

三峡库区大宁河流域径流泥沙的 AnnA GNPS 定量评价

花利忠^{1,2,3}, 贺秀斌², 颜昌宙¹, 南宏伟², 韦杰²

(1. 厦门理工学院 空间信息技术研究所, 福建 厦门 361024; 2. 中国科学院 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘要: 选择位于三峡库区的大宁河流域为研究区, 利用著名的农业非点源污染模型——AnnA GNPS 对该流域的径流与泥沙进行了定量评价。首先基于流域土地利用、土壤、地形及气象数据等资料对模型参数化, 在数字滤波法切割水文站总径流中的基流后, 利用偏差、相关系数 r^2 和 Nash-Sutcliffe 模拟系数 (NS) 等多个指标评价了模型对径流和泥沙量预测性能, 校正期 (1998—1999 年) 预测与实测的直接径流深偏差为 -3.71%, 相关系数 r^2 为 0.94, 斜率 k 为 1.04, NS 系数 0.94; 验证期 (2003—2005 年) 预测与实测直接径流深偏差 -6.37%, 相关系数 r^2 为 0.93, 斜率 k 为 0.93, NS 系数 0.94; 预测与实测的多年平均输沙量偏差为 -16.5%。最佳管理措施 (BMPs) 评价显示退耕还林方案削减了总输沙量和侵蚀量的 24.5%, 是一种水土流失较好的治理措施。研究证实了 AnnA GNPS 模型在该流域的适用性, 显示了模型在流域径流与泥沙负荷估算及其评价中的应用潜力。

关键词: AnnA GNPS; 模型; 大宁河流域; 三峡库区; 定量评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)06-0148-05

中图分类号: S157.1, X53

Evaluation of Runoff and Sediment from Daning River Watershed in Three Gorges Reservoir Region Based on AnnA GNPS Model

HUA Li-zhong^{1,2,3}, HE Xiu-bin², YAN Chang-zhou¹, NAN Hong-wei², WEI Jie²

(1. Institute of Spatial Information Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 3. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: Annualized Agricultural Non-Point Source model (AnnA GNPS), a continuous-simulation watershed-scale model, is widely used to evaluate non-point source pollution in agricultural watersheds in a number of countries. The Daning River watershed in the Three Gorges Reservoir Region was selected as a case study. The model was parameterized based on land use, soil, topographic data, and eight-year climatic data. Direct runoff was derived from the observed runoff using the baseflow filter method. Then indicators such as percent error (PE), Nash-Sutcliffe coefficient (NS), determination coefficient r^2 , and gradient k were used to evaluate the performance of AnnA GNPS. The calibration result for runoff is very satisfactory (PE = -3.71%, r^2 = 0.94, k = 1.04, and NS = 0.94). The validation result also matches well with the observed data, with PE = -6.37%, r^2 = 0.93, k = 0.93, and NS = 0.94 for runoff and PE = -16.5% for sediment yield. Alternative scenario simulations show that converting cultivated land into forest is promising BMPs (Best Management Practices) for sediment reduction. The results demonstrate that the model is suitable for prediction and assessment of runoff and sediment from the watershed.

Keywords: AnnA GNPS; model; Three Gorges Reservoir region; Daning River watershed; quantitative evaluation

三峡库区的水土保持生态环境状况, 不仅关系到三峡工程的安危和经济运行年限, 而且还关系到长江中上游乃至整个长江流域经济的可持续发展, 因此库区的侵蚀泥沙问题备受关注, 但是该区研究基础薄弱。库区水土流失区非常严重, 年产沙量达 1.55 ×

10⁹ t, 入江泥沙年均达 4.00 × 10⁷ t^[1], 严重的水土流失不仅困扰着库区农业可持续发展和当地人民脱贫致富, 而且也为该地区带来了一系列的生态环境问题。AnnA GNPS (annualized agricultural non-point source)^[2] 模型是一个连续模拟地表径流、泥沙和污

收稿日期: 2009-01-06

修回日期: 2009-05-26

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-422); 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB2-07-01); 国家自然科学基金课题 (40671120)

作者简介: 花利忠 (1978—), 男 (汉族), 山西省晋中市人, 博士, 主要从事流域侵蚀产沙模拟和城市环境规划研究。E-mail: hualizhong2008@yahoo.com.cn.

染物负荷的分布式流域评价模型,可用来进行水土流失研究,以确定土壤侵蚀风险区,也可以评价流域内农业管理措施对流域水文和水质的响应,进而评估 BMPs (best management practices) 的风险及其花费或进行效益分析。由于模型具有的科学性和实用性,已被国外许多政府部门接受,并作为流域管理和水质监测等方面的有效工具之一。模型在中国应用较少,主要集中于东南沿海^[3-4]和黄土高原^[5],重点针对流域的水质污染,特别是氮磷污染。本研究选择位于三峡库区的大宁河流域为研究区,评价模型对径流和泥沙量的预测性能,旨在为水土保持工作者制定防治土壤侵蚀对策,进行土地利用合理规划和减少水库泥沙淤积提供科学依据。

1 研究区概况

大宁河流域(108°44′—110°11′E, 31°04′—31°44′N)位于大巴山东段南麓的渝、陕、鄂 3 省(市)结合部,东接湖北省神农架林区,西接重庆开县、云阳,北连重庆城口县和陕西省镇坪县,流域面积 4 181 km²,全长 162 km,该流域是长江三峡库区重点淹没区之一。研究区地处大巴山弧形构造、川东褶皱带及川鄂湘黔隆起褶皱带的结合部位,以石灰岩为主。受内力地质作用和后期强烈的侵蚀与溶蚀作用等,地势陡峭、沟谷密布、峡谷幽深,形成中、低山为主(占流域的 95%以上)的地貌。流域属于北亚热带季风气候,四季分明,光照充足,降水丰沛,年均降雨量在 1 000 mm 以上,降雨量集中于 4—10 月,占全年的 87%以上,土壤侵蚀严重。土壤类型有黄壤、黄棕壤、棕壤、石灰土、山地草甸土、紫色土、新积土和水稻土共 8 个

土类,其中黄壤分布面积最大,占总面积的 45.8%。植被类型复杂,主要地带性植被有亚热带常绿阔叶林、常绿及落叶混交林,低山针阔林、竹林和草本等。

2 研究方法

2.1 模型简介

AnnAGNPS 是美国农业部的农业研究局 (USDA-ARS) 与自然资源保护局 (NRCS) 于 1998 年针对流域农业管理措施的响应而设计的基于连续事件的流域尺度的分布式农业非点源污染模型。模型按流域水文特征将流域划分成任意形状的均质分室 (cell) 单元,通过河网将这些分室单元连接起来,以日为尺度连续模拟各分室单元的径流、泥沙、养分和农药负荷量,采用河道演算得到流域出口处各种成分的含量。模型在功能上由降雨径流、侵蚀和化学物质迁移转化 3 个子模型组成。降雨径流子模型采用美国土壤保护局曲线值 (SCS-CN) 和修正的 TR-55 方法分别计算地表径流与峰值径流。侵蚀子模型采用 RUSLE 模型计算坡面侵蚀, HUSLE 模型计算沉积物由坡面进入沟道的输移率, Bagnold 水流挟沙力方程和改进的 Einstein 储存平衡方程计算河道泥沙输移。化学物质迁移模型块则采用 EPIC 和 GLEAM 模型模拟氮、磷和有机碳等物质的日动态变化。AnnAGNPS 的输入参数包括地形、气象、土地特征、农田管理和化学特性等(表 1),模型对部分参数提供了典型值或默认值。模型内部提供了众多的模块大大方便了模型参数的生成,各模块与 ArcView GIS 紧密集成,所有运算都由下拉式选单直接驱动各程序进行,大大提高了运算效率与可视化程度^[6]。

表 1 AnnAGNPS 模型主要参数计算

| 输入变量和参数 | 采用方法 | 数据收集和来源 |
|------------------------|--------------------------------------|---|
| 地理参数 | Flownet Generator 模块 | 数字高程模型 (DEM) |
| 土壤质地 | Feike et al ^[8] | 《四川土壤》 ^[9] 、《万县地区土壤》和流域土壤图 |
| 土壤水分(饱和导水率、田间系数、凋萎系数等) | Saxton and Rawls ^[9] | |
| 土壤可蚀性系数 K | Sharply and Williams ^[11] | |
| 逐日气象参数 | 泰森多边形法确定各站点相应的多边形面积 | 流域内 11 个雨量站资料、距流域最近的奉节气象资料 |
| 降雨侵蚀力值 | 章文波和付金生 ^[12] | |
| 作物生长与田间管理参数 | | 土地利用图、RUSLE 手册 AH-703 ^[13] 和刘宝元等 ^[14] |
| 水土保持因子 P | | 花利忠 ^[15] |

2.2 参数获取

模型所需主要参数来源见表 1。利用 Flownet

Generator 模块按流域水文特性将整个流域离散化为 3 268 个分室单元数和 1 314 条沟道生成模型所需的

地理参数,包括分室单元编号与面积、坡向、坡度、平均高程,薄层流、浅层流、集中流的坡长与坡度,沟道比降、下一级沟道代码、底宽、顶宽和沟道长度等参数。土地利用数据源为 2004 年 Landsat 5 TM 遥感影像,采用中国科学院“八五”期间“国家资源环境遥感宏观调查、动态调查、动态分析与遥感技术前沿的研究”提出的土地利用两级分类系统^[7],通过人机交互解译并结合研究区典型样区进行野外验证后建立土地利用数据库。流域土地利用类型以林地、旱地和草地为主,其中林地面积比重最大,占总面积的 59.2%,但林地以灌木林为主,有林地比重偏小,仅占流域面积的 13.8%;旱地次之,占 23.9%,其中陡坡耕地较多,占耕地总面积的 30%左右;草地以中覆盖草地为主占流域面积的 8.4%。根据调查结果,流域作物概化为水稻、小麦、玉米和油菜 4 种,水田主要以水稻和油菜轮作,而旱地则以玉米和小麦轮作。各种专题数据如气象、土壤和作物生长与田间管理等数据都在 GIS 平台上经过适当处理以符合模型需求。

2.3 基流分割

水文站径流资料包括了基流和直接径流两部分,而模型结果中只包含了直接径流部分,因此在模型校正和验证前,需要把基流分割出来。研究采用数字滤波法,Arnold 和 Allen 对在美国西部和东部的 6 个典型流域对该方法的验证,表明其不仅精度较高,而且具有较好的客观性和可重复性^[16]。图 1 显示巫溪站

2003—2005 年逐月基流、直接径流和总径流变化。其中,基流变化相对稳定,直接径流和总径流变化大,但趋势一致;丰水年(2003 年)总径流大,基流补给量也大,枯水年(2004 年)总径流量小,基流补给量也相对较小;从各月来看,丰水月直接径流大大超过基流,但枯水月直接径流小于基流,说明河道中丰水月径流主要来自暴雨径流,而枯水月径流主要由河道基流补给。

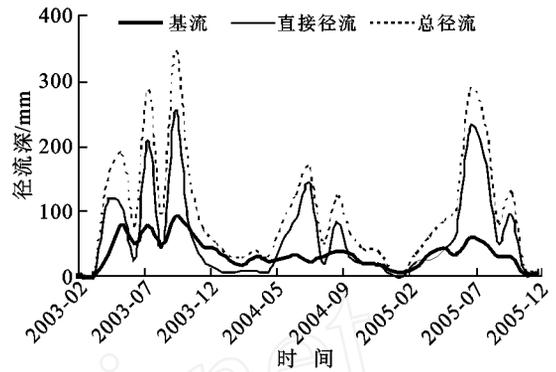


图 1 巫溪站 2003—2005 年基流、直接径流和总径流的月变化

2.4 评价方法

为了检验模型预测结果的优劣,选用偏差 (percent error, PE)、线性回归和 Nash-Sutcliffe 模拟系数 (NS) 法 3 种方法 (表 2) 分别评估模型在参数校正和验证过程的合理性。

表 2 3 种评价方法比较

| 方法名称 | 公式 | 参数含义 | 说明 |
|--------|--|--|----------------------------|
| 偏差 PE | $PE = (Q_p - Q_m) / Q_m \times 100\%$ | PE 为模型预测误差百分比; Q_m 为实测值; Q_p 为预测值。 | PE 趋向于 0, 则拟合度越好。 |
| 线性回归法 | $y = kx + b$ | k 为直线斜率; b 为截距。 | |
| NS 系数法 | $NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_{avg})^2}$ | NS 为模型模拟效率; Q_m 是为实测值; Q_p 为预测值; Q_{avg} 为实测值的均值; n 为实测次数。 | 通常以 $NS \geq 0.8$ 为拟合优劣标准。 |

3 结果与分析

3.1 模型校正与验证结果

模型校正即通过比对模型输出与实测数据,并在一定的合理取值范围内不断调整输入参数,使预测值与实测值之间的误差可以接受为止,以使模型更适合于研究区的实际情况。

Yuan 等的研究证实 AnnA GNPS 模型未校正时仍能较好地模拟流域径流与泥沙量,非常适合于无径流和泥沙监测的流域^[21]。本研究对模型提供的 SCS 径流曲线数 CN 参考值,按照模型说明进行了率定,详见文献^[17]。

图 2 显示了巫溪站 1998—1999 年径流深(这里及下文所指的径流均为直接径流)校正结果。校正期预测与实测径流偏差仅 - 3.71%; 月径流深最佳拟合直线斜率 k 为 1.04, 接近理想的 1:1 相关关系, 截距 b 为 0, 相关系数 r^2 达 0.94, NS 系数 0.94。表明模型参数校正后,模型较合理地预测了流域月径流深。

模型验证就是用调试好的模型参数,输入校正时未用过的降雨资料,其它参数则保持模型校正的结果,通过验证的模型才能应用于环境规划和管理。图 3 显示了巫溪站 2003—2005 年模型验证结果。

验证期预测与实测径流偏差 PE 为 - 6.27%, 月径流深相关系数 r^2 为 0.93, 拟合直线斜率 k 为 0.93,

NS 系数 0.94。若从 3 a 中各年变化来看,模型对 2003 年预测较差,两者偏差为 -11.63%,相关系数 r^2 为 0.90,NS 系数为 0.80,但也在误差范围之内。结果表明 AnnA GNPS 模型对月径流深的良好预测性能,很好的再现了月径流过程。

图 2—3 也显示多数预测值小于实测值,这与 Yuan 等的研究结果一致,模型倾向于低估径流,这是由于流域出口监测站的小型涵洞孔减缓了径流流速,这与模型中假定的三角单位水文过程线(triangular unit hydrograph)不一致^[2],另一个原因是模型中采

用了一些近似的模拟参数。

由于缺少直接的监测数据,无法详细验证泥沙数据。资料显示^[18]流域巫溪站 2000—2004 年平均输沙量为 1.30×10^6 t/a,巫溪站控制面积 2 000 km²,则平均输沙模数为 651.7 t/(km²·a),模型预测的巫溪站同期平均输沙量和输沙模数为 1.09×10^6 t/a 和 544.5 t/(km²·a),偏差为 -16.5%左右。因此,模型预测的流域输沙量是比较合理的。

本研究结果表明,AnnA GNPS 模型可适用于该流域侵蚀产沙定量评价。

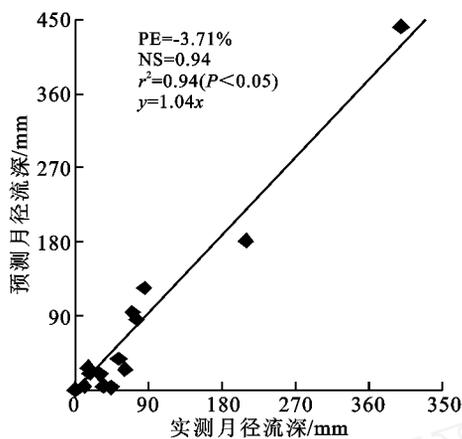


图 2 校正期巫溪站预测和实测的月径流深

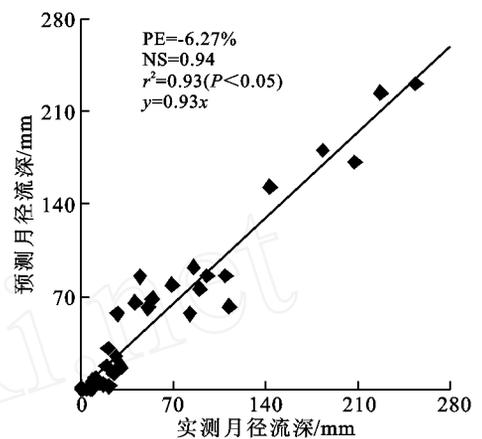


图 3 验证期巫溪站预测和实测的月径流深

表 3 不同方案的流域侵蚀产沙效应

| 方案 | 侵蚀量/(10^4 t·a ⁻¹) | 侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) | 输沙量/(10^4 t·a ⁻¹) | 输沙模数(t·km ⁻² ·a ⁻¹) |
|-----|----------------------------------|---|----------------------------------|--|
| 无措施 | 648.8 | 1 551.7 | 194.6 | 465.3 |
| A | 489.8 | 1 171.4 | 146.9 | 351.3 |
| B | 540.5 | 1 292.8 | 162.1 | 387.7 |

3.2 模型在 BMPs 评价中的应用

模拟模型的最终目的是为了实流流域优化管理,即实现最佳管理措施 BMPs,BMPs 是美国于 70 年代在非点源污染的管理与控制实践中提出的控制性措施的总称。AnnA GNPS 模型的一个强大功能就是对不同的 BMPs 作出模拟,评价它们对非点源污染负荷的削减作用。研究考虑退耕还林和退耕还草两种方案分别进行模拟(表 3),以评价它们对侵蚀量和泥沙量削减效果:(A)退耕还林,把所有大于 25°耕地种植灌木林;(B)退耕还草,把所有大于 25°耕地种植中覆盖度草地。

两种方案的预测结果显示:(1)按方案 A 退耕还林后,侵蚀量从原 6.49×10^6 t 减少到 4.90×10^6 t,削减了总侵蚀量的 24.51%;输沙量从 1.95×10^6 t 减少到 1.47×10^6 t,削减了总输沙量的 24.53%;(2)按方案 B 退耕还草后,侵蚀量则减少到 5.41×10^6 t,削减了

总侵蚀量的 16.69%;输沙量从 1.95×10^6 t 减少到 1.62×10^6 t,削减了总输沙量的 16.71%。针对流域的实际情况,研究认为,方案 A 退耕还林对于泥沙负荷削减比例大,是一种较好的水土流失治理措施。

4 结论

水文站径流资料包含基流和直接径流两部分,但由于模型缺少地下水模块(该模块将在以后的新版本中增加),目前结果只包含了直接径流部分,在模型校正和验证前需要把基流分割出来,建议采用数字滤波方法。

校正与验证是模型成功应用于环境规划管理的前提,而长时段的水文泥沙监测数据成为模型校正与验证的基础,但我国水文站较少,监测数据有限,成为模型在国内推广应用的“瓶颈”。缺少 2000—2002 年径流数据及详细的泥沙数据,无法对其验证,后续研究

中,应加强降雨径流和泥沙的监测,进一步检验模型性能,不断提高模型预测精度。但根据目前的数据,应用 AnnAGNPS 模型对库区大宁河流域径流和泥沙量进行的研究表明,其模拟精度和可靠性是令人满意的,验证了模型在该流域的适用性,显示了模型在流域径流和泥沙负荷估算及评价中的应用潜力。最佳管理措施(BMPs)评价表明退耕还林比退耕还草的泥沙负荷削减比例大,是一种较好的水土流失治理措施。

AnnAGNPS 是一个值得推广的综合流域模型,它为土壤侵蚀产沙的预测提供了一种新技术,它的应用将为制定防治土壤侵蚀对策,进行土地利用合理规划和控制水土流失,减少泥沙水库淤积提供科学依据,是实现流域优化管理的有效工具之一。

致谢:感谢中国气象局和中国水利部水文局提供的气象和水文数据,中国科学院南京土壤研究所提供的土壤图。

[参 考 文 献]

- [1] 陈国阶, 陈治谏. 三峡库区及长江沿江重点地区生态与环境建设对策的指标体系与优化研究[R]. 成都: 中科院成都山地灾害与环境研究所, 1995: 1-7.
- [2] Yuan Y P, Bingner R L, Rebich R A. Evaluation of AnnAGNPS on Mississippi Delta MSEA Watersheds [J]. Trans. of the ASAE, 2001, 44 (5): 1183-1190.
- [3] 王飞儿, 吕唤春, 陈英旭, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测[J]. 农业工程学报, 2003, 19 (6): 281-284.
- [4] 黄金良, 洪华生, 杜鹏飞, 等. AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验[J]. 环境科学学报, 2005, 25 (8): 1135-1142.
- [5] 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, 2006, 22 (12): 23-27.
- [6] 花利忠, 袁建平, 韦杰, 等. AnnAGNPS 模型动态及其应用前景[J]. 山地学报, 2006, 24 (S): 330-338.
- [7] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学院出版社, 1996.
- [8] Feike J L, William J A, Martinus T G, et al. The UN-SODA unsaturated soil hydraulic database user's manual version 1.0 [M]. USEPA, Cincinnati, 1996.
- [9] Saxton K E, Rawls W. Soil texture triangle hydraulic properties calculator [OL]. [2009-03-10]. <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>.
- [10] 四川省农牧厅, 四川省土壤普查办公室. 四川土壤[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1995.
- [11] Sharply A N, Williams J R. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation [C]// USDA Technical Bulletin, Washington D C: USDA, 1990.
- [12] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, 25 (1): 35-41.
- [13] Renard K G, Forest G R, Weesies G A, et al. RULSE: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation [C]// USDA Agricultural Handbook, Washington D C: USDA, 1997.
- [14] 刘宝元, 谢云, 张科利. 土壤侵蚀预报模型 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [15] 花利忠, 贺秀斌, 朱波. 川中丘陵区小流域土壤侵蚀空间分异评价研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27 (3): 111-115.
- [16] Arnold J G, Allen P M. Automated methods for estimating baseflow and ground water recharge from streamflow [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1999, 35 (2): 411-424.
- [17] 花利忠, 贺秀斌, 颜昌宙, 等. 三峡库区大宁河流域 AnnAGNPS 模型参数评价[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 65-69.
- [18] 范丽丽, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于 SWAT 模型的大宁河流域非点源污染空间特性研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 132-137.