

基于 GIS 和模型的流域非点源污染控制区划

黄金良^{1,2}, 洪华生^{1*}, 张珞平¹

1. 厦门大学 环境科学研究中心 近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005

2. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084

摘要: 采用 GIS 技术和 USLE, SCS-CN, 污染物流失经验模型及 AnnAGNPS 机理模型相结合, 对农业集约化程度较高的南方中等尺度流域进行农业非点源污染控制区划。结果表明: 利用 GIS 和经验模型回答了流域农业非点源污染氮磷来源与贡献, 标识了农业非点源污染氮磷等污染物的关键源区, 发挥了经验模型所需模型参数少、研究尺度较大、效率较高的优点, 通过 GIS 的栅格数据空间分析功能, 实现了流域非点源污染的分式模拟, 识别了 NPS 的关键源区。借助 AnnAGNPS 机理模型, 在模型得以校验的前提下, 模拟了非点源污染管理措施方案。以模型和 GIS 的定量结果为依据, 对九龙江流域农业非点源污染控制进行了区划, 共划分了水土流失控制区、生猪养殖 + 水土流失控制区、化肥施用 + 生猪养殖控制区、水土流失 + 化肥施用控制区及化肥施用 + 水土流失控制区 5 类控制单元。

关键词: GIS; 模型; 农业非点源污染; 控制区划

中图分类号: X321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6929(2006)04-0119-06

Control Divisions of Agricultural Non-point Source Pollution at Watershed Scale Based on GIS and Models

HUANG Jin-liang^{1,2}, HONG Hua-sheng¹, ZHANG Luo-ping¹

1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China

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

Abstract: GIS technology and USLE, SCS-CN, nutrient losses empirical equations and AnnAGNPS model were coupled to carry on control divisions of NPS in a medium sized watershed, located in southeast of China, with relative strong intensive agricultural activities. The results show that the integration of GIS with empirical models can help analyze major sources and contributors of NPS, and identify the critical source areas of NPS. This can not only develop the advantages of empirical equations, e. g. requiring less model parameters, having large scale under study and being more efficient, but also realize simulation of watershed nonpoint source pollution and identify critical source areas of NPS through spatial analysis functions, increasing visual display effect of the results. After calibrating and validating the AnnAGNPS model, several scenarios were designed and simulated for suggestions of best management practices (BMPs). Finally, based on the quantitative results derived from GIS and the models, five control division units were generated for nonpoint source pollution control in Jiulongjiang River watershed, namely, soil losses controlling unit, livestock breeding & soil losses controlling unit, fertilizer use & livestock breeding controlling unit, soil losses & fertilizer use controlling unit and fertilizer use & soil losses controlling unit.

Key words: GIS; models; agricultural nonpoint source pollution; control divisions

流域具有统一的出水口, 水文特性相近, 但同时

也是复杂的综合体。尤其在中国南方丘陵地区, 地形破碎, 流域内不同地形、地貌的土壤性状、植被覆盖、土地利用等差异较大, 而这些因素是造成农业非点源污染来源不确定性和污染负荷空间变异大的重要原因。因此, 对流域农业非点源污染来源贡献的定量识别以及对非点源污染关键源区的空间识别, 在此

收稿日期: 2005-06-06 修回日期: 2005-12-12

基金项目: 福建省科技重大攻关项目(2002H009)

作者简介: 黄金良(1975-), 男, 福建惠安人, 博士。

* 责任作者

基础上进行控制区划,并对流域非点源污染进行控制管理具有重要意义。GIS 和模型是当今流域农业非点源污染研究的主要手段,被广泛地应用于模拟非点源污染机理过程,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^[1-2]。20 世纪 90 年代中后期以来,GIS 作为有效的空间数据采集、管理、分析工具,在我国应用渐广,并与农业非点源污染模型(如 USLE, ANSWERS)相结合进行土壤侵蚀量的预测研究^[3-5]。21 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, SWAT 及 HSPF)开始被引入我国检验其适宜性^[6-8]。九龙江是福建省龙岩、漳州和厦门三市的饮用水源,其水质关系到几百万人民的生活健康。九龙江流域的农业非点源污染问题已引起各界的重视。

1 流域概况和研究方法

1.1 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。

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,气温及降水的时空差异较显著。多年平均气温约为 19.9 ~ 21.1℃,年均气温的总体变化趋势是由东南向西北递减。多年平均降雨量为 1 400 ~ 1 800 mm,年均降雨量由沿海向内地递增。据全国第二次土壤调查资料^[9],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、赤红壤及黄壤等地带性土壤和水稻土等人为土。流域森林覆盖度在 60% 以上,植被种类繁多。

1.2 研究方法

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,经验模型和机理模型相结合的方法,在 GIS 的支持下,对九龙江流域地表径流、土壤侵蚀和氮磷进行定量研究和空间分异性探讨。所涉及的地理信息技术包括:GIS 软件——ARC/INFO, ArcView; RS 软件——ERDAS IMAGINE。所涉及的模型包括:经验模型——SCS - CN, USLE 及污染物流失经验方程;机理模型——AnnAGNPS。具体的技术路线如图 1 所示。

1.3 数据来源及其分析处理

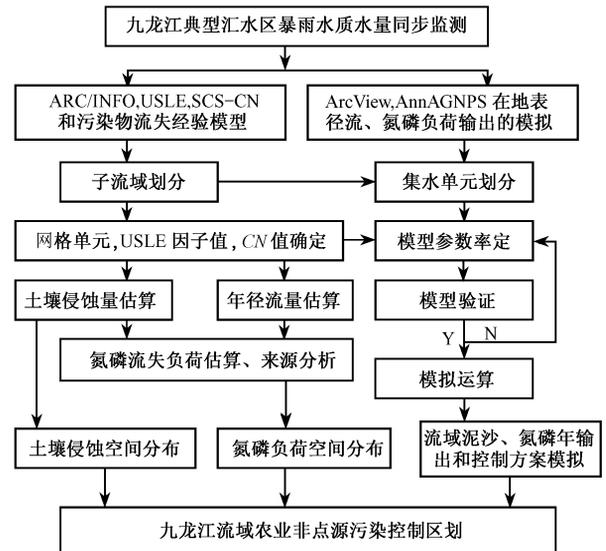


图 1 研究技术路线

Fig. 1 Flow chart of this study

该研究所涉及数据的主要来源:来自于现场调查、监测和采样,包括典型汇水区的边界、土地利用和土壤类型的现场调查及土壤理化性状采样分析,全流域规模养殖场调查,以及经验模型运算和机理模型验证所需的典型汇水区暴雨场次地表径流水质水量监测数据;数据收集,包括全流域数字高程模型(DEM)和 TM 卫片,以及全流域的土壤图以及全国第二次土壤普查资料^[9]等。

对于数据的处理,主要是运用 GIS 软件进行空间数据的分析处理,以用于经验模型的模拟运算和 AnnAGNPS 模型的模拟,包括各典型汇水区的边界、土地利用、土壤和 DEM;对于全流域空间数据的处理,主要是利用 ARC/INFO 对福建省基础地理信息中心提供的 46 幅 1:50 000 原始 DEMs 进行拼接,生成集水区边界;利用 ERDAS 软件对流域 2002 年 12 月 TM 卫片进行非监督分类,获得 13 类用地类型;土壤图取自依全国第二次土壤普查资料^[9]调绘的 1:200 000 土壤图。在此基础上运用 ARC/INFO 的 Grid 模块,结合 USLE 及污染物流失经验模型,进行全流域的土壤侵蚀预测和氮磷流失负荷估算,并利用 ArcView 和 AnnAGNPS 紧密集成界面,进行全流域出口处氮磷年负荷输出的估算和管理措施的模拟预测。

2 基于模型与 GIS 的九龙江流域非点源污染特征识别

2.1 流域边界识别及子流域划分

同一流域具有相同的出口,水文特性(包括产、

汇流机制)相近.由于水文动力条件是非点源污染产生的源动力,从流域角度探讨水体的非点源污染特征,进而进行管理与控制研究.

运用美国ESRI公司的ARC/INFO软件,在建立流域数字高程模型(DEM)的基础上,进行九龙江流域的地表水文分析,模拟了水流方向,提取了水网;对流域界线进行划定,划分了子流域.采用福建省基础地理信息中心提供的46幅1:50000DEM原始数据,在ARC/INFO系统中,经图幅合并、网格重分和流域界线切边等步骤得到九龙江流域数字高程模型.以此为基础,利用ARC/INFO的水文分析模块,生成了流域的边界,并以九龙江地表水质省控断面为出水口,划分了14个子流域.

2.2 流域土壤侵蚀量估算及土壤侵蚀严重区域识别

利用栅格GIS的空间分析功能,结合通用流失方程(USLE),对中等尺度流域进行土壤侵蚀量预测,对土壤侵蚀严重区域进行空间识别研究^[1,10].

USLE方程是由影响水土流失的6个因子用连乘的形式组成的,其表达式为: $A = R \times K \times L \times S \times C \times P$,其中, A 为年土壤流失量; R 为降雨和径流因子; K 为土壤可蚀性因子; L, S 分别为坡长和坡度因子; C 为植被与经营管理因子; P 为水土保持因子.应用USLE的关键是选用合适的算法获取方程各因子指标值,应用GIS和USLE模型预测土壤侵蚀的关键则是各因子图的生成.对于USLE不是能否运用的问题,而是是否适用的问题.有研究表明,直接利用USLE的因子进行福建省闽南地区的土壤侵蚀量预测与实际情况不符^[11].笔者通过文献资料率定USLE因子,尤其是对 R 因子和 L, S 因子进行敏感性分析,获取适宜的因子算法^[12].再运用ARC/INFO的空间数据管理和分析功能,建立九龙江流域的数字高程模型(DEM)、土地利用现状图、土壤图、植被覆盖度分布图等矢量图,对其属性数据进行相应的数据编码操作,并进一步将其栅格化(Grid格式),求得各因子边长为100m×100m的栅格图.再根据USLE的形式,将各因子值相乘,获得九龙江流域的土壤侵蚀强度等级图,并进一步分析九龙江不同子流域和不同县(市、区)土壤侵蚀的空间差异性.

基于USLE和GIS的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究结果表明,九龙江流域年均土壤侵蚀模数为2730.3t/km²,侵蚀强度属中度.该预测结果和利用卫星图片统计的2000年流域平均土壤侵蚀量2387

t/(km²·a)相比,二者的偏差为12.6%.说明该研究在因子确定的方法上基本可靠,可用于九龙江土壤侵蚀量关键源区识别^[13]以及下一步泥沙结合态氮磷负荷的计算.

2.3 不同子流域、行政单元和土地利用的农业非点源污染氮磷负荷空间差异识别

在ARC/INFO支持下,以通用土壤流失方程USLE及SCS-CN径流曲线法和非点源污染物流失经验模型估算九龙江流域非点源污染负荷.其中,SCS-CN是由美国土壤保持局(SCS)提出的计算降雨过程径流深度的经验公式,全年日径流深度之和即为年径流深度.其公式为:

$$\begin{cases} Q = (R - 0.2S)^2 / (R + 0.8S) & R > 0.2S \\ Q = 0 & R \leq 0.2S \end{cases} \quad (1)$$

$$S = (25400 / CN) - 254 \quad (2)$$

式中, Q 为径流量,mm; R 为降雨量,mm; S 为水土保持参数.由于 S 影响因素复杂,不便取值.为此,SCS在归纳了3000多种土壤资料的基础上,提出了一个无量纲参数 CN ,即径流曲线数(runoff curve number, CN). 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(AMC)、植被、坡度、农业耕作方式、水文条件、土地利用和土壤类型等因素有关.为了确定和区分 CN 值,SCS按照不同的土壤渗透性能和产流能力,将土壤分为4种水文类型组.

参照全国第二次土壤普查的成果^[9]——《福建土壤》、《福建土种志》,确定流域的土壤质地,并在此基础上绘制流域土壤水文类型分布图.根据九龙江流域的土壤、水文状况和土地利用类型,参照SCS曲线计算方法提供的取值条件,确定了不同土地利用方式的 CN 值,具体过程见文献^[12],其适用性也得以检验^[13].并根据2002年冬眠期(11—2月)降雨量大于20mm,生长期(3—10月)降雨量大于10mm的所有场次的日降雨量及其前5日降雨量,确定 CN 值,然后利用式(1)、(2)计算出不同土地利用方式下各场次降雨的径流量并逐日累加,得到不同土地利用方式下的逐月径流量数据,并累加成不同土地利用方式下的全年径流量数据 Q 值,其结果以边长为100m×100m的GIS栅格图表达.

在径流量计算的基础上,结合2.2节提及的土壤侵蚀量估算结果,利用溶解态氮磷营养盐迁移经验模型 LD_{kt} ($LD_{kt} = CD_{kt} \cdot Q_{kt}$,其中, LD_{kt} 为溶解态污染物负荷,kg/hm²; CD_{kt} 为径流溶解态污染物质量分

数, mg/kg; Q_{kt} 为径流量, mm) 和颗粒态氮磷营养盐迁移经验模型 LS_{kt} ($LS_{kt} = a \cdot CS_{kt} \cdot X_{kt}$, 其中, a 为单位换算常数; LS_{kt} 为颗粒态污染物负荷, kg/hm²; CS_{kt} 为土壤颗粒态污染物质量分数, %; X_{kt} 为土壤流失量, t/km²) 来进行流域氮磷负荷的估算. 结合相关资料和笔者于 2003 年 4—10 月在 5 个不同土地利用的典型汇水区出水口暴雨地表径流中的溶解态污染物浓度实测数据^[12], 对经验模型的各个参数进行了率定. 并利用 GIS 的栅格数据空间分析的功能, 通过各因子图的计算和表达, 将流域离散化为边长 100 m × 100 m 的网格, 估算出每一网格的溶解态氮磷负荷和颗粒态氮磷负荷. 据此, 以土地利用类型、子流域、县(市、区)为空间单元分别统计出流域的溶解态氮磷负荷、颗粒态氮磷负荷和总氮、总磷负荷. 结果表明, 九龙江子流域平均总氮负荷为 12.4~21.5 kg/(hm²·a), 平均总磷负荷为 0.8~2.0 kg/(hm²·a). 流域各用地类型单位面积总氮负荷排序是: 香蕉 > 果园 > 幼龄果园 > 水田 > 蔬菜地 > 耕地 > 村庄等; 单位面积总磷负荷依次为: 香蕉 > 幼龄果园 > 水田 > 耕地 > 村庄 > 灌木林 > 裸地 > 果园 > 林地等.

2.4 流域农业非点源污染负荷来源与贡献识别

笔者认为, 村庄和城郊的氮磷负荷反映了农村生活污染的氮磷贡献量; 林地、灌木丛、裸地和湿地的氮磷负荷之和可反映水土流失的氮磷贡献, 但由于并非所有的林地、灌木丛等都存在水土流失, 林木的树冠截留, 林下植被的郁密使得降雨动能得到极大的削减, 植被覆盖度高的林地因降雨形成的地表径流较小, 所形成的水土流失也较少, 因此, 以各主要行政区土壤侵蚀强度在强度以上(土壤侵蚀模数 > 5 000 t/(km²·a)) 的区域所占比例, 与林地、灌木林、裸地和湿地的氮磷负荷之和的乘积, 可反映各行政区水土流失造成的氮磷贡献; 其他用地类型的氮磷负荷总和, 可反映化肥施用的氮磷贡献量. 结合流域规模养猪场对地表水氮磷负荷贡献的定量结果^[12], 参照流域各用地类型面积, 统计水土流失、化肥施用、农村生活污染和畜禽养殖四大农业非点源污染来源在九龙江流域农业非点源污染的贡献, 并以流域县(市、区)为空间单元, 分别计算九龙江流域农业非点源污染的来源及贡献.

结果表明, 九龙江全流域总氮负荷的来源贡献依次是: 化肥施用 > 畜禽养殖 > 农村生活污染 > 水土流失; 总磷负荷的来源贡献排序分别是: 化肥施

用 > 畜禽养殖 > 水土流失 > 农村生活污染; 流域各主要县(市、区)的农业非点源来源贡献有别, 展现了较大的空间差异性. 表现在: 新罗区氮磷负荷的贡献主要来源于畜禽养殖和水土流失; 漳平总氮贡献以化肥施用和水土流失为主, 总磷贡献以水土流失和化肥施用为主; 漳州市郊的氮负荷主要来自于化肥施用和畜禽养殖, 总磷负荷主要来自于畜禽养殖与化肥施用; 化肥施用占龙海、长泰、华安、南靖和平和 5 个县(市、区)总氮来源的 50% 以上.

2.5 流域最佳管理措施模拟识别

笔者运用连续-分布式参数模型 AnnAGNPS 2.0 版本进行九龙江流域农业非点源污染负荷估算和流域管理措施的模拟. 通过典型汇水区的参数校正^[14]和两大子流域的进一步模型验证^[15], 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分别进行模拟.

结果显示, 典型小流域坡地种植退耕返林后, 流域出口氮磷流失削减显著; 模拟西溪香蕉地改种双季稻后, 西溪流出口总氮、可溶态氮、总磷和可溶性磷依次削减明显, 反映了香蕉种植对西溪水质氮磷贡献显著. 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达 60% 以上, 反映出北溪流域中生猪养殖对水质的影响之大.

3 九龙江流域农业非点源污染控制区划

有研究表明, 多数流域的泥沙和氮磷输出主要源自局部区域的泥沙和氮磷流失, 在空间上标识出这些关键源区对于有效进行流域水环境管理起重要作用^[16]. 因此, 要有效地治理流域农业非点源污染, 必须根据不同区域的实际情况因地制宜, 这也是进行控制区划的意义所在. 区划原则和方法如下:

3.1 以定量研究结果为区划依据

借助 GIS 和分布式参数模型对九龙江流域农业非点源污染来源贡献进行定量化和空间分异性探讨, 标识了流域农业非点源污染的关键源区, 揭示了各子流域和行政单元的水土流失、化肥施用、农村生活污染和畜禽养殖等农业非点源污染要素的空间差异, 为流域农业非点源污染控制区划提供了定量分析的基础.

3.2 以子流域为基础划定区划单元

笔者采用 GIS 和流域数字高程模型(DEM) 结合进行九龙江流域子流域的划分, 并以省控断面定义各子流域的出水口. 对于相邻近的子流域为同一种区划单元, 则利用 GIS 手段进行空间合并, 以形成同一区

划单元.这种区划单元的界定方法优点在于:从汇水区出发,充分考虑流域下垫面的水文地形等自然条件,较易从源头上控制各支流的水质状况;便于利用现有监测资料定期进行水质检验;部分控制区出口处(省控断面)为地市之间或县级行政区之间的交接断面,可进行控制区之间有效的行政监督和管理.

3.3 以主要污染源标定控制区

农业非点源污染大致有四大来源:水土流失、化肥施用、畜禽养殖污染和农村生活污染.参照 2.2 ~ 2.4 节对各子流域和行政界线的农业非点源污染源贡献的定量结果,分别筛选出各子流域的主要污染类型,以便有针对性管理.控制区划的结果见表 1. 具体空间分布情况见图 2.

表 1 九龙江流域农业非点源污染控制分区概述

Table 1 Brief conditions of division zones for agricultural non - point source pollution control in Jiulong River watershed

控制分区	面积/km ²	地理特征	社会经济状况	主要非点源污染问题
水土流失控制区	5 518. 1	地势较高,多为低山地貌,植被覆盖度较高	以林业、采矿业为主. 农业活动强度较低,生猪养殖规模较小	水土流失是该区需引起重视的首要问题
生猪养殖 + 水土流失控制区	1 123. 3	以低山为主	生猪养殖规模大,采矿业发达	生猪养殖带来的水质问题首当其冲,水土流失其次
化肥施用 + 生猪养殖控制区	2 642. 4	地处平原地区,耕地较多	种植香蕉等果园,芴城、龙文和龙海生猪养殖规模较大	化肥过量施用及生猪养殖业引起的氮磷流失量较大
水土流失 + 化肥施用控制区	1 789. 9	以丘陵低山为主	坡地果园开发强度较大,坡地上种植芦柑、茶等	坡地果园过度开发,既引起水土流失,又引起氮磷流失
化肥施用 + 水土流失控制区	1 132. 2	丘陵低山	坡地果园开发强度稍弱	化肥施用量较大,坡地又有一定程度的开发

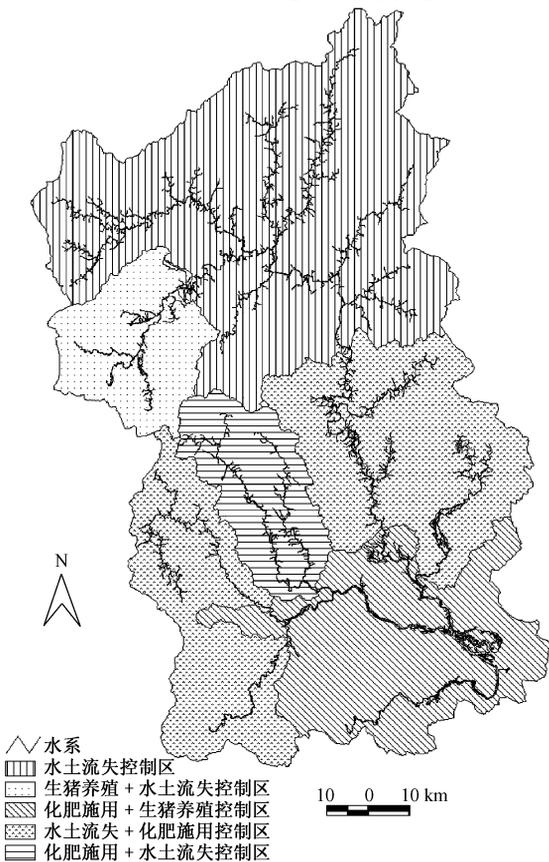


图 2 九龙江流域 NPS 控制区划单元划分

Fig. 2 Division zones for NPS control in Jiulong River watershed

4 结论

a. 利用 GIS 和经验模型较好地回答了流域农业非点源污染氮磷来源与贡献,标识了农业非点源污染氮磷等污染物的关键源区,既发挥了经验模型所需模型参数少、研究尺度较大、效率较高的优点,又通过 GIS 的栅格数据空间分析功能较好地实现了流域非点源污染的分式模拟,识别了 NPS 的关键源区,模拟结果的显示度也得以提高. 鉴于经验模型无法体现污染物的迁移转化过程,仅能从空间上体现其分布差异等,因此又借助 AnnAGNPS 机理模型,在模型得以校验的前提下,模拟了非点源污染管理措施方案,得到了流域非点源污染控制管理方面的有益启示.

b. 以模型和 GIS 的定量结果为依据,根据主要污染源进行了九龙江流域农业非点源污染控制区划,划分了水土流失控制区、生猪养殖 + 水土流失控制区、化肥施用 + 生猪养殖控制区、水土流失 + 化肥施用控制区及化肥施用 + 水土流失控制区 5 类控制单元. 为有针对性管理和控制九龙江流域农业非点源污染提供了参考.

参考文献:

[1] Ake S, Lars P. Non-point critical area analysis in the Gsselo watershed using GIS[J]. Environmental Modelling & Software, 2003, 18: 887—898.
 [2] Baginska B, Milne H W, Cornish P S. Modelling nutrient transport in

- Currency Creek ,NSW with AnnAGNPS and PEST[J]. *Environment Modeling & Software* , 2003 , 18 : 801 —808.
- [3] 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.
- Chen Yibing , Trouwborst K O. Study of applying ANSWERS and the geographical information system ARC/INFO in soil erosion modeling [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation* , 1997 , 3 (2) : 1 —13.
- [4] 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.
- Yóu Songcai , Li Wenqing. Estimation of soil erosion supported by GIS: a case study in Guanji Township , Taihe , Jiangxi [J]. *Journal of Natural Resources* , 1998 , 14 (1) : 62 —47.
- [5] Shi Z H , C Cai F , Ding S W , 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.
- [6] 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.
- Chen Xin , Guó Xīnbó. Prediction of phosphorus losses in micro-watershed ecosystem by AGNPS model [J]. *Transactions of CSAE* , 2000 , 16 (5) : 44 —47.
- [7] Hao F H , Zhang X S , Yang Z F. A distributed non-point source pollution model calibration and validation in the Yellow River basin [J]. *J Environ Sci* , 2004 , 16 (4) : 626 —650.
- [8] 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.
- Xíng Kèxiá , Guó Huáichéng , Sūn Yánfēng , et al. Simulation of non-point source pollution in Lake Dianchi basin based on HSPF model [J]. *China Environmental Science* , 2004 , 24 (2) : 229 —232.
- [9] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤[M]. 福州: 福建科学技术出版社 , 1991.
- Office of Soil Survey in Fujian Province. *Soil type in Fujian Province* [M]. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publication House , 1991.
- [10] Christopher Cox , Chandra M. Application of geographic information systems in watershed management planning in St. Lucia [J]. *Computer and Electronics in Agriculture* , 1999 , 20 : 229 —250.
- [11] 黄炎和 , 朱鹤健 , 郑达贤. 闽南地区的土壤侵蚀与治理[M]. 北京: 中国农业出版社 , 2002.
- Huang Yanhe , Zhu Hejian , Zheng Daxian. *Soil erosion and its control in southeast of Fujian Province* [M]. Beijing: Agricultural Press of China , 2002.
- [12] 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.
- Huang Jinliang. Study on agricultural non-point source pollution of Jiulong River watershed based on GIS and environmental models [D]. Xiamen: Xiamen University , 2004.
- [13] 黄金良 , 洪华生 , 张珞平 , 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀预测研究[J]. *水土保持学报* , 2004 , 18 (5) : 75 —79.
- Huang Jinliang , Hong Huasheng , Zhang Luoping , et al. Study on predicting soil erosion in Jiulong River watershed based on GIS and USLE [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* , 2004 , 18 (5) : 75 —79.
- [14] 黄金良 , 洪华生 , 杜鹏飞 , 等. AnnAGNPS 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 subwatersheds in Jiulong River watershed [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2005 , 25 (8) : 1135 —1142.
- [15] 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.
- Hóng Huashēng , Huáng Jīnliáng , Zhāng Luópíng , et al. Modelling pollutant loads and management alternatives in Jiulong River watershed with AnnAGNPS [J]. *Chinese Journal of Environmental Science* , 2005 , 26 (4) : 63 —69.
- [16] Tripathi M P , Panda R K , Raghuvanshi N S. Identification and prioritization of sub-watersheds for soil conservation management using SWAT model [J]. *Biosystems Engineering* , 2003 , 85 (3) , 365 —379.

(编辑: 潘风云)