

# AnnAGNPS 模型在九龙江流域农业非点源污染模拟应用

洪华生<sup>1</sup>, 黄金良<sup>1, 2\*</sup>, 张珞平<sup>1</sup>, 杜鹏飞<sup>2</sup>

(1. 厦门大学教育部海洋环境科学重点实验室, 厦门大学环境科学研究中心, 厦门 361005; 2. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘要:**运用连续-分布式参数模型(Annualized Agricultural NonPoint Source Model, AnnAGNPS)进行中国南方山区中等尺度流域——九龙江流域农业非点源污染负荷估算和对流域过程和管理措施的模拟. 利用 4 个典型汇水区校正模型参数, 并进一步在九龙江的北溪和西溪两大支流流域验证模型的适宜性. 以此为基础模拟西溪总氮负荷为 24.76kg/(hm<sup>2</sup>·a), 总磷负荷为 0.67kg/(hm<sup>2</sup>·a); 北溪总氮负荷 10.28kg/(hm<sup>2</sup>·a), 总磷负荷为 0.40kg/(hm<sup>2</sup>·a). 运用 AnnAGNPS 模型对典型汇水区特定集水单元、西溪和北溪流域的土地利用管理措施进行分别模拟. 模拟结果显示坡地种植退耕返林后, 天宝仙都集水单元 92 地表径流、泥沙、总氮和总磷负荷可分别削减了 21.6%、25.9%、96% 和 79.2%; 下庄集水单元 93 地表径流、泥沙总氮和总磷负荷削减率分别为 94.1%、54.9%、99.2% 和 79.7%; 模拟西溪香蕉地改种双季稻, 西溪总氮、可溶态氮、总磷和可溶性磷依次削减了 23.83%、25.44%、9.08% 和 19.84%; 模拟北溪流域内生猪场全部搬迁, 流域出口总氮和可溶态氮的削减率分别为 63.54% 和 76.92%.

**关键词:** AnnAGNPS; GIS; 非点源污染; 九龙江流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)04-0063-07

## Modelling Pollutant Loads and Management Alternatives in Jiulong River Watershed with AnnAGNPS

HONG Hua-sheng<sup>1</sup>, HUANG Jin-liang<sup>1, 2</sup>, ZHANG Luo-ping<sup>1</sup>, DU Peng-fei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Marine Environmental Science of Ministry of Education, Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The modelling package Annualized Agricultural Nonpoint Source Model (AnnAGNPS) was used to predict pollutant loads, and simulate catchment processes and management practices in Jiulong River watershed, a medium-sized mountainous watershed in southeast of China. Four typical sub-watersheds were primarily chosen to calibrate AnnAGNPS model by data collected from storm events during the period of April to September, 2003. The model was further validated in the two biggest branches of Jiulong River watershed, i.e. West river and North river by the data regarding climate, and land using condition in 2002~2003. The simulation results show that annual total nitrogen load was 24.76kg/(hm<sup>2</sup>·a) and 10.28kg/(hm<sup>2</sup>·a) in the West river and North river, respectively, and annual total phosphorus load was 0.67kg/(hm<sup>2</sup>·a) and 0.40kg/(hm<sup>2</sup>·a) in the West river and North river, respectively. With the support of AnnAGNPS model, several management alternatives were separately simulated in the typical sub-watersheds, West river and North river. In the specific cell with cell-ID of 92 in Tianbao and Xiandu sub-watershed, after reforesting in sloping field, runoff surface, sediment yield, total nitrogen load and total phosphorus load cut down with 21.6%, 25.9%, 96% and 79.2%, respectively. In West river, with the cultivation plant changing from banana into rice, the total nitrogen, dissolved nitrogen, total phosphorus and dissolved phosphorus cut down with 23.83%, 25.44%, 9.08% and 19.84%, respectively. In North river, when removing all the hoggerys, nitrogen and dissolved nitrogen cut down with 63.54% and 76.92%, respectively.

**Key words:** AnnAGNPS; GIS; non-point source pollution; Jiulong river watershed

20 世纪 90 年代以来, SWAT、AnnAGNPS、BASINS 等大型的连续-分布式参数机理模型应运而生. GIS 与 AnnAGNPS、SWAT 等机理模型集成, 成为当今农业非点源污染研究的主要手段和方向之一, 已被广泛地应用于进行非点源污染机理过程模拟、探讨污染负荷时空分布、标识关键源区、模拟非点源管理方案, 提供最佳管理措施等<sup>[1, 2]</sup>. 在我国, 20 世纪 90 年代中后期, 随着国外环境模型的介绍引入<sup>[3, 4]</sup>, 以及 GIS 技术在中国的逐渐推广, GIS 作

为有效的空间数据采集、管理、分析的工具, 与农业非点源污染模型如 USLE、ANSWERS 进行土壤侵蚀量的预测研究<sup>[5~8]</sup>. 本世纪初, 以 GIS 和模型为研究手段的农业非点源污染控制研究在我国方兴未艾, 非点源污染半机理、机理模型如 AGNPS、

收稿日期: 2004-09-23; 修订日期: 2004-12-03

基金项目: 福建省科技重大攻关项目(2002H009).

作者简介: 洪华生(1944~), 女, 博士, 教授; 研究方向为环境科学与管理.

\* 通讯联系人: jlhuan@tsinghua.edu.cn

AnnAGNPS SWAT 开始被引入我国检验其适宜性<sup>[9-12]</sup>。本研究采用野外采样和室内分析相结合,点(典型汇水区)和面(全流域尺度)相结合, GIS 和 AnnAGNPS 模型相结合的研究方法,在对模型校验的前提下,对中国南方山区中尺度流域——九龙江流域进行地表径流氮磷流失的模拟预测,并对非点源污染管理方案进行了模拟研究,以期为流域水环境的科学治理提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 模型介绍

AnnAGNPS(Annualized Agricultural Non-point Source Pollution Model)是由美国农业部开发研制而成的用于模拟评估流域地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的连续型分布式参数模型。其前期版本是单一事件分布式模型 AGNPS。与 AGNPS 相比, AnnAGNPS 模型的改进之处在于:以日为基础连续模拟一个时段内每天及累计的径流、泥沙、养分、农药等输出结果,可用于评价流域内非点源污染长期影响;根据地形水文特征进行流域集水单元(cell)的划分,且模拟的流域尺度更大;与 GIS 较好地集成,模型参数大多可自动提取,模拟结果的显示度得以显著提高;采用 RUSLE 预测泥沙生成,等等。

AnnAGNPS 模型采用 SCS-CN 径流曲线方程计算地表径流量,并按每日的耕作、土壤水分和作物情况,相应调整曲线数。其中土壤前期水分条件由 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。模型中地表泥沙侵蚀量的计算采用了修正的通用土壤流失方程(RUSLE)。模型逐日计算各单元内氮、磷和有机碳的营养盐状况,包括作物对氮磷的吸收、施肥、残留的降解和氮磷的迁移等。氮磷和有机碳的输出按可溶态和颗粒吸附态分别计算,并采用了一组动力学方程计算平衡浓度。作物对可溶态营养盐的吸收计算,则采用了简单的作物生长阶段指数。采用与 CREAMS 模型相同的公式计算氮、磷的可溶态浓度和颗粒态浓度。

AnnAGNPS 模型主要由 3 部分组成:参数准备模块、污染负荷计算模块以及污染负荷输出模块。

值得强调的是,由于 AnnAGNPS 与 Arc View 实现了紧密集成,模型所需的地理参数可通过 AnnAGNPS-Arc View 界面自动提取,并导入至 Input Editor 模型参数输入模块,模拟的输出结果文件可通过 Arc View 的数据库链接,得到每一个集水单元

的单位时段各种非点源污染输出,模拟结果的显示度得以显著提高。

### 1.2 试验设计与方法

采用实地地表径流监测方法,对 4 个典型汇水区出口处进行天然降雨径流的定点监测。同步监测每场次降雨过程的径流量和氮磷输出浓度。样品的采集频率为雨前采集 1 次,降雨过程中视雨量大小采样,若强度较大,则加密采样(一般 0.5 h 采集 1 次),对低强度降雨,适当延长采样时间间隔,采样持续至降雨结束后的若干小时,以汇水区出水口径流量基本恢复正常水平为准。每次取样 1 000 mL,取样时静置 15 min 左右,以测定氮磷浓度。由于各汇水区离气象站在 30 km 以内,各场次降雨采用龙岩、漳州气象局提供的逐小时雨量数据。

采集的样品在 24h 内送回实验室进行测定。样品分析项目包括:流量;总氮;可溶态氮;颗粒态氮;总磷;可溶态磷;颗粒态磷。分析项目的实验方法采用《水和废水监测分析方法(第四版)》<sup>[13]</sup>分析。其中,总氮采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;总磷采用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法。水样经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后,滤液与总氮、总磷同法测得可溶态氮与可溶态磷,颗粒态氮磷为总氮、总磷与可溶态氮磷之差。

### 1.3 流域概况

九龙江是福建省第 2 大河流,位于东经 116°46'55"~118°02'17",北纬 24°23'53"~25°53'38",地处福建省经济较为发达的东南沿海,流经农业集约化水平较高的漳州平原。由发源于龙岩梅花山一带的北溪和发源于南靖与平和县西部板寮岭的西溪两大支流构成。

九龙江流域地势自西北向东南倾斜,地貌类型以中、低山为主。地跨南亚热带和中亚热带,绝大部分区域属亚热带海洋性季风气候。气温及降雨的时空差异较显著。多年平均气温 19.9~21.1℃左右,年均气温的总体变化趋势是由东南向西北递减。多年平均降水量 1 400~1 800 mm,年均雨量由沿海向内地递增,平和部分区域年均雨量达到 1 600 mm 以上,漳平的部分区域年均雨量则小于 1 600 mm。据全国第二次土壤调查资料,九龙江流域共有 12 个土类,41 个亚类(土属)。流域土壤主要为红壤、赤红壤、黄壤等地带性土壤和水稻土等人为土,以上各类型分布面积约占流域总面积的 95%,其中:红壤面积最大,约占全流域的 62%,赤红壤次之,约占 16%,黄壤和水稻土分别约占 8%和 9%。流域森林

覆盖度 60 %以上,植被种类繁多.

### 2 AnnAGNPS 模型的模拟应用

#### 2.1 模型参数率定和校正

AnnAGNPS 包括 23 类参数,约 500 余个参数.所有的参数统一由 AnnAGNPS 参数准备模块 Input Editor 管理.模型参数的取值上,并非所有的参数都是必需的,如牲畜点源.施用杀虫剂参数等;对于一些不易确定的参数,可参照模型提供的典型值或默认值.此外,一些模型参数的取值如径流曲线( Curve

Number, CN) 值等需参阅相关文献资料如美国农业手册等,再根据流域的土地利用.土壤性状等实际状况进行参数率定,具体见表 1.

本研究利用 AnnAGNPS- Arc View 紧密集成界面,运行 TopAGNPS 模块对数字高程模型( Digital Elevation Model, DEM) 进行处理,划分汇水区集水区单元.获得集水区边界.水系分布.面积.海拔高度.坡度坡长等地理参数.为污染负荷计算模块的运行提供参数输入准备.地理参数确定流程如图 1 所示.

表 1 模型参数的取值来源

Table 1 Source for parameters and variables of AnnAGNPS model

输入参数类	参数文件或数据源	输入参数类	参数文件或数据源
AnnAGNPS 模型标识	视实际情况而定	非作物相关参数	土地利用图.调查资料等
集水单元参数	AnnAGNP_Cell.dat	输出设置参数	视实际情况而定
逐日气象参数	DayClim.inp	农药参数	土地利用图.调查资料等
等高耕作参数	土地利用图.调查资料等	点源参数	土地利用图.调查资料等
作物参数	土地利用图.调查资料等	集水区参数	AnnAGNPS-Reach.dat
养殖场参数	土地利用图.调查资料等	CN 值参数	土地利用图.土壤等
化肥施用参数	土地利用图.调查资料等	模拟时段参数	视实际情况而定
田间池塘参数	土地利用图.调查资料等	土壤参数	土壤图.实验.调查资料
溪谷参数	土地利用图.调查资料等	等高条植作物参数	土地利用图.调查资料等
水坝参数	土地利用图.调查资料等	排水沟参数	土地利用图.调查资料等
灌溉参数	土地利用图.调查资料等	流域参数	视实际情况而定
作物管理参数	土地利用图.调查资料等		

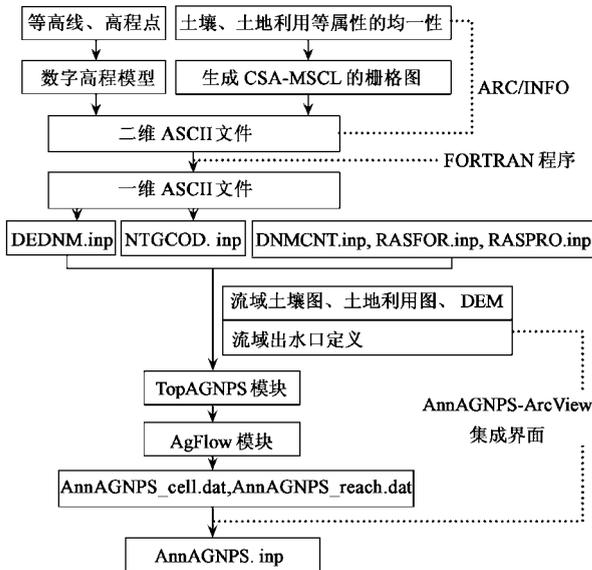


图 1 AnnAGNPS 模型地理参数确定流程图

Fig.1 The flow chart of generating topographic parameters by AnnAGNPS

输出的集水单元( Cell) 参数文件 AnnAGNPS. cell. dat 包括各集水单元的面积.高程.坡向.坡度坡长等;集水区( Reach) 参数 AnnAGNPS. reach. dat 包

括各集水区面积.高程.坡度.坡长等,两者可通过 Input Editor 模块直接导入污染负荷模块模拟运算.

AnnAGNPS- Arc View 界面可将集水区文件( subwa. shp) 与流域土壤图和土地利用图分别进行空间叠加运算,获得各集水单元的主要土壤类型和主要土地利用类型,以便通过 Input Editor 模块录入至 AnnAGNPS. inp 文件中.

GIS 被用于采集.管理和分析 AnnAGNPS 模型参数所涉及到的空间数据,包括:集水区边界.水系. DEM.土地利用类型图.土壤图等.在典型汇水区,结合汇水区 1: 1 万全要素地形图在野外勾绘典型汇水区流域界线.水系和土地利用现状图,并数字化地形图上的等高线( 等高距为 5 m), 利用 ARC/ INFO 制作各汇水区的 DEM;结合漳州市和龙岩市全国第二次土壤普查的土壤图,利用各汇水区的边界对其进行切边等空间处理,生成各汇水区的土壤图.通过田间调查流域的作物耕作制度.化肥农药施用量等,进行各汇水区土壤采样,测试土壤的机械组成.有机质含量和土壤全氮全磷含量,并结合全国第二次土壤普查资料获得各汇水区的土壤容重等土壤属性数据.对于全流域空间数据,利用 ARC/ INFO 对福建

省基础地理信息中心提供的 46 幅 1:5 万原始 DEMs 进行拼接,生成集水区边界,切边生成流域 DEM;利用 ERDAS 软件对流域 2002-12 TM 卫片进行非监督分类,获得了 13 类用地类型;土壤图取自全国第二次土壤普查调绘的 1:20 万土壤图。

根据土地利用、地形地貌等因素的代表性和典型性,在九龙江流域选取了 4 个典型汇水区,并于 2003-04 ~ 2003-10 进行暴雨事件的地表径流氮磷输出的同步监测,详见文献[14]。采用 AnnAGNPS 模型分别对 4 个典型汇水区进行空间离散化,利用上述步骤进行参数率定,通过模拟值与实测值对照,校正模型参数,取得适合九龙江流域的模型参数系统。

## 2.2 模型的验证

在典型汇水区 AnnAGNPS 模型参数校正的基础上,为了减少模型的不确定性,结合流域的自然特征,将流域分为西溪流域(以郑店水文站作为出水口)和北溪流域(以浦南水文站作为出水口)进行分别模拟,采用 2002 ~ 2003 年流域主要水文站的径流和泥沙数据和省控断面的水质监测数据进一步验证模型在九龙江流域的适用性。图 2 为运用 AnnAGNPS-Arc View 界面对北溪和西溪流域空间集水单元的划分。

## 2.3 模型表现评估

(1)评价指标 校正模型参数的过程,是反复调

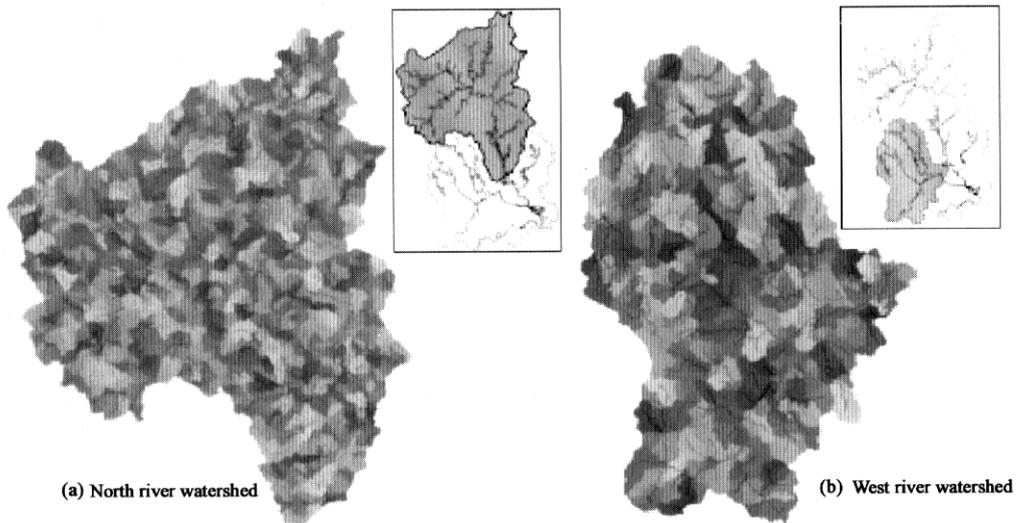


图 2 九龙江北溪浦南断面 (a)和西溪郑店断面 (b)上游集水单元空间分布

Fig.2 Cells divisions for West river and North river by AnnAGNPS-Arc View interface

试的过程,采用 2 个指标来表征模型实测值与模拟值的拟合度。

模拟偏差 ( $D_v$ ),计算公式如式(1):

$$D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100 \quad (1)$$

式中,  $V$  为模型模拟值,  $V'$  为实测值,  $D_v$  值越趋向于 0,则拟合度越好。

绘制 1:1 连线图和回归曲线,反映径流、泥沙及氮磷营养盐的拟合度。在 1:1 连线图上,数据点越接近于 1:1 连线,则拟合度越高。回归系数  $R^2$  越大,则表示实测值与模拟值的相关关系越好。

(2)典型汇水区模拟评估 通过在 4 个具有代表性和典型性的汇水区,即:天宝、仙都、下庄和雁石等的模拟,校正了 AnnAGNPS 模型,评估了模型对于九龙江流域平地果园(下庄)、坡地果园(天宝)、水田(雁石)、蔬菜地(仙都)等用地类型地表径流、泥沙

输出和氮磷流失负荷的模拟表现能力。通过汇水区校正了模型,整合了模型参数,为模拟尺度转化,AnnAGNPS 在全流域的验证和模拟应用奠定了基础。其结果见图 3。由图 3 可见,模型对于暴雨事件的地表径流输出模拟偏差多在  $\pm 10\%$  以内,反映了模型对地表径流的模拟能力很强;氮负荷输出的拟合度很高,模拟偏差在  $\pm 5\%$  以内;可溶态磷的模拟精度一般,基本处于可接受范围,汇水区 7 次降雨有 5 次模拟偏差在  $\pm 20\%$  以内。总磷和泥沙输出的模拟表现了较大的不确定性,个别汇水区个别降雨场次模拟值与实测值或是吻合甚好或是偏差很大。

(3)全流域尺度模拟评估 模型本身存在局限性,如不考虑降雨的空间变异,这限制了流域模拟尺度不宜太大。而九龙江流域面积较大,加之丘陵山地为主,地形较破碎,降雨的空间变异性很大。为了减少模型的不确定性,结合流域的自然特征,将流域分

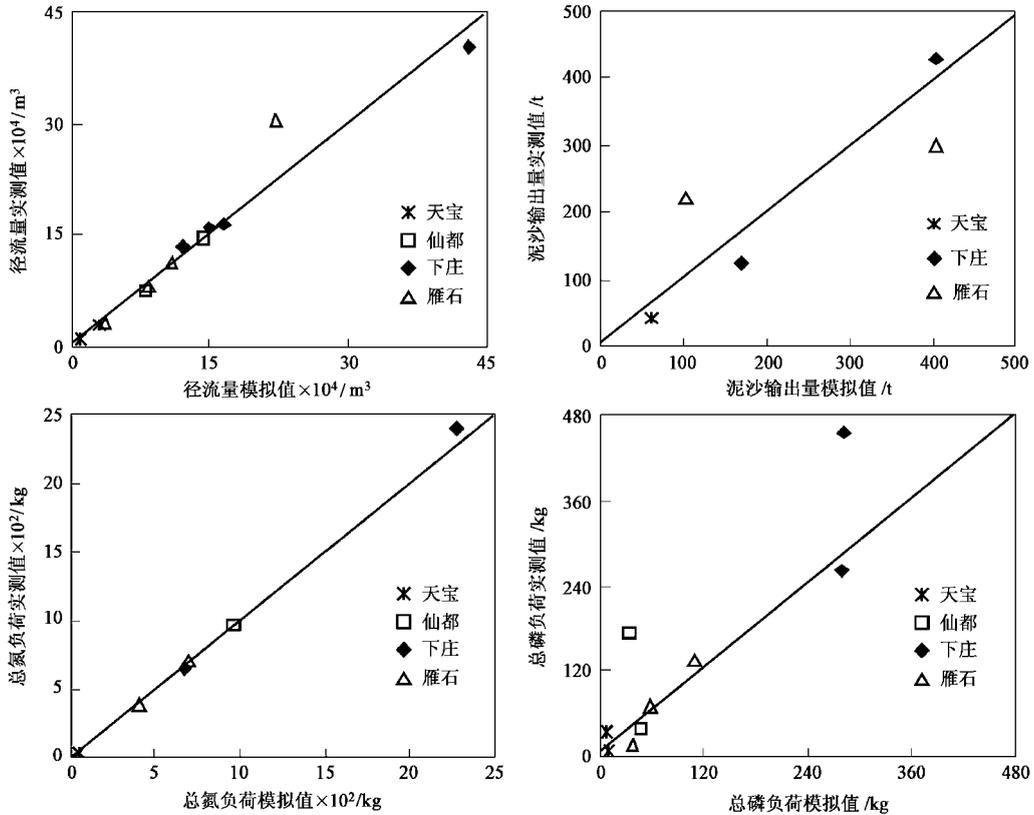


图 3 九龙江典型汇水区地表径流、泥沙输出、总氮和总磷模拟值与实测值拟合比较

Fig. 3 Comparison of simulated and observed runoff, sediment yield, total N and total P for model calibration in typical sub-watersheds

为西溪流域(以郑店水文站作为出水口)和北溪流域(以浦南水文站作为出水口)进行分别模拟,采用 2002~2003 年浦南和郑店断面洪峰过程的流量和泥沙量的实测数据以及 2003-09 浦南、郑店水质监测数据进一步验证模型在九龙江流域的适用性。结果表明:①西溪和北溪地表径流量实测值与 AnnAGNPS 模拟值的偏差多在  $\pm 20\%$  以内,西溪和北溪实测值与模拟值相关系数  $R^2$  分别在 0.99 和 0.95 以上,显示了良好的相关性;②西溪、北溪对泥沙输出的模拟表现出一定的不确定性,但一些月份模拟精度在  $\pm 20\%$  以内,尚可接受;西溪对泥沙的模拟能力好于北溪;③模型对西溪流域 2003-08 非点源污染总氮、可溶态磷、总磷和可溶态磷的模拟值与实测值相近,相对偏差分别为  $-21.2\%$ 、 $26.7\%$ 、 $14.68\%$  和  $-18.3\%$ (图 4);模型对北溪流域 2003-09 总氮、可溶态氮、总磷和可溶态磷的模拟偏差分别为  $-3.8\%$ 、 $-11.2\%$ 、 $25.3\%$  和  $-19.0\%$ ,表明模型对西溪和北溪氮磷的模拟精度较高(图 5)。

#### 2.4 流域农业非点源污染年负荷的估算

以经校验过的 AnnAGNPS 模型模拟 2002~2003 年九龙江西溪和北溪流域出口的地表径流、泥

沙和氮磷输出。

模拟结果显示,西溪郑店断面处近 2 年(2002~2003)年均非点源地表径流输出为  $12.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;年均泥沙输出为  $50.30 \times 10^4 \text{ t}$ ;年均总氮负荷为 8 993.79t,年均总磷负荷为 242.23t。单位面积总氮负荷为  $24.76 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,可溶态氮负荷为  $23.45 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,颗粒态氮负荷为  $1.31 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;单位面积总磷负荷为  $0.67 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,可溶态磷负荷为  $0.42 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,颗粒态磷负荷为  $0.25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。北溪浦南断面处近 2 年(2002~2003)年均非点源地表径流输出为  $26.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ ;泥沙输出为  $164.55 \times 10^4 \text{ t}$ ;总氮输出为 8 492.51t,总磷输出为 330.48t。单位面积总氮负荷  $10.28 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,可溶态氮负荷为  $8.44 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,颗粒态氮负荷为  $1.85 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;单位面积总磷负荷为  $0.40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,可溶态磷负荷为  $0.23 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,颗粒态磷负荷为  $0.17 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

#### 2.5 九龙江流域非点源污染管理措施方案的模拟

本研究通过典型汇水区特定集水单元坡地果园退耕返林、西溪香蕉地改种双季稻、北溪养殖场搬迁对非点源污染输出的影响进行分别模拟。

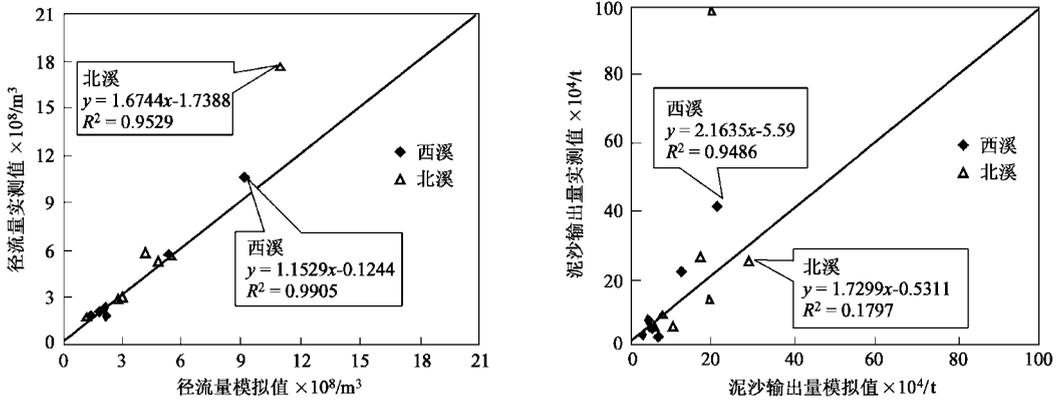


图 4 九龙江西溪和北溪流域地表径流和泥沙输出模拟值与实测值拟合比较

Fig. 4 Comparison of simulated and observed runoff, sediment yield for model validation for West river and North river watersheds

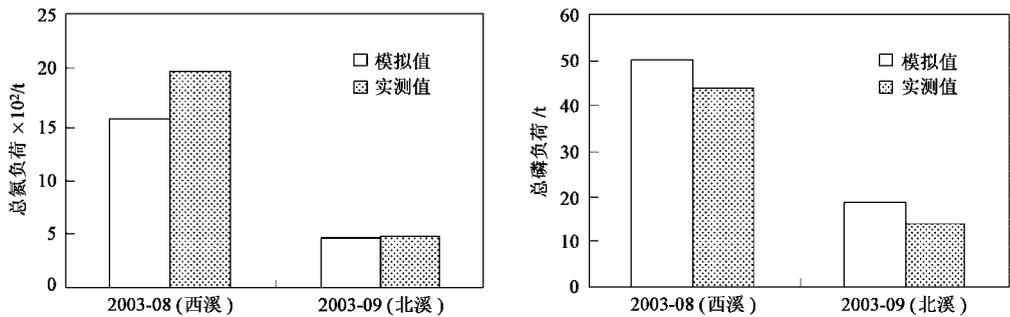


图 5 九龙江西溪和北溪流域总氮和总磷模拟值与实测值拟合比较

Fig. 5 Comparison of simulated and observed total N, total P for model validation for West river and North river watersheds

2. 5. 1 典型汇水区非点源污染管理措施方案模拟

对九龙江流域典型汇水区特定的集水单元进行模拟研究.选定的各集水单元的地形、土地利用等基本特征见表 2.天宝仙都汇水区集水单元 92 和下庄汇水区集水单元 93 属坡地种植,在九龙江流域尤其是漳州一带具有代表性.

运用 AnnAGNPS 模型进行模拟,对天宝仙都汇水区集水单元 92 和下庄汇水区集水单元 93 采用以表 2 用以模拟研究的典型汇水区基本特征

Table 2 The basic feature of cell chosen for simulating BMPs in sub-watersheds

集水单元	面积/hm <sup>2</sup>	平均高程/m	坡度/%	土地利用
天宝仙都 92	4.68	69	32.5	坡地幼龄龙眼林
下庄 93	32.01	137	46.2	坡地菠萝

表 3 九龙江典型汇水区集水单元不同管理措施非点源污染输出

Table 3 Non-point source pollutants generated under two different land practices in the two typical catchments of Jiulong River watershed

典型汇水区集水单元	管理措施	地表径流量/m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup>	泥沙/t·a <sup>-1</sup>	总氮/kg·a <sup>-1</sup>	总磷/kg·a <sup>-1</sup>
天宝仙都 92	现状耕作	13 694.27	27.24	490.15	3.12
	林地	10 729.39	20.19	19.59	0.65
	削减率/%	- 21.6	- 25.9	- 96.0	- 79.2
下庄 93	现状耕作	1 187 394.17	219.32	2 069.42	346.94
	林地	70 028.34	141.60	17.12	70.51
	削减率/%	- 94.1	- 54.9	- 99.2	- 79.7

下 2 种管理措施进行分别模拟:①现状坡地种植方式——顺坡等高种植,由于是幼龄龙眼林,坡壁无草,裸露的土壤较多;②退耕返林——模型中,将其改变为林地.

由表 3 的模拟结果看,不同管理措施各集水单元的径流、泥沙和氮磷输出差异较为明显.天宝仙都和下庄的坡地种植退耕返林后,泥沙、总氮和总磷的削减显著.天宝仙都集水单元 92 地表径流、泥沙、总氮和总磷负荷分别削减了 21.6%、25.9%、96% 和 79.2%;下庄集水单元 93 退耕返林后,地表径流输出削减率达到 94.1%,泥沙削减率达 54.9%,总氮负荷削减率达到 99.2%,总磷负荷削减率达到 79.7%.

2. 5. 2 西溪和北溪非点源污染管理措施方案模拟

西溪和北溪流域土地方式有所差异.西溪在芑城、南靖、平和果园种植面积很大,包括大面积的平地果园.这种在地势平坦的耕地上种植果树,经济效益较好,但耗用了大量的化肥和农药,而且对于一些多年生果树尤其是香蕉地,由于无轮作,土壤板结,地力日益贫瘠.时下随着“三农”政策的贯彻,水稻的市场价格开始抬升,本研究设想将西溪流域的平地香蕉园全部种植双季稻.由于水稻的化肥施用量远小于香蕉,这种种植方式的变化对流域水质的影响

表 4 西溪流域出口(郑店)非点源污染物输出差异

Table 4 Comparison of non-point source discharged at the outlet of West river watershed after changing agricultural land management

集水单元土地利用	地表径流 $\times 10^8 / \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$	泥沙输出 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	总氮 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	可溶态氮 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	总磷 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	可溶态磷 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$
香蕉	12.11	50.30	8 993.79	8 516.26	242.23	151.85
水稻	12.61	53.09	6 850.08	6 349.76	220.23	121.72
削减率 / %	4.13	5.55	- 23.83	- 25.44	- 9.08	- 19.84

北溪流域土地利用以林地为主,植被覆盖率较高.新罗区一带的生猪养殖对流域水质的贡献较大.假设北溪流域内生猪养殖全部禁养,运用模型进行模拟北溪流域出口水质的变化情况.根据模拟结果显示(表 5),总氮和可溶态氮的削减率分别为 63.54%和 76.92%,因此,有效地控制生猪养殖,是北溪水质控制的重点.养猪场的搬迁导致总磷和可溶态磷则分别增加了 1.96%和 5.29%,与林地面积变化等因素有关.

表 5 北溪流域出口(浦南)非点源污染物输出差异

Table 5 Comparison of non-point source discharged at the outlet of North West river watershed after changing agricultural land management

集水单元 土地利用	总氮 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	可溶态氮 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	总磷 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	可溶态磷 / $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$
生猪养殖	8 492.5	6 966.93	330.48	192.55
生猪禁养	3 096.52	1 607.97	336.96	202.73
削减率	- 63.54	- 76.92	1.96	5.29

### 3 结论

本研究采用野外采样和室内分析相结合,点(典型汇水区)和面(全流域尺度)相结合,GIS和AnnAGNPS模型相结合的研究方法,定量估算了九龙江流域农业非点源污染负荷,并模拟了不同管理措施对非点源污染物产生的影响.研究的校验工作表明,模型对于地表径流的模拟能力要强于泥沙和氮磷营养盐,尺度较小的典型汇水区模拟精度要高于尺度较大的北溪和西溪流域.借助GIS和AnnAGNPS模型较好地实现了南方山区中等尺度流域农业非点源污染负荷的定量估算.作为分布参数

应该是良性的.在模型中,通过改变集水单元的用地类型来实现.

由模拟结果看(表 4),由香蕉改种双季稻,则西溪流域出口非点源地表径流输出高出 4.13%,由此泥沙输出增加 5.55%,但总氮、可溶态氮、总磷和可溶性磷依次削减了 23.83%、25.44%、9.08%和 19.84%.西溪流域的这种种植方式改变导致可溶态氮磷的削减率在 20%左右,一方面也说明了香蕉地对于流域非点源污染氮磷输出中占有较大的贡献.

模型,对于农业非点源污染管理措施方案的模拟,给水环境管理决策部门以很好的启示.

参考文献:

- [1] Ake S, Lars P. Non-point critical area analysis in the Gisselo watershed using GIS[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 887 ~ 898.
- [2] Baginska B, et al. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. Environment Modeling & Software, 2003, 18: 801 ~ 808.
- [3] Perrone J, Madramootoo C A. 利用 AGNPS 预测泥沙量[J]. 水土保持科技情报, 1999, 4: 42 ~ 45.
- [4] Corwin D L, Loague K, Ellsworth T R. GIS 支持下的非点源污染模型[J]. 水土保持科技情报, 1999, 1: 14 ~ 16.
- [5] 陈一兵, Trouwborst K O. 土壤侵蚀建模中 ANSWERS 及地理信息系统 ARC/INFO 的应用研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(2): 1 ~ 13.
- [6] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62 ~ 67.
- [7] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 和地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19 ~ 24.
- [8] Shi Z H, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China[J]. Catena, 2004, 55: 33 ~ 48.
- [9] 陈欣, 郭新波. 采用 AGNPS 模型预测小流域磷素流失的分析[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 44 ~ 47.
- [10] 董亮. GIS 支持下西湖流域水环境非点源污染研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [11] 曹文志, 洪华生, 张玉珍, 等. AGNPS 在我国东南亚热带地区的检验[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 537 ~ 540.
- [12] 张建永. 官厅流域非点源污染模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2002.
- [13] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 254 ~ 255, 243 ~ 246, 276 ~ 279.
- [14] 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]. 厦门: 厦门大学, 2004.