

# 干热河谷冲沟发育区不同层位土体抗冲性研究

郑学用<sup>1,2,3</sup>, 熊东红<sup>1,2</sup>, 张素<sup>1,2,4</sup>,  
鲜纪绅<sup>5</sup>, 杨丹<sup>1,2,3</sup>, 张宝军<sup>1,2,3</sup>, 郭敏<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;  
2. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院大学,  
北京 100049; 4. 四川农业大学 农学院, 四川 成都 611130; 5. 四川省电力设计院 环保所, 四川 成都 610072)

**摘要:** [目的] 对干热河谷冲沟发育区不同层位土体抗冲性进行比较研究, 为冲沟侵蚀治理措施制定提供科学依据。[方法] 通过原状土槽冲刷法进行试验研究。[结果] (1) 各层土体抗冲性均随冲刷时间呈幂函数增大(除第Ⅳ、Ⅴ层土体因裂隙的存在而在冲刷前期表现为抗冲性能随冲刷时间呈线性增加外); (2) 不同层位土体初始抗冲性差异显著, 依次为: I层>II层>VI层>III层, IV层>V层。[结论] 研究区各层位土体抗冲性在存在差异, 总体上表现为随土层深度的增加呈旋回式减小。

**关键词:** 土体抗冲性; 不同层位; 冲沟; 干热河谷

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)06-0101-05

中图分类号: S157.1

## Soil Anti-scourability of Different Horizons in Gully Developed Area of Dry-hot Valley Region

ZHENG Xueyong<sup>1,2,3</sup>, XIONG Donghong<sup>1,2</sup>, ZHANG Su<sup>1,2,4</sup>,

XIAN Jishen<sup>5</sup>, YANG Dan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Baojun<sup>1,2,3</sup>, GUO Min<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Agronomy College of Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan 611130, China; 5. Institute of Environmental Protection, Sichuan Electric Power Design Institute, Chengdu, Sichuan 610072, China)

**Abstract:** [Objective] The anti-scourabilities of soils from different horizons in gully developed area of dry-hot valley region were compared in order to provide a scientific basis for gully erosion control. [Methods] Undisturbed soil sampled from six different horizons were eroded with scour trough in laboratory. [Results] (1) Except layers of IV and V, the soil anti-scourability of other horizons increased in a power function with the scouring time. Resulted from the existence of fissure, the two layers exhibited a linear function at the scouring earlier stage. (2) There were significant differences in soil anti-scourability among each horizon with ranks as: layer I > layer II > layer VI > layer III, layer IV > layer V. [Conclusion] Soil anti-scourability decreased with the depth of each horizon in a gyratory way with ranks of layer I > layer II > layer III, and layer IV > layer V > layer VI.

**Keywords:** soil anti-scourability; different horizons; gully; dry-hot valley region

冲沟侵蚀是金沙江干热河谷突出的生态环境问题之一, 强烈的冲沟侵蚀导致干热河谷区土地严重退化, 极大威胁着坡耕地的有效利用, 近年来已逐渐成

为环境相关学科的一个热点研究领域<sup>[1-3]</sup>。冲沟发育受地形、气候、土地利用方式、土壤和岩性等多方面的影响<sup>[4]</sup>。目前, 针对冲沟发育影响因素的研究多集中

收稿日期: 2014-10-11

修回日期: 2014-11-21

资助项目: 国家重点基础科学(973)研究发展计划项目“横断山地水土作用失衡机制与灾害风险评价”(2015CB452704); 中国科学院“西部之光”重点项目(Y4R2060060); 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所“青年百人团队”项目(SDSQB-2011-01); 四川省应用基础研究计划项目(2014JY0067)

第一作者: 郑学用(1988—), 男(汉族), 四川省简阳市人, 硕士研究生, 研究方向为冲沟侵蚀和水土保持、土力学等。E-mail: 372287873@qq.com。

通信作者: 熊东红(1974—), 男(汉族), 江西省奉新县人, 博士, 研究员, 主要从事冲沟侵蚀与水土保持、土壤物理、生态恢复等方面研究。E-mail: dhxiong@ms.imde.ac.cn。

于土地利用以及地形、降雨等方面<sup>[5-7]</sup>。针对冲沟发育区岩土性质的研究较少,已有的相关研究重点针对土体表层的一些理化性质,抗剪性、渗透性、崩解性等,但是针对不同层位土体抗侵蚀能力的研究鲜有报道。金沙江干热河谷冲沟发育区土层深厚,层次复杂且各层性质差异大<sup>[8]</sup>,不同层位土体的抗侵蚀能力强弱是该地区冲沟发生、发育的地质条件基础和关键影响因素。抗冲性是指土体抵抗径流的机械破坏和推动下移的能力<sup>[9]</sup>,是土壤的基本性质之一。冲沟侵蚀主要是由股流冲刷冲沟沟壁和沟床所形成。因此,土体的抗冲性是最能体现土体抗侵蚀能力对冲沟发生、发育的影响的指标之一。研究冲沟发育区不同层位土体的抗冲性及其差异可为揭示冲沟发育过程及其机理奠定基础,为冲沟侵蚀治理措施制定提供科学依据。

## 1 研究区概况

研究区地处云南元谋干热河谷,位于  $101^{\circ}48'48''$ — $101^{\circ}49'54''$ E,  $25^{\circ}50'30''$ — $25^{\circ}51'18''$ N,海拔  $1\ 067 \sim 1\ 138$  m,属南亚热带季风气候,具有“炎热干燥,降雨

集中,干湿季分明”的特征。该区地层以河流相沉积为主,厚 278.2 m,为元谋组的 14~23 层,由下向上依次为砂层、亚黏土层、黏土层组成,颗粒构成由粗向上变细的正向沉积旋回,地层具有明显的层次性<sup>[10]</sup>。研究区内地形切割破碎,沟蚀崩塌严重,大部分坡面发育成纵横交错的冲沟。冲沟长度多在 100~300 m 之间,宽度为 30~60 m,深度在 5~20 m 之间,最深的地方可超过 80 m<sup>[11]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选取

本试验于 2014 年 4 月在中国科学院成都山地灾害与环境研究所云南省元谋干热河谷沟蚀崩塌观测研究站内进行。

选取该站冲沟发育区内一条典型冲沟的新近开挖沟壁为采样剖面。该剖面高 21.4 m,地层层次分明,具备干热河谷冲沟发育区的典型地层特征。根据剖面自然层次特征可将该剖面分为 6 层(表 1),从上到下依次为燥红土层、2 个砂土层、2 个变性土、砂土层。

表 1 剖面基本分层特征

土层编号	土层类型	土层深度/m	颜色	结构	开裂状况
I	燥红土	0—5.6	亮红棕 2.5 YR5/8	核状、块状	细微裂隙
II	砂质土 I	5.6—9.6	暗红棕 5 YR 3/6	无结构	无裂隙
III	砂质土 II	9.6—12.2	亮棕 7.5 YR 5/6	无结构	无裂隙
IV	变性土 I	12.2—16.8	亮黄棕 7.5 YR5/6	块状、楔状	有连续较大裂隙
V	变性土 II	16.8—21.4	浊红棕 5 YR5/4	块状、楔状	有连续较大裂隙
VI	砂质土 III	>21.4	亮棕 7.5 YR 5/6	无结构	无裂隙

### 2.2 试验步骤和方法

土体抗冲性的测定选用蒋定生设计的原状土冲刷测定法<sup>[12]</sup>。用规格为 20 cm×10 cm×10 cm 的条形环刀取样器在选定沟壁剖面各土层采集原状土,置于冲刷槽中进行冲刷试验。

根据干热河谷近年降雨强度情况,本次试验设计放水流量为 2 L/min;坡度采用  $10^{\circ}$ ,冲刷时间为 30 min。

试验开始后 0~4 min 每 1 min 收集 200 ml 泥沙样,6~10 min 每 2 min 收集 200 ml 泥沙样,15~30 min 每 5 min 收集 200 ml 泥沙样。冲刷完成后,把所取泥沙样在  $105^{\circ}\text{C}$  下烘干至恒重,称重。

采用冲刷模数(单位体积水量所冲刷掉的土体质量, g/L)对土体的抗冲性能进行描述<sup>[13]</sup>。冲刷模数越大,其抗冲性能就越弱,反之,冲刷模数越小,其抗冲性能就越强。土体冲刷模数可通过下式计算:

$$M_{(t)} = 4W_{(t)} \quad (1)$$

式中:  $M_{(t)}$ —— $t$  时刻的冲刷模数 (g/L);  $W_{(t)}$ —— $t$  时刻收集的泥沙样干重(200 ml 泥沙的干土重, g)。

$$\text{用 } \frac{W_{(t)} - W_{(t+n)}}{2} \times n \text{ 表示在 } t \text{ 到 } (t+n) \text{ 时段内产}$$

沙量,冲刷时段(30 min)内的总产沙量即为:

$$W = \sum \frac{W_{(t)} + W_{(t+n)}}{2} \times n \quad (2)$$

式中:  $W$ ——冲刷时段(30 min)内的总产沙量 (g);  $n$ —— $t$  时刻收集泥沙的时间间隔 (min)。

冲刷时段(30 min)内的平均冲刷模数 (g/L), 即为:

$$M = W/Q \quad (3)$$

式中:  $Q = 2 \text{ L/min} \times 30 \text{ min} = 60 \text{ L}$ , 为冲刷总用水量 (L)。

运用吸管法测定土体机械组成,重铬酸钾容量法测定土体有机质,采用环刀法测土体容重。采用

Excel软件进行数据处理,运用 Origin 8.0 进行函数拟合分析。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同层位土体基本理化性质

颗粒组成是影响土体抗冲性最主要的因素之一,试验区为河流相沉积,其土体颗粒组成以粒径 < 2 mm 的砂粒和细颗粒为主,且其细颗粒含量表现为从下向上逐渐减少的正向旋回,其中 II, III, VI 层砂粒含

量均达 80% 以上,而 IV, V 层细颗粒含量分别高达 92.90% 和 85.93%,土体具有极强的膨胀收缩性。研究剖面为一新近开挖剖面,土体风化程度不高,土体固结程度较好,最高干容重可达 2.12 g/cm<sup>3</sup> (第 V 层土体)。

土体的固结程度直接影响其抵抗径流冲刷的能力。此外,整个剖面完全没有植被覆盖,土体有机质含量极低,最高不超过 0.34 g/kg (第 I 层),其对土体抗冲性的影响可以忽略不计。

表 2 不同层位土体基本理化性质

土层编号	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	颗粒组成/%			不均匀 系数 C <sub>u</sub>	曲率系数 C <sub>c</sub>
			2~0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm		
I	1.67	0.34	53.12	22.97	23.91	176.47	0.95
II	1.75	0.06	80.11	8.99	10.90	72.50	16.90
III	1.48	0.01	81.19	5.89	12.92	17.89	7.49
IV	1.96	0.20	7.10	69.23	23.67	16.67	1.36
V	2.12	0.08	14.07	56.88	29.05	29.41	0.95
VI	1.52	0.01	81.58	11.38	7.04	18.95	7.08

#### 3.2 不同层位土体的抗冲性比较

3.2.1 各层位土体抗冲性能随冲刷时间的变化 由图 1—3 可知,各层土体抗冲性变化过程主要分为两种模式。A 模式:土体冲刷模数随冲刷时间的增加呈幂函数 ( $p < 0.01$ ) 减小 (I, II, III, VI 层); B 模式:土体冲刷模数随冲刷时间的增加先呈线性增大 ( $p < 0.05$ ) 然后呈幂函数 ( $p < 0.01$ ) 递减 (IV, V 层)。如 A 模式下的第 I 层土体在刚开始冲刷时产沙量较大 (40 g/L),但在 5 min 之内迅速降低到 1.0 g/L 左右,之后冲刷模数缓慢下降,并稳定于 0.4 g/L 左右。B 模式下的第 IV 层土体在刚开始冲刷时产沙量较小 (1.4 g/L),且冲刷模数随时间逐渐增大,到 4 分钟时达到最大值 (8.0 g/L),随后开始呈幂函数下降并稳定于 1.0 g/L 左右。

构破碎,且其破碎程度随深度的增加逐渐减弱,是土体冲刷模数随冲刷时间的增加呈幂函数递减(抗冲性能随冲刷时间的增加呈幂函数递增)的主要原因。此外,土体遇水的崩解作用以及表层浮土的存在也是导致冲刷初期冲刷模数较大的重要因素。

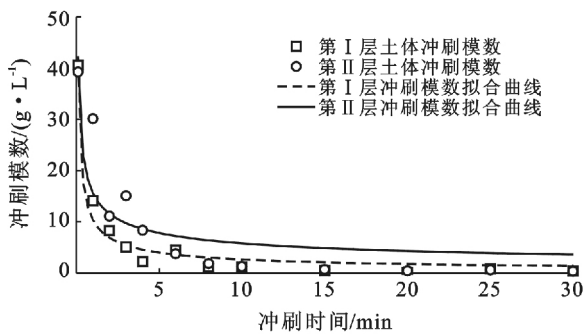


图 1 第 I, II 层土体抗冲性过程曲线

冲刷过程中试验土体含水率的急剧提高以及在干热河谷极端的水热条件下,冲沟发育区表层土体结

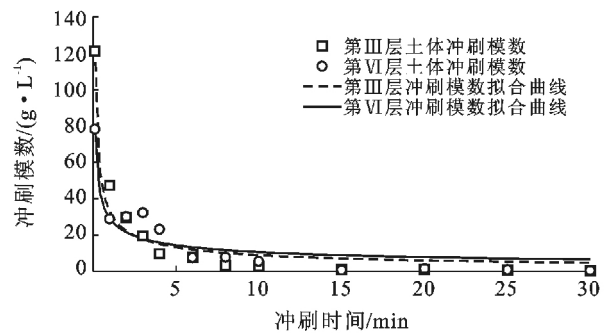


图 2 第 III, VI 层土体抗冲性过程曲线

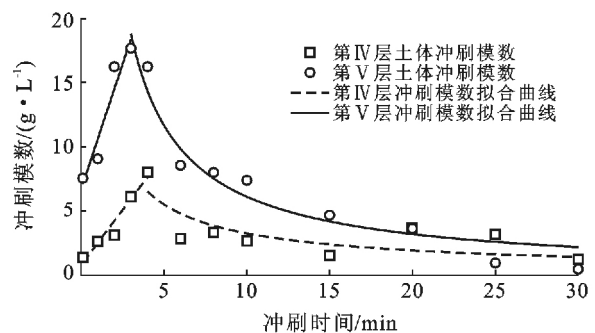


图 3 第 IV, V 层土体抗冲性过程曲线

试验过程中发现,IV, V 层土体试验土样内部存

在大规模裂隙(图 3),冲刷前期的产沙大部分陷在裂隙内,极少泥沙随水冲出。随泥沙在裂隙中的累积作用和含水率增加而导致的裂隙自身的闭合作用,实际产沙量随冲刷时间的增加呈现一种线性增加的趋势,但这并不能表示试验土体抗冲性能的减小,而是一种裂隙对产沙的拦截作用。当裂隙达到饱和后,冲刷模数再次表现出随冲刷时间的增加呈幂函数递减的趋势,其抗冲性能则随时间递增而增强。

3.2.2 不同层位土体初始抗冲性能的差异分析 由图 1—3 可知,在 30 min 冲刷时间内,燥红土(I 层)和砂土(II, III, VI 层)前 4 min 内的产沙量即占总产沙量的 70%~80%,变性土层(IV, V 层)前 4 min 的产沙量亦达总产沙量的 15%~30%。在冲沟发育区,土体初始冲刷模数对于评价次降雨下土体的抗侵蚀能力有重要意义。

为排除因取样扰动造成的表层松散浮土的影响,以冲刷 1 min 时土体冲刷模数为不同层位土体初始抗冲性的比较指标。由表 3 计算可得,冲刷第 1 min,即  $x=1$  时,各层位土体冲刷模数从上到下依次为: 9.49, 14.48, 30.74, 2.52, 10.60 和 30.42 g/L。由于土体内裂隙的拦沙消能作用,IV, V 层土体抗冲性冲刷模数明显偏小,且 IV 层土体冲刷模数小于 V 层。其余 4 层土体冲刷模数由小到大依次为: I 层 < II 层 < VI 层 < III 层,其中 III 层和 VI 层土体抗冲性指数差异并不显著。

表 3 不同层位土体抗冲过程曲线拟合方程

层位	拟合曲线方程	$p$ 值	$R^2$
I	$y=9.4932x^{-0.887}$	1.08E-08	0.97
II	$y=14.778x^{-0.958}$	1.36E-04	0.79
III	$y=30.735x^{-1.086}$	9.86E-08	0.96
IV	$y=1.706x+0.809(x \leq 4)$ $y=37.268x^{-1.179}(x > 4)$	5.32E-03 1.63E-04	0.93 0.87
V	$y=3.877x+6.727(x \leq 3)$ $y=52.329x^{-0.932}(x > 3)$	4.03E-02 2.64E-06	0.88 0.94
VI	$y=30.416x^{-0.929}$	5.35E-06	0.86

3.2.3 土体抗冲性随土层深度的变化 土体抗冲性能的比较采用整个冲刷过程(30 min)的平均冲刷模数进行比较。由图 4 可知,随土层深度的增加,土体冲刷模数表现为逐渐增大的正向旋回(I 层 > II 层 > III 层, IV 层 > V 层 > VI 层),土体抗冲性能则随土层深度增加而旋回式减小(抗冲性随土层深度增加而减小到一定值后突然增大到接近初始值又重新继续减小)。I 层土体土级配较好( $C_u=176.5, C_c=0.95$ ),土体抗侵蚀性能最好(2.43 g/L)。III, VI 层土

体颗粒组成基本相同,III 层土体容重略小于 VI 层土体,其冲刷模数亦表现为 III 层土体略小于 VI 层。II 层土体砂粒含量与 III, VI 层相近(均大于 80%),然而其容重远大于 III, VI 层,其冲刷模数亦远小于 III, VI 层土体。IV, V 层土体细颗粒含量极高(92.90% 和 85.93%),容重亦极高(1.96, 2.12 g/cm<sup>3</sup>)然而其冲刷模数却相差极大,可能与其可溶性离子(K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> 等含量有关)。

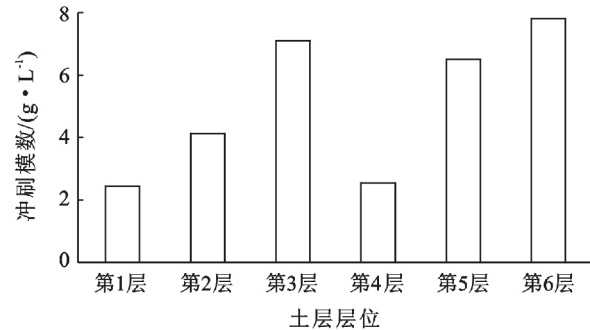


图 4 不同层位土体抗冲性比较

## 4 讨论

(1) 土体冲刷模数随土层深度的增加旋回式增大的变化规律与研究区域颗粒构成由粗向上变细旋回沉积的地质条件相一致。冲沟发育区表层土体抗冲性强而下层土体抗冲性弱,这种土层结构有利于冲沟沟头跌坎的形成以及冲沟沟床的下切。在径流作用下,冲沟发育区下层土体易被优先侵蚀而形成带有水刷窝的跌坎,为冲沟掏蚀—崩塌—再掏蚀—再崩塌的溯源侵蚀理论提供了依据。此外,跌坎的形成又可为冲沟在遭遇下一旋回中强抗侵蚀能力土层后的继续下切提供充分的水动力条件。

(2) 裸露变性土经过自然水热条件作用后,地表裂隙极其发育。裂隙的存在一方面使土体结构破碎,增大了地表裸露面积,使土体更容易被径流分散、剥离;另一方面裂隙增大了地表粗糙度,降低了径流动能,而且松散泥沙陷入裂隙中,阻碍了泥沙随水迁移。裂隙的存在对变性土抗冲性的影响究竟如何,其作用机理等问题都值得进一步研究。

(3) 各层位土体抗冲性的规律性变化初步揭示了干热河谷冲沟沟头水刷窝形成的地质条件,由于本试验为室内模拟试验,设备的设计具有一些难以弥补的缺陷:冲刷土槽设置为下陷的五面封闭土槽,随冲刷试验的进行,部分泥沙会被土槽壁阻挡而堆积于土样下侧。堆积物的产生一方面减小了土样的冲刷面积,另一方面减缓了土样的设置坡度。所以,本次抗

冲试验所得冲刷稳定值较实际情况偏小,但其总体趋势并没有改变,对本文不同层位土体间抗冲性大小的定性比较也没有实质性影响。原位冲刷试验能极好地对土体抗冲性进行定量研究,然而其试验成本和试验条件要求均较高,试验过程亦极复杂,难以大规模推广使用。为更好地定量研究土体的抗冲性能,更科学、更精密的模拟冲刷仪器亟待研发。

## 5 结论

(1) 各层土体抗冲性均随冲刷时间呈幂函数增大,(除第Ⅳ,Ⅴ层土体因裂隙的存在而在冲刷前期表现为抗冲性能随冲刷时间呈线性增加外)。

(2) 不同层位土体初始抗冲性能差异显著,依次表现为:Ⅰ层>Ⅱ层>Ⅵ层>Ⅲ层,Ⅳ层>Ⅴ层。其中,表层燥红土抗冲性能最强。

(3) 土体抗冲性随土层深度的增加呈旋回式减小,具体表现为:Ⅰ层>Ⅱ层>Ⅲ层,Ⅳ层>Ⅴ层>Ⅵ层。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Dong Yifan, Xiong Donghong, Su Zhengang, et al. Critical topographic threshold of gully erosion in Yuanmou Dry-hot Valley in Southwestern China[J]. *Physical Geography*, 2013, 34(1):50-59.
- [2] Su Zhengang, Zhang Jianhui, Xiong Donghong, et al. Assessment of soil erosion by compensatory hoeing tillage in a purple soil[J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 9(1):59-66.
- [3] 熊东红,杨丹,李佳佳,等.元谋干热河谷区退化坡地土壤裂缝形态发育的影响因子[J].*农业工程学报*,2013,1(1):102-108.
- [4] 康超,谌文武,崔凯,等.西夏王陵4号陵冲沟发育过程、特征及其影响因素[J].*敦煌研究*,2009(6):71-74.
- [5] Oliveira M A T D. Slope geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo, Brazil[J]. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 1990,34(4):423-434.
- [6] Poesen J W A, Hooke J M. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe[J]. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(2):157-199.
- [7] Cerdan O, Bissonnais Y L, Couturier A, et al. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France[J]. *Soil & Tillage Research*, 2002, 67(2):99-108.
- [8] 钱方,凌小惠.元谋土林成因及类型的初步研究[J].*中国科学:化学生命科学地学*,1989,4(4):412-418.
- [9] 朱显谟,雷文进,刘朝端,等.甘肃中部土壤侵蚀调查报告[J].*土壤专报*,1958(32):53-109.
- [10] 柴宗新,范建容,刘淑珍.金沙江下游元谋盆地冲沟发育特征和过程分析[J].*地理科学*,2001,21(4):339-343.
- [11] 杨丹,熊东红,翟娟,等.元谋干热河谷冲沟形态特征及其成因[J].*中国水土保持科学*,2012,1(1):38-45.
- [12] 蒋定生.黄土高原水土流失与治理模式[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [13] 蒋定生.黄土区不同利用类型土壤抗冲刷能力的研究[J].*土壤通报*,1979(4):20-29.
- [4] 杨建锋.城市化和雨水利用[J].*北京水利*,2001(1):22-23.
- [5] 任玉芬,王效科,韩冰,等.城市不同下垫面的降雨径流污染[J].*生态学报*,2005,25(12):3225-3230.
- [6] USEPA. Results of the Nationwide Urban Runoff Program[R]. Washington D C: Environmental Protection Agency,1983.
- [7] 欧阳威,王玮,郝芳华,等.北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J].*中国环境科学*,2010,30(9):1249-1256.
- [8] Kim G, Yur J, Kim J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon City, Korea [J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(1):9-16.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. GB3838—2002 中华人民共和国地表水环境质量标准[S].北京:中国环境出版社,2002.
- [10] 李春荣,刘坤,林积泉,等.海口市城区不同下垫面降雨径流污染特征[J].*中国环境监测*,2013,29(5):80-83.

(上接第100页)