

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

HUANG Jinliang, HONG Huasheng, DU Pengfei, et al. Testing AnnAGNPS for water quality modelling in the typical sub-watersheds in Jiulong River watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(8): 1135 - 1142

## AnnAGNPS 模型在九龙江典型小流域的适用性检验

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

1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084

2. 厦门大学国家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

收稿日期: 2004-12-14 修回日期: 2005-06-08 录用日期: 2005-06-14

**摘要:** 在中国东南丘陵山区一中尺度流域——九龙江流域选取 4 个土地利用方式不同的典型小流域, 借助 GIS 和相关资料率定模型参数, 并通过对 2003 年 4 月至 9 月各小流域出口降雨水质水量的同步监测, 检验了连续-分布式参数模型 (Annualized Agricultural NonPoint Source Model, AnnAGNPS) 的适用性. 研究表明, 模型对于地表径流量的模拟能力好于对泥沙和营养盐的模拟, 对总磷和泥沙输出的模拟结果表现出了较大的不确定性.

**关键词:** AnnAGNPS; GIS; 非点源污染; 九龙江典型小流域

文章编号: 0253-2468(2005)08-1135-08 中图分类号: X52 文献标识码: A

## Testing AnnAGNPS for water quality modelling in the typical sub watersheds in Jiulong River watershed

HUANG Jinliang<sup>1,2,\*</sup>, HONG Huasheng<sup>2</sup>, DU Pengfei<sup>1</sup>, ZHANG Luoping<sup>2</sup>

1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2. Key Laboratory For Marine Environmental Science of Ministry of Education, Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China

Received 14 December 2004; received in revised form 8 June 2005; accepted 14 June 2005

**Abstract:** An interface, in which ArcView Geographic Information System (GIS) was integrated with Annualized Agricultural NonPoint Source Model (AnnAGNPS), was used as a procedure to input, analyze, and visualize spatial data that agricultural Nonpoint source pollution concerned. Four typical sub-watersheds in southeast of China were chosen to test AnnAGNPS model from storm events during the period of April to September, 2003. Then, the model was run to simulate the annual runoff, sediment and nutrient yield. The simulation results show that the event flows and nitrogen exports were simulated efficiently with AnnAGNPS, but only moderate accuracy is achieved for prediction of event-based sediment yield and phosphorus exports, especially the prediction of sediment yield and total-phosphorus show obvious uncertainties.

**Keywords:** AnnAGNPS; GIS; Nonpoint 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, 成为当今农业非点源污染研究的主要手段, 并被广泛应用于计算非点源污染负荷、关键源区识别、模拟非点源管理方案等<sup>[1~3]</sup>. 20 世纪 90 年代中后期, 尤其是本世纪初以来, 国外成熟的非点源污染半机理、机理模型, 如 AGNPS、SWAT、HSPF 开始被引入我国的黄河流域、滇池流域等检验其适宜性<sup>[4~6]</sup>. 但有关连续分布式参数机理模型——AnnAGNPS 模型与 GIS

ArcView 紧密集成, 并应用于土地利用方式各异的小流域进行地表径流和水质的模拟研究, 在国内鲜见报道. 本文应用 AnnAGNPS (2.0 版本), 在中国东南丘陵山区遴选主要土地利用方式分别为平地果园、坡地果园、水稻田和蔬菜地的 4 个小流域, 进行各小流域集水单元的划分和模型地理参数的提取, 并通过暴雨径流监测数据, 检验 AnnAGNPS 模型的适用性和模拟表现能力.

基金项目: 福建省科技重大攻关项目 (No. 2002H009)

作者简介: 黄金良 (1975—), 男, 博士, E-mail: jlhuang@tsinghua.edu.cn; \* 通讯作者 (责任作者)

Foundation item: Key science and technology project in Fujian province (No. 2002H009)

Biography: HUANG Jinliang (1975—), male, Ph. D., E-mail: jlhuang@tsinghua.edu.cn; \* Corresponding author

## 1 材料与方法 (Materials and Methods)

### 1.1 小流域概况

九龙江是福建省第二大河流,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。

根据土地利用、地形地貌等因素的代表性和典型性,本研究在九龙江流域选取了 4 个典型小流域,即天宝、仙都、下庄和雁石。其中:(1) 天宝小流域 (117°33'45" E, 24°37'00" N ~ 24°40'00" N): 面积 0.78 km<sup>2</sup>, 丘陵山坡地, 平均坡度为 20.5°; 次生林与坡地香蕉、龙眼、柑桔郁闭成林。其中, 次生林占 43%, 坡地果园占 44.7%。(2) 仙都小流域 (117°33'45" E, 24°37'00" N ~ 24°40'00" N): 面积 1.06 km<sup>2</sup>, 河谷平地, 平均坡度为 6.5°; 1~4 月种植蔬菜, 4~11 月蔬菜和水稻混种, 12 月至翌年 1 月种植黄瓜等蔬菜。(3) 下庄小流域 (117°30'00" E, 24°25'00" N ~ 24°27'30" N): 面积 6.2 km<sup>2</sup>, 平均坡度 19.4°; 次生林、疏林地占 57.1%, 芦柑、蜜柚、龙眼等果园种植于平地农田, 占 36.2%, 竹园占 4.8%。(4) 雁石小流域 (117°07'30" E, 25°15'00" N ~ 25°18'00" N): 面积 3.51 km<sup>2</sup>, 河谷地为主, 平均坡度 10.1°; 4~11 月种植双季稻。水稻田占 48.5%, 林地占 43.2%。

### 1.2 试验设计与方法

采用实地地表径流监测方法,对 4 个典型小流域的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地表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(一般半小时采集 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,以小流域出水口径流量基本恢复正常水平为准。每次取样 1 000 mL,取样后静置 15 min 左右,以测定上清液中的氮磷浓度。另取未静置的水样 500 mL 左右,以测定悬浮泥沙含量。由于各小流域与气象站的距离在 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 24 h 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>[7]</sup>中的国标分

析方法。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,测定滤液中的可溶态氮与可溶态磷,方法同总氮、总磷的测试方法。颗粒态氮磷为总氮、总磷与可溶态氮磷之差。

### 1.3 AnnAGNPS 模型简介

AnnAGNPS (Annualized Agricultural Nonpoint 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<sup>[8]</sup>。该模型采用 SCS-CN 径流曲线方程计算地表径流量;采用矫正的通用土壤流失方程 (RUSLE) 来计算地表泥沙侵蚀量;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。作为分布式参数模型,AnnAGNPS 模型的参数达 500 多个,AnnAGNPS 2.0 版本实现了与 GIS ArcView 的紧密集成,模型的效率和模拟结果的显示度得到了显著提高<sup>[9]</sup>。

## 2 AnnAGNPS 模型参数率定 (Identification of AnnAGNPS parameters)

### 2.1 典型小流域农业非点源基本信息数据库的建设

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:流域边界、水系、数字高程模型 (DEM)、土地利用类型图、土壤图等。结合小流域 1/10 000 全要素地形图勾绘流域边界、水系和土地利用现状图;应用 MapInfo 矢量化等高线(等高距为 5 m),在此基础上应用 ARC/INFO 生成各小流域的 DEM;结合漳州市和龙岩市全国第二次土壤普查的土壤图,利用各小流域的边界对其进行切边等空间处理,生成各小流域的土壤图。

通过田间调查各典型小流域的作物耕作制度、化肥农药施用量等。在各小流域进行土壤取样,测试土壤的机械组成、有机质含量和土壤全氮全磷含量,并结合二次土壤普查资料获得各小流域的土壤 pH、容重等土壤属性数据。

### 2.2 模型参数率定

本研究模型参数的率定主要通过 3 种途径,其一是通过现场调查和资料收集的途径,获取的参数包括:流域参数(形状面积)、土地利用类型、土壤类型、作物管理参数(各作物耕作制度、耕作方式)、化肥施用参数和气象参数等。其二是通过采样分析测试的途径,获得的参数如土壤质地、各土层机械组成

等.其三,一些不易确定的参数,通过文献调研或参阅模型手册提供的典型值或默认值来获得. AnnAGNPS 包括 23 类约 500 余个参数,通过 AnnAGNPS-ArcView 模型界面可自动产生大量的模型参数,如集水单元参数和集水区参数,并可自动导入 AnnAGNPS 参数准备模块 Input Editor. 但并非所有的参数都是必需的,这取决于模型的研究目的. 通过实测值与模拟值的对照,初步确定了 AnnAGNPS 模型的主要参数,主要模型参数的取值方法和数据来源见表 1.

表 1 模型主要参数的取值来源

Table 1 Source for parameters and variables of AnnAGNPS model

输入参数类	取值方法	数据源或文件
AnnAGNPS 模型标识	文献[10]	流域名称及经纬度
集水单元参数	GIS、文献[10]	DEM、AnnAGNPS. Cell. dat
逐日气象参数	文献[10]	资料收集、DayClim. inp
作物参数	文献[10]	现场调查、土地利用图
化肥施用参数	文献[10]	现场调查、土地利用图
作物管理参数	文献[10]	现场调查、土地利用图
非作物参数	文献[10]	现场调查
输出设置参数	文献[10]	研究目标
集水区参数	GIS、文献[10]	DEM、AnnAGNPS. Reach. dat
CN 值参数	文献[11]	土地利用图、土壤图
模拟时段参数	文献[9][11]	资料收集
土壤参数	文献[9][12]	土壤图、测试分析
流域参数	GIS、文献[10]	现场调查

2.2.1 集水单元参数和集水区参数的率定 本研

究利用 AnnAGNPS-ArcView 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,划分小流域集水区单元,生成集水单元 (Cell) 参数文件 AnnAGNPS. cell. dat 和集水区 (Reach) 参数文件 AnnAGNPS. reach. dat, 分别包括各集水单元和集水区的面积、高程、坡向、坡度坡长等参数. 该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,从而获得各集水单元的主要土壤类型和主要土地利用类型.

作为分布式模型, AnnAGNPS 模型通过 CSA (Critical Source Area) 和 MSCL (Minimum Source Channel Length) 值的确定来反映流域非点源污染的空间变异性. 根据土地利用类型的差异,将天宝仙都小流域划分了 23 个集水单元和 10 个集水区,见图 1 (a). 由图可见,集水单元代号为 81-83、91-93 共 6 个集水单元所覆盖的空间单元即为天宝小流域,除此以外的下游地区为仙都小流域. 雁石小流域用地类型主要是水稻和林地,地势较平,划分了 28 个集水单元和 12 个集水区,见图 1 (b). 下庄小流域由于用地类型相对单一,参照主要用地类型:果园和林地,划分了 23 个集水单元和 10 个集水区,见图 1 (c). 表 2 以天宝和仙都小流域为例列出了各集水区单元的土地利用、土壤类型情况.

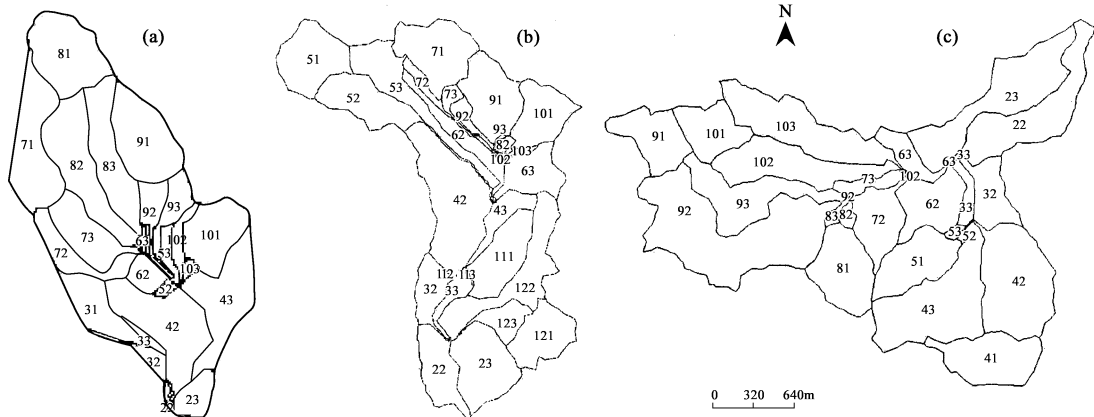


图 1 基于 ArcView AnnAGNPS 界面的典型小流域集水单元划分

((a) 天宝和仙都; (b) 雁石; (c) 下庄)

Fig. 1 Catchment discretisation for typical sub-watersheds by AnnAGNPS-ArcView interface

((a) Xiandu & Xiandu sub-watershed; (b) Yanshi sub-watershed; (c) Xiazhuang sub-watershed)

2.2.2 CN 值参数的率定 CN 值 (Curve Number, CN) 是用来综合反映降雨前流域特征的一个综合参数,它与流域前期土壤湿润状况 (Antecedent moisture condition, AMC)、坡度、植被、水文状况、土地利用和

土壤类型等因素有关. 为了确定和区分 CN 值,美国土壤保持局按照不同的土壤渗透性能和产流能力的大小,分为 4 种土壤水文类型: A 类 (透水)、B (较透水)、C (较不透水)、D (接近不透水). 根据典型小流

域的土壤、植被、水文状况和土地利用类型等,参照 CN 取值条件<sup>[11]</sup>,确定了不同土地利用方式下的 CN 值(见表 3)。其中水文状况好坏通常根据样方的植

被密度和地表残余物覆盖度来估计,本研究则以作物生长季节为依据,这是因为不同的生长季节,作物及植被覆盖度不同。

表 2 天宝和仙都小流域各集水单元主要土地利用和土壤类型

Table 2 Cells, Land use and soil information in Tianbao & Xiandu sub-watershed

Cell . ID	土地利用	土壤类型	Cell . ID	土地利用	土壤类型
22	蔬菜	灰泥田	72	龙眼、荔枝园	黄泥田
23	蔬菜	灰泥田	73	龙眼、荔枝园	黄泥田
31	香蕉	黄泥田	81	林地	赤土
32	香蕉	黄泥田	82	龙眼、荔枝园	赤土
33	水田	黄泥田	83	龙眼、荔枝园	赤土
42	水田	灰泥田	91	龙眼、荔枝园	赤土
43	龙眼、荔枝园	赤土	92	幼龄果园	灰泥田
52	香蕉	灰泥田	93	香蕉	灰泥田
53	蔬菜	灰泥田	101	龙眼、荔枝园	赤土
62	蔬菜	黄泥田	102	龙眼、荔枝园	灰泥田
63	蔬菜	灰泥田	103	蔬菜	灰泥田
71	龙眼、荔枝园	赤土			

表 3 典型小流域不同土地利用 CN 值

Table 3 CN values of different land-uses in the typical sub-watersheds

土地利用类型	水文条件	不同水文土壤类型组 CN				土地利用类型	水文条件	不同水文土壤类型组 CN			
		A	B	C	D			A	B	C	D
旱地	差	72	81	85	91	香蕉园	差	64	70	81	86
	好	67	78	82	89		好	60	68	79	83
水田	差	77	88	91	93	林地	差	45	65	70	80
	好	70	82	88	89		好	25	55	68	77
蔬菜地	差	61	74	82	85	灌木林	差	30	58	72	78
	好	58	70	79	83		好	41	57	70	80
果园	差	60	70	81	87	农村用地	/	65	75	82	85
	好	50	65	75	85	水体	/	100	100	100	100
幼龄果园	差	41	57	68	77						
	好	40	55	66	75						

表 3 的数值表征的是中等含水量(CN<sub>0.5</sub>)的 CN 值,当土壤处于干旱或饱和含水量状态时,则需分别以式(1)和式(2)进行校正。土壤湿度由前 5 日降水量确定(AMC)。

$$CN = \frac{CN}{0.4036 + 0.059CN} \quad (\text{干旱时}) \quad (1)$$

$$CN = \frac{CN}{2.334 - 0.01334CN} \quad (\text{饱和含水量状态时}) \quad (2)$$

式中,CN<sub>0.5</sub>为干旱时的 CN 值,CN<sub>0.5</sub>为中等含水量的 CN 值,CN<sub>sat</sub>为饱和含水量的 CN 值。

2.2.3 其它主要模型参数的率定 通过资料收集,在 Input Editor 模块以手工录入方式建立包括日雨量、日最高气温、日最低气温、日平均云量、日平均露点温度、日平均风速的逐日气象数据参数文件(DayClim.inp)。模拟时段参数中的降雨侵蚀强度因子(ED)值,采用福建水土保持试验站和福建农林大

学在闽东南试验研究基础上建立的计算公式,并在模拟年份中以 15 d 为周期分别计算并累积成全年 EI 值,作为参数输入文件<sup>[9]</sup>。

模型的作物参数,包括各种作物的残茬率、氮磷吸收率,以参考模型手册为主。作物管理参数,包括作物地块的田间情况、各作物种植时序、作物不同生长期的施肥、耕作管理和 CN 值等,以现场调查的数据来率定参数。化肥施用参数包括施肥量、肥料的无机和有机肥的比重、施肥深度等,以现场调查统计和参照模型手册来确定参数,详见文献[9]。

土壤参数,包括水文特征组、土壤侵蚀因子(K)值、质地、各土层的机械组成、pH 值、有机无机氮磷、土壤容重等。笔者结合全国第二次土壤普查的土壤图和土壤分析资料<sup>[12]</sup>,对各小流域进行针对性采样分析,取各小流域主要的土壤类型,分别测试土壤质地、各土层土壤机械组成、全氮、全磷,并参考相关文献和模型手册进行土壤参数的率定,详见文献[9]。

### 2.3 拟合度 (goodness-of-fit) 评价指标

为评价模型计算的质量,方便模型参数校正,本文采用 2 个指标来表征模型实测值与模拟值的拟合度,这符合评价指标应尽可能简化的原则<sup>[13]</sup>.

1) 模拟偏差,计算公式如式(3):

$$Dv = \frac{V - V'}{V'} \times 100 \quad (3)$$

式中,  $V'$  为模型模拟值,  $V$  为实测值,  $Dv$  为模拟偏差,  $Dv$  值越趋向于 0, 则拟合度越好.

2) 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.可决系数  $R^2$  越大,则表示实测值与模拟值的拟合度越好.

### 3 结果 (Results)

AnnAGNPS 模型是连续型模型,但某一时段非点源污染负荷的计算却来自于这一时段内的各场次暴雨的贡献,因此,模拟参数的校正,还需通过场次暴雨事件的监测值与模拟值进行对照,反复调试模型,以使模拟结果与实测结果合理地接近.由于地表径流影响了泥沙和氮磷输出,泥沙输出影响了颗粒态氮磷输出,因此,模型各模块的参数校正存在先后顺序.首先对水文模块进行校正,其次是泥沙侵蚀模块,最后是氮磷营养盐流失模块.

#### 3.1 地表径流量模拟结果

表 4 和图 2 分别为典型小流域地表径流模拟值与实测值的对照表和拟合图.由表 4 和图 2 可见,典型小流域地表径流量模拟值与实测值的偏差多在  $\pm 9\%$  以内.5 月 17 日天宝仙都和雁石小流域的暴雨事件由于采样密度较小,导致实测值计算有所偏差,

表 4 典型小流域地表径流模拟值与实测值对照

Table 4 Comparison of simulated and observed surface runoff in typical sub-watersheds

典型小流域	降雨事件	降雨量 /mm	地表径流/ $m^3$		模拟偏差
			模拟值	实测值	
天宝	5月17日	57.7	10 127.8	10 323.7	-1.9%
	8月21日	109.5	30 590.7	30 905.8	-1.0%
仙都	5月17日	57.7	58 087.3	76 294.9	-23.9%
	8月21日	109.5	143 463.3	145 388.6	-1.3%
下庄	5月17日	56.9	165 073.2	164 139.3	0.6%
	8月5日	38.2	121 843.4	134 461.0	-9.4%
	8月6日	26.8	150 304.3	158 082.5	-4.9%
	8月21日	91.2	430 605.8	400 960.2	7.4%
雁石	5月17日	95.2	222 703.9	304 765.5	-26.9%
	6月6日	47.4	36 124.9	33 632.0	7.4%
	6月7日	52.9	85 667.6	79 707.9	7.5%
	9月21日	79.0	107 739.4	114 091.7	-5.6%

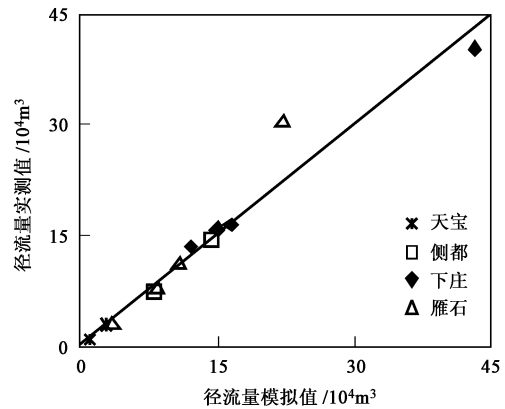


图 2 九龙江典型小流域地表径流模拟值与实测值拟合图

Fig.2 Comparison of simulated and observed surface runoff in typical sub-watersheds

模拟偏差在  $-25\%$  左右.径流量模拟值和实测值的数据较好地分布在 1:1 连线上,雁石和下庄两小流域模拟值与实测值的可决系数  $R^2$  在 0.98 以上.模型较好地模拟了降雨条件下各小流域的地表径流量.

#### 3.2 泥沙输出模拟结果

表 5 和图 3 分别为典型小流域泥沙输出模拟值与实测值的对照表和拟合图.由表 5 和图 3 可见,小流域泥沙模拟值与实测值的偏差多在  $\pm 35\%$  以上,仅有下庄小流域 8 月 21 日的降雨场次泥沙模拟拟合度较高.通过对有限的监测降雨场次实测值与模拟值的回归分析,可决系数  $R^2$  为 0.74.总体而言,泥沙的模拟较高地估算了泥沙的输出.

表 5 典型小流域泥沙输出模拟值与实测值对照

Table 5 Comparison of simulated and observed sediment yield in typical sub-watersheds

小流域	降雨事件	降雨量 /mm	泥沙输出/t		模拟偏差
			模拟值	实测值	
天宝	5月17日	57.7	60.3	41.1	46.9%
下庄	5月17日	56.9	168.99	122.44	38.0%
	8月21日	91.2	403.78	429.64	-6.0%
雁石	5月17日	95.2	402.88	297.91	35.2%
	9月21日	79.0	100.33	221.68	-54.7%

注:由于监测和实验的原因,典型小流域暴雨场次泥沙输出的实测数据较少.

#### 3.3 氮输出模拟结果

表 6 和图 4 分别为典型小流域氮负荷输出模拟值与实测值的对照表和拟合图.由表 6、图 4 可见,小流域氮模拟拟合度较高,且流域尺度较小的模拟精度更高一些.可溶态氮和总氮的模拟偏差在  $\pm 5\%$  以内,且总氮、可溶态氮的模拟值与实测值很好地分布在 1:1 连线上.通过对有限的降雨场次实测值

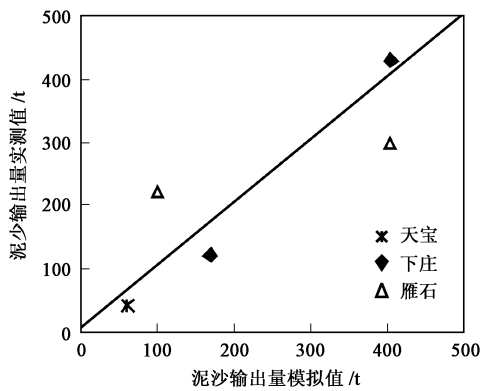


图3 九龙江典型小流域泥沙输出模拟值与实测值拟合图  
Fig.3 Comparison of simulated and observed sediment for model calibration in typical sub-watersheds

与模拟值的回归分析,  $R^2$  为 0.99 以上. 作为连续型

表6 典型小流域氮负荷模拟值与实测值对照

Table 6 Comparison of simulated and observed nitrogen loads in typical sub-watersheds

小流域	降雨事件	总氮负荷			可溶态氮负荷		
		模拟值/kg	实测值/kg	模拟偏差	模拟值/kg	实测值/kg	模拟偏差
天宝	8月21日	46.96	47.26	-0.6%	44.36	44.68	-0.71%
仙都	8月21日	960.45	971.20	-1.1%	926.61	936.17	-1.04%
下庄	8月5日	671.70	645.10	4.12%	629.30	600.75	4.75%
	8月21日	2270.08	2392.60	-5.12%	2214.96	2121.41	4.41%
雁石	6月7日	397.60	391.41	1.58%	/	/	/
	9月21日	695.80	711.90	-2.26%	/	/	/

注: 由于监测和实验的原因, 典型小流域暴雨场次氮负荷的实测数据较少.

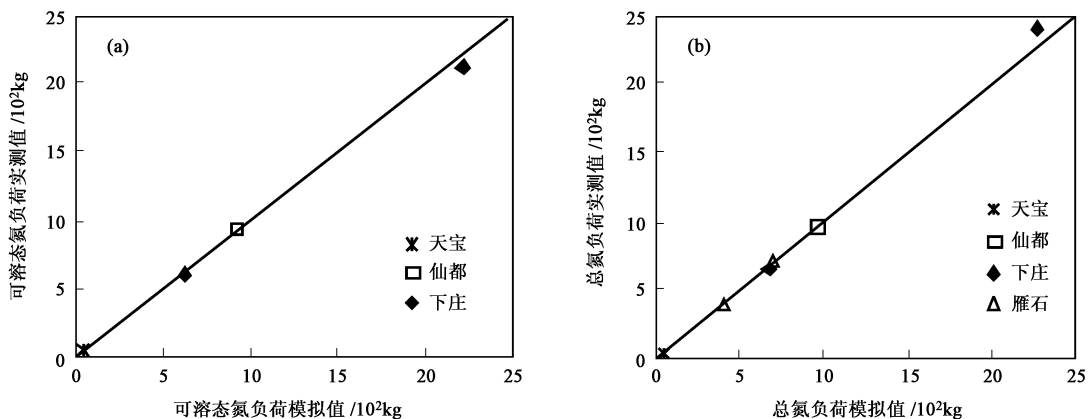


图4 九龙江典型小流域氮输出模拟值与实测值拟合图

Fig.4 Comparison of simulated and observed total-N, Dissolved-N in typical sub-watersheds

#### 4 模拟结果分析(Analysis of simulation results)

##### 4.1 模拟结果分析

尽管由于监测、实验等原因, 小流域的泥沙、氮磷输出的实测值较少, 用于模型拟合的样本有限, 但

模型模拟场次降雨事件地表径流的氮输出, 作物耕作措施、不同耕作时期的施肥量等因素极大地影响了小流域不同降雨场次的氮输出量.

##### 3.4 磷输出模拟结果

表7和图5分别为典型小流域磷负荷输出模拟值与实测值的对照表和拟合图. 由表7、图5的小流域磷负荷的模拟情况看, 可溶态磷模拟值与实测值的偏差多在  $\pm 20\%$  以内, 在 1:1 连线上分布较好. 通过对各小流域所监测降雨场次的可溶态磷实测值与模拟值的回归分析,  $R^2$  为 0.98. 总磷的模拟精度较差, 个别降雨场次模拟偏差达到 111%, 总磷模拟值与实测值在 1:1 连线上分布不规则, 通过对各小流域所监测降雨场次的总磷实测值与模拟值的回归分析,  $R^2$  为 0.74.

从模拟试验结果总体来看, AnnAGNPS 模型对地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失的模拟精度由高到低为: 地表径流 > 氮输出 > 泥沙模拟 > 磷输出. 模型的水文模块模拟精度较高, 这与 Novotny 对众多非点源污染模型的评估结果<sup>[15]</sup> 基本相近. 对总磷输

表 7 典型小流域磷负荷模拟值与实测值对照

Table 7 Comparison of simulated and observed phosphorus loads in typical sub-watersheds

小流域	降雨事件	总磷负荷			可溶态磷负荷		
		模拟值/kg	实测值/kg	模拟偏差	模拟值/kg	实测值/kg	模拟偏差
天宝	5月17日	11.32	8.57	32.08%	2.75	2.19	25.73%
	8月21日	8.11	34.29	-76.36%	4.08	6.10	-33.13%
仙都	5月17日	47.10	39.58	19.00%	13.23	13.29	-0.41%
	8月21日	34.08	174.97	-80.52%	21.62	20.44	5.81%
下庄	8月5日	281.03	454.67	-38.19%	98.12	102.67	-4.43%
	8月21日	279.82	260.80	7.29%	105.99	90.52	17.09%
雁石	5月17日	110.03	133.48	-17.57%	13.44	13.73	-2.11%
	6月7日	38.13	18.07	111.04%	13.44	10.95	22.75%
	9月21日	59.70	71.02	-15.94%	/	/	/

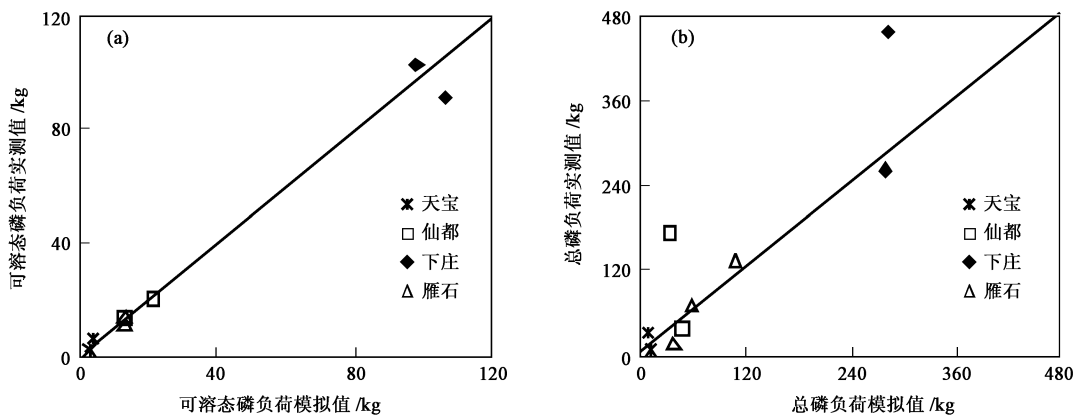


图 5 九龙江典型小流域磷输出模拟值与实测值拟合图

Fig. 5 Comparison of simulated and observed total-P, Dissolved-P in typical sub-watersheds

出的模拟情况较差, 尽管可溶态磷模拟精度尚可, 但由于泥沙输出模拟值偏高, 而磷在暴雨事件下输出形态以泥沙结合态为主, 磷作为非保守态, 较易发生吸附、降解、迁移等复杂的环境行为过程, 从而导致模拟偏差的累积, 使磷负荷输出较难估算, 模拟精度受限。

从各流域的模拟情况看, 流域面积大小排序依次是下庄 > 雁石 > 仙都 > 天宝, 相应的各子流域的地表径流、泥沙侵蚀和氮磷营养盐流失, 仅在氮流失的模拟上显现出较小尺度流域模拟精度较高的特点, 其余的模拟结果没有表现出非常明显的因流域尺度越小而模拟精度越高的趋势, 这可能与各小流域降雨事件采集场次、场次降雨中水样采集的频次密度等因素有关。

泥沙和营养盐的输出与土地利用、流域面积和降雨量有关。从各小流域的泥沙输出看, 在相同的降雨时间下(5月17日降雨), 由于雁石降雨量较大, 泥沙输出量依次为雁石(水稻田) > 下庄(平地果园) > 天宝(坡地果园, 面积最小)。这也反映了 RUSLE

中  $R$  因子是泥沙输出预测的敏感因子。各小流域的总氮总磷输出的排序依次为下庄(平地果园) > 仙都(蔬菜地) > 雁石(水稻田) > 天宝(坡地果园), 表现出营养盐的输出主要与土地利用强度, 尤其是化肥的施用量有关的特点。天宝小流域尽管化肥用量高于水稻田为主的雁石小流域, 但由于流域尺度较小, 氮磷的总输出较小。

#### 4.2 模型的敏感性参数初析

南方由于地形破碎, 气候、土壤等自然要素的空间变异性较大, 导致相应的土地利用方式也具有较大的空间变异。因此, 对于南方小流域的分布式模型模拟, 集水单元的划分要尽可能体现空间变异性, 模拟结果才有可能较接近实测值。笔者通过实测值与模拟值的对照, 对 AnnAGNPS 模型的 500 余个参数进行了反复调试, 初步发现对地表径流量、泥沙和氮磷营养盐输出较为敏感的模型参数。影响地表径流量输出的最敏感的参数是 CN 值。对于泥沙的输出, 降雨动力因子  $R$  和 LS 因子值最为敏感, 表现在各小流域降雨强度越大, 泥沙输出越多, 坡度较大的小

流域,如天宝小流域,泥沙输出也较多.对于氮磷营养盐的输出,最为敏感的参数主要有作物管理参数、化肥施用参数和土壤参数.化肥的施用量和土壤中氮磷的含量与模型的氮磷营养盐输出基本成线性关系,表现在化肥施用量较高的小流域氮磷输出高于化肥施用量较低的小流域.这与 YUAN (2001) 的相关研究结果接近<sup>[14]</sup>.

我国目前尚处于运用国外成熟机理模型阶段,由于气候、土地利用、土壤等相关模型参数的差异,要将国外模型引入我国,其前提是验证模型的适用性,否则,模型变量参数的偏差累积会导致结果的严重不可信.由于国外的机理模型参数极多,只有通过模型参数的敏感性分析和不确定性分析,识别出对模型结果影响最为敏感的参数,对模型进行优化处理,才能使模型在我国的运用更为合理和科学.但目前,国内缺少大量的、长时期暴雨场次的水量水质数据,在一定程度上限制了对国外机理模型进行有效校验.因此,研究者通常须利用有限的人力物力去监测暴雨场次,获得有限的水质水量同步监测数据,并以此来校验模型,这里的关键技术包括典型小流域的遴选,水质水量监测采样的频率等.只有较为翔实的监测方案设计,才能获得较为理想的暴雨场次水质水量的监测数据.

## 5 结论 (Conclusions)

1) AnnAGNPS 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,说明模型对地表径流的模拟能力较强.

2) AnnAGNPS 模型对氮负荷输出的拟合度较高,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,小流域 7 场次降雨有 5 次模拟偏差在  $\pm 20\%$  以内.

3) 泥沙输出和总磷的模拟表现了较大的不确定性.个别小流域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.

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Francos C, Bidoglio G, Galbiati L, *et al.* Hydrological and water quality modelling in a medium sized coastal basin[J]. *Phys Chem Earth*, 2001, 26(1): 47—52
- [ 2 ] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. *Environment Modeling & Software*, 2003, 18: 801—808
- [ 3 ] Tong S T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality [J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 66(4): 377—393

- [ 4 ] Chen X, Guo X B. Prediction of phosphorus losses in micro-watershed ecosystem by AGNPS model[J]. *Transactions of CSAE*, 2000, 16(5): 44—47 (in Chinese)
- [ 5 ] Hao F H, Zhang X S, Yang Z F. A distributed nonpoint source pollution model calibration and validation in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Environmental Science*, 2004, 16(4): 626—650
- [ 6 ] Xing K X, Guo H C, Sun Y F, *et al.* Simulation of nonpoint source pollution in Lake Dianchi basin based on HSPF model[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24 (2): 229—232 (in Chinese)
- [ 7 ] State Environmental Protection Administration of China. Methods of Monitoring and analyzing for Water and wastewater[M]. China Environmental Science Press. Beijing, 2002, 254—255, 243—246, 276—279 (in Chinese)
- [ 8 ] Cronshey R G, Theurer F G. AnnAGNPS Non-Point Pollutant Loading Model[C]. First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conf., Las Vegas, Nevada, 1998
- [ 9 ] Huang J L. Study on Agricultural Non-point Source Pollution of Jiulong River Watershed Based on GIS and Environmental Models [D]. Xiamen: Xiamen University, 2004: 110—119 (in Chinese)
- [ 10 ] Bingner R L, Darden R W, Theurer F D, *et al.* AnnAGNPS Input Parameter Editor Interface [C]. First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, Nevada, 1998
- [ 11 ] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service and Conservation Engineering Division [M]. *Urban Hydrology for Small Watersheds—Technical Release 55 second Edition*[M], 1986: 13—27 (in Chinese)
- [ 12 ] Office of soil survey in Fujian province. Soil type in Fujian province [M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publication House, 1991 (in Chinese)
- [ 13 ] Martinec J, Rango A. Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models. *Water Resources Bulletin*, American Water Resource Association, 1989, 25(20): 421—432
- [ 14 ] Yuan Y P, Binger R L, Reibich R A. Evaluation of AnnAGNPS nitrogen loading in an agricultural watershed[J]. *Journal of the American Water Resource Association*, 2003, 39(2): 457—466
- [ 15 ] Novotny N, Olem H. *Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution* [M]. Van Nostrand Reinhold, New York, New York, 1993

### 中文参考文献:

- [ 4 ] 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
- [ 6 ] 邢可霞,郭怀成,孙延枫,等.基于 HSPF 模型的滇池流域非点源污染模拟[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(2): 229—232
- [ 7 ] 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
- [ 9 ] 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: 110—119
- [ 12 ] 福建省土壤普查办公室编. *福建土壤* [M]. 福州:福建科学技术出版社, 1991