趋势总体表现为: 2° 时的 T_0 最大,较其它坡度下的 T_0 平均滞后 $1.34 \sim 1.74 \text{ min}$,随坡度增大,差异减小。 T_0 随雨强变化显著,当雨强由 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, T_0 可减小 $38.57\% \sim 72.89\%$ 。这是因为雨强增大,单位时间单位面积内的承雨量增加,加速了浮土湿润过程及表层径流形成。分析可知, T_0 与雨强呈显著的负幂函数关系,相关系数为 0.794 ($p < 0.01$)。

T_1 指降雨开始到小区出口处某一点表层浮土完全流失,径流开始侵蚀道路路面的时间点,该时间点对于区分单独浮土侵蚀时段与后期的混合侵蚀时段具有重要的意义。由表 1 可知,在雨强为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, T_1 随浮土厚度总体呈现先增大后减小的变化规律,2 cm 厚度时的 T_1 最大;当雨强增大至 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, T_1 总体随浮土厚度的增大而递增。当坡度越小、浮土厚度越大时,相同雨强下径流所具有的势能越小,导致 T_0 与 T_1 相对较大。雨强为 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同浮土厚度下 T_1 随坡度的变化趋势较显著,总体呈现随坡度的增大 T_1 逐渐减小,在

2 cm浮土厚度下最显著,16°相对于2°时 T_1 缩短了58.19%。在浮土厚度、坡度相同时,随雨强递增 T_1 显著减小,可达-24.56%~74.59%。2°及16°坡度下浮土厚度为4 cm时,在1.5 mm·min⁻¹雨强下的 T_1 比1.0 mm·min⁻¹时反而增大,主要是由于浮土厚度大,

表层结皮层经过不断形成与破碎的循环过程不同,导致 T_1 有差异。分析可知, T_1 与 T_0 、雨强之间呈显著相关性,相关系数分别为0.731 ($p < 0.01$) 和0.492 ($p < 0.05$)。

表1 浮土侵蚀的产流起始时间及开始侵蚀路面时间

Table 1 Initial times for runoff generating and road surface erosion in regolith erosion process

雨强 / (mm·min ⁻¹)	浮土厚度 / cm	产流起始时间 T_0 /min				开始侵蚀路面时间 T_1 /min			
		2°	4°	8°	16°	2°	4°	8°	16°
1.0	1	5.35	3.88	6.22	5.02	16.31	11.43	14.00	15.92
	2	10.33	4.97	5.47	4.77	33.17	16.71	20.54	13.87
	4	6.00	4.47	4.68	4.36	24.67	10.16	21.00	10.36
1.5	1	2.95	1.97	1.83	2.67	8.56	6.01	5.56	4.67
	2	2.80	2.15	1.50	2.93	11.53	8.17	5.22	7.83
	4	2.84	2.40	2.12	2.47	30.73	10.52	10.67	10.37

3.2 不同浮土厚度下径流产沙特征

3.2.1 浮土侵蚀的径流量特征 图1为1.0、1.5 mm·min⁻¹ 2种雨强下1、2、4 cm厚度浮土径流量随

侵蚀过程的变化。由于道路、浮土干燥,容重差异较大,道路表层类似于一个隔水层,雨水落至小区时首先浸润表层浮土,由于浮土颗粒间存在大量的空

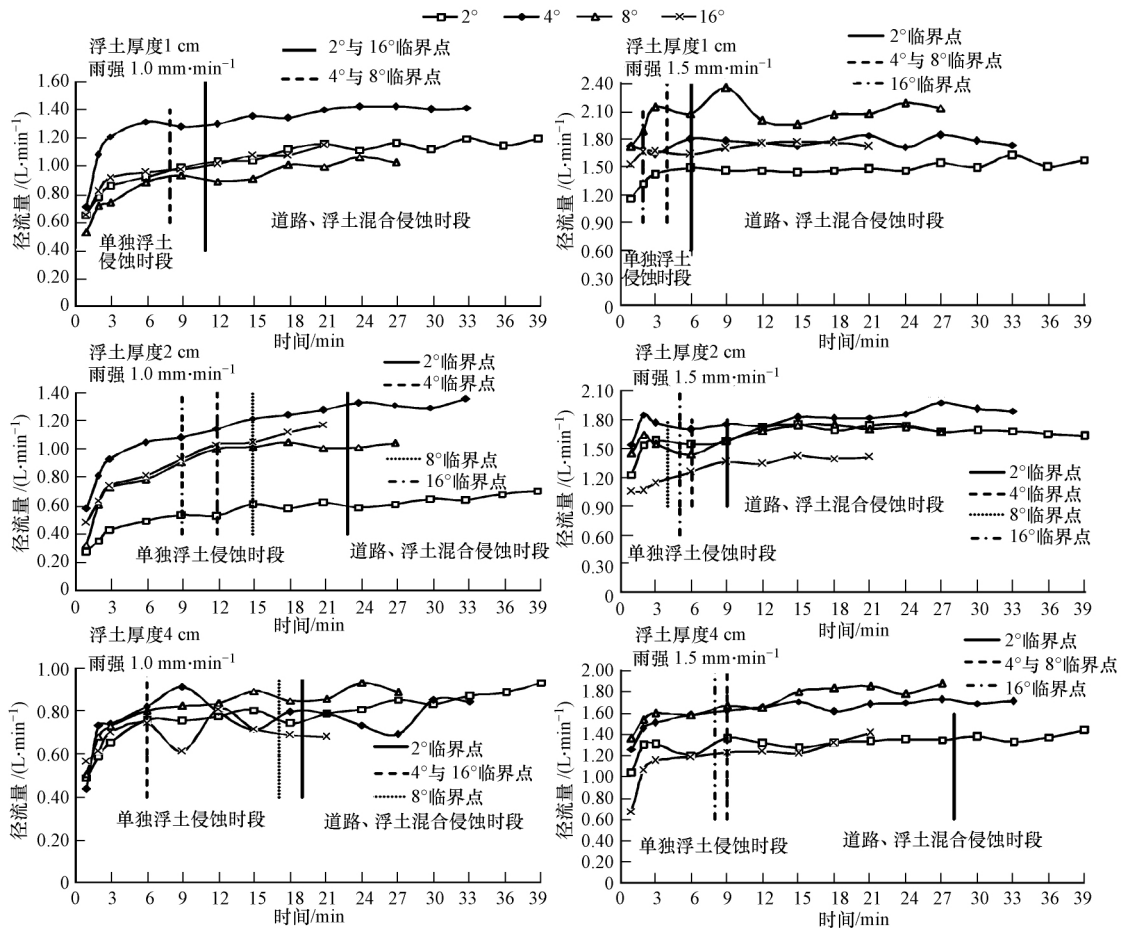


图1 两种雨强下不同浮土厚度径流量随时间变化

Fig.1 Variation of runoff volume for different regolith thicknesses at two rainfall intensities

隙,雨水很快就能下渗,但同时由于浮土的颗粒小于 2 mm,经雨水浸润后会发生“胶结”;随着降雨的持续,浮土底层湿润后雨水到达道路表层,开始时由于道路容重较大,雨水入渗较难,且道路存在一定坡度,雨水沿坡面流下,在集水槽出口处汇集大量雨水,首先出现跌坑;随径流持续冲刷,形成类似溯源侵蚀,不断向后推移,形成侵蚀断面,随着浮土的持续流失,至某一点处浮土全部流失,道路侵蚀开始,该时间点之前为“单独浮土侵蚀时段”,随后发生的侵蚀包含浮土与道路两部分,称为“道路-浮土混合侵蚀时段”。在分析道路浮土径流产沙过程中,图中用不同坡度下“临界点”来划分两个不同侵蚀阶段。总体看来,径流量在产流开始后的 3 min 内迅速递增,该过程主要发生在单独浮土侵蚀时段,在道路-浮土混合侵蚀时段,径流量在较小范围内波动或趋于稳定。计算可知,相同坡度下 1、2、4 cm 浮土厚度时,在 1.0 和 1.5 mm·min⁻¹ 雨强下的稳定径流量分别为 0.96~1.36 L·min⁻¹ 和 1.50~2.10 L·min⁻¹、0.60~1.22 L·min⁻¹ 和 1.36~1.83 L·min⁻¹、0.71~0.86 L·min⁻¹ 和 1.27~1.76 L·min⁻¹。径流量随浮土厚度的增大而呈递减趋势,相同坡度下 2 和 4 cm 浮土厚度在 1.0 mm·min⁻¹ 雨强时的稳定径流量较 1 cm 浮土厚度时分别减少了 -1.08%~45.17% 和 10.56%~41.74%; 1.5 mm·min⁻¹ 雨强时,分别减少了 -11.77%~21.09% 和 5.72%~26.13%。可能是由于相同雨强、坡度下,随浮土厚度的增大,浮土层可容纳的水量增多,因此,降雨入渗量随浮土厚度的增加呈递增趋势,进而导致径流量减少;当浮土厚度相同,径流量随雨强的增大呈显著递增趋势。计算可知,1.5 mm·min⁻¹ 雨强下浮土厚度为 1、2 和 4 cm 时的稳定径流量较 1.0 mm·min⁻¹ 雨强时分别增加了 29.84%~118.47%、34.28%~177.81% 和 63.29%~110.13%。道路浮土侵蚀过程中的稳定径流量与雨强相关性显著,相关系数为 0.846 ($p < 0.01$)。次降雨过程中径流量随坡度变化规律不显著,但坡度对径流量影响较大,不同坡度单位小区所承受的雨量不同,且径流所具有的挟沙力随坡度变化也较大,最终导致了侵蚀的差异,这也会进一步影响径流量。

分析次降雨过程中不同坡度、雨强、浮土厚度下 2 个侵蚀阶段的时间临界点,从图中可以看出,临界点随坡度的增大而减小,2° 时的临界点最大,在产流开始后的 28 min,而 16° 时的临界点较小,甚至在产流开始后的 2 min 就发生道路侵蚀。临界点随着

浮土厚度的增大总体呈递增趋势,随雨强、坡度的增大呈递减趋势。主要是由于坡度越大,侵蚀势能越大,在水力作用下,能较快发生侵蚀,导致侵蚀临界点时间提前;而浮土厚度增大,集水口处表层浮土被完全侵蚀的时间延长,导致侵蚀临界点时间滞后;雨强增大,单位时间内雨量增多,断面径流增多,水流挟沙力增强,浮土流失加快,侵蚀临界点时间缩短。总体而言,道路浮土侵蚀过程中的径流量变化规律与一般农地、道路相近,在产流开始初期,径流量增大随后趋于相对稳定。

3.2.2 浮土侵蚀的侵蚀速率特征 图 2 为两种雨强下 3 种浮土厚度在不同坡度下的侵蚀速率随时间的变化。可以看出,侵蚀速率转折点大部分在产流开始后的 9 min 左右,相对于径流量的转折点有滞后效应。在单独浮土侵蚀时段,侵蚀速率随时间变化波动强烈,且总体呈现递增趋势,尤其在大坡度、大浮土厚度下更显著;在道路-浮土混合侵蚀时段,两个小坡度(2°、4°)下的侵蚀速率在较小范围内波动,趋于相对稳定,而大坡度(8°、16°)下侵蚀速率持续递增。浮土厚度及雨强相同时,侵蚀速率均随着坡度增大显著递增,主要是由于坡度增大,侵蚀势能作用越来越显著,加之水流的冲击、剥蚀作用,道路浮土侵蚀愈加严重。从图中可以看出,当坡度为 2° 时,各场次降雨下的侵蚀速率均较小,变化范围为 2.87~107.10 g·m⁻²·min⁻¹,1、2 和 4 cm 浮土厚度时 1.0 和 1.5 mm·min⁻¹ 雨强下的平均侵蚀速率分别为 19.40 和 42.15 g·m⁻²·min⁻¹、14.80 和 63.53 g·m⁻²·min⁻¹、58.99 和 29.25 g·m⁻²·min⁻¹,仅占 4° 时的 11.56%~64.54%,8° 时的 10.47%~56.24%,16° 时的 9.45%~47.38%。图中反映出不同坡度在单独浮土侵蚀时段的侵蚀速率值均小于混合侵蚀时段,随坡度变化规律不显著;但在混合侵蚀时段,侵蚀速率总体表现为坡度越大侵蚀越强,且均达到相对稳定;在混合侵蚀时段,由于道路与浮土同时被侵蚀,可提供充足的侵蚀物质,此时的侵蚀速率主要取决于径流挟沙力。在各次降雨过程中,16° 时的侵蚀速率在开始混合侵蚀后递增迅速。考虑雨强影响分析侵蚀速率变化,可知,相同浮土厚度下,各坡度下的侵蚀速率随雨强增大总体呈递增趋势,该现象与上述径流量变化特征较一致,也吻合侵蚀中所描述的“水大沙多”特点:雨强增大,小区承雨量增多,形成的径流增多,径流所能携带的泥沙量也递增,导致了侵蚀速率增大。分析可知,1 cm 浮土厚度时 1.5 mm·min⁻¹

雨强下的平均侵蚀速率是 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的 $0.89 \sim 2.30$ 倍, 2 和 4 cm 浮土厚度时分别为 $0.95 \sim 4.29$ 倍、 $0.50 \sim 2.38$ 倍. 平均侵蚀速率随浮土厚度的变化表现为: $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下 2 cm 浮土厚度的平均侵蚀速率是 1 cm 的 $0.76 \sim 1.85$ 倍, 4 cm 浮土厚度的平均侵蚀速率是 1 cm 的 $1.10 \sim 3.04$ 倍; 4 cm 浮土厚度的平均侵蚀速率是 2 cm 的 $0.71 \sim 3.99$ 倍; $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下的相应值分别为 $0.77 \sim 1.51$ 倍、 $0.69 \sim 2.12$ 倍、 $0.46 \sim 1.85$ 倍. 总体看来, 侵蚀速率随

浮土厚度的增大总体呈递增趋势, 主要是由于浮土厚度越厚所能提供的侵蚀性颗粒越多, 径流所能携带的泥沙随径流挟沙力的增大而持续递增. 除了 4 cm 浮土厚度在 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下的最大侵蚀速率 ($480 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$) 较大外, 其他各条件下的侵蚀速率最大值较一致, 大致在 $240 \sim 300 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间. 分析可知, 平均侵蚀速率与坡度相关性显著, 相关系数为 $0.578 (p < 0.01)$.

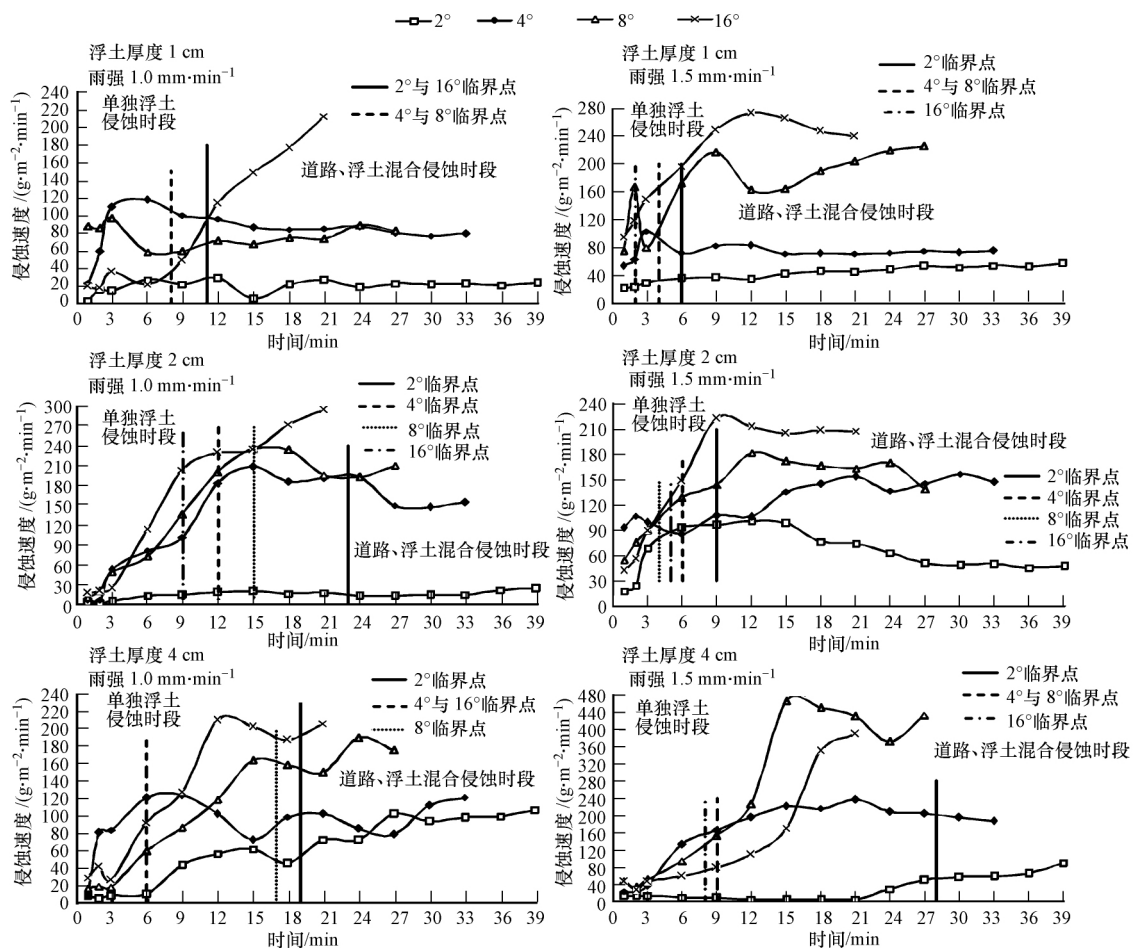


图 2 两种雨强下不同浮土厚度侵蚀速率随时间变化

Fig.2 Variation of erosion rate for different regolith thicknesses at two rainfall intensities

3.3 浮土侵蚀的径流产沙关系

由于道路浮土侵蚀存在着特殊性, 浮土颗粒的组成主要是粉粘粒, 因此, 分析道路浮土侵蚀过程中的径流产沙关系是一项重要内容. 不同坡度、浮土厚度、雨强下浮土流失的速度、侵蚀程度各异, 本文设计的 4 种坡度下的产流后的降雨时间 (39、33、27、21 min) 不同, 为便于比较分析, 采用产流后 21 min 内的径流量、产沙量进行分析对比. 表 2、表 3 列出了

各场次降雨下产流后 21 min 内及单独浮土侵蚀时段的次降雨总径流量、总侵蚀量.

21 min 内的次降雨径流总量随浮土厚度的变化规律不显著, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时各坡度下的径流总量变化范围为 $10.11 \sim 25.16 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时为 $23.81 \sim 41.30 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$. 造成次降雨径流总量随浮土厚度变化不大的原因主要是由于浮土颗粒细小, 在侵蚀过程中发生表层“结皮”, 结

皮经过“形成-破碎-再形成-再破碎”的循环往复过程。而径流总量随坡度变化在 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时表现为 4° 时最大, 平均是 2° 时的 1.41 倍; 在 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时表现为 8° 时最大, 平均是最小的 16° 时的 1.28 倍。在 3 种因素中, 雨强对次降雨径流量影响最大, 其他相同条件时, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下的径流量是 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时的 1.38~3.19 倍, 二者之间呈显著的线性关系, 相关系数为 0.860 ($p < 0.601$)。

单独浮土侵蚀时段的次降雨径流量大小主要取决于该时段降雨时间长短, 总体表现为随着坡度

的增大而递减, 即坡度越大, 相同条件下浮土流失较快, 更快到达混合侵蚀时段。 1.0 、 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时, 16° 时的平均单独浮土侵蚀时段次降雨径流量分别占 2° 时的 56.57% 和 36.49%。随着浮土厚度增大, 相同雨强、坡度下的径流量总体呈递增趋势, 主要是由于浮土厚度增大, 单独浮土侵蚀时段的时间延长, 导致径流总量增多, 计算可知 4 cm 时可达 1 cm 时的 1.58~3.83 倍。单独浮土侵蚀时段的次降雨径流总量与坡度呈显著负相关关系, 相关系数为 -0.463 ($p < 0.05$)。

表 2 21 min 内及单独浮土侵蚀时段次降雨总径流量

Table 2 Total runoff volumes in the 21 min and regolith erosion alone stages

雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	浮土厚度/ cm	21 min 次降雨总径流量/($\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$)				单独浮土侵蚀时段次降雨总径流量/($\text{L} \cdot \text{m}^{-2}$)			
		2°	4°	8°	16°	2°	4°	8°	16°
1.0	1	19.25	25.16	17.28	19.48	8.71	8.04	5.21	9.03
	2	10.11	21.26	17.28	18.06	10.11	10.51	11.13	5.75
	4	14.58	15.51	15.99	14.00	13.09	3.39	12.55	3.28
1.5	1	28.59	34.76	41.30	33.95	6.71	6.66	7.88	3.17
	2	32.28	35.12	32.23	25.78	12.13	8.67	6.16	5.51
	4	25.71	31.80	33.32	23.81	25.71	12.00	12.44	7.57

21 min 内次降雨总侵蚀量随浮土厚度变化可分为 2 个阶段: 由 1 cm 增至 2 cm 时, 不同坡度、雨强下的总侵蚀量均呈递增趋势, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时可达 1.39~2.05 倍, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时为 1.00~2.00 倍; 由 2 cm 增至 4 cm 时, 总侵蚀量呈随机变化, 既有增大也有递减。 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时 4 cm 浮土厚度下的总侵蚀量可达 1 cm 时的 1.26~2.37 倍, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时为 0.28~2.01 倍。主要原因是浮土厚度为 1 cm 时, 浮土层较薄, 随降雨持续, 导致可供侵蚀的细颗粒减少, 而 2 cm 浮土厚度具有充足的侵蚀源, 该过程决定侵蚀的主要因素是易发生侵蚀性颗粒的数量; 而浮土厚度增大至 4 cm 时, 由于浮土层厚度大, 可以持续供应细颗粒, 决定侵蚀大小因素是径流挟沙力。

在雨强相同时, 坡度对次降雨侵蚀量的影响显著, 随坡度的增大而增大, 且两个大坡度 (8° 、 16°) 下的次降雨侵蚀量远大于两个小坡度 (2° 、 4°)。计算可知, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时随坡度增大 21 min 内的次降雨总侵蚀量平均值分别为 0.61、2.00、2.31、2.87 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时分别为 0.55、1.33、1.92 和 2.36 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在相同雨强下, 次降雨侵蚀总量随坡度变化明显, 且在 2° 增大至 4° 时的递增幅度最大, 两

种雨强递增幅度分别为 229.00% 和 141.11%; 随着坡度继续增大, 递增幅度减缓, 两种雨强下分别为 15.44%~24.44% 和 23.14%~44.78%。同时, 在不考虑浮土厚度的影响下, 雨强对次降雨侵蚀总量的影响出现了“反常”现象: 对一般的农地、弃土弃渣体、非硬化路面及土质道路等侵蚀过程中发现, 随着雨强增大, 次降雨侵蚀量呈递增趋势, 主要是雨强增大, 雨滴打击坡面表层作用力加强, 导致侵蚀初期的溅蚀量递增, 更多的细小碎屑颗粒可提供给后续的坡面侵蚀, 且雨强增大, 使得单位时间单位面积内的径流量增大, 出现“水大沙多”特性; 但在对于道路浮土侵蚀试验中发现, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下的次降雨侵蚀量小于 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强, 同坡度下仅为 66.34%~90.52%, 造成该现象的原因可能是由于浮土的特殊理化性质, 在侵蚀过程中可能发生板结、电化学反应。分析可知, 次降雨侵蚀量与坡度相关性显著, 相关系数为 0.728 ($p < 0.01$)。

单独浮土侵蚀时段的次降雨总侵蚀量随雨强变化规律与 21 min 内次降雨侵蚀量一致, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下的侵蚀量大于 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强。造成该现象原因是由于雨强增大, 导致单独浮土侵蚀时段与混合侵蚀时段的时间临界点提前, 进而导

致大雨强下的侵蚀总量较小雨强的小. 计算可知, 相同坡度下 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时单独浮土侵蚀时段的次降雨侵蚀量仅占 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时的 18.99% ~ 66.75%. 而侵蚀量随着浮土厚度的增大总体呈先递增后递减趋势, 在 2 cm 浮土厚度时最大, 分别为 1 cm 厚度时的 0.97~3.43 倍, 4 cm 厚度时的 0.60~2.39 倍. 在 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时, 侵蚀量随坡度的变化较显著, 总体呈现随坡度的增大而递增, 在 1.5

$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下侵蚀量变化的随机性增强. 不考虑浮土厚度影响下, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强下 4 种坡度的平均侵蚀量分别为 0.51、0.57、1.29 和 $0.39 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时分别为 0.19、0.28、0.25 和 $0.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. 分析可知, 单独浮土侵蚀时段的侵蚀量与雨强呈显著的负相关关系, 相关系数为 -0.590 ($p < 0.01$).

表 3 21 min 内及单独浮土侵蚀时段次降雨总侵蚀量

Table 3 Total erosion volumes in the 21min and regolith erosion alone stages

雨强/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	浮土厚度/ cm	21 min 次降雨总侵蚀量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)				单独浮土侵蚀时段次降雨总侵蚀量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)			
		2°	4°	8°	16°	2°	4°	8°	16°
1.0	1	0.38	1.46	1.75	1.63	0.21	0.54	0.81	0.33
	2	0.53	2.17	2.97	3.33	0.53	0.71	1.60	0.60
	4	0.91	2.37	2.21	3.66	0.78	0.47	1.47	0.23
1.5	1	0.50	0.90	1.54	2.53	0.10	0.19	0.21	0.13
	2	1.01	1.27	1.71	2.54	0.34	0.29	0.20	0.33
	4	0.14	1.81	2.52	2.02	0.14	0.36	0.33	0.31

分析单独浮土侵蚀时段与 21 min 内总的次降雨侵蚀量之间的关系, $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时, 1、2 和 4 cm 浮土厚度下单独浮土侵蚀时段次降雨侵蚀量与混合侵蚀时段次降雨侵蚀量的比值为 20.25% ~ 55.26%、18.02% ~ 100.00%、6.28% ~ 85.71%, 该雨强下的比值表现为 $2^\circ > 8^\circ > 4^\circ > 16^\circ$; 而 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时, 1、2 和 4 cm 浮土厚度下的比值分别为 5.14% ~ 21.11%、11.70% ~ 33.66%、13.10% ~ 100.00%, 该雨强下的比值表现为 $2^\circ > 4^\circ > 8^\circ > 16^\circ$, 在 2° 时最大, 16° 时最小, 即随坡度、雨强增大, 单独浮土侵蚀时段的侵蚀量递减, 其比值也减小.

分析道路浮土侵蚀过程中的径流产沙关系可知, 21 min 内总侵蚀量与 21 min 内总径流量相关性不显著, 而与单独浮土侵蚀时段的总径流量呈负相关关系, 相关系数为 -0.470 ($p < 0.05$); 21 min 内总径流量与单独浮土侵蚀时段的总侵蚀量相关性显著, 相关系数为 0.528 ($p < 0.05$).

4 结论(Conclusions)

1) 在坡度、雨强较大时, 由于浮土颗粒级配小, 遇水易粘附的特性使得产流起始时间随浮土厚度的变化差异不显著, 相同雨强下相差 1.45 ~ 1.86 min, 但小雨强、小坡度下变化规律表现为先增大后递减; 随坡度增大产流加快, 2° 时产流起始时间较其他坡度滞后 36.23% ~ 52.57%, 随雨强由 1.0

$\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, T_0 可减小 38.57% ~ 72.89%. 路面侵蚀开始首先发生在小区出口处, 小雨强时随浮土厚度的增大呈先递增后递减的趋势, 大雨强下随浮土厚度的增大而递增, 且与产流起始时间、雨强均呈显著相关性.

2) 径流量在产流开始后 3 min 内迅速递增, 可增加 692.59%, 该过程主要发生在单独浮土侵蚀时段, 而在道路、浮土混合侵蚀时段趋于相对稳定. 径流量随浮土厚度的增大而递减, 幅度可达 $-11.77\% \sim 45.17\%$. 径流量随雨强呈线性递增, 递增幅度达 29.84% ~ 177.81%. 开始侵蚀路面的临界时间点随雨强增大, 临界时间提前, 随浮土厚度增大而滞后.

3) 侵蚀速率随降雨历时发生转折在产流后 9 min 左右, 且在单独浮土侵蚀时段波动剧烈, 而混合侵蚀时段, 坡度为 2° 和 4° 时随侵蚀过程变化较小, 8° 和 16° 时侵蚀速率随降雨过程持续递增. 随坡度增大, 平均侵蚀速率递增, 2° 时的平均侵蚀速率仅占其他坡度的 9.45% ~ 64.54%.

4) 21 min 内的总径流量随坡度变化显著, 与雨强呈显著线性关系, $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时的总径流量可达 $1.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 雨强时的 1.38 ~ 3.19 倍. 单独浮土侵蚀时段总径流量随坡度的增大而递减, 呈显著负相关关系, 随浮土厚度的增大而递增, 4 cm 时可达 1 cm 的 1.58 ~ 3.83 倍; 21 min 内的总侵蚀量随

浮土厚度由 1 cm 增至 2 cm 时显著增大, 可达 1.00~2.05 倍, 由 2 cm 增至 4 cm 时, 变化不显著。坡度对侵蚀量影响显著, 随坡度增大, 递增幅度可达 15.44%~229.00%, 呈显著线性关系。

5) 单独浮土侵蚀时段侵蚀量与 21 min 内总侵蚀量的比值随坡度、雨强的增大而减小。21 min 总侵蚀量与单独浮土侵蚀时段总径流量、21 min 总径流量与单独浮土侵蚀时段总侵蚀量均线性相关。

责任作者简介: 王文龙(1964—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: wlwang@nwsuaf.edu.cn.

参考文献(References):

- Duncan S H, Ward J W. 1985. The influence of water shed geology and forest roads on the composition of salmon spawning gravel [J]. Northwest Science, 59: 204-212
- Fabiano B, Currò F, Reverberi A P, et al. 2014. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study [J]. Process Safety and Environment Protection, 92(2): 150-159
- 高博, 王晓君, 周怀东, 等. 2011. 北京城市道路尘土中铅同位素特征及其源解析[J]. 环境化学, 30(5): 1045-1046
- Jacky C, Simon M. 2001. Gully initiation and road-to-stream linkage in a forested catchment, southeastern Australia [J]. Earth Surface Process and Landforms, 26(2): 205-217
- 史志华, 陈利顶, 杨长春, 等. 2009. 三峡库区土质道路侵蚀产沙过程的模拟降雨试验[J]. 生态学报, 29(12): 6785-6792
- 王晓燕, 冯伟. 2011. 北京市道路路面尘土粒度分析研究[J]. 环境卫生工程, 19(4): 5-6
- 王晓燕, 冯伟, 宋华旻. 2011. 城市道路路面尘土污染研究现状分析[J]. 环境卫生工程, 19(1): 7-8
- Wemple B C, Jones J A, Grant G E. 1996. Channel network extension by logging roads in two basins western Cascades Oregon [J]. Water Resources Bulletin, 32(6): 1195-1207.
- Witt P J, Carey K G, Nguyen T V. 2002. Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modeling[J]. Applied Mathematical Modelling, 26(2): 297-309
- 刑宁婷. 2011. 高速铁路建设水土流失预测与防治研究[D]. 成都: 西南交通大学
- 徐宪利, 张科利, 庞玲, 等. 2006. 青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J]. 地理科学, 26(2): 211-216
- 杨绍晋, 杨亦男, 钱琴芳, 等. 1987. 京津地区大气颗粒物的表征及来源鉴别[J]. 环境科学学报, 7(4): 411-423
- 张科利, 徐宪利, 罗丽芳. 2008. 国内外道路侵蚀研究回顾与展望[J]. 地理科学, 28(1): 119-123
- 郑世清, 周宝林, 赵克信. 1994. 长武王东沟试验区沟坡道路侵蚀及其防止措施[J]. 水土保持学报, 8(30): 29-35
- Ziegler A D, Sutherland R A, Giambelluca T W. 2000. Runoff generation and sediment Production on unpaved roads, footpaths and agricultural land surfaces in northern Thailand [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 25(5): 519-534
- Ziegler A D, Giambelluca T W, Sutherland R A. 2001. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand validation of dynamic erodibility modelling using KNEROS2 [J]. Hydrological Processes, 15(3): 337-358