

非点源污染模型 AnnAGNPS 在三峡库区林农复合小流域模拟效果评定

黄志霖¹, 田耀武^{1,2}, 肖文发¹, 曾立雄¹, 马德举³

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091; 2. 河南科技大学林学院, 洛阳 471003; 3. 秭归县林业局, 宜昌 443600)

摘要:应用连续农业非点源污染 AnnAGNPS 模型(Annualized AGricultural NonPoint Source Model)模拟三峡库区林农复合小流域的径流、泥沙和营养物输出,以 2003 年和 2004 年的小流域观测数据对模型分别进行校准和验证,并以统计参量决定系数(R^2)、Nash-Sutcliffe 效率系数(E)和相对误差(VE)对模拟结果进行评定。结果表明,径流量模型模拟结果误差在可接受范围之内,模型校准期模拟值 VE 值为 5.0% ($R^2 = 0.93$, $p < 0.05$),验证期内模型 VE 值为 6.7% ($R^2 = 0.90$, $p < 0.05$);与径流模拟比较,泥沙模拟结果精度较低,校准期内模型 VE 值为 15.1% ($R^2 = 0.63$, $p < 0.05$),验证期内模型 VE 值为 26.7% ($R^2 = 0.59$, $p < 0.05$);次降水较小,产生径流和泥沙较少时,模型模拟值则偏高,反之则偏低。氮输出模拟决定系数 R^2 值 0.68($p < 0.05$),略高于磷输出模拟决定系数 ($R^2 = 0.65$, $p < 0.05$)。模型对径流输出的模拟精度高于对泥沙和营养物的输出模拟。在三峡库区农林复合小流域应用 AnnAGNPS 模型模拟农业非点源污染输出满足流域管理要求。

关键词: AnnAGNPS 模型; 径流; 泥沙输出; 营养物输出; 三峡库区; 模拟效果

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2872-07

Nonpoint Source Pollution Model, AnnAGNPS, Assessment for a Mixed Forested Watershed in Three Gorges Reservoir Area

HUANG Zhi-lin¹, TIAN Yao-wu^{1,2}, XIAO Wen-fa¹, ZENG Li-xiong¹, MA De-ju³

(1. Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration China, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China; 3. Forestry Bureau of Zigui County, Yichang 443600, China)

Abstract: Watershed models provide a cost-effective and efficient means of estimating the pollutant loadings entering surface waters, especially when combined with traditional water quality sampling and analyses. But there have often been questions about the accuracy or certainty of models and their predictions. The main goal of this study was to evaluate the performance of AnnAGNPS (Annualized AGricultural NonPoint Source) Pollution Model, in simulating runoff, sediment loading and nutrient loadings under Three Gorges Reservoir area. Most of model input parameters were sourced from Zigui Forest Ecology Station in Three Gorges Reservoir area, State Forestry Administration. Data year 2003 was used for calibration while data year 2004 was used for validation of the model. The whole evaluation consisted of determining the coefficient of determination (R^2), Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (E), and the percentage volume error (VE). Results showed that the model predicted the daily runoff volume within the range of acceptable accuracy. The runoff on a daily basis was underpredicted by 5.0% with R^2 of 0.93 ($p < 0.05$) during calibration and underpredicted by 6.7% with R^2 of 0.90 ($p < 0.05$) during validation. But sediment loading was able to produce a moderate result. The model underpredicted the event-based sediment loading by 15.1% with R^2 of 0.63 ($p < 0.05$) during calibration and 26.7% with R^2 of 0.59 ($p < 0.05$) during validation. For the events of small magnitude, the model generally overpredicted sediment loading, while the opposite was true for larger events. Nitrogen loading prediction was slightly better with $R^2 = 0.68$ ($p < 0.05$), and phosphorus loading performance was slightly poor with $R^2 = 0.65$ ($p < 0.05$). In general, the model performs well in simulating runoff compare to sediment loading and nutrient loadings, and as a watershed management tools it can be used for Three Gorges Reservoir area conditions that with mixed types of land uses and steep slopes.

Key words: AnnAGNPS model; runoff; sediment loading; nutrient loading; Three Gorges Reservoir area; performance

非点源(nonpoint source, NPS)污染量化研究直接有效的方法是建立模型进行时间和空间序列模拟。目前常用的 NPS 污染模型主要有 ANSWERS^[1]、CREAMS^[2]、AGNPS^[3,4]和 SWAT^[5]和 AnnAGNPS^[6]等,其中连续分布式模型——AnnAGNPS (Annualized AGricultural NonPoint Source)模型实现了与 ArcView

GIS 3.x 的紧密集成,并在欧美农业小流域土地利用变化非点源污染研究得到应用。如 Jennifer 等^[7]利用

收稿日期: 2008-11-07; 修订日期: 2009-02-17

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD03A13, 2006BAD03A07)

作者简介: 黄志霖(1966~),男,博士,副研究员,主要研究方向为景观生态学, E-mail: hzlin66@163.com

该模型对美国乔治亚州南部 Piscola Creek 流域的月泥沙、氮、磷输出量进行模拟, Baginska 等^[8]模拟了 Currency Creek 流域氮、磷输出, Tsou 等^[9]对美国堪萨斯州 Bedrock Creek 流域径流和泥沙输出模拟, 这些模拟结果存在一定的偏差和不确定性, 但误差均在可接受范围之内, 在研究流域条件下, 可作为流域农业 NPS 污染管理的有效工具. 国内也有应用 AnnAGNPS 模型模拟非点源污染物输出, 如黄金良等^[10]在中国东南丘陵山区的九龙江流域、王飞儿等^[11]在千岛湖小流域. AnnAGNPS 模型的建立及应用条件是地形较平坦, 降雨较不集中, 主要侵蚀形式是细沟侵蚀, 流域农场经营方式、耕作制度和施肥(农药)较为统一, 数据易于获取. 国内这些研究在参数输入中多利用模型默认值和模型参考文件数据, 在一定程度上影响模型输出的精度.

三峡库区的水土流失和农业 NPS 污染已成为制约库区经济社会发展的因素之一^[12, 13]. 三峡库区沿江小流域多属山地农林复合, 农户分散经营, 耕作施肥(农药)方式不一, 数据不易获取且不确定性高, 所以 AnnAGNPS 模型在三峡库区林农复合流域适用

性评定尤为迫切和必要, 可为该地区非点源污染最佳管理措施(best management practices, BMPs)的制订提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究流域概况

黑沟小流域位于湖北省秭归县中东部, 东经 110°53'27" ~ 110°54'50", 北纬 30°51'21" ~ 30°51'34", 面积 144.4 hm², 毗邻三峡水库(图 1), 属亚热带大陆性季风区, 多年平均降雨量 1 439 mm, 年际差异大, 年内降雨分布为单峰型(5 ~ 8 月占全年 68%). 土壤为花岗岩母质出露发育的石英砂土, 保水保肥性较差, 植被覆盖率为 72.5%. 小流域西高东低, 西部最高海拔 1 400 m, 植被覆盖度低, 荒草出露岩石分布; 中部低山区为柑桔、板栗、农林、农茶间作带和马尾松等人工次生林带; 东部缓坡台地以植茶为主, 间作玉米、花生等. 农地面积 45.8 hm²、林地 56.1 hm²、草地 6.9 hm²、荒山荒坡 20.8 hm². 农地、林果地农药及化肥施用量较大, 氮、磷肥比为 20:3.

1.2 AnnAGNPS 模型简介

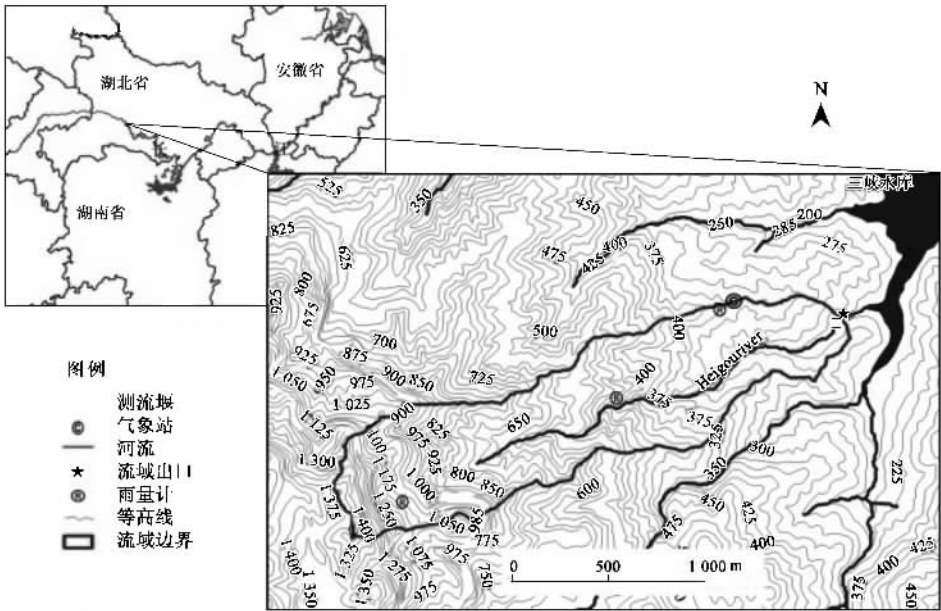


图 1 研究区地理位置示意
Fig.1 Location of the study area

AnnAGNPS 模型是参数分布式、基于物理过程、连续模拟、流域尺度的高级流域评价工具(USDA-ARS 与 NRCS 联合开发), 最新版本为 AnnAGNPS4.0 (2007), 替代其前身场次模型 AGNPS, 实现与 ArcView 3.x 界面的高度集成. 模型包括水文、土壤

侵蚀、化学物质输移 3 大模块. 水文计算法则为土壤水分平衡方程[式(1)]与地表径流模型(SCS-CN)^[6][式(2)和(3)]. 泥沙输出计算法则为修订的通用水土流失方程 RUSLE[式(4)]; 氮的矿化平衡计算法则为 EPIC 模型^[14], 逐日计算氮磷等的吸收、降解, 并

按可溶态和颗粒吸附态计算并输出.

$$SM_{t+1} = SM_t + \frac{WI_t + Q_t + PERC_t + ET_t + Q_{lat} + Q_{tile}}{Z}$$

(1)

式中, SM_t 、 SM_{t+1} 分别为某时间步长起始、终止时的土层含水率(%), WI_t 为水分输入量(mm), Q_t 为表面径流量(mm), $PERC_t$ 为水分渗出量(mm), ET_t 为蒸发量(mm), Q_{lat} 为侧流量(mm), Q_{tile} 为管道流(mm), Z 为土层厚度(mm), t 为步长时间(d).

$$Q = \frac{(WI - 0.2S)^2}{WI + 0.8S}$$

(2)

$$S = 254 \times \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

(3)

式中, Q 为地表径流量(mm), WI 为土壤输入水量(mm), S 为水土保持无量纲滞留系数, CN 为径流曲线数.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot H \cdot C \cdot P$$

(4)

式中, A 为土壤年侵蚀量[$t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$], R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, L 为坡长因子, H 为坡度因子, C 为覆盖管理因子, P 为水土保持工程措施因子.

1.3 模型数据库建立

数字高程模型(DEM)采用国家测绘部门 5.0 m 等高距1:10 000地形图件作为基本地形信息源,按照国家地形图数字化技术规范标准矢量化等高线,利用 ArcView GIS 3.2 双线性内插重采样^[15]方法生成 5.0 m 水平格网尺度 DEM.在地形图上随机选择 50 个点作为高程控制点,视其高程值作为准值,检验对

应 DEM 栅格点的高程采样精度;在小流域内随机布设 300 个点, GPS 定位并量测地面实际坡度,计算 DEM 提取地面坡度的中误差^[16].

分布式 AnnAGNPS 模型通过 CSA(Critical Source Area)和 MSCL(Minimum Source Channel Length)值来描述流域微地形空间变异性.该小流域面积小,景观类型较多, CSA 和 MSCL 取值分别为 2 hm² 和 30 m 时,小流域划分为 66 个空间离散单元,较能准确地代表小流域实际地形变化(图 2).

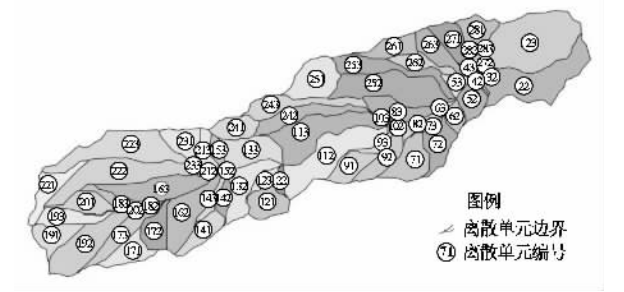


图 2 黑沟小流域离散单元区划
Fig.2 Heigou watershed discretization units delineations

UNIX 操作系统下启动 GEM 模块生成天气文件 Dayclim. inp. 矢量化土壤、土地利用资料数据,形成 soils. shp 和 fields. shp 输入文件;作物参数由模型手册和现场调查确定;化肥施肥量、无机有机肥比重、施肥深度等由现场调查统计来确定,以上小流域管理资料由模型编辑模块 InpEdit 输入.启动集成界面 AGNPS/ArvView Interface, 输入 AnnAGNPS. inp 和 Dayclim. inp 文件,输出小流域非点源污染数据.黑沟小流域资料来源见表 1.

表 1 黑沟小流域资料来源
Table 1 Data sources for the Heigou watershed

种类	来源	比例尺	资料内容
地形	定位站、秣归林业局、GIS	1:10 000	1:10 000 地形图、DEM、水库、河道、路网、坡度
土壤	定位站、秣归林业局、GIS	1:10 000	土壤类型、水文土壤组、反射率、比重、空隙度、饱和导水率、田间系数、凋萎系数、pH 值、有机质率、有机氮率、无机氮率、有机磷率、无机磷率
土地利用	定位站、秣归林业局、现场调查	1:10 000	农地、林地、草地、居民地、湿地
天气	定位站	—	降雨量、最高和最低温度、露点温度、云量和风速
流域管理	模型参考文件、现场调查	—	耕作措施、轮作制度、灌溉制度

1.4 模型模拟效果评定

使用 Nash-Sutcliffe 预测效率系数 E ^[17] [式(5)]、相对误差 VE[式(6)]和决定系数 R^2 [式(7)]等 3 个统计参量评定模型模拟输出效果.

$$E = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}$$

(5)

$$VE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n M_i}$$

(6)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(M_i - P_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

(7)

式中, N 降雨发生径流事件总数(天数), M_i 是第 i 次观测值, $\bar{M}$ 平均观测值, P_i 第 i 次模拟值, $\bar{P}$ 平均模拟值.

E 值为效率系数, 可以检验模型模拟值与观测值之间的吻合度, 回归线与 1:1 线的符合程度^[18], E 为负值或较小时, 预测效率不能被接受, $E > 0.6$, 模拟效率可以接受^[19], 当模型模拟值越接近观测值时, E 值趋近于 1. 径流和泥沙输出较大时, E 值对模拟值与观测值偏离较为敏感^[20]; VE 值为相对误差, 是模型模拟值对观测值误差百分比, 表示在较长时间段或多次径流条件下, 径流总量或悬浮物负荷量的预测可靠性. Chiew 等^[19]认为 $VE < 15\%$ 时模型模拟误差可以接受; 决定系数 R^2 , 其统计学意义为模拟值与观测值之间的线性关系部分所占的比率.

1.5 模型校准

首先, 降雨事件径流的校准. 设定 $-4\% \sim 4\%$ 之间的 9 组 RCN 值, 输入小流域 AnnAGNPS.inp 文件与 2003 年小流域天气数据 Dayclim.inp 文件, 启动非点源污染输出负荷模块 PLModel, 输出径流模拟值, 选取 23 次降雨径流事件, 使用试错法和图示法^[8], 每次调整 2% RCN 值, 当日径流观测值与模拟值基本吻合时按 1% RCN 调整, 使日降雨径流量观测值和模拟值最大程度的拟合, 径流模拟量与观测量 $VE < \pm 15\%$ ^[19].

其次, 是日泥沙输出的校准. 影响模型泥沙输出的参数较为冗繁, 任一子单元中的根量(root mass)、冠层盖度(canopy cover)、曼宁粗糙系数(Manning's roughness coefficient)及田间耕作和管理等参数均影响泥沙输出^[21]. 校准时, 利用非线性参数评定软件 PEST 优化输入参数, 执行 PLModel 污染负荷模块, 确定泥沙输出敏感因子曼宁粗糙系数和植物冠层盖度, 使用试错法和图示法^[8]调整敏感参数, 校准泥沙输出.

1.6 模型验证

使用校准后的模型, 产生小流域 2004 年 AnnAGNPS.inp 文件, 输入 2004 年 Dayclim.inp 文件, 启动非点源污染负荷模块 PLModel, 输出小流域 2004 年径流量、泥沙、氮磷模拟值, 选取其中 49 次径流和泥沙日输出事件, 利用 R^2 、 VE 、 E 等 3 个统计参量进行模型模拟能力评定.

2 结果与讨论

2.1 AnnAGNPS 模型校准

对模型径流与泥沙输出的校准是评估模型模拟

精度的重要一步. 本研究以参数 E 、 VE 和 R^2 值评估模型模拟效果. 模型校准过程中, 径流量模拟值与观测值之间吻合度较好, 回归线位于 1:1 线下方(图 3), VE 值为 -5.0% , 在 $\pm 15\%$ 范围误差界内. $R^2 = 0.93$ ($p < 0.05$), $E = 0.87$, 高于可接受界值 0.6.

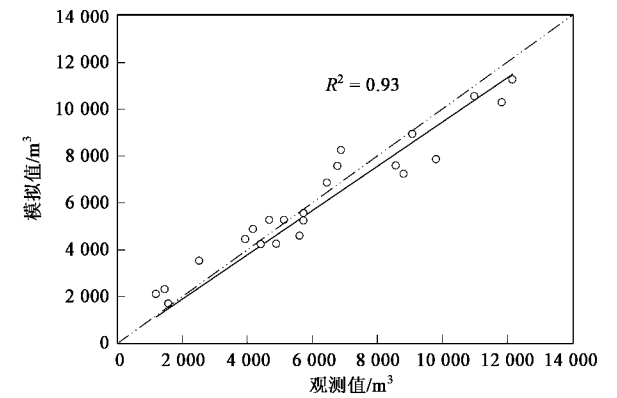


图 3 2003 年校准期黑沟小流域径流量观测值与模拟值比较
Fig.3 Measured vs predicted daily runoff from Heigou watershed during calibration in 2003

泥沙模拟回归线位于 1:1 线的下方(图 4), VE 为 -15.1% , 由于有较大偏差数据的存在, 决定系数 $R^2 = 0.63$ ($p < 0.05$), 但 $E = 0.77 > 0.6$. 这个结果说明 AnnAGNPS 模型可以用来预测研究小流域条件下的泥沙输出.

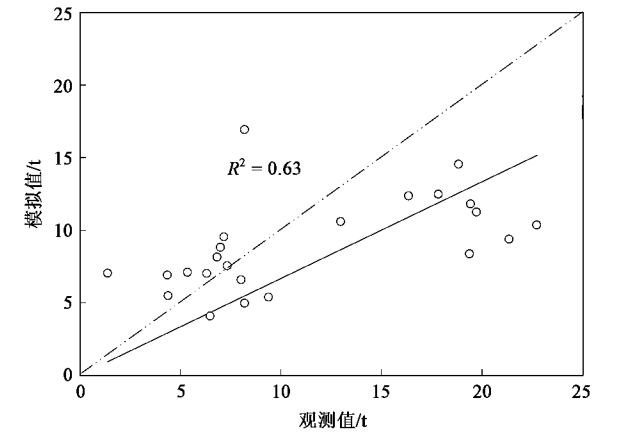


图 4 2003 年验证时段黑沟流域泥沙观测值与模拟值比较
Fig.4 Measured vs predicted daily sediment loading from Heigou watershed during calibration in 2003

2.2 AnnAGNPS 模型验证

表 2 为小流域 2004 年径流量、泥沙和氮磷模拟效果综合评定.

2.2.1 径流量

小流域 2004 年 49 次降雨径流模拟总量为 $2.32 \times 10^5 \text{ m}^3$, 观测总量为 $2.45 \times 10^5 \text{ m}^3$, VE 为 -5.3% .

对于次降水量 < 5 mm 的降雨事件, AnnAGNPS 模型均假定不产生径流, 这可能是径流量模拟值偏低原因之一. 次径流量模拟值与观测值相关性较高 ($R^2 = 0.90, p < 0.05$) (表 2), 回归线接近 1:1 线, $E = 0.79$, 模拟效果较好 (图 5).

表 2 AnnAGNPS 模型模拟效果评定
Table 2 Evaluation of AnnAGNPS performance

评定指标	径流	泥沙	总氮	总磷
相对误差 VE/%	-5.3	-13.5	20.3	23.5
决定系数 (R^2)	0.90	0.66	0.68	0.65
Nash-Sutcliffe 效率系数 (E)	0.79	0.69	0.53	0.43

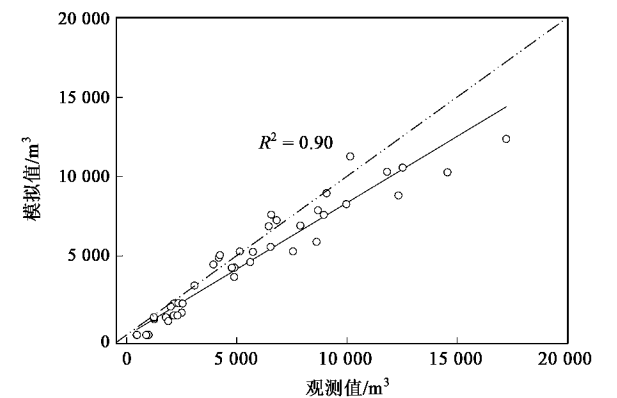


图 5 2004 年黑沟小流域验证阶段日径流量观测值与模拟值比较
Fig.5 Measured vs predicted daily runoff from Heigou watershed during validation in 2004

AnnAGNPS 模型使用 TR-55 综合降雨分布方法来模拟径流, 并假定降雨类型为均匀分布. 日径流量模拟值与观测值间均存在偏差, 可能源于以下原因: 首先, 该小流域山高坡陡, 迎风坡面降雨量大, 且多为间歇性降雨, 其空间分布不均^[22], 单一雨量图并不能代表整个小流域降雨实际分布. 其次, 模型本身对某日(次)降雨量的时间段, 其界定与其前后降雨事件完全区分开, 但降雨产流事件过程的连续性和时滞性, 与模型对日降水径流事件的界定不完全符合, 在间歇性降雨径流事件发生时更为突出. 再次, 模型对径流产生物理过程的描述不充分. Grunwald 等^[23]认为模拟误差主要是由于 CN 取值不精确, CN 精确取值可以明显地减小径流量模拟偏差; 径流产生是基于 RCN 方法, 模型用这种方法在流域出口处来描述整个流域, 对流域内河道产生途径、实际产流面积均没有加以考虑^[24], 虽然这种方式对全流域径流量的模拟偏差较小, 但 RCN 方法的最初设计使用范围是流域发生地表径流的地面, 而不是流域出口处.

模型对小降雨事件产生的径流预测偏差更大, 这与径流监测系统对大小径流事件的敏感性差异有关. 有文献认为 AnnAGNPS 模型对较小降雨事件径流模拟值比观测值低, 对大暴雨径流模拟值偏高^[22, 25]. Shamshad 等^[25]按降雨事件大小进行 AnnAGNPS 模型分段模拟效果评定, 发现对于次降水 > 15 mm, 模型 R^2 值为 0.96, E 值为 0.81; < 15 mm 的降雨, R^2 值为 0.52, E 值为 0.70, 降雨量越小, E 值越低, 模拟效果越差. 也有报道认为 AGNPS 模型对径流预测具有相同的规律性^[26-28]. 但 Polyakov 等^[21]和本研究结果认为对于小降雨径流, 模型模拟值偏高, 对大暴雨径流, 模型模拟值偏低, 与上述流域^[22, 25-28]地形地貌不同, 本研究小流域地形地势为山高坡陡、集水面积小, 在小流域出口处易于快速产生较大径流和峰值.

2.2.2 泥沙输出

小流域泥沙模拟值回归线与 1:1 线如图 6 所示. 回归线低于 1:1 线表明泥沙模拟值低于观测值 ($VE = -13.5\%$). 较低的 VE 值可能与模型在小型降雨事件 (< 5 mm) 忽略泥沙输出有关. 模拟值与观测值显示一般相关性 ($R^2 = 0.66, p < 0.05$), E 值为 0.69, 大于可接受效率界限值 0.6.

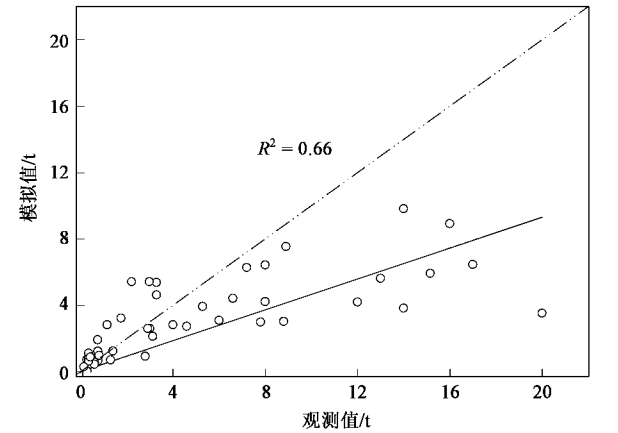


图 6 黑沟小流域验证阶段泥沙观测值与模拟值
Fig.6 Measured vs predicted daily sediment loading from Heigou watershed during validation in 2004

对泥沙输出模拟的不确定性, 可能与模型自身设计缺陷、流域地理位置、流域管理条件、获取资料数据的准确性以及与模型评定方法的选择有关^[8]. 模型, 包括 AnnAGNPS 的模拟, 均是假设资料数据绝对可靠, 但数据获取总存在一定的误差和错误. 基流对河岸侵蚀所产生泥沙, 模型并没有考虑在内. 实际上, 该部分也是泥沙输出组成部分. 模型对泥沙模拟

偏差趋势与径流相同的原因,Rode 等^[27]认为是泥沙输出量与径流量有正比线性关系,Suttles 等^[29]认为由于泥沙输移的能力,泥沙、径流量均与沟道对泥沙的输移能力成正比线性关系,径流量大时沟道对泥沙的输移能力就高。

多数相关文献认为,对流域较小降雨事件,模型对泥沙输出模拟有偏低趋势;暴雨条件下,模型对泥沙输出模拟有偏高趋势^[29,30]。Polyakov 等^[21]和本研究结论与上述观点相反,这归结于 AnnAGNPS 模型中泥沙输出的 RUSLE 计算法则^[31],对小型泥沙输出事件模拟结果偏高,对大型泥沙输出事件模拟结果偏低;其次,受小流域地形和土壤地质条件特殊性影响,如土壤含砂量高,质地松散,易于崩塌,河床冲蚀,这种现象在暴雨过程中更容易发生^[32]。黑沟小流域监测中,持续性小降雨也易产生土体崩塌事件,使泥沙输出变大。在三峡库区条件下,应用 RUSLE 方程预测泥沙输出进行小流域管理有待于进一步论证。

对泥沙模拟具有较大程度的不确定性,但模型模拟趋势表现出了某种程度的稳定性:在地形较为平坦、侵蚀形式主要是细沟和细沟间的侵蚀,不考虑重力侵蚀,模型对较小降雨泥沙输出量有估计偏低趋势,对暴雨泥沙输出有偏高估计趋势;在地质松散,平均坡度较大地区,模型对较小泥沙输出模拟结果偏高,对暴雨事件泥沙输出模拟结果偏低。

2.3 营养物输出

限于监测资料,仅对校准后模型对总氮总磷输出进行评定。氮磷输出与径流量和泥沙输出均相关联^[21,33]。图 7 为氮输出回归线与 1:1 线图。回归线($R^2 = 0.68, p < 0.05$)接近但高于 1:1 线,说明模型对氮输出模拟偏高($VE = 20.3\%, E = 0.53$),预测精度一般,误差在可接受范围之内;磷输出回归线位于 1:1 线上方, $VE = 23.5\%, R^2 = 0.65 (p < 0.05)$ (图 8),这说明模型 65% 的模拟结果的是由于观测资料可变性引起的。 $E = 0.43$,表明虽然模型并不能正确地预测磷输出量,但是仍能部分地代表观测资料。尽管模型对氮磷输出预测具有很大的不确定性,但仍表现有一定的预测趋势:对较小氮输出事件,模型有过高模拟趋势,对较大输出事件,模型有过低模拟趋势;模型对磷模拟趋势与氮相反。

与径流和泥沙的模拟效率比较,AnnAGNPS 模型对营养物模拟效率较低。植物吸收和营养物质循环等大量的参数依靠实地调查、估计或使用与本地实际不符的模型参考文件,这些均影响到模型的模拟效率;对营养物模拟是基于质量守恒,但模型营养

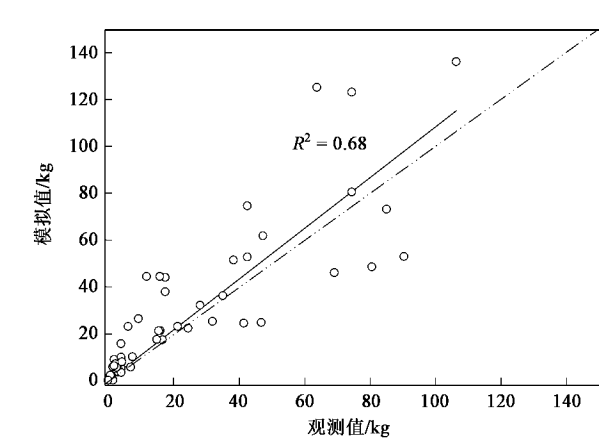


图 7 2004 年黑沟小流域卡口站氮观测值与模拟值比较
Fig. 7 Measured vs predicted nitrogen loading from Heigou watershed during validation in 2004

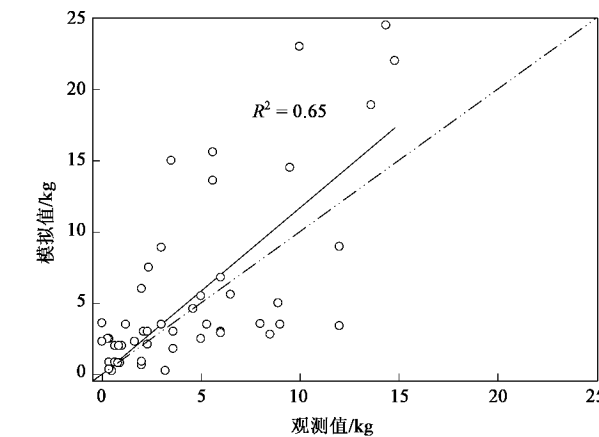


图 8 2004 年黑沟小流域卡口站日磷输出观测值与模拟值比较
Fig. 8 Measured vs predicted phosphorus loading from Heigou watershed during validation in 2004

物输出、输入资料的缺失及不考虑输移过程中二次沉淀吸附过程,这些都将对结果产生影响。其他有关文献均有营养物输出量模拟效率偏低的报道^[27,29]。在模型实际应用中,需要更加精准地测定氮磷敏感参数,减少模型模拟误差。

3 结论

(1) AnnAGNPS 模型对径流量模拟误差在可接受的范围内,校准期模型 VE 值为 5.0% ($R^2 = 0.93, p < 0.05$),验证期模型 VE 值 6.7% ($R^2 = 0.90, p < 0.05$)。

(2) 模型对泥沙模拟效果较径流低,校准期内模型 VE 值为 15.1% ($R^2 = 0.63, p < 0.05$),验证期内模型 VE 值为 26.7% ($R^2 = 0.59, p < 0.05$)。对于小流域较小泥沙输出事件,模型模拟值偏高,大泥沙

输出事件,模型模拟值偏低.

(3) 模型对营养物质模拟具有更大的不确定性,对氮模拟结果 R^2 为 0.68 ($p < 0.05$)、 E 值为 0.53,略高于对磷的模拟($R^2 = 0.65$, $p < 0.05$)、 $E = 0.43$.

(4) 模型对径流、泥沙、总氮总磷的模拟均存在一定的不确定性,但模拟误差呈现一定的变化趋势,有利于 AnnAGNPS 模型作为高级流域管理工具在三峡库区农林复合流域管理模式下的科学利用.

参考文献:

- [1] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. Trans Asae, 1980, **23**(4):938-944.
- [2] Knisel W G. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management system [R]. Conservation Research Report No. 26. Washington, D C: USDA-SEA, 1980.
- [3] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS, Agricultural nonpoint-source pollution model: A watershed analytical tool [R]. Conservation Research Report, No.35, Washington, D C: USDA, 1987.
- [4] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS: A nonpoint source pollution model for evaluating agricultural watersheds [J]. J Soil Water Conser, 1989, **44**(2):168-173.
- [5] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development [J]. J Am Water Resour Assoc, 1998, **34**(1):73-89.
- [6] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS Technical Processes [R]. Documentation Version 2, 2001.
- [7] Jennifer B S, George V, David B, *et al.* Use of AnnAGNPS model for a watershed in the coastal plain of Georgia [R]. Proceedings of the 9 National Nonpoint Source Monitoring Workshop, Hyatt Regency, Indianapolis, 2001. 1-11.
- [8] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. Environ Modell Softw, 2003, **18**(8):801-808.
- [9] Tsou M S, Zhang X Y. Estimation of runoff and sediment yield in the Redrock Creek watershed using AnnAGNPS and GIS [J]. J Environ Sci, 2004, **16**(5):865-867.
- [10] 黄金良,洪华生,杜鹏飞. 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.
- [11] 王飞儿,吕唤春,陈英旭. 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.
- [12] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, **19**(5): 87-91.
- [13] 许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(2): 326-331.
- [14] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator [R]: 1. Model Documentation. US. Department of Agriculture Technical Bulletin, No. 1768, 1990.
- [15] Wu S, Li J, Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models [J]. Environ Model Assess, 2005, **10**: 33-42.
- [16] 汤国安,赵牡丹,李天文,等. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性[J]. 地理学报, 2003, **58**(6): 824-830.
- [17] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models, part I. A discussion of principles [J]. J Hydrol, 1970, **10**(3):282-290.
- [18] Cheng H, Ouyang C, Hao F X, *et al.* The non-point source pollution in livestock-breeding areas of the Heihe River basin in Yellow River [J]. Stoch Environ Res Risk Assess, 2007, **21**:213-221.
- [19] Chiew F H S, Stewardson M J, McMahon T A. Comparison of six rainfall-runoff approaches [J]. J Hydrol, 1993, **147**:1-36.
- [20] Krause P, Boyle D P, Baise F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment [J]. Adv Geosci, 2005, **5**: 83-87.
- [21] Polyakov V, Fares A, Kubo D, *et al.* Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed [J]. Environ Modell Softw, 2007, **22**:1617-1627.
- [22] Shrestha S, Babel M S, Gupta A D, *et al.* Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Sivalik Hills of Nepal [J]. Environ Modell Softw, 2006, **21**:961-975.
- [23] Grunwald S, Norton L D. Calibration and validation of a nonpoint source pollution model [J]. Agr Water Manage, 2000, **45**:17-39.
- [24] Garen D, Woodward D, Geter F. A user agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modeling [J]. Catena, 1999, **37**:277-289.
- [25] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, *et al.* Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions [J]. Int J Appl Earth Obs Geoinf, 2007, **10**(3):239-252.
- [26] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, Western Hararghe, Ethiopia [J]. Agr Ecosystems Envir, 2003, **99**:201-212.
- [27] Rode M, Frede H G. Testing AGNPS for soil erosion and water quality modeling in agricultural catchments in Hesse, Germany [J]. PhysChem Earth P B-Hydrol Oc, 1999, **24**(4):297-301.
- [28] Lenzi M A, Luzio M D. Surface runoff, soil erosion and water quality modelling in the Aplone Watershed using AGNPS integrated with a Geographic Information System [J]. Eur J Agron, 1997, **6**:1-14.
- [29] Suttles J B, Validis G, Bosch D D, *et al.* Watershed-scale simulation of sediment and nutrient loads in Georgia Coastal Plain Streams using the annualized AGNPS model [R]. Proceedings of ASAE Annual Meeting, 2002, Paper No. 022092.
- [30] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, Western Hararghe, Ethiopia [J]. Agr Ecosystems Envir, 2003, **99**:201-212.
- [31] Nearing M A. Why soil erosion models over-predict small soil losses and under-predict large soil losses [J]. Catena, 1998, **32**(1):15-22.
- [32] Calhoun R S, Fletcher C H. Measured and predicted sediment yield from a subtropical, heavy rainfall, steep-sided river basin: Hanalei, Kauai, Hawaiian Islands [J]. Geomorphology, 1999, **30**(3):213-226.
- [33] 洪华生,黄金良,张珞平,等. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用[J]. 环境科学, 2005, **26**(4):63-69.