

# 基于水蚀预测模型的红壤坡面侵蚀 主要影响因素研究

马良<sup>1</sup>, 左长清<sup>2</sup>

(1. 山东省水利科学研究院 山东省水资源与水环境重点实验室, 山东 济南 250013;  
2. 中国水利水电科学研究院 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 北京 100044)

**摘要:** 利用 229 场侵蚀性自然降雨的小区观测数据, 率定并验证了典型红壤坡面水蚀预测 (WEPP) 模型, 并对模型的敏感性检验和弹性系数进行了分析。结果表明, 红壤坡面土壤侵蚀对降雨量、雨强、细沟可蚀性、临界剪切力、坡长、坡度等 6 个输入参数的变化具有强敏感性; 地表径流量对降雨量具有强敏感性, 对雨强、初始饱和导水率、有效水力传导系数等参数存在弱敏感性。这些参数是影响红壤坡面侵蚀产沙产流的主要因素。

**关键词:** 影响因素; 土壤侵蚀; WEPP 模型; 红壤

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0026-04

中图分类号: P331.1, S157.1

## Major Factors Affecting Erosion and Runoff on Red Soil Slope Based on WEPP Model

MA Liang<sup>1</sup>, ZUO Chang-qing<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Resources and Environment of Shandong Province, Water Resources Research Institute of Shandong Province, Ji'nan, Shandong 250013, China; 2. Research Center on Soil and Water Conservation of the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A data set, which includes soil losses from field standard runoff plots established in red soil region during 229 rainfall events, was used to calibrate and validate the physically based soil erosion model (water erosion project, WEPP model). Meanwhile, sensitivity test and elastic coefficient analysis methods were applied to determine the major influencing factors of soil erosion and runoff on red soil slopelands. The results showed that erosion sediment yield is extremely sensitive to the input parameters including rainfall amount, intensity, rill erosion threshold, critical shear stress, slope length and gradient. Surface runoff is regulated strongly by the rainfall amounts, while is weakly sensitive to rainfall intensity, initial saturated hydraulic conductivity and effective hydraulic conductivity. In conclusion, all parameters aforementioned are the major controlling factors of soil erosion and runoff on red soil slopelands.

**Keywords:** influence factors; soil erosion; WEPP model; red soil

在我国南方红壤区, 受集中分布的侵蚀性降雨和易被侵蚀的下垫面等因素共同影响, 区域水土流失特别是坡面水蚀十分严重, 导致了土壤质量恶化、土地肥力下降、生态环境恶化, 而成为全国生态脆弱区之一<sup>[1]</sup>。红壤区土壤侵蚀有其自身固有的发生特点和规律, 通过基于过程模拟的 WEPP (water erosion prediction project) 模型 (坡面版)<sup>[2-3]</sup>, 不仅能对侵蚀产生数量进行预测和模拟, 而且可深入了解和探讨土

壤侵蚀发生发展的过程和主要影响要素。

WEPP 模型的预报机理是将地表径流分为细沟流和沟间径流, 通过建立侵蚀及沉积净值的稳态空间变化泥沙平衡连续方程, 外延和推出随空间位置变化的方程基本参量、侵蚀参量以及泥沙平衡方程通用表达式<sup>[4-5]</sup>。尽管存在对浅沟、切沟侵蚀过程刻画的缺失, 但 WEPP 模型在侵蚀模拟中仍显示出精度高, 简洁直观, 尺度扩展性好等特点, 因此在坡面侵蚀预

收稿日期: 2012-01-04

修回日期: 2012-03-08

资助项目: 水利部引进国际先进水利科学技术计划 (948) 项目“SCPS 水土流失监测管理系统的技术引进” (201029); 水利部公益性行业科研专项经费项目“黄河下游引黄灌区泥沙综合利用技术” (201101057)

作者简介: 马良 (1980—), 男 (汉族), 山东省东阿县人, 博士, 工程师, 主要从事土壤侵蚀、生态水文及对气候变化响应的研究。E-mail: male-ung@163.com。

报<sup>[6]</sup>,土壤结构对侵蚀影响<sup>[7]</sup>,小流域管理<sup>[8-9]</sup>等方面得以广泛应用。在我国,王建勋<sup>[10-11]</sup>在黄土高原、陈晓燕、代华龙等<sup>[12-13]</sup>在西南紫色土区、刘远利<sup>[14]</sup>在东北黑土区对该模型的适用性进行了探讨,Shen<sup>[15]</sup>在三峡库区张家冲小流域的研究认为 WEPP 比分布式水文模型 SWAT 对径流和侵蚀泥沙的模拟效果更好。然而在我国红壤区,虽有应用 WEPP 模型架构研究土壤团聚体这一单因素与侵蚀量的关系<sup>[16]</sup>,但对基于该模型综合研究影响土壤侵蚀主要因素的研究还鲜有报道。

本研究以典型红壤坡面为对象,率定并验证侵蚀模拟预报的 WEPP 模型,通过模型的敏感性检验和弹性系数分析,获取降雨、土壤、坡面等参数对侵蚀产生径流和泥沙的贡献度,筛选出影响坡面土壤侵蚀的主要因素,为探讨 WEPP 模型在红壤坡面上的适用性以及红壤坡面土壤侵蚀规律奠定基础。

## 1 研究区概况

在南方红壤区内的江西省北部德安国家水土保持科技示范园内布设典型坡面,地理坐标为北纬 28°46′21.61″,东经 115°24′10.31″。该区为亚热带季风气候区,多年平均降雨量为 1 300~1 400 mm,年内存在明显的干、湿两季。土壤类型为红壤,土质为中壤土、重壤土和轻黏土,具有酸、黏、板、瘦等特性。

坡面侵蚀量的观测采用标准径流小区法,自 2000 年始建设的标准径流小区长 20 m,宽 5 m,投影面积 100 m<sup>2</sup>,坡度为 12°。小区坡面裸露,降雨产流和产沙通过集流槽进入径流池,取样观测。小区周边还设置了 1 处气象观测站,用于降雨、气温、蒸发等气象要素的观测。

## 2 红壤坡面侵蚀 WEPP 模型的率定及验证

研究中选取 2001—2003 年 116 场产流的自然降雨、侵蚀试验数据对 WEPP 模型进行参数率定。率定的参数主要为气象、管理、坡面及土壤 4 类。其中根据观测所得的日降雨、温度极值修改气象参数;参考休耕状态(fallow)修订管理参数;以小区设计调整坡面坡度及坡长;实测土壤肥力、抗剪切力、抗蚀性等土壤理化性质,对土壤参数进行修正。模型率定后,选用 2004—2006 年 113 次产流降雨的观测数据进行模型的验证。验证结果表明,年侵蚀量模型模拟值与实际观测值之间相关系数为 0.92, Nash—Suttcliffe 效率系数  $E_m$  为 0.89;次侵蚀量模拟值精度也较好,其与观测值之间相关系数为 0.83,  $E_m$  为 0.67。因此

认为研究中建立的 WEPP 模型可较好地红壤坡面发生的土壤侵蚀进行模拟。

## 3 敏感性检验结果与分析

模型的敏感性分析是进行探寻模型运行机理、揭示模拟规律的有效方法。对 WEPP 模型中气候(特别是降雨)、土壤、坡面等输入参数的敏感性分析,可以定量评价各输入参数对侵蚀产流产沙的贡献度,并可揭示坡面侵蚀的主要影响要素。

模型敏感性分析普遍采用单参数分析法。研究中任意选择实际的单场降雨,如 2002 年 9 月 8 日次降雨(雨量 41.4 mm,历时 15.92 h,平均雨强 2.60 mm/h,且前后 24 h 内无降雨事件),以率定后模型的模拟结果为基准,保持除待分析参数的其他参数的数值不变,调节分析参数的数值后运行模型,得到模拟条件下的侵蚀数据。如此反复试验,再与基准值对比,得到侵蚀量、径流量之于分析参数变化倍率的曲线。

为定量描述和筛选敏感参数,研究中引入弹性系数( $EC$ , elastic coefficient),用以描述相互联系的两个参数增长或减少速度的比率,这里指土壤侵蚀量、地表径流量与待分析参数的变化比率,可衡量侵蚀量( $E$ )、地表径流量( $R_s$ )的变化幅度对输入参数( $A$ )的变化幅度的依存关系,计算式如公式(1—2):

$$EC_e = \frac{\Delta E/E}{\Delta A/A} \times 100\% \quad (1)$$

$$EC_r = \frac{\Delta R_s/R_s}{\Delta A/A} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $EC_e$ ——土壤侵蚀弹性系数; $EC_r$ ——地表径流弹性系数。

若  $EC=1$  表示侵蚀量或径流量与参数变化同步;当  $EC>1$  时,表明侵蚀量或径流量的变化高于参数的变化,即输入参数微小的变化将导致侵蚀和径流显著的变化。出现以上两种情形可判断该参数为强敏感性;当  $0<|EC|<1$  时,表明尽管参数发生较大变化,但侵蚀量和径流量低于其变化速率,该参数为弱敏感性;当  $EC=0$  表示无敏感性。

### 3.1 降雨参数敏感性检验

在南方红壤裸露坡面上,除降雨外其他气象参数,如日最高温、日最低温、太阳辐射等对坡面侵蚀量、径流量的影响微乎其微,因此仅对降雨要素进行敏感性检验即可。雨量、降雨历时、雨强之于侵蚀量、径流量的倍数变化曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出,3 个降雨参数中以降雨雨量对侵蚀量、径流量的贡献度最大,也即侵蚀量及径流量

对雨量最为敏感。无论是侵蚀量—雨量倍数还是径流量—雨量倍数变化分布点的斜率大于 1:1 参考线,雨量的增加对侵蚀量和径流量的影响程度略高于其减少时的影响程度。如表 1 所示,当雨量减少时,侵蚀量对雨量的弹性系数为 1.23,即雨量减少 10%,侵蚀量将相应减少 12.3%;当雨量增加时,弹性系数变为 1.25,即雨量增加 10%,侵蚀量将增加 12.5%。同理,得到径流量对雨量的弹性系数分别为降低时的 1.19 和增加时的 1.20。降雨历时对侵蚀量或径流量的倍数点分布均基本为一水平直线,且各弹性系数均

接近 0,说明降雨历时的增加或降低对侵蚀量、径流量几乎不产生影响。降雨雨强对侵蚀和径流的影响表现为幂函数曲线,但在增加过程的后期基本维持水平。从弹性系数分析,当雨强增加 10%时,侵蚀量相应增加 3.5%,径流量增加微乎其微;而雨强减少 10%时,侵蚀量相应减少了 10.3%,径流量减少了 4.3%。因此,雨强对土壤侵蚀的影响程度超过对地表径流的影响。综合比较认为,无论是侵蚀还是径流,对降雨参数中的雨量最为敏感,其次为雨强,对降雨历时敏感性不强。

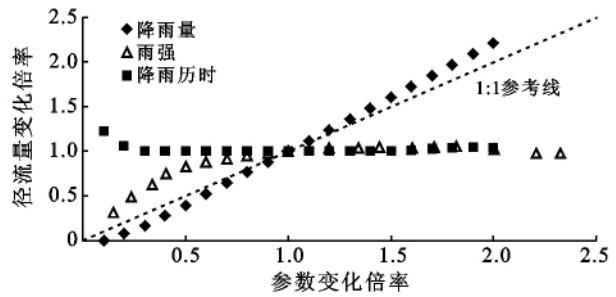
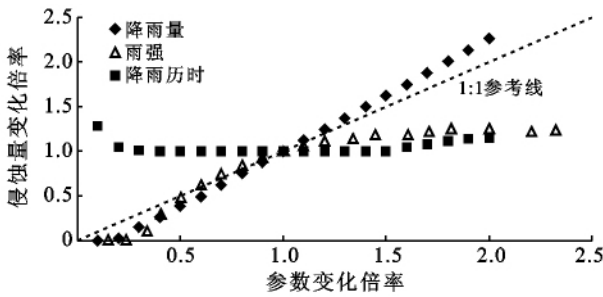


图 1 降雨参数敏感性检验倍数变化

表 1 土壤侵蚀及地表径流对降雨参数的弹性系数

降雨参数		EC <sub>e</sub>	EC <sub>r</sub>
雨量	增加	1.25	1.20
	减少	1.23	1.19
雨强	增加	0.35	0.07
	减少	1.03	0.43
降雨历时	增加	0.06	0.02
	减少	-0.04	-0.03

3.2 土壤参数敏感性检验

土壤参数中有土壤反照率、初始饱和导水率、沟间土壤可蚀性、细沟土壤可蚀性、土壤临界剪切力和有效水力传导系数 6 个参数。经检验计算,得到土壤参数敏感性检验倍数变化图(图 2)。对土壤侵蚀量而言,细沟可蚀性及临界剪切力对其敏感性超过其他

参数,其中细沟可蚀性与侵蚀量呈现正相关(弹性系数为正值),而临界剪切力与侵蚀量呈负相关(弹性系数为负值)。

由图 2 可以看出,细沟可蚀性对侵蚀量影响的倍数变化点分布斜率小于 1:1 参考线,表 2 也给出细沟可蚀性的降低对侵蚀量的影响程度略高于其增加时的影响程度。初始饱和和导水率对侵蚀量也呈现正相关,弹性系数分别为减少时的 0.44 和增加时的 0.45。但当初始饱和和导水率增加至 100%时(理想值)侵蚀量稳定不变。沟间可蚀性也对侵蚀量呈现微弱的正相关,弹性系数仅为 0.09。从比较细沟可蚀性、沟间可蚀性两要素对土壤侵蚀的影响得到,红壤坡面侵蚀以细沟侵蚀为主要发生类型,其占侵蚀总量的比重大,而沟间侵蚀比重较小。

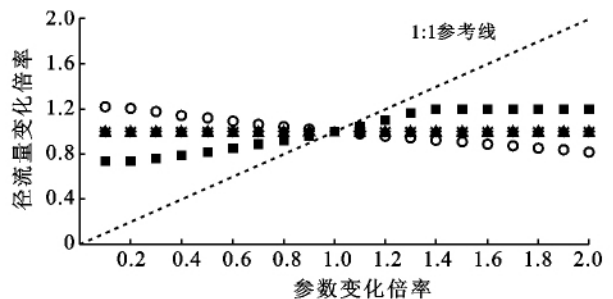
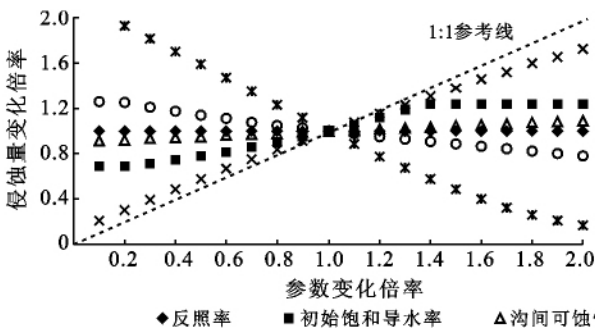


图 2 土壤参数敏感性检验倍数变化

临界剪切力是细沟侵蚀过程中的一个临界值,小于该值,坡面细沟侵蚀就不会出现,临界剪切力越大,细沟侵蚀就越不易发生,因此临界剪切力与土壤侵蚀量呈负相关,弹性系数为增加时的-1.00和减少时的-1.17。与侵蚀量呈负相关的土壤因素还有有效水力传导率参数。有效水力传导率越高,降雨入渗率越高,侵蚀发生概率越低;相反有效水力传导率越低,地表产流率越高,受径流冲刷和搬运的侵蚀泥沙量越大。与侵蚀量的检验特性一致,径流量对初始饱和导水率呈正相关,对有效水力传导系数呈负相关。此外,侵蚀量对土壤参数中土壤反照率不敏感,而径流量对反照率、沟间可蚀性、细沟可蚀性、临界剪切力也均不敏感,弹性系数均为 0。

3.3 坡面参数敏感性检验

图 3 给出坡长、坡度两坡面参数对侵蚀量、径流量的敏感性检验变化倍数分布。侵蚀量对坡长、坡度因子均呈现敏感的正相关关系。表 3 显示,当增加时,侵蚀量对坡度的弹性系数 1.44,高于对坡长的弹性系数 1.02;当减少时,侵蚀量对坡度的弹性系数 1.43

同样高于对坡长的弹性系数 1.13。因此侵蚀量对坡度、坡长两要素均强敏感,对坡度的变化尤为敏感。地表径流对坡长无敏感性;对坡度仅在减少时存在正相弱敏感,增加时无敏感性。

表 2 土壤侵蚀及地表径流对土壤参数的弹性系数

降雨参数		EC <sub>e</sub>	EC <sub>r</sub>
反照率	增加	0	0
	减少	0	0
初始饱和导水率	增加	0.45	0.37
	减少	0.44	0.36
沟间可蚀性	增加	0.09	0
	减少	0.09	0
细沟可蚀性	增加	0.76	0
	减少	0.84	0
临界剪切力	增加	-1.00	0
	减少	-1.17	0
有效水力传导系数	增加	-0.23	-0.19
	减少	-0.28	-0.23

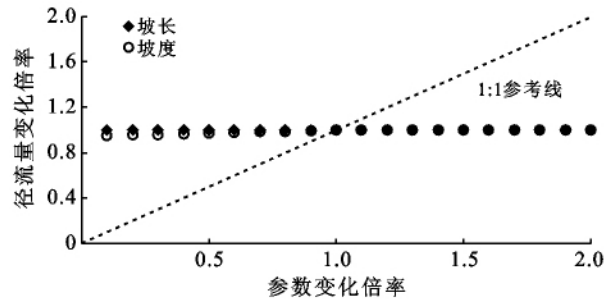
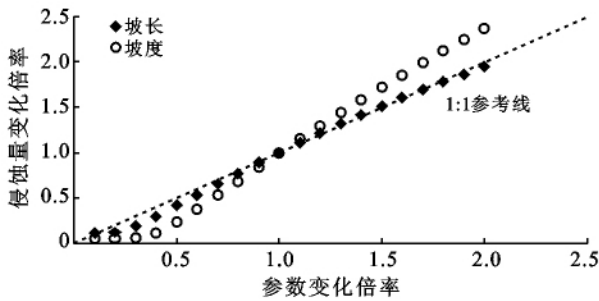


图 3 坡面参数敏感性检验倍数变化

表 3 土壤侵蚀及地表径流对坡面参数的弹性系数

降雨参数		EC <sub>e</sub>	EC <sub>r</sub>
坡长	增加	1.02	0
	减少	1.13	0
坡度	增加	1.44	0
	减少	1.43	0.05

4 结论

红壤坡面土壤侵蚀对降雨雨量、雨强、细沟可蚀性、临界剪切力、坡长、坡度等 6 个要素的变化具有强敏感性,其中对坡度、雨量的变化最为敏感;而地表径流对降雨量具有强敏感性,对雨强、初始饱和导水率、有效水力传导系数等要素的变化存在弱敏感性。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与

生态安全:南方红壤区卷[M]. 北京:科学出版社,2010: 94-112.

[2] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989, 32(5): 1587-1593.

[3] Ascough J C, Baffaut H C, Nearing M A, et al. The WEPP watershed model I: Hydrology and erosion[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1997, 40(4):921-933.

[4] Flanagan D C, Nearing M A. USDA—WEPP: Hillslope profile and watershed model documentation[R]. US-DA—ARS: National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.

[5] 肖培青,姚文艺. WEPP 模型的侵蚀模块理论基础[J]. 人民黄河,2005,27(6):38-50.

### 3 结 论

(1) 洋葱产量随灌溉量的增加而下降,最佳灌溉量为 420 mm,产量达  $1.26 \times 10^5 \sim 1.31 \times 10^5$  kg/hm<sup>2</sup>,比灌溉量 840 mm 增产 4.1%~4.8%,节水率达 50%。洋葱生长期灌水 7 次较 14 次的产量高。随着灌溉定额的减小,洋葱耗水量也减小,但相应的产量逐渐增大,水分利用效率趋于提高。产量最高的处理所对应的灌溉定额是 420 mm,基本能够满足洋葱田间生长生育阶段的需水要求。灌水过量造成洋葱茎叶徒长,贪青晚熟,不利于取得高产。

(2) 洋葱生长前、后期耗水量小,中期耗水量大。以八叶一膨大期耗水量最高。该时期也是生态区年度气温最高的阶段。在洋葱田间管理上,生长前后期适当控制灌水量,中期适当增大灌水量,利于洋葱产量的形成。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 司永胜,刘刚,杨政,等.激光平地系统的开发与试验[J].江苏大学学报:自然科学版,2009,30(5):441-445.  
[2] 沈晖,田军仓,王宏伟.激光控制平地技术的研究进展

[J].宁夏工程技术,2007(6):122-126.

- [3] 符崇梅,魏野畴,李娟,等.不同灌溉量、滴灌频率及水肥耦合对洋葱产量和水分利用率的影响[J].节水灌溉,2011(8):36-39.  
[4] 李应海,田军仓.膜上灌玉米节水灌溉制度与氮磷配比试验研究[J].节水灌溉,2009(12):12-13.  
[5] 张永玲,肖让,成自勇.膜上灌对河西绿洲灌区玉米水分利用效率和产量的影响[J].节水灌溉,2010(5):9-10.  
[6] 韩娜娜,王仰仁,孙书洪,等.灌水对冬小麦耗水量和产量影响的试验研究[J].节水灌溉,2010(4):4-7.  
[7] 裴学艳,宋乃平,王磊,等.灌溉量和灌溉时期对紫花苜蓿耗水特性和产量的影响[J].节水灌溉,2010(1):26-30.  
[8] 张振华,蔡焕杰,柴红敏,等.膜上灌作物需水量和地膜覆盖效应试验研究[J].灌溉排水,2002(3):11-14.  
[9] 张永玲,肖让,成自勇.河西内陆灌区膜上灌节水增产技术[J].农机化研究,2008(4):218-220.  
[10] 韩丙芳,田军仓,杨金忠.玉米膜上灌溉条件下土壤水、热运动规律的研究[J].农业工程学报,2007,23(12):85-89.  
[11] 郭元裕.农田水力学[M].北京:中国水利水电出版社,1997.

(上接第 29 页)

- [6] Laflen J M, Elliot W J, Flanagan D C, et al. WEPP—predicting water erosion using a process-based model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1997, 52(2):96-102.  
[7] Shi Zhihua, Yan Fenglin, Li Lu, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China[J]. Catena, 2010, 81(3):240-248.  
[8] Pandey A, Chowdary V M, Mal B C, et al. Application of the WEPP model for prioritization and evaluation of best management practices in an Indian watershed[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(21):2997-3005.  
[9] Abaci O, Papanicolaou A N T. Long-term effects of management practices on water-driven soil erosion in an intense agricultural sub-watershed: Monitoring and modelling[J]. Hydrological Processes, 2009, 23(19):2818-2837.  
[10] 王建勋,郑粉莉,江忠善,等. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价:以坡度因子为例[J].泥沙

研究,2008(6):52-60.

- [11] 王建勋,郑粉莉,江忠善,等. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价:以坡长因子为例[J].水土保持通报,2007,27(2):50-55.  
[12] 陈晓燕,何丙辉,缪驰远,等. WEPP 模型在紫色土坡面侵蚀预测中的应用研究[J].水土保持学报,2003,17(3):42-44.  
[13] 代华龙,曹叔尤,刘兴年,等.基于 WEPP 模型的紫色土坡面水蚀预报[J].中国水土保持科学,2008,6(2):60-65.  
[14] 刘远利,郑粉莉,王彬,等. WEPP 模型在东北黑土区的适用性评价:以坡度和水保措施为例[J].水土保持通报,2010,30(1):139-145.  
[15] Shen Zhenyao, Gong Yongwei, Li Yanhong, et al. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the Three Gorges Reservoir area[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(10):1435-1442.  
[16] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].农业工程学报,2009,25(3):37-41.