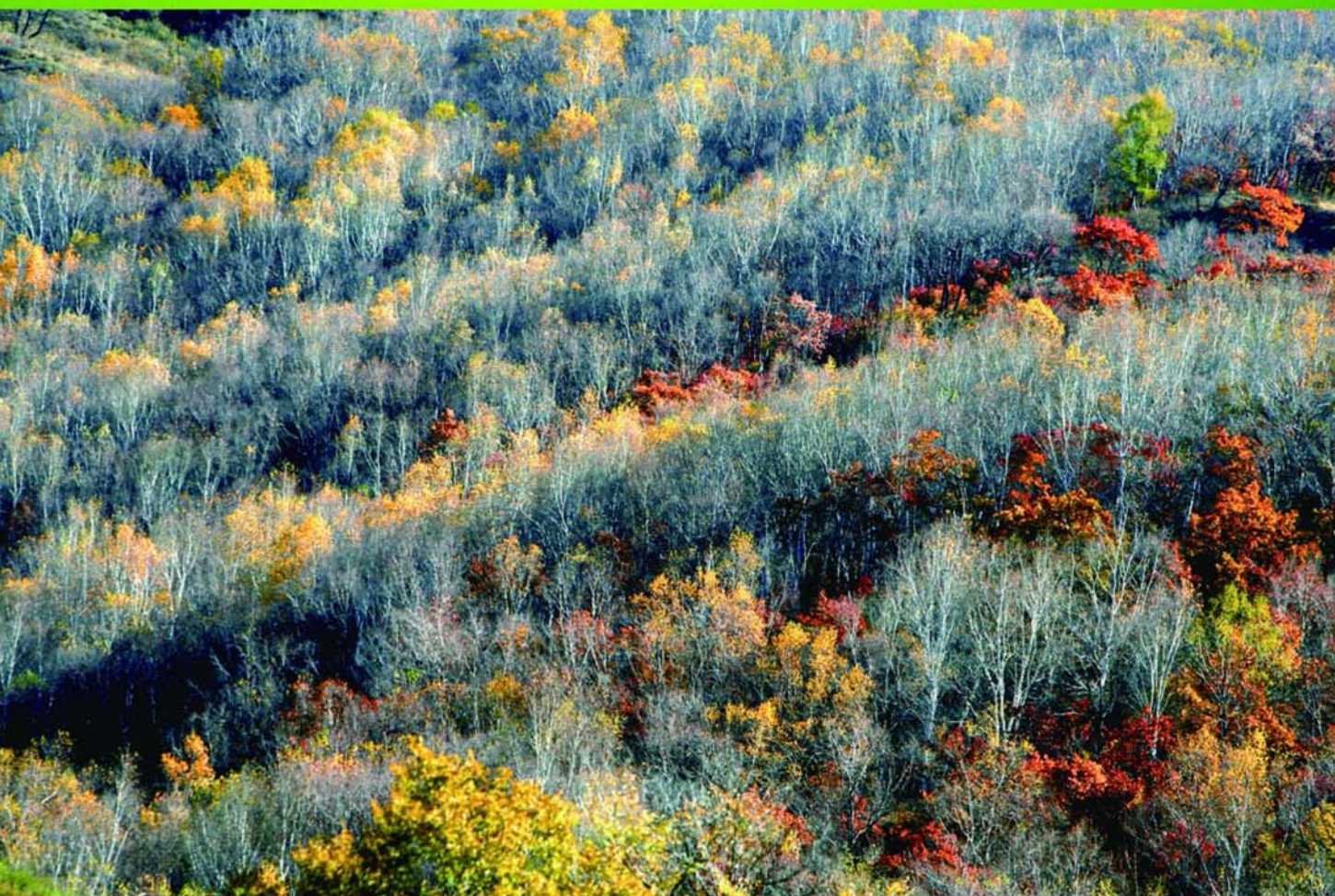


ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第31卷 第16期 Vol.31 No.16 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 16 期

2011 年 8 月 (半月刊)

目次

人工和天然湿地芦苇根际土壤细菌群落结构多样性的比较·····	汪仲琼,王为东,祝贵兵,等 (4489)
不同土壤水分下山杏光合作用光响应过程及其模拟·····	郎莹,张光灿,张征坤,等 (4499)
不同颜色遮阳网遮光对丘陵茶园夏秋茶和春茶产量及主要生化成分的影响·····	秦志敏,付晓青,肖润林,等 (4509)
镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响·····	吴坤,吴中红,邵付菊,等 (4517)
条浒苔和缘管浒苔对镉胁迫的生理响应比较·····	蒋和平,郑青松,朱明,等 (4525)
盐胁迫对拟南芥和盐芥莲座叶芥子油苷含量的影响·····	庞秋颖,陈思学,于涛,等 (4534)
长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响·····	高菊生,曹卫东,李冬初,等 (4542)
基于水量平衡下灌区农田系统中氮素迁移及平衡的分析·····	杜军,杨培岭,李云开,等 (4549)
苏北海滨湿地互花米草种子特征及实生苗生长·····	徐伟伟,王国祥,刘金娥,等 (4560)
基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价·····	田耀武,黄志霖,肖文发 (4568)
镉污染对不同生境拟水狼蛛氧化酶和金属硫蛋白应激的影响·····	张征田,庞振凌,夏敏,等 (4579)
印度洋南赤道流区水体叶绿素 a 的分布及粒级结构·····	周亚东,王春生,王小谷,等 (4586)
长江口滩涂围垦后水鸟群落结构的变化——以南汇东滩为例·····	张斌,袁晓,裴恩乐,等 (4599)
应用鱼类完整性指数 (FAII) 评价长江口沿岸碎波带健康状况·····	毛成贵,钟俊生,蒋日进,等 (4609)
基于渔业调查的南极半岛北部水域南极磷虾种群年龄结构分析·····	朱国平,吴强,冯春雷,等 (4620)
水稻模型 ORYZA2000 在湖南双季稻区的验证与适应性评价·····	莫志鸿,冯利平,邹海平,等 (4628)
旱地农田不同耕作系统的能量/碳平衡·····	王小彬,王燕,代快,等 (4638)
宁夏黄灌区稻田冬春休闲期硝态氮淋失量·····	王永生,杨世琦 (4653)
太湖沉积物有机碳与氮的来源·····	倪兆奎,李跃进,王圣瑞,等 (4661)
日偏食对乌鲁木齐空气可培养细菌群落的影响·····	马晶,孙建,张涛,等 (4671)
灰飞虱与褐飞虱种内和种间密度效应比较·····	吕进,曹婷婷,王丽萍,等 (4680)
圈养马来熊行为节律和时间分配的季节变化·····	兰存子,刘振生,王爱善,等 (4689)
塔里木荒漠河岸林干扰状况与林隙特征·····	韩路,王海珍,陈加利,等 (4699)
珍稀植物伯乐树一年生更新幼苗的死亡原因和保育策略·····	乔琦,秦新生,邢福武,等 (4709)
垃圾堆肥复合菌剂对干旱胁迫下草坪植物生理生态特性的影响·····	多立安,王晶晶,赵树兰 (4717)
CLM3.0-DGVM 中植物叶面积指数与气候因子的时空关系·····	邵璞,曾晓东 (4725)
基于生态效率的辽宁省循环经济分析·····	韩瑞玲,佟连军,宋亚楠 (4732)
专论与综述	
土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法·····	曹志平,李德鹏,韩雪梅 (4741)
生态社区评价指标体系研究进展·····	周传斌,戴欣,王如松,等 (4749)
问题讨论	
不同胁迫条件下化感与非化感水稻 PAL 多基因家族的差异表达·····	方长甸,王清水,余彦,等 (4760)
研究简报	
钦州湾大型底栖动物生态学研究·····	王迪,陈丕茂,马媛 (4768)
人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征·····	董凯凯,王惠,杨丽原,等 (4778)
基于地统计学丰林自然保护区森林生物量估测及空间格局分析·····	刘晓梅,布仁仓,邓华卫,等 (4783)
晋西黄土区辽东栎、山杨树干液流比较研究·····	隋旭红,张建军,文万荣 (4791)
小兴安岭典型苔草和灌木沼泽 N ₂ O 排放及影响因子·····	石兰英,牟长城,田新民,等 (4799)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-08



封面图说:在长白山麓低海拔地区的晚秋季节,成片的白桦林用无数根白色的树干、树枝烘托着林冠上跳动的金黄色叶片,共生的柞木树冠用更浓重的颜色显示了它的存在,整个山梁层林尽染,秋意浓浓。

彩图提供:陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

田耀武, 黄志霖, 肖文发. 基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县非点源污染输出评价. 生态学报, 2011, 31(16): 4568-4578.

Tian Y W, Huang Z L, Xiao W F. Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16): 4568-4578.

基于 AnnAGNPS 模型的三峡库区秭归县 非点源污染输出评价

田耀武^{1,2}, 黄志霖², 肖文发^{2,*}

(1. 河南科技大学林学院, 洛阳 471003;

2. 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)

摘要: 非点源 (NPS) 污染已成为全球关注的环境问题。由于 NPS 特点、实验手段和监测数据的局限, 其研究多采用数学模型进行时间和空间模拟。模型模拟提供了一种成本低效率高的手段来评定区域非点源污染。选择连续农业非点源污染 AnnAGNPS (Annualized AGricultural Non-Point Source) 模型, 构建该模型数据库, 模拟秭归县黑沟、兰陵溪、杉木溪等 3 条典型流域和县域径流、泥沙和营养物质的输出。结果表明: AnnAGNPS 模型对 3 条典型流域的径流模拟能力高于对泥沙和养分的模拟, 径流模拟误差均在可接受范围之内, 说明模型中采用的径流预测 (SCS 曲线) 法对研究区的地理气候条件是适用的; 对 3 条典型流域泥沙输出模拟误差较高, 对氮磷等养分输出模拟的误差最高, 通过调整 RUSLE 和 HUSLE 等子模型的输入参数来减小泥沙模拟误差; 对小型降雨径流事件, 模型泥沙、养分模拟误差有偏大趋势, 对较大降雨径流事件, 模型泥沙和养分模拟误差有偏小趋势; 2006 年秭归县县域模型模拟的地表径流量为 363 mm, 泥沙输出为 19.6 t/hm², 总氮输出为 122 kg/hm², 总磷输出为 28 kg/hm², 有机碳输出为 581 kg/hm², 模拟结果与相关文献研究和政府统计数据较为相符; AnnAGNPS 模型对 NPS 污染物输出模拟具有一定的不确定性, 但作为一个较好的高级农业流域管理工具, 该模型可以在三峡库区地理气候条件下使用。

关键词: AnnAGNPS 模型; 非点源污染; 典型流域; 秭归县; 评价

Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model

TIAN Yaowu^{1,2}, HUANG Zhilin², XIAO Wenfa^{2,*}

1 College of Forestry, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2 State Forestry Administration Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: Non-point source (NPS) pollution has become a global environmental issue and a widely discussed form of environmental degradation in recent years. Because of the nature of NPS and the limitations of assessing it through experiments and field measurements, its management is highly dependent on spatial simulation modeling which helps deal with the spatial uncertainty associated with NPS pollution. In the last three decades, several computer simulation models have been developed to provide a better understanding of hydrological systems, sediment transport and associated pollutant loading. Annualized AGricultural Non-Point Source (AnnAGNPS) is a continuous simulation, watershed-scale model intended to be used as a tool to evaluate NPS pollution. In the Three Gorges Reservoir area, non-point source pollution studies are still in their infancy. Although soil erosion has been a major problem in this area, erosion studies are very much limited to using the universal soil loss equation (USLE). The objectives of this study were to prepare a database for the

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAF2007010); 河南科技大学博士科研基金 (09001445)

收稿日期: 2010-08-23; **修订日期:** 2011-01-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

simulation of runoff and non-point source pollution using the AnnAGNPS model, and to assess the applicability and predictive capability of the model as a long-term monitoring tool in Zigui county. The model was calibrated and validated using observed stream flow and sediment load data from the Heigou, Lanlingxi and Shamuxi watersheds in Zigui county. The calibrated model was then used to simulate runoff, sediment yield and nutrient export from the county. Digital elevation models were generated from digitized topographical data. Based on critical source area and minimum source channel length specifications, Zigui county was divided into 1966 cells and 986 channel reaches. Results showed that the model predicted the runoff volume of the three typical watersheds within an acceptable range. This indicates that the SCS curve number method used in the AnnAGNPS model is suitable for runoff volume prediction. Sediment yield predictions for the three typical watersheds were only moderately accurate but the predictions were improved by amending the input parameters for both the RUSLE and HUSLE sub-models. In general, the model performed well in simulating runoff compared to sediment and nutrient loadings. For smaller events, the model generally over-predicted sediment and nitrogen loadings, while under-predicting for larger events. The prediction for total phosphorus showed obvious uncertainties. The model predicted the export from Zigui county in 2006 of 363 mm of runoff, 19.6 t/hm² of sediment yield, 122 kg/hm² of total nitrogen, 28 kg/hm² of total phosphorus, and 581 kg/hm² of total organic carbon. The simulation results were in accordance with related studies and government statistics. As a watershed management tool, AnnAGNPS can be used to formulate different management strategies for soil and water conservation in hilly parts of the Three Gorges Reservoir area with mixed types of land use and steep slopes.

Key Words: AnnAGNPS model; non-point source pollutants; typical watershed; Zigui county; assessment

三峡库区较为严重的非点源(NPS, non-point source)污染引发了一系列严重的环境生态问题,已成为制约库区经济社会发展的因素之一^[1]。由于NPS本质特性和传统试验手段局限性,目前多采用空间模拟模型进行研究,较为成熟的模型有CREAMS、ANSWERS、AGNPS和SWAT等,其中SWAT和AGNPS参数分布式模型应用较广泛。AnnAGNPS是USDA-ARS与自然资源保护局(NRCS)共同研发的一个高级的流域评价工具,它是针对农业流域对管理措施的响应而设计的基于连续事件的分布式模型。有关学者已利用上述模型对流域尺度NPS进行了大量的研究,取得了较好的模拟结果^[2-7]。但上述研究均是在自然流域条件下进行NPS输出与管理,对单一行政区NPS输出与管理还鲜有报道。实际自然流域往往跨越不同行政区域,不同行政区划给流域统一农业管理带来困难。本研究首先选取秭归县3条典型农业流域进行模型参数率定和输出验证,然后根据秭归县四周高,中间低,呈东西开口的不规则盆状地形特点,把秭归县数字高程模型DEM(digital elevation model)进行行政区边界切割(图1),使之符合AnnAGNPS模型模拟条件,然后进行秭归县域NPS输出,进而为模型应用于行政区区域和行政区NPS管理提供新思路。

1 材料与方法

1.1 秭归县概况

秭归县位于湖北省西部,东经110°18′—110°0′,北纬30°38′—31°11′,总面积2427 km²,长江横贯中部,流长64 km,与境内8条溪流形成“蜈蚣”状水系(图1),地形四周高,中间低,呈东西开口的不规则盆地状。秭归县地处中纬度,属亚热带大陆性季风区,多年平均降雨量1439 mm,年际差异大,年内降雨分布为单峰型(5—8月占全年68%)。土类有黄棕壤(231)、棕壤(232)、石灰土(233)、紫色土(234)、水稻土(235)、黄壤(236)、潮土等7类(图2),分别占林地和耕地的14.34%、28.22%、0.15%、35.93%、17.91%、0.23%和3.22%。全县林地面积164863 hm²,农地面积42031 hm²,草地面积22051 hm²,内陆水域3450 hm²,其他10303 hm²。

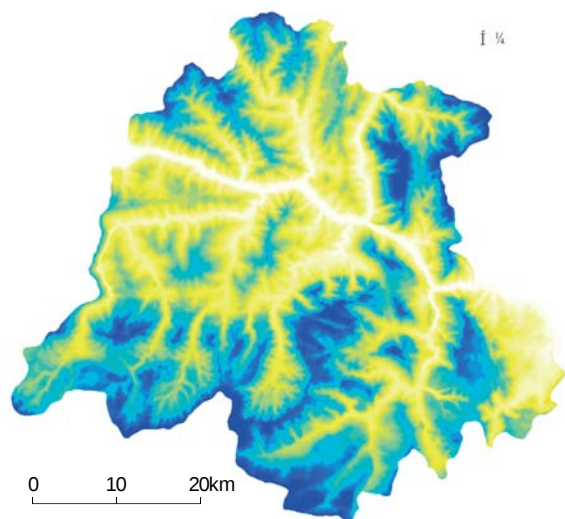


图1 秭归县数字高程模型

Fig. 1 DEM of Zigui county

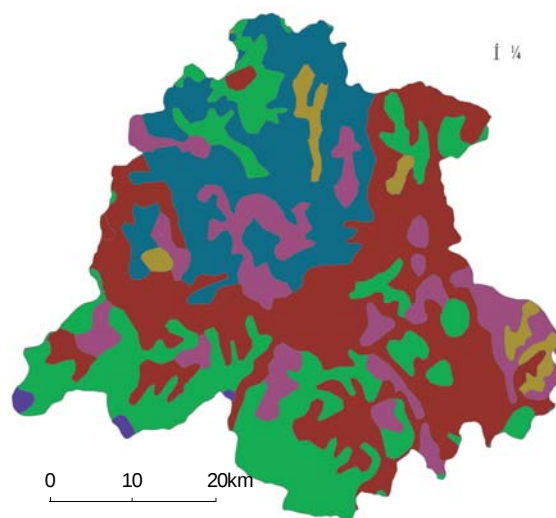


图2 秭归县土壤分类图

Fig. 2 Soil classification map of Zigui county

1.2 AnnAGNPS 模型

AnnAGNPS 模型是 USDA-ARS 与 NRCS 联合开发的参数分布式、基于物理过程、连续模拟、流域尺度的高级流域评价工具,最新版本为 AnnAGNPS4.0。AnnAGNPS 模型直接替代了其前身场次模型 AGNPS,实现了与 ArcView 3.x 界面的高度集成。模型主要包括水文、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)^[8](式 2,式 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,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。

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

式中, SM_t 为土层某时间步长起始水分百分含量(%), SM_{t+1} 为土层某时间步长终止时水分百分含量(%), 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);

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

$$S = 254 \times \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3)$$

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;

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot H \cdot C \cdot P \quad (4)$$

式中, A 为土壤年侵蚀量(t/hm^2), 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 模型空间数据库构建

1.3.1 气象

气象文件 Dayclim.in 由模型编辑模块逐日输入秭归县 2006 年最低最高气温、降雨量、风速、云量和露点温度等 6 类气象要素数据产生,气象数据由秭归县气象部门提供。

1.3.2 地形

数字高程模型 DEM 采用国家测绘部门航测 1:5 万 25 m 等高距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进行矢量化,利用 ArcView GIS 双线性内插重采样^[9]方法生成 30 m^[10] 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;在秭归县域内随机布设 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^[11]。

分布式 AnnAGNPS 模型通过改变 CSA(Critical Source Area)和 MSCL(Minimum Source Channel Length)参数值来描述微地形空间变异性。秭归县域景观较为破碎,土地利用多为镶嵌块状,CSA 和 MSCL 取值较小。CSA 和 MSCL 取 1hm²和 30 m 时,秭归县区划为 1966 个空间离散单元时,较能准确地代表县域实际地形变化,并控制空间参数聚合于容许范围^[12]之内。

1.3.3 土壤

土壤类型数据由中国科学院南京土壤研究所数据中心提供;土壤属性数据由模型参考文件及全县 21 个采样点(表 1)调查取得。秭归县土壤质地是卡钦斯基粒级制,将各粒级含量的百分比转化为对数分布,进行插值和外推,转化为美国农业部三角制。模型要求的土壤氮磷养分按照有机氮、无机氮、有机磷和无机磷的含量输入,全氮中有机氮和无机氮含量按照 96% 和 4% 比率进行转换,全磷中有机磷和无机磷含量分别按照 10%—18%、82%—90% 的比例进行转换^[13]。

表 1 秭归县 21 个采样点土壤属性数据

Table 1 Soil properties of 21 sampling points of Zigui county

样点号 Sampling point	石砾(>2mm) Rock fragment	粗砂/% Coarse sand	细砂/% Fine sand	粉砂/% Silty sand	粘粒/% Clay	有机质/% Organic matte	全氮/% Total nitrogen	全磷/% Total phosphorus	全钾/% Total potassium	pH
1		1.30	17.10	54.60	26.90	3.53	0.250	0.036	1.80	6.4
2		26.60	24.00	26.10	23.20	2.34	0.150	0.040	1.69	6.7
3		65.50		23.20	11.30	1.31	0.080	0.026	1.67	7.1
4		15.42	6.39	28.76	49.43	7.83	0.332	0.049	0.86	
5		6.32	16.03	42.86	34.79	1.34	0.075	0.094	2.64	6.8
6		58.40	9.80	13.60	18.20	0.74	0.047	0.020	2.26	6.2
7	2.80	1.50	24.00	44.30	30.20	9.58	0.441	0.082	1.70	5.6
8		3.60	30.70	46.20	19.50	1.80	0.105	0.040	1.33	5.5
9		41.70	28.00	16.10	14.20	0.96	0.047	0.015	4.65	5.1
10	45.00	19.00	2.40	34.10	22.90	1.27	0.075	0.028	1.41	6.2
11		14.80	29.30	40.90	15.00	7.41	0.290	0.030	1.44	6.5
12	2.69	1.21	16.95	42.65	39.19	1.09	0.063	0.029	1.68	7.2
13		1.40	24.50	34.90	39.20	1.51	0.092	0.035	1.38	7.6
14		1.04	56.60	32.00	9.56	1.69	0.109	0.076	1.82	7.7
15		66.70	24.70	7.90	0.60	0.91	0.077	0.141	2.41	6.3
16		34.20	31.90	21.70	12.20	1.19	0.066	0.086	1.19	6.0
17		23.00		48.30	28.60	3.42	0.191	0.045	1.16	6.6
18	12.45	41.35	33.19	15.10	10.36	1.88	0.115	0.136	2.21	6.0
18		0.50	20.50	48.50	30.50	2.98	0.182	0.048	1.20	5.7
20		0.50	6.30	39.60	53.60	4.22	0.256	0.053	2.36	7.9
21		1.40	12.60	37.60	48.40	1.82	0.102	0.033	1.20	5.3

1.3.4 土地利用

秭归县 TM(时相:2006.6.30)影像作为信息源来获取土地利用专题数据。图像处理软件为 ERDAS IMAGING9.2,地理信息系统软件为 ArcGIS9.2。数字化秭归县 1:5 万地形图生成高精度的数字地形图,并以此为标准对 TM 影像进行几何精纠正。对纠正后的遥感数据采用线性变换、图像运算和信息融合处理,进行

主成份分析和数字图像彩色增强,获得 7、4、2 三波段假彩色合成影像^[14]。按模型要求的林地(21—24)、农地(111、114、121、124)、草地(31、32)、水域(41、46)、建设(居民区)(51—53)用地等 5 类划分法(图 3),对假彩色影像进行目视解译、监督分类,并结合地形图和现场调查对解译分类结果进行修改编辑,获取秭归县土地利用分类图并矢量化成 shp 格式(图 2)。

作物参数由模型手册和现场调查确定;化肥施用量、肥料类型及比率、施肥深度等由现场调查统计来确定(表 2),农业管理资料由模型编辑模块 InputEdit 输入。

1.3.5 数据统一化

模型所使用的空间数据应具有相同的地理坐标和投影。本研究选择 Albers 等积圆锥投影进行空间数据统一化^[15]。将不同的空间数据,特别是来源不同的空间数据,经过投影变换,使之统一于相同的坐标系。

1.4 模型参数率定和调试

选择秭归县不同尺度的黑沟流域^[7]、兰陵河流域、杉木河流域等 3 条典型流域,根据 3 条典型流域 2003、2004 年监测数据率定模型输入参数^[7]。典型流域参数率定分为 2 步,第 1 步是降雨径流量的校准。设定 -4%—4% 之间的 9 组 RCN 值,输入典型流域 AnnAGNPS. inp 与 Dayclim. inp 文件,输出径流模拟值,使用试错法和图示法^[3],每次调整 2% RCN 值,当径流观测值与模拟值基本吻合时按 1% RCN 调整,使降雨径流量观测值和模拟值最大程度的拟合,总径流模拟量与观测量误差 $<\pm 15\%$ ^[16]。第 2 步为泥沙输出校准。影响模型泥沙输出的参数较为冗繁,模型 cell 中根系重量、植被覆盖率、曼宁粗糙系数及田间操作和管理等参数均影响泥沙输出,在模型校准调试中某些参数还具有与理论上的相反结果。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被覆盖率,使用试错法和图示法^[3]调整敏感参数,控制泥沙输出误差在 $\pm 20\%$ ^[16]。

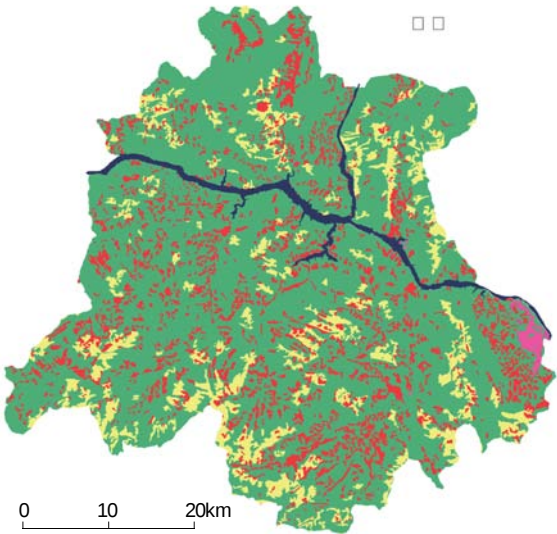


图 3 秭归县土地利用图
Fig. 3 Contour map of Zigui county

表 2 秭归县数据源
Table 2 Data sources for Zigui county

数据种类 Data type	格式 Format	来源 Source	内容 Content	比例 Proportion
DEM	栅格	地形图	1 : 10000 地形图、DEM、水库、河道、路网、坡度	1 : 50000
土壤 Soil	矢量	中国科学院数据中心、模型参考文件、现场调查	土壤类型	1 : 250000
土壤参数 Soil parameter	文本	中国科学院数据中心、模型参考文件	水文土壤组、反射率、比重、空隙度、饱和导水率、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 Landuse	矢量	遥感、现场调查、模型参考文件	农地、林地、草地、居民地、湿地	1 : 50000
作物 Crop	文本	现场调查、模型参考文件		
气象 Weather	文本	秭归定位站	降雨量、最高和最低温度、露点温度、云量和风速	—
农业管理 Agricultural management	文本	现场调查、模型参考文件	耕作措施、轮作制度、灌溉制度	—

1.5 NPS 模拟输出

加载 3 条典型流域 2006 年 AnnAGNPS.inp 与 Dayclim.inp 文件,利用参数率定后的模型模拟 3 条典型流域 2006 年 NPS 污染物输出;加载秭归县 2006 年 AnnAGNPS.inp 与 Dayclim.inp 文件,利用参数率定后的模型模拟 2006 年秭归县径流、泥沙、总氮、总磷等 NPS 污染物输出。

2 结果与分析

2.1 降雨量与径流量

图 4 为 2006 秭归县降雨量与模型模拟径流量关系图。2006 年秭归县降雨量为 840 mm,模型模拟地表径流量为 363 mm,模拟地表径流量低于秭归县 2006 年平均地表水资源量 405 mm(宜昌市水资源公报),模拟误差约为 -11.6%,小于可允许误差范围 ($\pm 15\%$)^[16]。

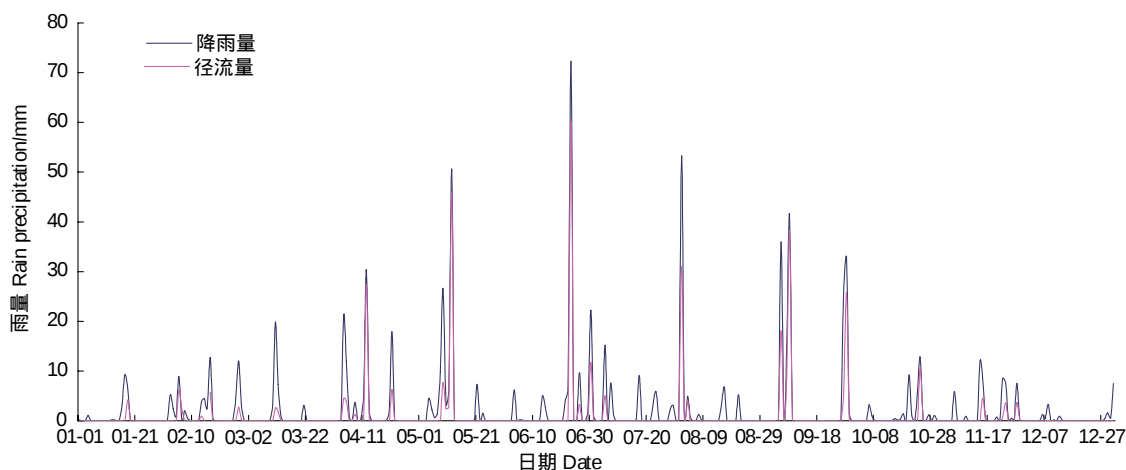


图 4 秭归县 2006 年降雨量与模拟径流量分布

Fig. 4 Distribution map of daily amounts of rainfall and simulation runoff from Zigui county in 2006

对黑沟流域、兰陵河流域、杉木河流域等 3 条典型流域次降雨径流监测数据均表明,径流量模拟值与观测值间均存在一定的偏差^[7,17]。偏差的原因可能为模型模拟机理和参数的界定方法。Grunwald^[18]认为模型对径流的模拟误差主要是由于 CN 取值的不精确,精确的 CN 取值可以明显地减小径流量模拟偏差;径流偏差还可能是模型对径流产生物理过程的描述不充分,径流的产生是基于 RCN 方法,模型用这种方法在流域卡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^[19],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,而不是流域卡口处;径流模拟偏差还可能是由于模型本身的一些假设条件,如对日(次)降雨量的定义上,模型认为某日降雨量之前和之后产生的降雨均是独立的,三者间没有任何关联,这与流域连续降雨产生径流的实际情况是不相符的;降雨量的空间分布不均也会产生^[5]模拟偏差。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。但典型流域山高坡陡,降雨类型差异巨大,迎风坡面降雨量大且多为间歇性降雨,模型使用的雨量文件不可能代表整个小流域降雨实际分布。

3 条典型流域次降雨径流监测数据还同时有如下规律:模型对暴雨产生的大型径流预测偏差较小,对小降雨事件产生的径流预测偏差较大,这可能与径流监测系统对大径流事件的敏感性高于小径流事件的敏感性有关。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,对大型暴雨径流模拟值偏高^[5]。但 Polyakov^[6]等和本研究结果认为对于小型降雨径流事件,模型模拟值偏高,对大型暴雨径流事件,模型模拟值偏低。相反结论的原因可能是流域地形地貌特征的巨大差异。研究流域为山地流域,坡度大、土壤含砂量大、保水性差。小降雨事件发生时,土壤的渗透性相对较大,产生地表径流值偏低,暴雨径流发生时,土壤保水能力差,产生较大的地表和地中径流(AnnAGNPS 模型默认土壤不产生地中径流)在卡口处能迅速产生较大

径流和洪峰,这类流域与^[5]研究流域特征是不相同的。

由于缺乏秭归县域径流模拟监测数据,径流输出缺乏相应的验证。但从不同尺度 3 条典型流域输出结果和宜昌市水资源统计公报上看,模型对径流的输出模拟准确度较高,误差在可允许范围内。

2.2 泥沙输出

表 3 为 2006 年秭归县泥沙、总氮、总磷、有机碳等 NPS 污染物输出模拟。2006 年秭归县泥沙输出量为 4619494 t ($19.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

秭归县黑沟、兰陵溪、杉木溪等 3 条典型流域泥沙输出事件与模拟结果相比,模拟值与观测值间均存在偏差^[12],误差高于径流模拟误差,这进一步说明 AnnAGNPS 模型对泥沙输出模拟具有更高的不确定性。这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^[17]。模型在设计上对基流产生的泥沙输出并没有考虑,在实际中,部分泥沙是由于基流对河岸的侵蚀造成的,暴雨时,堤岸产生的侵蚀也会加剧,特别是模型对强降雨产生泥石流没有考虑。另外,AnnAGNPS 对流域的模拟均是假设资料数据绝对真实可靠,但任何数据总存在一定的误差和错误。

在模拟误差趋势上,多数相关文献,如 Polyakov^[6]等认为模型对流域较小降雨泥沙输出事件有偏低模拟趋势,对暴雨泥沙输出事件有偏高模拟趋势^[5,20]。但本研究结论与上述观点相反,认为模型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。原因可能为 AnnAGNPS 模型中泥沙输出是根据 RUSLE 计算法则,而 RUSLE 是基于上述规律来预测的;其次是由于流域特殊的地形和土壤地质条件造成的,如土壤含砂量高,质地松散,易于崩塌,河床冲蚀,这种地质现象在暴雨过程中更容易发生,甚至持续性小降雨事件也易产生土体崩塌事件,使泥沙输出变大。所以在秭归县三峡库区条件下使用 RUSLE 方程来预测泥沙输出进行流域管理有待于进一步改进。

2.3 营养物输出

2006 年,秭归县总氮输出为 28765 t (约 $122 \text{ kg}/\text{hm}^2$),总磷输出为 6694 t (约 $28 \text{ kg}/\text{hm}^2$),有机碳输出为 137019 t (约 $581 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。

黑沟流域、兰陵溪流域、杉木溪流域等 3 条典型流域营养物质模型模拟效率值^[7]平均为 0.44。模型对营养物质输出的不确定性更大,尽管模型对氮磷输出预测具有很大的不确定性,但 3 条流域均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^[5,7,20]。

AnnAGNPS 模型对营养物模拟效率较径流和泥沙低,可能是由于模型在自身设计中缺乏这方面的信息。如营养物质的取样和监测在实验室中进行,而植物吸收和营养物质循环等大量的参数则靠现场调查、估计或者使用不符合本地实际的模型参考文件,这些均影响到模型的模拟效率;模型对营养物模拟基础是质量守恒,输移过程中没有考虑二次沉淀吸附过程,营养物在输出与输入资料上的缺失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^[21]。

3 讨论

本研究首次利用高级流域管理模型 AnnAGNPS 来模拟行政区域内的非点源污染输出的动态变化,具有一定的理论和实践创新性。但 AnnAGNPS 模型主要是针对农业流域对管理措施的响应而设计的,秭归县域的 NPS 输出的不确定性主要有几个方面:

(1)模型对秭归县域面积模拟的不确定性 一般地,模型对流域面积的确定是通过 DEM 产生模拟河道与流域出口,由模型使用者选择流域出口位置,模型自动计算并确定上游流域边界与面积。本文矢量化 1:5 万地形图并生成 DEM,利用秭归县域边界切割 DEM,选择秭归县域边界与长江出口交点位置,重新生成流域(秭归县域)边界与面积(235560 hm^2),模拟面积略小于秭归县域面积 2427 km^2 ,误差为 2.94%,这可能是模拟结果不确定性的一个原因。

表 3 2006 年秭归县非点源污染物 AnnAGNPS model of Zigui county in 2006

Table 3 NPS pollutant exported by AnnaGNPS model of Zigui county in 2006													
日期 Date	悬移质 Suspended sediment/t			总氮 Total nitrogen/kg			总磷 Total phosphorus /kg			有机碳 Organic carbon/kg			
	粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	合计 Total	吸附 Attached	溶解 Dissolved	合计 Total	吸附 Attached	溶解 Dissolved		合计 Total		
2006-01-18	251.7	150.1	191.2	593.0	1330.0	1137.6	2467.6	1395.6	27696.5	29092.1	41266.6	6	
2006-02-05	418.4	335.9	451.9	1206.2	2209.0	796.3	3005.3	2317.9	21272.8	23590.7	68554.5	5	
2006-02-06	153.7	200.8	260.7	615.3	812.1	2514.0	3326.1	852.3	6455.9	7308.0	25196.4	4	
2006-02-12	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	0.0	3.2	26.2	1265.4	1291.7	0.0	0	
2006-02-13	105.2	44.1	52.1	201.5	555.4	981.2	1536.6	582.7	22601.9	23184.6	17233.7	7	
2006-02-16	2374.9	6328.1	5405.2	14108.1	9043.5	481361.2	490404.7	9197.0	75755.2	84952.2	275136.6	6	
2006-02-25	105.5	74.7	90.4	270.7	557.1	995.4	1552.5	584.6	22620.9	23205.5	17292.0	5	
2006-02-26	2066.5	5932.9	4654.4	12653.8	7870.5	410517.2	418387.6	8004.8	75872.1	83876.8	239643.8	8	
2006-02-27	23.5	155.8	0.0	179.3	124.2	1450.4	1574.6	130.2	27724.3	27854.5	3852.8	5	
2006-03-11	7711.5	25652.7	28590.1	61954.3	35783.1	638662.9	674445.9	36291.2	113292.2	149583.5	995079.6	6	
2006-03-12	170.5	1125.8	0.0	1296.2	923.8	6484.3	7408.2	950.5	28047.8	28998.4	27918.1	1	
2006-04-04	12369.0	15093.6	32707.4	60170.0	55961.4	621982.8	677944.2	56959.0	112765.9	169725.0	1593133.6	6	
2006-04-05	2148.6	4970.2	3331.8	10450.6	8171.8	359410.5	367582.3	8311.9	76610.3	84922.3	249606.7	3	
2006-04-08	74.9	496.3	0.0	571.2	394.8	2275.2	2670.0	414.3	27919.9	28334.1	12260.2	2	
2006-04-11	152.3	910.2	220.7	1283.3	802.8	2389.0	3191.8	842.3	27957.9	28800.2	24929.1	1	
2006-04-12	24693.0	83156.5	70712.3	178561.8	103875.4	980113.5	1083988.9	105071.0	141269.4	246340.2	4632816.1	1	
2006-04-13	11.5	16.8	19.1	47.4	60.5	1493.1	1553.6	63.5	27914.5	27977.9	1877.7	7	
2006-04-21	8347.6	12532.7	26235.1	47115.4	38334.6	513853.9	552188.5	39033.7	114926.7	153960.4	1090911.8	8	
2006-05-09	43752.7	112311.0	229575.9	385639.6	182395.5	904704.8	1087100.4	183170.5	144675.7	327846.2	6439102.3	3	
2006-05-10	26.1	172.9	0.0	198.9	137.6	2815.6	2953.2	144.4	28106.5	28250.9	4273.9	9	
2006-05-11	91.8	607.4	0.0	699.2	483.3	1692.2	2175.5	507.2	28093.0	28600.2	15014.9	9	
2006-05-12	115471.6	362393.0	38.2	477902.8	464843.4	906994.3	1371837.7	468285.3	144662.4	612947.9	16642959.7	7	
2006-06-23	290167.6	897559.6	0.0	1187727.2	1156464.6	961471.1	2117935.6	1163641.1	148037.6	1311678.6	41034471.4	4	
2006-06-26	323.4	2111.5	1.7	2436.7	1686.2	8133.8	9820.0	1768.8	29992.0	31760.8	52472.8	8	
2006-06-30	34550.5	26621.4	63421.4	124593.3	142249.6	553442.4	695692.0	143283.9	118256.2	261540.1	4142466.0	0	
2006-07-05	0.0	0.0	0.0	0.0	58.5	184.9	243.3	422.2	1728.1	2150.2	0.0	0	
2006-08-01	136072.8	415577.9	0.0	551650.7	535966.2	3490284.8	4026251.0	539465.1	150886.8	690351.9	19049486.0	2	
2006-08-03	77.3	510.0	0.0	587.3	403.5	6612.3	7015.8	423.4	29311.5	29735.0	12554.2	9	
2006-09-05	100576.0	160367.6	287546.9	548490.5	400315.3	3369642.3	3769957.6	401617.2	152845.6	554462.8	14011623.9	2	
2006-09-07	13747.3	31341.5	57552.1	102640.9	52086.1	2346001.4	2398087.5	51782.8	95443.2	147226.0	1555440.2	2	
2006-09-08	93292.2	284647.3	0.0	377939.5	361112.3	3217929.1	3579041.4	363362.7	152743.0	516105.7	12783720.8	8	
2006-09-27	29484.4	63221.5	39336.2	132042.0	116725.7	1412870.8	1529596.4	117253.4	121110.2	238363.5	3434057.8	5	
2006-09-28	41433.1	123368.9	72749.2	237551.3	160336.8	1734598.3	1894935.1	161247.1	153093.2	314340.2	6073054.1	1	
2006-09-29	11.1	48.8	71.3	131.1	57.5	3227.9	3285.5	60.4	29753.1	29813.5	1790.0	2	
2006-10-24	7856.2	8221.2	17084.5	33162.0	30750.9	799761.2	830512.2	30894.2	57125.9	88020.1	915117.2	2	
2006-11-14	6327.1	2969.8	7986.1	17283.0	24085.5	767055.2	791140.8	24085.5	27326.7	51412.3	714242.6	6	
2006-11-15	2131.3	4031.8	6613.1	12776.2	6790.1	90311.2	97101.3	6837.8	38295.6	45133.5	235244.9	9	
2006-11-22	1976.3	4159.2	6461.9	12597.3	6331.2	84907.6	91238.8	6379.9	38306.0	44685.7	219033.8	8	
2006-11-23	1650.2	4002.0	5658.9	11311.1	5362.4	83926.4	89288.8	5411.8	38273.5	43685.1	184826.2	2	
2006-11-27	1535.3	3733.4	5252.2	10520.9	4993.0	70716.1	75709.0	5039.6	38258.9	43298.3	172061.1	1	
2006-12-08	58.9	123.1	152.9	335.0	306.2	1308.2	1614.4	321.4	29941.8	30263.0	9544.3	3	

(2) AnnAGNPS 模型的适用性 AnnAGNPS 模型是在美国地形较平坦,降雨较不集中,侵蚀形式主要是不考虑重力侵蚀的细沟和细沟间侵蚀,流域农场经营方式,耕作制度、施肥(农药)数据统一且易于获取的情况下建立的。秭归县农业为农户分散经营模式,耕作施肥(农药)方式不一,数据不易获取且不确定性高;秭归县地形平均坡度较高,全为景观破碎山地流域;土地利用为农林间作、以林为主的复合利用方式。为真实表达这种土地利用方式,采用 30m 的 DEM,CSA 和 MSCL 取值分别为 1 hm^2 和 30 m,区划为 1966 个空间离散单元,最大限度地减小各类输入参数的聚合误差^[7]。但这种子流域区划方式增加了模型处理的数据量,减小了模型处理面积的限值。

(3) DEM 尺度与研究区尺度匹配 研究中所选 DEM 应能足够代表坡度因素的空间变化,保证模型的正确运用^[9-10]。受 DEM 数据获得途径的限制,地学模型中 DEM 尺度与流域尺度匹配问题并没有一致性的结论。虽然有关学者对 DEM 尺度和流域尺度进行了相关研究^[9-10,22-23],并建议使用合理格网的 DEM 来尽可能地反映流域空间特征,但这些研究均没有涉及使用这些格网 DEM 的合理理由。一般认为小尺度 DEM 能提供更为准确的地形参数,大尺度流域要使用大格网尺度的 DEM,小尺度流域要使用小格网尺度 DEM,对局部进行细致处理时应使用更小格网尺度的 DEM^[24]。秭归县 DEM 尺度取 20 m 时产生的数据量已超出模型处理的限值,取 50 m 以上时已不能详尽表述秭归县复杂的地形,DEM 精度对秭归县 NPS 输出的影响以及最佳 DEM 尺度的选择还缺乏科学的研究。

(4) 模型输出结果的不确定性 黑沟、兰陵溪、杉木溪等 3 条典型流域 NPS 输出误差均在可接受范围之内^[7,16,25-28],输出误差均表现为径流<泥沙<营养物质。模型对秭归县 NPS 输出时,缺乏全县监测数据对输入参数进行率定。但从 3 个不同面积典型流域模型 PEST 优化参数结果上看,模型输入参数值基本上没有发生大的变化。黑沟、兰陵溪、杉木溪、秭归县,虽然尺度不同,但地形、土壤特征相似,研究中把已率定的 3 个典型流域参数值应用于全县域 NPS 输出,有一定的科学依据。从模拟结果上看,地表径流量误差在可接受的范围之内,泥沙和养分输出不确定性可能会较大,但与相关研究结论^[7,25-28]和当地政府统计公报数据较为符合,表明模型对秭归县 NPS 的模拟有一定的科学性。

4 结论

(1) 模型对秭归县 NPS 输出具有不确定性,不确定性因素包括模型自身的设计缺陷、输入参数以及模型的适用性。

(2) AnnAGNPS 模型对秭归县黑沟、兰陵溪、杉木溪等 3 条典型流域的径流模拟误差均在可接受范围之内,说明模型中采用的径流预测(SCS 曲线)法对研究区是合适的;对泥沙输出量的模拟误差较高,对氮磷等养分输出的模拟误差最高,可通过调整 RUSLE 和 HUSLE 等子模型的输入参数来减小泥沙模拟误差;模型对径流模拟能力高于对泥沙和养分的模拟;对较小降雨径流事件,模型的泥沙和养分模拟有偏大趋势,而对较大降雨径流事件,泥沙和养分模拟有偏小趋势。

(3) 秭归县 2006 年地表径流量为 363 mm,泥沙输出为 19.6 t/hm^2 ,总氮输出为 122 kg/hm^2 ,总磷输出为 28 kg/hm^2 ,有机碳输出为 581 kg/hm^2 ,模拟结果与相关文献研究和政府统计数据较为相符。

(4) AnnAGNPS 模型对秭归县泥沙和营养物质等模拟方式有待进一步改进,使之更好地成为 NPS 管理和调控工具。

References:

- [1] Chen X, Wang Z Q, Yang W D, Ye X J. Effects of sloping land use patterns on phosphorus loss in micro-watershed of red soil area, Southern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 374-377.
- [2] Wang F E, Lu H C, Chen Y H, Wang D. Prediction of output loading of nitrogen and phosphorus from Qiandao Lake watershed based on AnnAGNPS model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(6): 281-284.
- [3] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST. *Environmental Modelling and Software*, 2003, 18(8/9): 801-808.

- [4] Hong H S, Huang J L, Zhang L P, Du P F. Modelling pollutant loads and management alternatives in Jiulong River Watershed with AnnAGNPS. *Environmental Science*, 2005, 26(4): 63-69.
- [5] Shrestha S, Babel M S, Gupta A D, Kazama F. Evaluation of annualized agricultural nonpoint source model for a watershed in the Siwalik Hills of Nepal. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21(7): 961-975.
- [6] Polyakov V, Fares A, Kubo D, Jacobi J, Smith C. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22(11): 1617-1627.
- [7] Huang Z L, Tian YW, Xiao W F, Zeng L X, Ma D J. Nonpoint source pollution model, AnnAGNPS, assessment for a mixed forested watershed in Three Gorges Reservoir area. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2009, 30(10): 2872-2878.
- [8] Bingner R L, Theurer F D. AnnAGNPS Technical Processes Documentation. Version USDA-ARS, 2005.
- [9] Wu S, Li J, Huang G. An evaluation of grid size uncertainty in empirical soil loss modeling with digital elevation models. *Environmental Modeling and Assessment*, 2005, 10(1): 33-42.
- [10] Tian YW, Huang Z L, Zeng L X, Xiao W F, Ma D J. Impact of DEM mesh size on AnnAGNPS runoff and sediment predictions for a small-scale hilly watershed. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 846-853.
- [11] Tang G A, Zhao M D, Li T W, Liu Y M, Xie Y L. Modeling slope uncertainty derived from DEMs in loess plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(6): 824-830.
- [12] Huang Z L, Tian YW, Xiao W F, Zeng L X, Ma D J. Impact of parameter spatial aggregation on AnnAGNPS predictions for Heigou watershed in Three Gorges Reservoir area conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6681-6690.
- [13] Jia N F, Li X L, Chen H W, Duan J N, Li B G, Guo Q X. Database construction for AnnAGNPS model — case study of Zhuangyagou watershed in Hilly-gully Loess Plateau. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 436-441.
- [14] Lu Y D, Yin G Z, Xiong Y S, He B H. The relationship between soil erosion and vegetation coverage on the basis of TM image interpretation in Nanchan city, Chongqing. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, 28(4): 72-75.
- [15] Cheng H G, Hao F H, Ren X Y, Yang S T, Xiogn W, Lei S P. The study of the rate loss of nitrogenous non-point source pollution loads in different precipitation levels. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 392-397.
- [16] Chiew F H S, Stewardson M J, McMahon T A. Comparison of six rainfall-runoff modelling approaches. *Journal of Hydrology*, 1993, 147(1/4): 1-36.
- [17] Huang Z L, Tian Y W, Xiao W F. AGNPS model and factors affecting its prediction deviation. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1806-1813.
- [18] Grunwald S, Norton L D. Calibration and validation of a non-point source pollution model. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(1): 17-39.
- [19] Garen D, Woodward D, Geter F. A user agency's view of hydrologic, soil erosion and water quality modeling. *Catena*, 1999, 37(3/4): 277-289.
- [20] Shamshad A, Leow C S, Ramiah A, Wan Hussin W M A, Sanusi S A M. Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(3): 239-252.
- [21] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AGNPS) on Augucho catchment, Western Hararghe, Ethiopia. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 2003, 99(1/3): 201-212.
- [22] Olsen P, Kristensen P R. Using a GIS system in mapping risks of nitrate leaching and erosion on the basis of SOIL/SOIL-N and USLE simulations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 50(1/3): 307-311.
- [23] Fistikoglu O, Harmancioglu N B. Integration of GIS with USLE in assessment of soil erosion. *Water Resources Management*, 2002, 16(6): 447-467.
- [24] Blöschl G, Sivapalan M. Scale issues in hydrological modeling: a review. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3/4): 251-290.
- [25] Xiang W S, Liang C F, Li W H. Soil and water loss from cultivated slope land derived from granite under different cropping systems in Three-Gorges reservoir areas. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 47-50.
- [26] Hua L Z, He X B, Yan C Z, Wei J, Nan H W. Evaluation for AnnAGNPS Model parameters in Daning River Watershed of Three Gorges Reservoir region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(4): 65-69, 74.
- [27] Xu Q G, Liu H L, Shen Z Y, Xi B D. Characteristics on nitrogen and phosphorus losses in the typical small watershed of the Three Georges Reservoir area. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 326-331.
- [28] Yu H, Shen Y Z. Analyzing parameter uncertainty of the non-point source pollution in Daning River of the Three Gorges Reservoir area. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 554-558.

参考文献:

- [1] 陈欣, 王兆骞, 杨武德, 叶旭君. 红壤小流域坡地不同利用方式对土壤磷素流失的影响. *生态学报*, 2000, 20(3): 374-377.

- [2] 王飞儿, 吕唤春, 陈英旭, 王栋. 基于 AnnAGNPS 模型的千岛湖流域氮、磷输出总量预测. 农业工程学报, 2003, 19(6): 281-284.
- [4] 洪华生, 黄金良, 张珞平, 杜鹏飞. AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用. 环境科学, 2005, 26(4): 63-69.
- [7] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 曾立雄, 马德举. 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. 环境科学, 2009, 30(10): 2872-2878.
- [10] 田耀武, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 马德举. DEM 格网尺度对 AnnAGNPS 预测山地小流域径流和物质输出的影响. 环境科学学报, 2009, 29(4): 846-853.
- [11] 汤国安, 赵牡丹, 李天文, 刘咏梅, 谢元礼. DEM 提取黄土高原地面坡度的不确定性. 地理学报, 2003, 58(6): 824-830.
- [12] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 曾立雄, 马德举. 三峡库区黑沟流域 AnnAGNPS 参数空间聚合效应. 生态学报, 2009, 29(12): 6681-6690.
- [13] 贾宁凤, 李旭霖, 陈焕伟, 段建南, 李保国, 郭青霞. AnnAGNPS 模型数据库的建立——以黄土丘陵沟壑区砖窑沟流域为例. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 436-441.
- [14] 卢玉东, 尹光志, 熊有胜, 何丙辉. 应用 TM 图像分析重庆南川市土壤侵蚀与植被覆盖度的关系. 南京农业大学学报, 2005, 28(4): 72-75.
- [15] 程红光, 郝芳华, 任希岩, 杨胜天, 熊文, 雷少平. 不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究. 环境科学学报, 2006, 26(3): 392-397.
- [17] 黄志霖, 田耀武, 肖文发. AGNPS 模型机理与预测偏差影响因素. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1806-1813.
- [25] 向万胜, 梁称福, 李卫红. 三峡库区花岗岩坡耕地不同种植方式下水土流失定位研究. 应用生态学报, 2001, 12(1): 47-50.
- [26] 花利忠, 贺秀斌, 颜昌宙, 韦杰, 南宏伟. 三峡库区大宁河流域 AnnAGNPS 模型参数评价. 水土保持学报, 2008, 22(4): 65-69, 74.
- [27] 许其功, 刘鸿亮, 沈珍瑶, 席北斗. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征. 环境科学学报, 2007, 27(2): 326-331.
- [28] 余红, 沈珍瑶. 三峡水库大宁河流域非点源污染参数的不确定性分析. 中国环境科学, 2007, 27(4): 554-558.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.31 ,No. 16 August ,2011 (Semimonthly)

CONTENTS

A comparative study on the diversity of rhizospheric bacteria community structure in constructed wetland and natural wetland with reed domination	WANG Zhongqiong, WANG Weidong, ZHU Guibing, et al (4489)
Light response of photosynthesis and its simulation in leaves of <i>Prunus sibirica</i> L. under different soil water conditions	LANG Ying, ZHANG Guangcan, ZHANG Zhengkun, et al (4499)
Effects of colour shading on the yield and main biochemical components of summer-autumn tea and spring tea in a hilly tea field	QIN Zhimin, FU Xiaoqing, XIAO Runlin, et al (4509)
Effects of cadmium on the contents of phytohormones, photosynthetic performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves	WU Kun, WU Zhonghong, TAI Fujun, et al (4517)
Comparative physiological responses of cadmium stress on <i>Enteromorpha clathrata</i> and <i>Enteromorpha linza</i>	JIANG Heping, ZHENG Qingsong, ZHU Ming, et al (4525)
Effects of salt stress on glucosinolate contents in <i>Arabidopsis thaliana</i> and <i>Thellungiella halophila</i> rosette leaves	PANG Qiuying, CHEN Sixue, YU Tao, et al (4534)
Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field	GAO Jusheng, CAO Weidong, LI Dongchu, et al (4542)
Nitrogen balance in the farmland system based on water balance in Hetao irrigation district, Inner Mongolia	DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al (4549)
Seed characteristics and seedling growth of <i>Spartina alterniflora</i> on coastal wetland of North Jiangsu	XU Weiwei, WANG Guoxiang, LIU Jin'e, et al (4560)
Assessment of non-point source pollution export from Zigui county in the Three Gorges Reservoir area using the AnnAGNPS model	TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa (4568)
Effects of Cadmium pollution on oxidative stress and metallothionein content in <i>Pirata subpiraticus</i> (Araneae: Lycosidae) in different habitats	ZHANG Zhengtian, PANG Zhenling, XIA Min, et al (4579)
The distribution of size-fractionated chlorophyll a in the Indian Ocean South Equatorial Current	ZHOU Yadong, WANG Chunsheng, WANG Xiaogu, et al (4586)
Change of waterbird community structure after the intertidal mudflat reclamation in the Yangtze River Mouth: a case study of NanHui Dongtan area	ZHANG Bin, YUAN Xiao, PEI Enle, et al (4599)
Application of fish assemblage integrity index (FAII) in the environment quality assessment of surf zone of Yangtze River estuary	MAO Chengze, ZHONG Junsheng, JIANG Rijin, et al (4609)
Population age structure of Antarctic krill <i>Euphausia superba</i> off the northern Antarctic Peninsula based on fishery survey	ZHU Guoping, WU Qiang, FENG Chunlei, et al (4620)
Validation and adaptability evaluation of rice growth model ORYZA2000 in double cropping rice area of Hunan Province	MO Zhihong, FENG Liping, ZOU Haiping, et al (4628)
Coupled energy and carbon balance analysis under dryland tillage systems	WANG Xiaobin, WANG Yan, DAI Kuai, et al (4638)
The nitrate-nitrogen leaching amount in paddy winter-spring fallow period	WANG Yongsheng, YANG Shiqi (4653)
The sources of organic carbon and nitrogen in sediment of Taihu Lake	NI Zhaoxui, LI Yuejin, WANG Shengrui, et al (4661)
Effect of partial solar eclipse on airborne culturable bacterial community in Urumqi	MA Jing, SUN Jian, ZHANG Tao, et al (4671)
Comparative study on density related intra- and inter-specific effects in <i>Laodelphax striatellus</i> (Fallen) and <i>Nilaparvata lugens</i> (Stål)	LÜ Jin, CAO Tingting, WANG Liping, et al (4680)
Behavior rhythm and seasonal variation of time budget of sun bear (<i>Helarctos malayanus</i>) in captivity	LAN Cunzi, LIU Zhensheng, WANG Aishan, et al (4689)
Disturbance regimes and gaps characteristics of the desert riparian forest at the middle reaches of Tarim River	HAN Lu, WANG Haizhen, CHEN Jiali, et al (4699)
Death causes and conservation strategies of the annual regenerated seedlings of rare plant, <i>Bretschneidera sinensis</i>	QIAO Qi, QIN Xinsong, XING Fuwu, et al (4709)
Effects of municipal compost extracted complex microbial communities on physio-ecological characteristics of turfgrass under drought stress	DUO Lian, WANG Jingjing, ZHAO Shulan (4717)
Spatiotemporal relationship of leaf area index simulated by CLM3.0-DGVM and climatic factors	SHAO Pu, ZENG Xiaodong (4725)
Analysis of circular economy of Liaoning Province based on eco-efficiency	HAN Ruiling, TONG Lianjun, SONG Yanan (4732)
Review and Monograph	
The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement	CAO Zhiping, LI Depeng, HAN Xuemei (4741)
Indicators for evaluating sustainable communities: a review	ZHOU Chuanbin, DAI Xin, WANG Rusong, et al (4749)
Discussion	
Differential expression of <i>PAL</i> multigene family in allelopathic rice and its counterpart exposed to stressful conditions	FANG Changxun, WANG Qingshui, YU Yan, et al (4760)
Scientific Note	
Ecology study on the benthic animals of QinZhou Bay	WANG Di, CHEN Pimao, MA Yuan (4768)
Change characteristics of soil carbon and nitrogen contents in the Yellow River Delta soil after artificial restoration	DONG Kaikai, WANG Hui, YANG Liyuan, et al (4778)
Estimation and spatial pattern analysis of forest biomass in Fenglin Nature Reserve based on Geostatistics	LIU Xiaomei, BU Rencang, DENG Huawei, et al (4783)
Study on sap flow in forest of <i>Quercus liaotungensis</i> and <i>Populus davidiana</i> by using the TDP method	SUI Xuhong, ZHANG Jianjun, WEN Wanrong (4791)
N ₂ O Emission and its driving factors from typical marsh and shrub swamp in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China	SHI Lanying, MU Changcheng, TIAN Xinmin, et al (4799)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 16 期 (2011 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 16 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元