

# 基于农业非点源污染模型的桃溪 流域日径流泥沙模拟

钟科元<sup>1</sup>, 陈莹<sup>1,2,3</sup>, 陈兴伟<sup>1,2,3</sup>, 刘梅冰<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点  
实验室培育基地, 福建 福州 350007; 3. 福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心, 福建 福州 350007)

**摘要:** [目的] 以中国东南沿海桃溪流域为研究对象, 构建该流域日尺度产流产沙的农业非点源污染模型(annualized agricultural non-point source pollution model, AnnAGNPS), 以期为流域水土流失治理与水土资源合理配置分析支持。[方法] 采用 DSA(differential sensitivity analysis)方法, 分析流域敏感性参数, 并建立研究区日尺度的 AnnAGNPS 模型。[结果] (1) CN 值(curve number)、土壤有效含水量和沟道曼宁系数为径流敏感性参数, 土壤可侵蚀因子  $K$ 、地表残留物覆盖率、年根系生物量、耕作后地面残留物覆盖率、随机粗糙率、沟道曼宁系数和耕作扰动面积为输沙量的主要敏感性参数; (2) 模型对日尺度径流模拟的  $R^2$ , Ens 系数均大于 0.66, 日尺度泥沙模拟的  $R^2$ , Ens 系数均大于 0.62。[结论] AnnAGNPS 模型能够较好地模拟桃溪流域日尺度产流产沙规律。

**关键词:** AnnAGNPS 模型; 日尺度; 径流; 泥沙; 参数敏感性

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)06-0130-05

中图分类号: TV213.4

## Simulation of Daily Runoff and Sediment Load in Taoxi Watershed Based on AnnAGNPS Model

ZHONG Keyuan<sup>1</sup>, CHEN Ying<sup>1,2,3</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2,3</sup>, LIU Meibing<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou, Fujian 350007, China; 3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou, Fujian 350007, China)

**Abstract:** [Objective] Daily runoff and sediment process in Taoxi watershed in the Southeast of China were simulated to provide a support for soil and water conservation plan. [Methods] The annualized agricultural non-point source pollution model(AnnAGNPS) was adopted to simulate the daily runoff and sediment yield. Differential sensitivity analysis(DSA) methods were carried out to evaluate the sensitivity of input parameters. [Results] (1) Curve number, field capacity and Maning's-reach were the sensitive parameters for runoff simulation.  $K$ -factor, surface residue cover, root-mass, remained residue cover after cultivation, random roughness, Maning's-reach and disturbed area were the major sensitive parameters for sediment load estimation. (2) In the calibration and validation processes of both runoff and sediment simulation,  $R^2$  and Ens had values above 0.66 for daily runoff and were above 0.62 for daily sediment load modeling. [Conclusion] AnnAGNPS model can simulate well for daily runoff and sediment process in the study area.

**Keywords:** AnnAGNPS model; daily runoff; sediment; parameter sensitivity

在全球变化和人为活动日益增强的背景下, 严重的土壤侵蚀使耕地面积减少, 土壤质量退化, 引起一系列的生态和环境问题。以流域为单元研究产流产

沙变化规律, 对防治流域水土流失与保护流域水资源具有重要意义。分布式流域水文模型将流域划分成若干个计算单元, 考虑了下垫面的异质性和水文气象

收稿日期: 2014-08-15

修回日期: 2014-09-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“土地利用变化对流域洪水风险的影响及其不确定性分析”(41301031); 福建省科技厅重点项目“农业面源对水库型饮用水源地氮素污染负荷的影响与调控技术”(2013N0013)

第一作者: 钟科元(1987—), 男(汉族), 江西省兴国县人, 硕士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: zkygeo@163.com。

通信作者: 陈莹(1982—), 女(汉族), 福建省南平市人, 博士, 副教授, 主要从事洪涝灾害、水文学与水资源等方面研究。E-mail: chenying\_nju@163.com。

要素的时空变异性,能更真实地反映了产流产沙过程。目前,国外开发了很多流域尺度的分布式水文模型用于产流、产沙过程的研究,如 SWAT(soil and water assessment tool), AnnAGNPS(annualized agricultural non-point source pollution model), AN-SWERS(areal non-point source watershed environment response simulation)和 HSPF(hydrologic simulate program)模型等,这些模型已成为模拟、预测气候变化、人类活动影响下流域产流、产沙演化规律的重要工具。AnnAGNPS 是美国农业部开发的适用于流域尺度的连续时段非点源污染分布式模型,可以用来模拟流域的产流、产沙和化学养分迁移等过程,具有操作简单灵活与 GIS 高度集成的特点。由于模型的科学性和实用性,已被许多国内外学者所采用,并作为流域管理和水质监测等方面的有效工具之一。目前在不同下垫面特征及气候环境下得到广泛应用,如热带的加勒比群岛<sup>[1]</sup>、马来西亚<sup>[2]</sup>,美国的东北部<sup>[3]</sup>,西欧平原<sup>[4]</sup>,埃塞尔比亚高原<sup>[5]</sup>,中国东南丘陵地区<sup>[6]</sup>和黄土高原流域<sup>[7]</sup>。这些对产流产沙的模拟主要集中于年尺度、月尺度和部分降水事件模拟,而对日尺度模拟相对较少,仅见李硕等<sup>[8]</sup>对敛水河、Polyakov 等<sup>[9]</sup>对 Hanalei River 流域研究,但是模拟效果均不理想。

桃溪流域位于我国东南沿海的福建省泉州市境内,伴随着地区经济快速发展,人类活动加强,剧烈的土地利用变化已造成流域产流、产沙过程发生显著的改变。本研究以桃溪流域为研究区,采用 DSA(differential sensitivity analysis)方法识别流域径流和泥沙敏感性参数,构建该流域日尺度产流产沙的 AnnAGNPS模型,以期为区域水土流失治理与水土资源配置分析提供有力的工具。

## 1 研究区概况

桃溪是晋江流域的一条支流,发源于永春县锦斗乡珍卿村附近,出东关汇入山美水库。本文选取桃溪流域永春水文站(118°18'24"E,25°17'56"N)以上流域为研究区(图 1),流域面积 392 km<sup>2</sup>。流域内土地利用类型以林地为主,约占流域总面积的 69%,其次是园地和建设用地。土壤类型主要有红壤、黄壤、水稻土、石质土等,其中红壤和水稻土分布最广、面积最大,分别为占总面积的 43%和 36%。地形多为山地和丘陵,地势起伏大,海拔约在 40~1 360 m。气候属亚热带海洋性季风气候,年平均降雨量约为 1600 mm,降水主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 37%~39%。

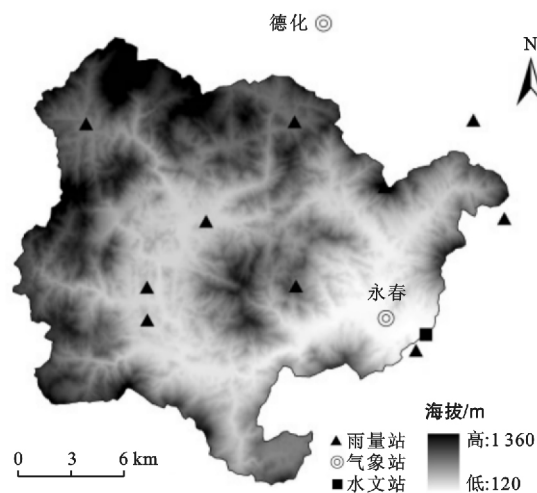


图 1 桃溪流域地理位置及气象站、水文站点分布

## 2 研究方法与数据

### 2.1 AnnAGNPS 模型

AnnAGNPS 模型能连续地以日为步长模拟流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的分布式模型,是基于独立事件的 AGNPS 模型的基础上发展而来的。模型适用于小尺度到 3 000 km<sup>2</sup> 流域。模型采用 SCS-CN 径流曲线方程计算地表径流量,并根据每日的土壤水分和作物等情况,相应地调整曲线数。其中前期土壤水分条件由 SWRRB 和 EPIC 模型计算,渗漏计算采用了 Brooks—Corey 方程,流量峰值计算采用了 TR-55 模型。采用 Penman 公式计算潜在蒸散发;采用 RUSLE 方程计算坡面土壤侵蚀, HUSLE 方程计算坡面泥沙输移率, Bagnold 指数计算河道泥沙输移率。模型根据地形特征划分为不同的集水区,又称为分室(Cell),集水区面积由临界源面积(the critical source area, CSA)和最小源沟道长度(the minimum channel length, MSCL)共同确定,将土地利用和土壤数据叠加到每一个分室,确保分室物理属性的均一性,分别对每个集水单元进行模拟计算,通过河道演算到流域出口,实现对流域水文的模拟。

### 2.2 参数敏感性分析

参数敏感性分析可以识别模型关键敏感性参数,提高模型率定效率。由于下垫面的差异和气象水文的异质性,AnnAGNPS 模型的敏感性参数在不同地区存在差别,而且同一个参数在不同地区敏感性程度也不一样。如:席庆<sup>[10]</sup>采用扰动分析法对田中河流域敏感性进行分析,认为影响泥沙敏感性主要参数为 CN 值、土壤侵蚀因子 K、坡长因子。邹桂红等<sup>[11]</sup>通过对大沽河流域的敏感性参数分析,认为 CN 值,作物残留覆盖、年根系生物量是影响泥沙的主要因素。

Chahor 等<sup>[12]</sup>采用 DSA 方法对西班牙的 Latxaga 流域分析认为 CN 值、水土保持因子  $P$ 、年冠层覆盖率、作物残留覆盖率是影响泥沙的主要参数。Das 等<sup>[13]</sup>对 Canagagigue Creek 流域敏感性分析结果表明土壤侵蚀因子  $K$ 、RUSLE- $C$ 、RUSLE- $P$  和沟道曼宁系数是影响泥沙计算过程的敏感性参数。

DSA<sup>[14]</sup>是一种简单的参数敏感性分析方法,即在参数初始值附近增减 10%,保持其他参数不变,通过计算敏感性指数  $I$  获取各参数的敏感性程度。DSA 将敏感性程度分为 4 个等级,分别为:极其敏感(大于 1)、非常敏感(0.2~1.0)、中等敏感(0.05~0.2)和不敏感(小于 0.05),敏感性指数  $I$  计算方法为:

$$I = \frac{(y_2 - y_1) / y_0}{2\Delta x / x_0}$$

式中: $x_0$ ——参数的初始值; $y_0$ ——参数  $x_0$  对应的模型输出值; $y_1, y_2$  分别为  $x_1 = x_0 - \Delta x, x_2 = x_0 + \Delta x$  相对应的模型输出值,  $\Delta x = 10\% x_0$ 。DSA 具体算法可参考文献[14]。

### 2.3 基础数据

建立 AnnAGNPS 产流产沙模型需要地形、土壤、气象和土地利用等空间数据以及气象和水文属性数据。具体数据包括:分辨率为 30 m×30 m 的数字高程模型(DEM),下载于“中国科学院国际科学数据服务平台”(http://www.gscloud.cn/);1:50 万福建省数字化土壤图,通过对福建省土壤肥料实验站 1:50 万土壤类型图数字化得到,并概括成 7 种主要

土壤类型,土壤属性数据参照《福建土壤》和《福建土种志》;根据 1995 年 TM 影像进行目视解译的土地利用数据;1995—1997 年流域 11 个雨量站的逐日降水数据以及永春气象站逐日最高、最低气温、风速、相对湿度数据;永春水文站 1995—1997 年逐日径流数据,1996—1997 年 4—10 月逐日输沙量数据。考虑到研究区地处丘陵地带,地势起伏大,CSA 取 15 hm<sup>2</sup>,MSCL 取 150 m,将研究区分为 2 664 个分室和 1 105 条沟道。

## 3 结果分析

### 3.1 敏感性参数分析及率定

参考 AnnAGNPS 模型在不同区域的参数敏感性分析结果,选取影响径流的 CN 值、土壤有效含水量、凋萎系数和沟道曼宁系数 4 个参数,影响泥沙的土壤可侵蚀因子  $K$ 、地表残留物覆盖率、年根系生物量、耕作后地面残留物覆盖率、随机粗糙率、沟道曼宁系数、耕作扰动面积、年降水降落高度、年冠层覆盖率等 9 个参数,采用 DSA 方法进行 AnnGNPS 模型径流和泥沙参数敏感性分析。

从图 2 和表 1 可以看出,CN 值对径流量的影响最明显,敏感性指数为 0.719,属于非常敏感的参数;土壤有效含水量敏感性值为 0.075,属于中等敏感的参数,凋萎系数对径流量有一定的影响,但影响并不显著,敏感性指数仅为 0.001。此外,沟道曼宁系数虽对径流量影响不显著,但对洪峰流量和汇流时间具有较大影响,也是调整径流的重要参数。

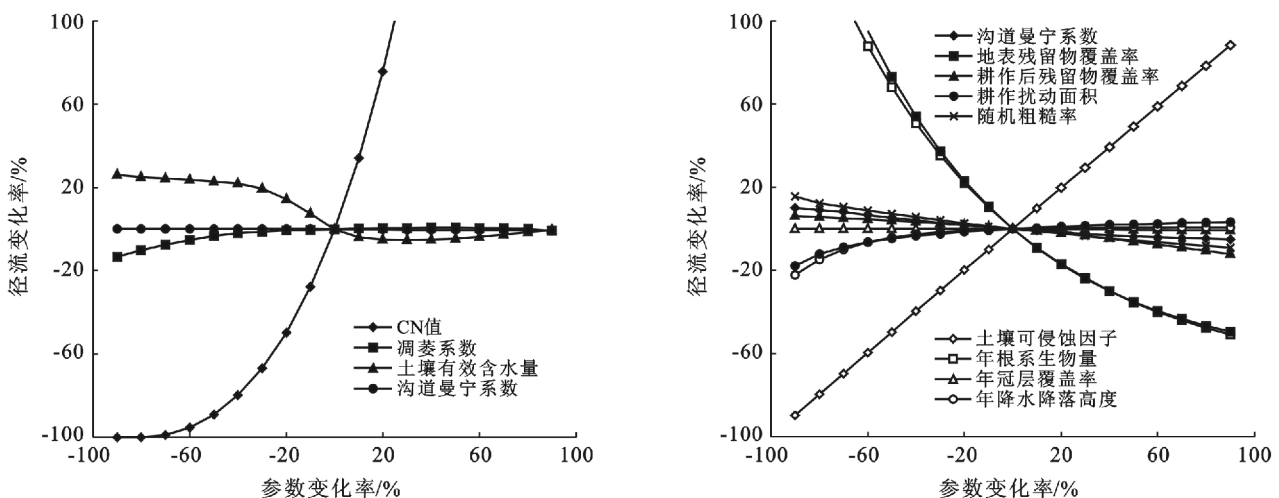


图 2 参数敏感性分析结果

由图 2 和表 1 可知:(1)土壤侵蚀因子  $K$  对输沙量的影响非常显著,敏感性指数为 0.988,属非常敏感。(2)地表残留物覆盖率、年根系生物量与输泥

沙呈高度负相关,敏感性指数分别为 -0.81, -0.77,即随着参数值的提高输沙量将显著下降;(3)耕作后地面残留物覆盖率、随机粗糙率和沟道曼宁系数的敏

感性取值均位于  $-0.05 \sim -0.2$ , 属中等敏感参数; (4) 年降水降落高度和年冠层覆盖率的敏感性指数小于 0.05, 敏感性等级低, 对输沙量影响轻微。此外, 耕作扰动面积对研究区的产沙量也有一定的影响, 敏感性指数为 0.057, 呈中等敏感。

在确定敏感性参数的基础上, 遵循先率定径流再率定泥沙, 先保证总量平衡再确保过程匹配的原则, 对模型参数进行手动调参。由于 AnnAGNPS 模型

目前没有考虑基流模拟, 本文采用数字滤波法计算基流, 与模拟值合并形成总径流, 继而通过与实测值对比, 比较模拟效果。采用 1995—1996 年径流数据和 1995 年 4—10 月泥沙数据进行参数校准, 1997 年径流数据和 1996 年 4—10 月泥沙数据进行模型验证, 并选取 Nash—Suttcliffe 效率系数 ( $E_{ns}$ )、相关系数 ( $R^2$ ) 和相对误差 ( $R_e$ ) 作为模型效率的评价指标。最终确定各参数的取值(表 1)。

表 1 径流与泥沙敏感性参数值

项目	径流参数	敏感性指数	值域	实际取值
径流	CN	0.719	30~100	63~98
	有效含水量	0.075	0.0~1.0	0.083~0.311
	凋萎系数	0.000 1	0.0~1.0	0.034~0.307
	沟道曼宁系数	-0.000 1	0.005~1.0	0.027 6
泥沙	土壤可侵蚀因子 K	0.988	0.0~0.131 7	0.021~0.061
	地表残留物覆盖率	-0.811	0.0~100	0~40
	年根系生物量	-0.769	0.0~112 000	0~3 700
	耕作后地面残留物覆盖率	-0.124	0~100	65~90
	随机粗糙率	-0.08	0.0~254.0	6.10~48
	沟道曼宁系数	-0.075	0.005~1.0	0.027 6
	耕作扰动面积	0.057	0.0~100	30~100
	年降水降落高度	0.049	0.0~80	0.0~11.48
	年冠层覆盖率	-0.006	0~1.0	0.0~0.6

### 3.2 模拟效果分析

3.2.1 径流模拟效果 由表 2 可知, 模型在率定和验证期的径流模拟评价指标  $R^2$ ,  $E_{ns}$  和  $R_e$  均满足要求<sup>[15]</sup>, 月尺度  $R^2$  与  $E_{ns}$  均大于 0.92, 日尺度径流  $E_{ns}$  与  $R^2$  均大于 0.66, 相对误差均可以控制在 6% 以内, 模拟日尺度径流变化趋势与实测径流变化相一致(图 3), 率定期的模拟效果略好于验证期, 总体上模型具有较好的模拟效果。对 1996, 1997 年两个特大暴雨事件模拟值比实测值较低, 与田耀武<sup>[16]</sup> 和 Polyakov<sup>[9]</sup> 研究结果趋于一致。

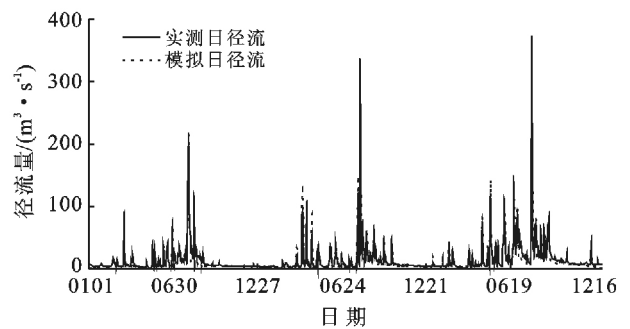


图 3 研究区日径流模拟效果

表 2 永春水文站径流和泥沙的率定和验证结果

模拟尺度	阶段	$R^2$	$E_{ns}$	$R_e/\%$
月产流	率定期	0.95	0.94	-4.41
	验证期	0.93	0.92	-6.00
日产流	率定期	0.77	0.71	-4.41
	验证期	0.70	0.66	-6.00
月产沙	率定期	0.89	0.88	-7.52
	验证期	0.98	0.97	12.71
日产沙	率定期	0.63	0.62	-7.36
	验证期	0.62	0.62	12.71

3.2.2 输沙量模拟效果 率定期和验证期内流域实测年泥沙输出量分别为  $2.33 \times 10^5$  t 和  $3.01 \times 10^5$  t, 模拟值分别为  $2.14 \times 10^5$  t 和  $3.45 \times 10^5$  t, 模拟误差均可以控制在 15% 以内; 月产沙量的  $R^2$  和  $E_{ns}$  均大于 0.88, 日产沙模拟的  $R^2$  和  $E_{ns}$  均大于 0.62, 模拟效果差于产流, 但仍可以达到模拟精度的要求(表 2)。由图 4 可知, 日尺度泥沙模拟的变化趋势与实测值变化基本相一致, 流域年内产沙量分布很不均匀, 主要集中在 5—8 月的个别特大暴雨事件。除局部单个事件模拟较差外, 模型总体上能够模拟日尺度泥沙的变化规律。

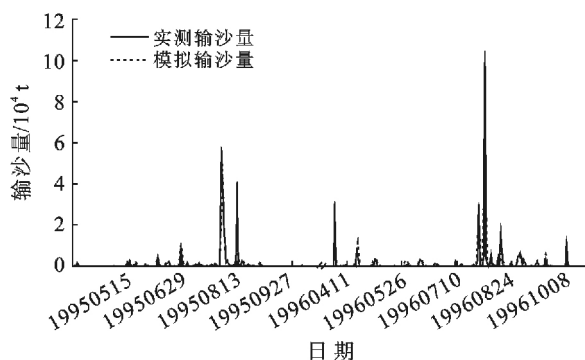


图 4 研究区日尺度泥沙模拟效果

## 4 讨论

由于不同地区降水、蒸发等气象因素和地形、土壤、土地利用等下垫面因素的空间变异,各区域的参数敏感性也存在差异。与其他研究区相比,桃溪流域耕作扰动面积对产沙量有一定的影响并呈中等敏感,而这个参数在其他研究区并不敏感,这可能是流域内园地、耕地所占比例较大,分别为 13% 和 9%,人类对地表的扰动较活跃成为影响水土流失的重要因素。此外,流域年冠层盖度对泥沙影响较弱,而在陕西省黑河流域<sup>[17]</sup>、大沽河流域<sup>[18]</sup>以及西班牙 Latxaga 流域<sup>[12]</sup>则是影响泥沙的重要因子,这可能是由于研究区处亚热带湿润海洋气候、降水量较多,林下草木相对茂盛,对雨水对地面冲击起缓冲作用,因此该参数对泥沙影响不显著。

目前,国内外应用 AnnAGNPS 型进行日尺度径流、泥沙模拟的研究较少,仅在敛水河<sup>[8]</sup>、Hanalei River 流域<sup>[9]</sup>的应用。与上述流域的模拟效果相比,AnnAGNPS 模型在桃溪流日尺度径流、泥沙的模拟效果有较大的提高,这主要与研究区气候、土壤和土地利用的特征、研究基础以及 CSA 取值等因素密切相关。AnnAGNPS 模型基于 CSA 和 MSCL 的取值将研究区划分一定数量的分室,在分室的基础上对地形、土壤和土地利用等输入数据进行参数集总,集总程度对模拟结果产生一定的影响。王晓燕等<sup>[18]</sup>、Pradhanang 等<sup>[19]</sup>、黄志霖等<sup>[20]</sup>研究表明地形、土壤、土地利用等参数的空间集总程度和模型输出结果均随着 CSA 取值的改变而发生变化,且 CSA 取值变化对输沙量的影响较显著。因此,未来需要进一步分析 CSA 取值变化对桃溪流域模型的输入参数与模拟结果的影响,以及在保证模型的输出精度的条件下,确定研究区适合的 CSA 取值范围,这对于深入认识 AnnAGNPS 模型的不确定性、提高模型的模拟精度至关重要。

## 5 结论

(1) 研究区 AnnAGNPS 模型径流敏感性参数主要为 CN 值、土壤有效含水量,沟道曼宁系数;输沙量的敏感性参数依次为土壤可侵蚀因子  $K$ 、地表残留物覆盖率、年根系生物量、耕作后地面残留物覆盖率、随机粗糙率、沟道曼宁系数和耕作扰动面积。

(2) 模型对桃溪流域日尺度径流模拟  $R^2$ , Ens 系数均大于 0.66,日尺度泥沙模拟  $R^2$ , Ens 系数均大于 0.62,能够较好地模拟桃溪流域日尺度产流产沙规律。

### [参 考 文 献]

- [1] Sarangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds [J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(2): 241-256.
- [2] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, et al. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(3): 239-252.
- [3] Tsou M S, Zhan X. Estimation of runoff and sediment yield in the Red Rock Creek watershed using AnnAGNPS and GIS [J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(5): 865-867.
- [4] Licciardello F, Zema D A, Zimbone S M, et al. Runoff and soil erosion evaluation by the AnnAGNPS model in a small Mediterranean watershed [J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(5): 1585-1593.
- [5] Junker L. Evaluation of the AnnAGNPS Model Used for River Discharge and Sediment Yield Predictions in a Micro-scale Catchment in the Highlands of Ethiopia [D]. Switzerland: University of Berne, 2012.
- [6] 黄金良. GIS 和模型支持下的九龙江流域农业非点源污染研究 [D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2004.
- [7] 贾宁凤, 段建南, 李保国, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的黄土高原小流域土壤侵蚀定量评价 [J]. 农业工程学报, 2007, 22(12): 23-27.
- [8] 李硕, 刘磊. AnnAGNPS 模型在湫水河流域产水、产沙的模拟评价 [J]. 环境科学, 2010, 31(1): 50-57.
- [9] Polyakov V, Fares A, Kubo D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, 22(11): 1617-1627.
- [10] 席庆, 李兆富, 罗川. 基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 [J]. 资源科学, 2014, 35(5): 1773-1780.

(下转第 139 页)

### 3 结论

(1) 不同坡度不同降雨强度下,撒施不同剂量 Jag S 坡面的入渗率皆随降雨历时的延长先减小,随后趋于稳定变化状态或低速率下降,与裸坡坡面入渗率随降雨过程的变化大体相似。

(2) 在降雨过程中撒施不同剂量 Jag S 坡面入渗率趋于稳定的时间早于裸坡坡面(大降雨强度下比较显著),入渗率减小速率较裸坡大,且前期入渗率小于裸坡坡面前期入渗率,但稳渗率大于裸坡。

(3) 撒施 Jag S 坡面的入渗量明显高于裸坡的入渗量,在各个剂量下,入渗量均随坡度的增加而减小,随雨强的增加而呈现递增变化趋势。

(4) 不同降雨强度及不同坡度下,撒施 Jag S 提高了坡面入渗量,强化了入渗效应,各剂量强化入渗效应的大小顺序为:1 g/m<sup>2</sup>>3 g/m<sup>2</sup>>5 g/m<sup>2</sup>。

(5) 撒施 Jag S 能有效地增加土壤入渗,这与 PAM 对降雨入渗的影响结果类似,但是,仍然存在使用多大剂量 Jag S 在增加入渗方面最优,以及 Jag S 和 PAM 对黄土坡面降雨入渗的调控机理是否类似等问题有待于进一步研究。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 史德明. 土壤侵蚀对生态环境的影响及防治对策[J]. 水土保持学报, 1991, 5(3): 1-8.  
 [2] Lentz R D, Sojka R E. Field results using polyacrylamide to manage furrow erosion and infiltration [J]. Soil

Science, 1994, 158(4): 274-282.

[3] Green V S, Soil D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and effects on infiltration under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1786-1791.  
 [4] Steven G V, Stott D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1786-1791.  
 [5] Sojka R E, Lentz R D. Reducing furrow irrigation erosion with polyacrylamide(PAM)[J]. Journal of Production Agriculture, 1997, 38(3): 47-52.  
 [6] 雷廷武,唐泽军,张晴雯,等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究(II): 侵蚀[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 401-406.  
 [7] 唐泽军,雷廷武,张晴雯,等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究(I): 入渗[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 178-185.  
 [8] 于海龙,于健,李平,等. PAM 与不同土壤调理剂混合施用对降雨入渗和土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 152-155.  
 [9] 于健,雷廷武, Shainberg I,等. PAM 特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 21-27.  
 [10] 赵伟,吴军虎,王全九,等. 聚丙烯酰胺对黄土坡面水分入渗及溶质迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 36-40.  
 [11] 吴发启,赵西宁,余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2003, 23(1): 16-18.  
 [12] 焦念. Jag C162 对黄土坡面降雨入渗的调控效应研究[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 25-30.

(上接第 134 页)

[11] 邹桂红,崔建勇. 基于 AnnAGNPS 模型的农业非点源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 11-17.  
 [12] Chahor Y, Casali J, Giménez R, et al. Evaluation of the AnnAGNPS model for predicting runoff and sediment yield in a small Mediterranean agricultural watershed in Navarre(Spain)[J]. Agricultural Water Management, 2014, 134(4): 24-37.  
 [13] Das S, Rudra R P, Gharabaghi B, et al. Applicability of AnnAGNPS for Ontario conditions[J]. Canadian Biosystems Engineering, 2008, 50(1): 1-11.  
 [14] Lenhart T, Eckhardt K, Fohrer N, et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2002, 27(9): 645-654.  
 [15] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, et al, Model evaluation guidelines for systematic quantifica-

tion of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(3): 885-900.

[16] 田耀武,黄志霖,曾立雄. DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 846-853.  
 [17] 李家科,李怀恩,李亚娇,等. 基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 81-88.  
 [18] 王晓燕,林青慧. DEM 分辨率及子流域划分对 AnnAGNPS 模型模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(S1): 46-52.  
 [19] Pradhanang S M, Briggs R D. Effects of critical source area on sediment yield and stream flow [J]. Water and Environment Journal, 2014, 28(2): 222-232.  
 [20] 黄志霖,田耀武,肖文发,等. 三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6681-6690.