

文章编号: 1009-3087(2013)02-0038-09

## 不同土地利用方式坡面产流输沙过程模拟研究

赵春红<sup>1</sup>, 高建恩<sup>1, 2, 3\*</sup>, 邵辉<sup>1</sup>, 王宏杰<sup>3</sup>, 许秀泉<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 针对目前多数坡面侵蚀预测模型难以模拟土地利用变化对坡面产流输沙过程影响的问题, 基于运动波方程和泥沙输移公式, 给出了一种能够反映不同土地利用方式下坡面产流输沙时空变化的简化模型, 并利用裸地、草地、坡耕地、灌木地及幼林地的试验及自然降雨条件下坡面产流输沙实测资料对模型进行验证, 符合较好。利用该模型对黄土高原不同降雨条件下不同土地利用场景坡面产流输沙特征进行了模拟, 结果表明: 典型降雨条件下, 5 a 树龄以上的林地或覆盖度在 60% 以上的草地坡面标准小区基本不再发生侵蚀; 坡度小于 15° 的裸地坡面中下部发生轻度侵蚀; 十年一遇降雨条件下, 10 a 树龄以上的林地坡面土壤侵蚀基本得到控制, 而草地调控坡面水沙的能力有限, 裸地更差。对低强度短历时降雨, 草地调控水沙的见效较快; 对高强度长历时降雨, 林地调控水沙的作用较大, 两者宜配合进行; 对不同坡度裸地, 要严格控制坡面坡长。研究结果为优化土地利用方式提供了理论支撑。

**关键词:** 土地利用方式; 运动波; 泥沙输移公式; 产流输沙过程; 模型应用

中图分类号: P333.4

文献标志码: A

### Numerical Simulation of Runoff Generation and Sediment Transport Processes Under Different Lands Use Patterns

ZHAO Chun-hong<sup>1</sup>, GAO Jian-en<sup>1, 2, 3\*</sup>, SHAO Hui<sup>1</sup>, WANG Hong-jie<sup>3</sup>, XU Xiu-quan<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F Univ., Yangling 712100, China;

2. Inst. of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China;

3. College of Water Conservancy and Architectural Eng., Northwest A&F Univ., Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effect of land use change on soil erosion process, a mathematical model was developed for simulating runoff generation and sediment transport processes on different slope lands. This model was comprised of two modules: the kinematic-wave equation for overland flow and a sediment transport formula. The measured runoff generation and sediment transport data of bare land, grassland, cropland, scrubs land and young forest land were used for model validation and the simulating values were in good agreement with the measurements. Then the characteristics of runoff generation and sediment transport under different land use scenarios were predicted using the model and the results showed that soil erosion could be greatly controlled on 5-year-old forestland or grassland with coverage more than 60% under the normal rainfall in the loess plateau, and light erosion occurs in the middle and lower part of the bare land with the gradient less than 15°. Only the 10-year-old forestland could provide a good erosion control effect while the effects of grassland and bare land are limited under the once in ten-year rainfall. Both grassland and forestland should be cooperated in combating erosion by taking the advantages of the faster effect of grassland for low intensity and short duration rainfall and the more obvious effect of forestland for high intensity and long duration rains. The slope length should be strictly controlled for bare land with different gradients.

**Key words:** land use pattern; kinetic wave; sediment transport formula; runoff generation and sediment transport processes; model application

### 土壤侵蚀是最严重的环境和土地退化问

题之一。严重的土壤侵蚀不仅造成土地资源退化甚至彻底破坏, 而且大量径流泥沙及其携带的污染物对水体质量和河道运行安全也造成威胁。因此, 土壤侵蚀的预测和防治对水土资源的有效管理至关重要。

大量资料已证明数学模型是一种能够快速评价土地利用变化对坡面产流输沙影响的有效工具<sup>[1-2]</sup>。早期建立的模型多为经验性模型, 近年来, 国内外学者对坡面产流输沙模型的研究逐渐从经验

收稿日期: 2012-10-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD31B05);  
国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目  
(2009ZX07212-002-003-002)

作者简介: 赵春红(1987—), 女, 博士生, 研究方向: 流域治理和  
坡面侵蚀, E-mail: zhaochunhong1987@163.com

\* 通信联系人 E-mail: gaojianen@126.com

性模型向机理性模型发展<sup>[3]</sup>。王光谦等<sup>[4]</sup>基于泥沙运动学基本概念,在对坡面进行概化的基础上导出了裸坡条件下坡面产沙理论模型;孙全敏和王占礼<sup>[5]</sup>基于坡面土壤水力侵蚀动力基础和能量相互转化的关系,探索建立了以土壤分散和径流挟沙为核心的坡面土壤侵蚀动力学模型;李文杰等<sup>[6]</sup>在研究基于物理过程的分布式流域水沙预测模型时,利用运动波方程和质量守恒原理建立了坡面产流输沙的 1 维模型;Liu 等<sup>[7]</sup>和 Deng 等<sup>[8]</sup>也利用运动波方程和坡面土壤侵蚀输沙模型相结合的方法分别建立了不同的坡面径流输沙模型;An 及 Liu 等<sup>[9]</sup>将坡面细沟间侵蚀处理为 2 维,将细沟侵蚀处理为 1 维,建立了包括细沟间侵蚀量和细沟侵蚀量的 2 维坡面土壤侵蚀模型;Nearing 等<sup>[10]</sup>将 WEPP 模型中用于计算坡耕地侵蚀输沙的方程替换为牧草地侵蚀输沙方程,建立了适用于牧草地坡面产流输沙的 RHEM 模型。

可见,由于对坡面侵蚀输沙机理的认识和理解不同,目前研究者建立的坡面产流输沙模型差异也较大,并且这些模型或者地域性太强,通用性不足,或者参数要求较多,计算较为复杂。另外,在黄土地区这样一个特殊的侵蚀环境下,如何揭示坡面的侵蚀输沙动力机制,建立更为有效的坡面产流输沙模型,也需要进一步研究。为此,作者基于运动波方程和一个参数要求较少、计算较为简单的泥沙输移公式建立了能够反映坡面产流输沙过程的简化模型,在利用不同土地利用方式室内或野外模拟试验及自然降雨条件下坡面产流输沙实测资料对模型进行验证的基础上,对黄土高原不同降雨条件下不同土地利用场景的产流输沙特征进行了模拟,以期揭示土壤侵蚀机理和优化土地利用方式提供理论支撑。

## 1 坡面产流输沙模型的建立

### 1.1 坡面产流模型

对坡面径流的数学描述,一般采用 1 维圣维南方程,但由于该方程求解复杂,研究者多将坡面流视为运动波,把圣维南方程简化为:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i - f = r \quad (1)$$

$$q = bh^m \quad (2)$$

式中:  $q$  为坡面流单宽流量  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $x$  为沿水流方向距坡顶距离  $\text{m}$ ;  $h$  为坡面流水深  $\text{m}$ ;  $i$  为降雨强度,  $\text{m/s}$ ;  $f$  为入渗强度  $\text{m/s}$ , 可取  $f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}$ ,  $f_0$  为初始入渗率,  $f_c$  为稳定入渗率,  $k$  为系数, 不同土地

利用方式各参数取值不同;  $r$  为净雨强  $\text{m/s}$ ;  $b$  为运动波阻力参数;  $m$  为经验常数。坡面径流由于受地表糙度、降雨等影响较大,一般表现为紊流流态,故  $b = S^{0.5}/n$ ,  $m = 5/3$ , 其中:  $n$  为曼宁糙度系数;  $S$  为坡降,  $S = \sin \beta$ ,  $\beta$  为坡面坡度。

运动波方程的初始及边界条件可以表示为:

$$h(x, 0) = 0, 0 \leq x < L \quad (3)$$

$$h(0, t) = 0, 0 \leq t < \infty \quad (4)$$

Liggett 与 Woolhiser 于 1967 年利用无因次化法对上述方程进行求解,得到了次降雨条件下坡面流的产流过程运动参数,求解方程见文献[11]。

### 1.2 坡面输沙模型

高建恩在研究泥沙输移规律时曾利用 Bagnold 水流功率理论提出了一个细沙输移公式<sup>[12]</sup>,该公式能够同时表征水流、床面不同形态及泥沙本身性质等因素对坡面侵蚀输沙的影响,且精度较高、参数要求较少、计算较为简单。公式的形式为:

$$\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} \Phi = 0.01 \frac{1}{\tan \alpha} [Fr(\theta - \theta_c) \frac{v}{v_{*c}}]^{1.5} \quad (5)$$

式中,  $\Phi = g_b / (\gamma_s d \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} gd})$ ,  $\theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d}$ ,

$\theta_c = \frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d}$ , 其中:  $\Phi$  为表征输沙强度的无量纲参数;  $\theta$  及  $\theta_c$  为表征水流强度的无量纲参数;  $d$  为泥沙粒径  $\text{m}$ ;  $g_b$  为单宽输沙率  $\text{g}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $\gamma_s$  及  $\gamma$  分别为泥沙与水的容重  $\text{N}/\text{m}^3$ ;  $\tau_0, \tau_c$  分别为床面剪切力及起动切应力  $\text{Pa}$ ,  $\tau_0 = \gamma h S$ ,  $\tau_c = \rho v_{*c}^2$ ;  $\tan \alpha$  为摩擦系数,对天然泥沙,一般取  $\tan \alpha = 0.63$ ;  $Fr$  为水流佛汝德数  $Fr = v/(gh)^{0.5}$ ;  $v$  及  $v_{*c}$  为流速和起动摩阻流速,  $\text{m/s}$ 。式(5)为 1 个半理论半经验公式,建立该公式的数据资料范围非常广泛,不仅包含低强度输沙资料(输沙强度  $\Psi > 10$ )而且包含高强度输沙资料( $\Psi < 2$ );不仅有大量的室内试验资料,而且还有大量的野外资料。具体资料范围为:  $\rho_s = 1.25 \sim 4.22 \text{ t}/\text{m}^3$ ;  $d = 0.018 \sim 300 \text{ mm}$ ;  $h = 0.008 \sim 2.0 \text{ m}$ ;  $h/d = 1.5 \sim 7000$ ;  $\Psi = 0.2 \sim 19$ 。

式中,起动切应力  $\tau_c$  采用窦国仁的计算公式:

$$\tau_c = k^2 \rho \left( \frac{d'}{d_*} \right)^{1/3} \left[ 3.6 \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) g d \cos \beta + \left( \frac{\gamma_0}{\gamma_{0*}} \right)^{5/2} \left( \frac{\varepsilon_0 + g \cos \beta h \delta \sqrt{\delta/d}}{d} \right) \right] \quad (6)$$

式中:  $k$  为无量纲参数  $k = 0.128$ ;  $d'$  为特征粒径,  $\text{m}$ (当  $d \leq 0.5 \text{ mm}$  时  $d' = 0.5 \text{ mm}$ ; 当  $0.5 < d < 10 \text{ mm}$  时  $d' = d$ );  $d_*$  为参照粒径  $\text{m}$ ,  $d_* = 10 \text{ mm}$ ;  $\varepsilon_0$

为表征黏结力的参数,  $m^3/s^2$ , 对一般泥沙, 取  $\varepsilon_0 = 1.75 \text{ cm}^3/s^2$ ;  $\delta$  为水层的厚度参数,  $m$ ,  $\delta = 2.31 \times 10^{-5} \text{ cm}$ ;  $\gamma_0$  及  $\gamma_{0^*}$  分别为土壤的干容重和稳定干容重,  $N/m^3$ 。

坡面降雨径流由于水深极浅, 目前多数学者认为坡面流不具有足够的紊动能悬浮泥沙, 故泥沙在水流中多以推移质形式运动<sup>[13-14]</sup>。而式(5)恰好是基于 Bagnold 水流功率理论推求的推移质输沙公式, 不仅物理意义清楚, 而且建立该公式的资料中还包括了细沙和小水深情况, 因此将式(5)应用到坡面输沙计算上是合理的。需要重点说明的是, 该公式模拟的为坡面径流的输沙过程, 其与坡面产沙是不同的。坡面输沙的动力条件主要为坡面径流, 重点强调径流携带和输移泥沙的过程, 其对应的输沙量为通过坡面出口处的泥沙量, 而坡面产沙的动力条件不仅包括坡面径流, 还包括降雨击溅, 是降雨溅蚀和径流侵蚀共同作用的结果, 其对应的产沙量为整个坡面由于降雨和径流双重作用造成的泥沙侵蚀总量, 但这些泥沙并不是全部通过径流输出坡面。

由上述运动波方程和坡面输沙公式共同组成了坡面产流输沙模型。在确定模型的参数以后, 该模型可以计算: 1) 次降雨条件下坡面产流过程, 主要通过运动波方程近似解法得到; 2) 坡面输沙量随降

雨时间变化过程, 将坡面产流过程运动参数作为式(5)的输入项, 即可得到坡面输沙过程; 3) 坡面输沙量沿坡长变化过程, 当坡面降雨达到平衡状态时, 单宽径流量可表示为  $q = rx$ , 结合坡面输沙方程式(5)即可得到。

## 2 模型验证

为了检验模型的有效性, 利用裸地、草地、坡耕地、灌木地和幼林地 5 种土地利用方式模拟试验及自然降雨条件下的产流输沙过程实测资料对模型进行了验证。

### 2.1 坡面产流输沙过程验证

#### 2.1.1 模拟试验实测资料

文献[15-17]中分别给出了不同试验条件下裸地、草地、坡耕地和灌木地 4 种土地利用方式产流输沙过程实测资料, 资料基本情况见表 1。模型计算中, 曼宁糙度  $n$  及入渗速率  $f$  按实测资料计算。图 1 及 2 分别为 4 种土地利用方式下坡面产流、输沙模拟过程与实测值的对比, 由图 1、2 可知实测结果与模拟结果吻合较好, 表明模型可以模拟不同土地利用方式坡面产流输沙过程。通过 SPSS 软件分析, 模型对产流过程模拟精度为 0.95, 对输沙过程模拟精度为 0.88, 可见模型对产流过程模拟要优于输沙过程。

表 1 不同试验条件下 4 种土地利用方式产流输沙实测资料基本情况

Tab. 1 Basic information of runoff generation and sediment transport measured data of four land use patterns under different experimental conditions

不同土地利用方式	小区尺寸/ m <sup>2</sup>	坡度/(°)	试验方式	流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	试验时间/ min	备注
裸地	20 × 1.67	10/20	野外放水	1.0/1.5	—	30	自然裸露, 试验前除杂草
草地	20 × 1.67	20	野外放水	3.0/3.5	—	30	2 a 生苜蓿, 植株高度约 10 cm, 覆盖度约 65%
坡耕地	3 × 1	3/15	模拟降雨	—	80	60	夏玉米, 拔节初, 株行距 25 cm × 60 cm
灌木地	5 × 1	20	模拟降雨	—	90/130	60	紫穗槐, “品”字型排列种植, 覆盖度约 70%

#### 2.1.2 自然降雨实测资料

利用 2010 年在陕西省杨凌区五泉乡岭后国家节水中心水土保持实验站测定的一次侵蚀性自然降雨条件下裸地、坡耕地、草地和幼林地坡面产流输沙过程数据对模型进行验证。该实验站属于黄土高原平原区, 土壤机械组成为 37.3% 黏粒、59.9% 粉粒和 2.8% 砂粒, 中值粒径为 0.038 mm。实验站径流小区为国际标准径流小区(投影面积为 20 m × 5 m), 文中主要选用裸地、坡耕地、苜蓿草地和幼林地 4 个小区, 苜蓿草地为 2 a 生, 地表植株高度在 12 cm 左右, 覆盖度为 50% 左右; 坡耕地种植夏玉米, 高度约 50 cm; 幼林地为 2 a 树龄柿树, 树下无杂草,

小区坡度为 20°。

每个小区出口处配有 3 级径流桶, 2 个为分流桶, 1 个为集流桶, 用于观测每次降雨过程中径流及泥沙变化。降雨过程中, 定时利用卷尺测量径流桶中的水位, 即可得到每次降雨的产流过程资料。在测量水位的同时, 将水搅拌均匀后抽取水样 500 mL, 放入已知重量的铝盒, 然后在 105 °C 恒温下烘干不少于 8 h, 即可得到输沙过程资料。降雨前后土壤含水量通过 DIVINER2000 测定, 测定深度为 0 ~ 100 cm。

该次侵蚀性降雨历时约为 15 min, 降雨量为 10.65 mm。模型计算中, 降雨强度按平均雨强计

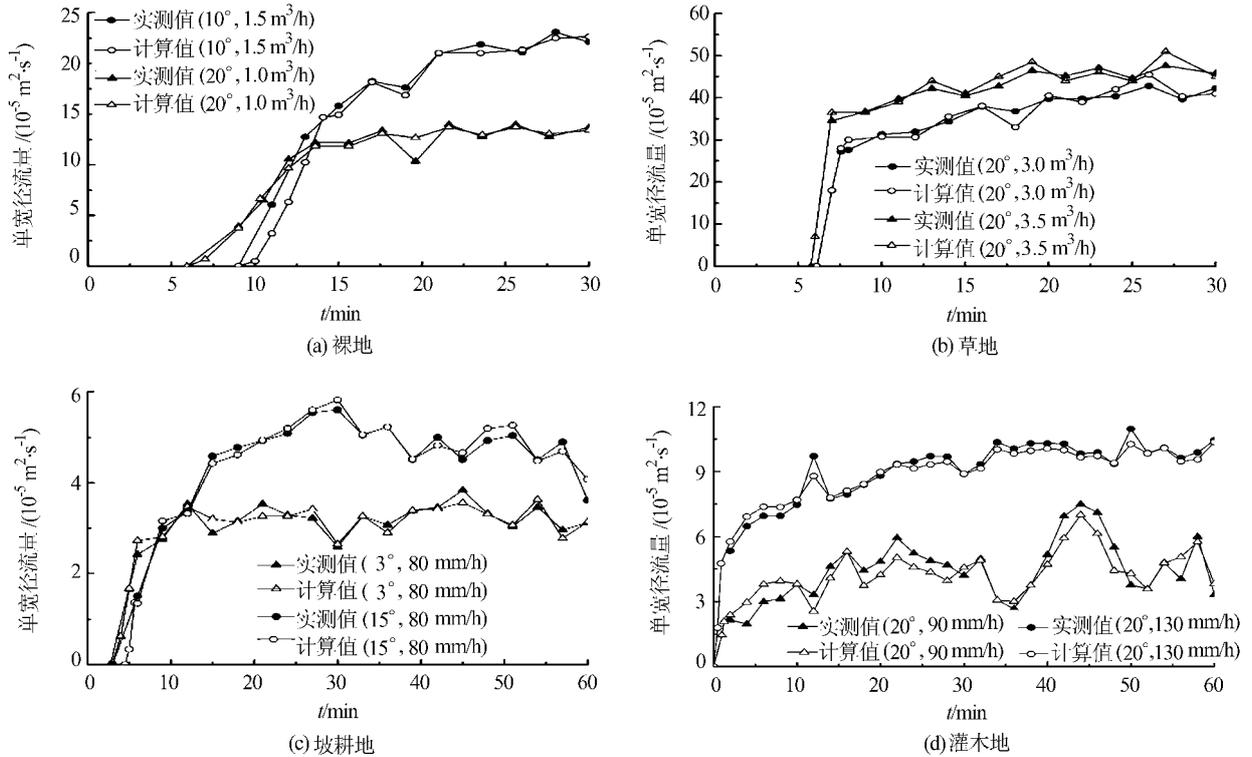


图 1 4 种土地利用方式产流过程计算值与实测值的对比

Fig. 1 Simulated runoff discharges vs measured values under four land use patterns

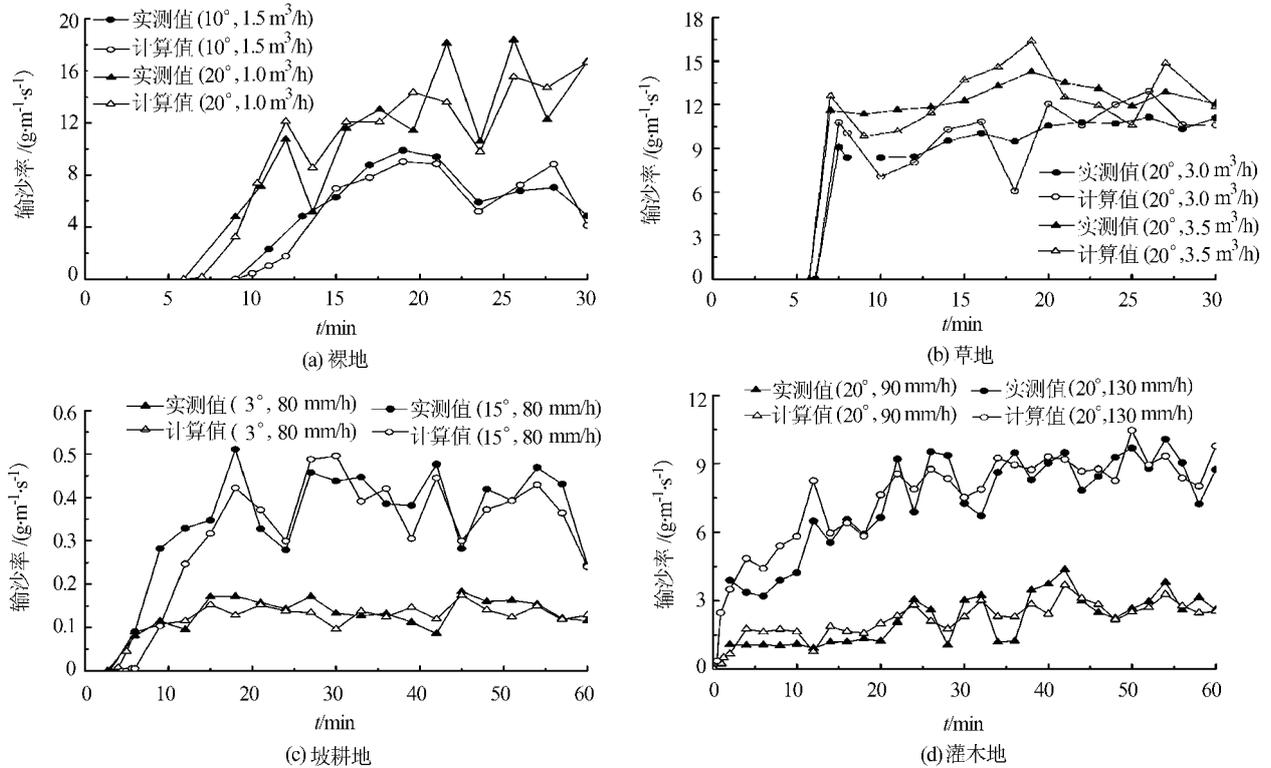


图 2 4 种土地利用方式输沙过程计算值与实测值的对比

Fig. 2 Simulated sediment transport rates vs measured values under four land use patterns

算。参照以往类似试验<sup>[15-16]</sup>,取裸地、坡耕地、草地和幼林地的曼宁系数 $n$ 分别为0.054、0.059、0.071和0.064。入渗强度 $f$ 按 $f = f_c + (f_0 - f_c) e^{-kt}$ 计

算,参数取值参考文献[16,18]。图3和4分别为4种土地利用方式坡面产流、输沙模拟过程与实测值的对比。

由图 3、4 可知模拟结果与实测结果吻合较好,表明模型也可以用于自然降雨条件下不同土地利用方式产流输沙过程模拟。通过 SPSS 软件分析 模型

对产流过程模拟精度为 0.89,对输沙过程模拟精度为 0.83,可见模型对产流过程模拟仍优于输沙过程。

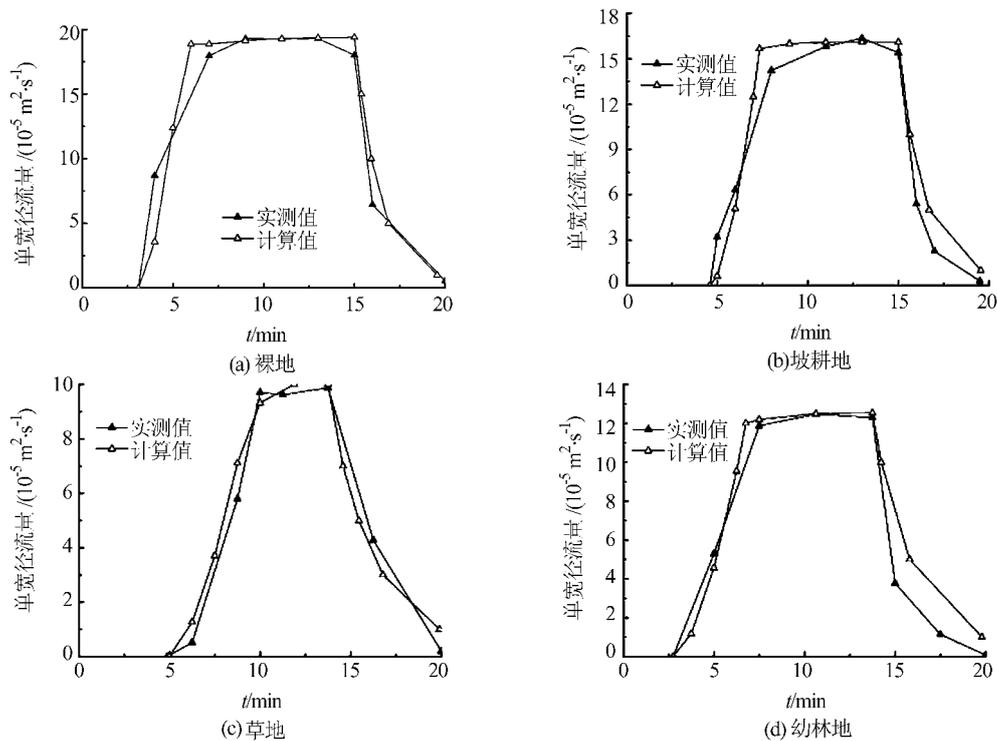


图 3 不同土地利用方式产流过程计算值与实测值的对比

Fig. 3 Simulated runoff discharge vs measured values under different land use patterns over time

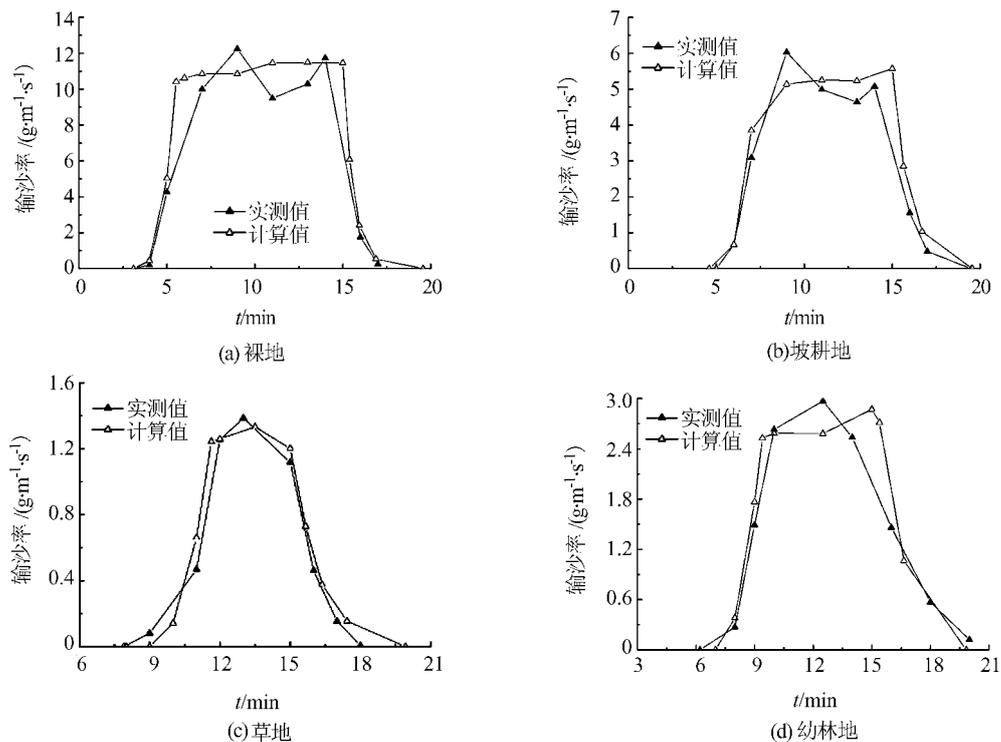


图 4 不同土地利用方式输沙过程计算值与实测值的对比

Fig. 4 Simulated sediment transport rates vs measured values under different land use patterns over time

### 2.2 坡面沿程侵蚀输沙量验证

由于没有在文献中收集到不同土地利用方式降雨条件下坡面沿程输沙实测资料,仍利用该次侵蚀性自然降雨条件下测定的裸地、坡耕地、草地和幼林地坡面沿程输沙资料对模型进行验证。降雨结束后,利用卷尺和皮尺,沿坡从上到下分段(1 m 间隔)量测并记录细沟侵蚀密度、沟宽、沟长、沟深等,并将细沟形状概化为棱柱体,通过计算即可获得坡面沿程细沟侵蚀输沙实测资料。将坡面沿程细沟侵蚀输沙资料作为坡面沿程输沙实测资料对模型进行了验证。原因为:第一,坡面降雨径流由于水深极浅,沿程输沙资料很难获取,特别是在自然降雨或复杂下垫面条件下;第二,根据以往研究结果<sup>[19-20]</sup>,坡面细沟侵蚀量可占坡面总侵蚀量的 76%~98%,且坡面泥沙输移比高达 0.9 以上,接近 1,可见细沟侵蚀量在坡面总输沙量中占主导地位;第三,坡面产生细沟以

后,坡面径流开始集中,大部分水流汇入细沟内,促进细沟侵蚀加剧<sup>[21]</sup>,细沟侵蚀及其水流输沙成为坡面输沙量的主要来源。此外,将 4 种土地利用方式下细沟沿程侵蚀输沙总量与坡面出口处总输沙量进行比较,发现细沟侵蚀输沙总量可占出口处总输沙量的 85%~97%。综上所述,在没有收集到其它实测资料的情况下,利用坡面沿程细沟侵蚀输沙实测资料来代表坡面沿程输沙实测资料在一定程度上是可行的。

图 5 为 4 种土地利用方式下输沙率沿程分布计算结果与实测值的对比,模型参数取值同上。由图 5 可知计算值与实测值变化趋势吻合较好,表明模型总体上可以反映不同土地利用方式输沙量沿坡长的平均变化情况。进一步分析发现,模型不能反映实测结果的波动情况,这主要由于坡面沿程细沟侵蚀输沙与坡面沿程输沙仍存在一定差别。

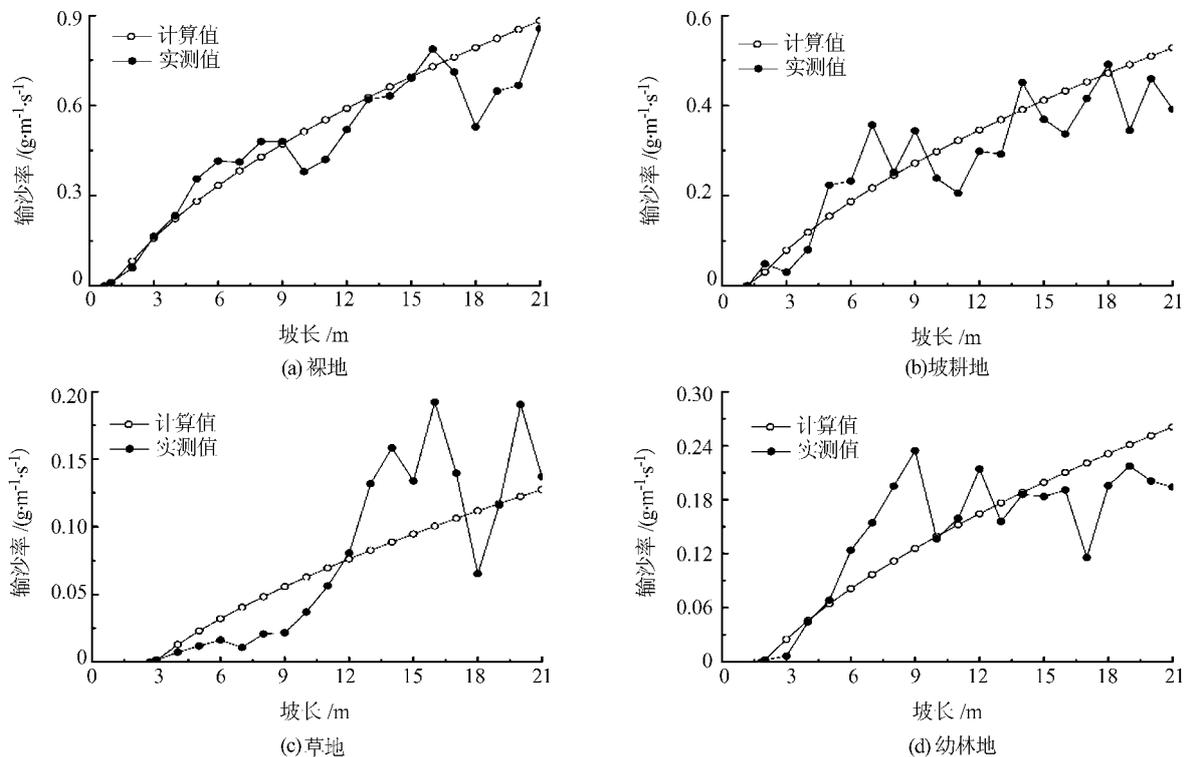


图 5 不同土地利用方式坡面沿程侵蚀输沙量计算值与实测值的对比

Fig. 5 Calculated sediment transport rates along the slope length vs measured values under different land use patterns

### 3 模型应用

上述验证表明该模型可以用来模拟不同土地利用方式水沙输移时空变化过程。对不同土地利用方式沿程输沙的模拟结果可知,单宽输沙量随坡长呈增加趋势,因此当坡面某段侵蚀量增大到一定程度时就需要进行调控,而该模型恰好可以为不同土地利用方式坡长大小控制提供一种量化方法。根据国

家制定的土壤侵蚀强度分级标准,取年平均侵蚀模数  $200 \text{ t}/\text{km}^2$  为黄土高原轻度侵蚀标准,则年侵蚀量达到  $200 \text{ t}/\text{km}^2$  的坡段坡长称为轻度侵蚀控制坡长。对于某一坡面,从分水岭开始沿坡长的某一段距离内,由于地表径流弱,侵蚀以雨滴击溅为主,而少发沟蚀,这个距离称为侵蚀临界距离。在该距离内,侵蚀很弱,近似等于 0,只产生径流,又称之为侵蚀临界坡长<sup>[22]</sup>。利用上述模型对黄土高原不同土地利

用场景在典型降雨( $I = 0.65 \text{ mm/min}$   $t = 10 \text{ min}$ )及十年一遇降雨( $I = 1.2 \text{ mm/min}$   $t = 30 \text{ min}$ )条件下的产流输沙特征进行了模拟。不同土地利用场景及其模型参数如糙度、平均入渗率取值见表 2 取值参考文献 [23 - 28 ]。

典型降雨和十年一遇的降雨标准通过查阅黄土高原地区燕沟流域多年平均雨强、重现期及降雨历时相关图获得<sup>[22]</sup>。假定研究坡面长 20 m,宽 5 m,土壤中值粒径为 0.038 mm。

详细结果见表 3。

表 2 不同土地利用场景及参数取值

Tab.2 Different land use scenarios and parameter values

不同坡度裸坡			不同覆盖度草地(坡度为 20°)			不同树龄林地(坡度为 20°)		
坡度/(°)	糙率 $n$	平均入渗率 $f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	盖度/%	糙率 $n$	平均入渗率 $f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	树龄/a	糙率 $n$	平均入渗率 $f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
5	0.054	0.35	20	0.062	0.42	2	0.057	0.43
10	0.054	0.33	40	0.067	0.54	3	0.064	0.51
15	0.054	0.30	60	0.072	0.63	5	0.079	0.62
20	0.054	0.28	80	0.078	0.74	8	0.105	1.00
25	0.054	0.25	100	0.082	0.83	10	0.114	1.13

表 3 黄土高原不同降雨条件下不同土地利用场景产流输沙特征模拟结果

Tab.3 Runoff generation and sediment transport characteristics under different land use scenarios and rainfall conditions in the Loess Plateau

	裸地,不同坡度/(°)									
	典型降雨( $I = 0.65 \text{ mm/min}; t = 10 \text{ min}$ )					十年一遇降雨( $I = 1.2 \text{ mm/min}; t = 30 \text{ min}$ )				
	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
产流量/ $\text{m}^3$	0.30	0.32	0.35	0.37	0.40	2.55	2.61	2.70	2.76	2.85
输沙量/kg	0.20	1.89	6.48	14.90	33.13	6.56	34.91	105.39	217.29	421.91
临界坡长/m	6.97	2.77	1.74	1.30	0.89	2.37	1.02	0.74	0.56	0.44
轻度侵蚀控制坡长/m	>50	>50	38.45	13.95	5.48	35.5	5.45	2.05	1.37	0.67
	坡度为 20°草地,不同覆盖度/%									
	典型降雨( $I = 0.65 \text{ mm/min}; t = 10 \text{ min}$ )					十年一遇降雨( $I = 1.2 \text{ mm/min}; t = 30 \text{ min}$ )				
	20	40	60	80	100	20	40	60	80	100
产流量/ $\text{m}^3$	0.23	0.11	0.06	0	0	2.34	1.98	1.71	1.38	1.11
输沙量/kg	3.83	0.55	0	0	0	118.64	65.47	43.43	21.67	10.65
临界坡长/m	2.40	6.26	40.13	>50	>50	0.81	1.22	1.36	2.19	3.16
轻度侵蚀控制坡长/m	>50	>50	>50	>50	>50	2.13	3.32	4.96	10.00	18.90
	坡度为 20°林地,不同树龄/a									
	典型降雨( $I = 0.65 \text{ mm/min}; t = 10 \text{ min}$ )					十年一遇降雨( $I = 1.2 \text{ mm/min}; t = 30 \text{ min}$ )				
	2	3	5	8	10	2	3	5	8	10
产流量/ $\text{m}^3$	0.24	0.14	0.09	0	0	2.26	1.98	1.65	0.60	0.21
输沙量/kg	5.64	1.21	0	0	0	130.86	69.87	25.69	1.11	0.00
临界坡长/m	1.81	4.45	34.07	>50	>50	0.71	0.96	2.33	9.89	34.45
轻度侵蚀控制坡长/m	33.70	>50	>50	>50	>50	2.12	3.05	7.95	>50	>50

表 3 表明:

1) 降雨条件一致时,裸地:坡度越大,产流量越大 25°时产流量为 5°时相应值的 1.22 倍。坡度对输沙量影响更为显著,特别当坡度大于 15°后,输沙

量大大增加,25°时输沙量为 5°时相应值的 114.98 倍。草地:覆盖度对坡面产流输沙量均有显著影响,对输沙量影响更甚。覆盖度越大,产流输沙量越小。与 20%覆盖度时坡面产流输沙量相比,当覆盖度达

80%, 产流量和输沙量可分别减少约70.51%和90.87%。林地: 树龄越大, 林地减水减沙效应越大, 与2 a树龄林地相比, 10 a树龄林地减水减沙效率均达90%以上。

2) 在其它条件一致时, 不同土地利用方式对坡面产流输沙量也有影响。坡度均为20°时, 典型降雨条件下, 裸地产流输沙量最大, 草地产流输沙量最小, 与裸地相比, 草地和林地的平均减水、减沙率分别为78.39%、94.12%和74.59%、90.81%; 十年一遇降雨条件下, 林地的减水减沙效应最大, 其减水减沙率分别为51.45%和79.06%, 草地减水减沙率分别为38.26%和76.08%。草地和林地的减沙效应均大于减流效应。可见, 对低强度短历时降雨, 草地调控水沙见效较快; 对高强度长历时降雨, 林地的调控作用较大。实际应用中, 2种方式应配合进行, 各补所短。

3) 对20 m×5 m的径流小区, 在典型降雨条件下, 5 a树龄以上的林地土壤侵蚀基本已得到完全控制, 3 a树龄的林地, 在5~20 m发生轻度侵蚀。60%覆盖度以上的草地水土流失也基本不再发生, 40%覆盖度草地在坡面中下部会发生轻度侵蚀。裸地, 在不同坡度条件下均发生侵蚀, 坡度小于15°时侵蚀不显著。十年一遇降雨条件下, 10 a树龄以上的林地土壤侵蚀基本得到控制, 8 a树龄林地在坡下部发生轻度侵蚀。草地由于受本身茎叶及根系条件的限制, 承受高强度长历时暴雨冲击的能力有限。裸地承受高强度长历时降雨的能力更差, 在整个坡面均发生较为严重的土壤侵蚀。对不同坡度裸地, 要严格控制坡面坡长, 分段拦蓄泥沙。

#### 4 结 论

基于运动波方程和泥沙输移公式, 给出了一种能够反映坡面产流输沙时空变化的简化模型。利用裸地、草地、坡耕地、灌木地及幼林地的试验及自然降雨条件下坡面产流输沙实测资料对模型进行了验证, 并在此基础上, 对黄土高原不同降雨条件下不同土地利用场景坡面水沙输移特征进行了模拟。结果表明: 1) 模型能够反映不同土地利用方式下坡面产流输沙过程及沿程侵蚀输沙量的变化情况, 且其计算简单, 要求参数较少, 能够满足研究精度要求。模型对产流过程模拟要优于输沙过程。2) 在黄土高原典型降雨条件下, 5 a树龄以上的林地和覆盖度达到60%的草地坡面标准小区基本不再发生侵蚀, 3 a树龄的林地或40%覆盖度草地在坡面中下部会发

生轻度侵蚀, 坡度小于15°的裸地坡面中下部也会发生轻度侵蚀; 在黄土高原十年一遇的降雨条件下, 10 a树龄以上的林地坡面土壤侵蚀基本也得到控制, 8 a树龄林地在坡面下部将发生轻度侵蚀, 而草地在覆盖度达到100%的条件下其调控坡面水沙的能力仍然有限, 裸地更差。对低强度短历时降雨, 草地调控水沙的见效较快; 对高强度长历时降雨, 林地调控水沙的作用较大, 两者宜配合进行。对不同坡度裸地, 要严格控制坡面坡长。

#### 参考文献:

- [1] Wang Guoqiang, Jiang Hong, Xu Zongxue, et al. Evaluating the effect of land use changes on soil erosion and sediment yield using a grid-based distributed modeling approach [J]. *Hydrological Processes* 2012, 26(23): 3579–3592.
- [2] Zhang Yan, Liu Xianchun, Li Zhiguang, et al. Surveying soil erosion condition in Loess Plateau using soil erosion model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 2012, 28(10): 165–171. [张岩, 刘宪春, 李智广, 等. 利用侵蚀模型普查黄土高原土壤侵蚀状况 [J]. *农业工程学报* 2012, 28(10): 165–171.]
- [3] Yao Wenyi. Review and prospect of Chinese soil erosion and sediment yield mathematic models [J]. *Journal of Sediment Research* 2011(2): 65–74. [姚文艺. 我国侵蚀产沙数学模型研究评述与展望 [J]. *泥沙研究* 2011(2): 65–74.]
- [4] Wang Guangqian, Xue Hai, Liu Jiahong. Sediment yield model on slopes [J]. *Journal of Basic Science and Engineering* 2005(S1): 1–7. [王光谦, 薛海, 刘家宏. 坡面产沙理论模型 [J]. *应用基础与工程科学学报* 2005(S1): 1–7.]
- [5] Sun Quanmin, Wang Zhanli. Dynamic model of soil dispersion and sediment Delivery by runoff on slope and its application [J]. *Journal of Basic Science and Engineering* 2011, 19(6): 862–876. [孙全敏, 王占礼. 坡面土壤分散-径流挟沙动力学模型及应用 [J]. *应用基础与工程科学学报* 2011, 19(6): 862–876.]
- [6] Li Wenjie, Wang Xingkui, Li Danxun, et al. A physically-based distributed watershed water erosion prediction model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 2012, 43(3): 264–274. [李文杰, 王兴奎, 李丹勋, 等. 基于物理过程的分布式流域水沙预报模型 [J]. *水利学报* 2012, 43(3): 264–274.]
- [7] Liu Q Q, Xiang H, Singh V P. A simulation model for unified interrill erosion and rill erosion on hillslopes [J]. *Hydrological Processes* 2006, 20(3): 469–486.
- [8] Deng Zhiqing, de Lima J L M P, Jung H S. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion [J]. *CATENA* 2008, 76(1): 52–62.

- [9] An Y, Liu Q Q. Two-dimensional hillslope scale soil erosion model [J]. *Journal of Hydrologic Engineering* 2009, 14(7): 690–697.
- [10] Nearing M A, Wei H, Stone J J, et al. A rangeland hydrology and erosion model [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 2011, 54(3): 901–908.
- [11] Liggett J A, Woolhiser D A. Unsteady one dimensional flow over a plane—the rising Hydrology [J]. *Water Resource Research* 1967, 3(3): 753.
- [12] Gao Jian'en. The study on the law of bed load sediment transport [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993(4): 62–69. [高建恩. 推移质输沙规律的再探讨 [J]. *水利学报*, 1993(4): 62–69.]
- [13] Asadi H, Ghadiri H, Rose C W, et al. Interrill soil erosion processes and their interaction on low slopes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms* 2007, 32(5): 711–724.
- [14] Wu Pute, Zhou Peihua. Research on the laminar flow type and erosion transportation manners on the slope surface [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(1): 19–24. [吴普特, 周佩华. 坡面薄层水流流动型态与侵蚀搬运方式的研究 [J]. *水土保持学报*, 1992, 6(1): 19–24.]
- [15] Wu Shufang. Study on the effect and mechanism of the slope runoff regulation [D]. Yangling: Northwest A&F University 2006. [吴淑芳. 坡面径流调控效应及其机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学 2006.]
- [16] Ma Fan. Effects of crop cover on soil erosion on slope land [D]. Yangling: Northwest A&F University 2009. [马璠. 作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学 2009.]
- [17] Yao Wenyi, Xiao Peiqing, Shen Zhenzhou, et al. Responses of runoff process and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* 2011, 42(12): 1438–1444. [姚文艺, 肖培青, 申震洲, 等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应 [J]. *水利学报* 2011, 42(12): 1438–1444.]
- [18] Wu Shufang, Wu Pute, Feng Hao, et al. Effects of forage grass on the reduction of runoff and sediment and the hydrodynamic characteristic mechanism of slope runoff in the standard slope plot [J]. *Journal of Beijing Forestry University* 2007, 29(3): 99–104. [吴淑芳, 吴普特, 冯浩, 等. 标准坡面人工草地减流减沙效应及其坡面流体力学机理研究 [J]. *北京林业大学学报* 2007, 29(3): 99–104.]
- [19] Xue Yazhou, Liu Puling, Yang Mingyi, et al. A study of slope land soil erosion process under one rainfall event using rare earth element tracers technology [J]. *Scientia Agricultura Sinica* 2004, 37(7): 1089–1092. [薛亚洲, 刘普灵, 杨明义, 等. 利用 REE 示踪技术研究次降雨坡面侵蚀 [J]. *中国农业科学* 2004, 37(7): 1089–1092.]
- [20] Wang Guiping. Summary of rill erosion study [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1998(8): 23–25. [王贵平. 细沟侵蚀研究综述 [J]. *中国水土保持*, 1998(8): 23–25.]
- [21] Zheng Fenli, Tang Keli, Zhou Peihua. Approach to the genesis and development of rill erosion on slope land and the way to control [J]. *Acta Conservation Soil et Aquae Sinica*, 1987, 1(1): 36–48. [郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨 [J]. *水土保持学报*, 1987, 1(1): 36–48.]
- [22] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论 [M]. 郑州: 黄河水利出版社 2006.
- [23] Huang Jun, Wu Pute, Zhao Xining. Impact of slope biological regulated measures on soil water infiltration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10): 29–37. [黄俊, 吴普特, 赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(10): 29–37.]
- [24] Feng Hao, Wu Shufang, Wu Pute. Study on scouring experiment of regulating runoff in grassland slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2005, 19(6): 23–25. [冯浩, 吴淑芳, 吴普特, 等. 草地坡面径流调控放水试验研究 [J]. *水土保持学报* 2005, 19(6): 23–25.]
- [25] Zhang Hongjiang, Kitahara Hikaru, Endo Taizo. The effect of the several kind of litters to the roughness coefficient [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 8(4): 4–6. [张洪江, 北原曜, 远藤泰造. 几种林木枯落物对糙度系数  $n$  值的影响 [J]. *水土保持学报* 1994, 8(4): 4–6.]
- [26] Zhang Zhiqiang, Wang Lixian, Yu Xinxiao, et al. Effective overland roughness coefficient calculation for forested infiltrating slope [J]. *Scientia Silvae Sinicae* 2000, 136(5): 22–27. [张志强, 王礼先, 余新晓, 等. 渗透坡面林地地表径流运动的有效糙率研究 [J]. *林业科学* 2000, 136(5): 22–27.]
- [27] Gao Peng. Study on runoff and sediment laws of artificial Robinia pseudoacacia plantation [J]. *Soil and Water Conservation in Fujian Province*, 1994(4): 39–41. [高鹏. 人工刺槐林产流、产沙规律研究 [J]. *福建水土保持*, 1994(4): 39–41.]
- [28] Zhang Ying, Zheng Xilai, Zhang Xiaohui, et al. Impacts of young trees on hydraulic characteristics of overland flow and sediment particle size in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2011, 31(4): 7–12. [张颖, 郑西来, 张晓晖, 等. 黄土高原幼树对坡面流体力学特性及泥沙颗粒组成的影响 [J]. *水土保持通报* 2011, 31(4): 7–12.]

(编辑 张琼)