

# 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源 氮磷负荷估算研究

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

**摘要:**以实测资料和相关研究资料为基础,分别选取适当的算法对 USLE 方程和 SCS 模型中的各个参数进行了率定,并借助 ARC/INFO 的 GRID 模块使各参数分别以栅格图层存储。利用 GIS 的空间运算分析能力,估算了九龙江流域土壤侵蚀量和年径流量,并进一步计算了流域的溶解态氮磷负荷和固态氮磷负荷。以 100 m × 100 m 的网格为基本计算单元,以污染源输出经验模型进行了氮磷负荷的估算,实现了模型在空间上的分布式模拟,对九龙江流域农业非点源进行了定位、定量研究。

**关键词:** GIS; 氮磷负荷; 九龙江流域

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2004)05-0866-06

## Nitrogen and Phosphorus Loading of Agricultural Non-point Sources in Jiulong River Watershed Based on GIS

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

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

**Abstract:** Empirical models – USLE, SCS – CN and empirical equations are used to quantify the nitrogen (N) and phosphorus (P) loadings in a Geographic Information Systems (GIS) environment. Various GIS layers, including land – use, soil types and DEMs layer are created for the entire watershed by ARC/INFO, which are used to extract the parameters for USLE and SCS – CN models. The GIS layers are mostly organized in ARC/INFO GRID (the grid cell size is 100 m × 100 m). The curve numbers (CNs) method is used to estimate surface runoff and the CNs is adjusted depending on the antecedent moisture condition (AMC) before each storm. USLE is employed to predict the soil loss in Jiulong river watershed. Then, combined with the results obtained from the CNs methods and USLE model, the empirical equations for calculating the nitrogen and phosphorus loadings are provided to calculate N and P loadings in forms of dissolved N and P, particulate N and P based on ARC/INFO GRID. As a result, the spatial distribution of N and P loadings in terms of sub – watersheds, land – use type and counties in Jiulong river watershed are obtained and analyzed, which makes it easy to identify the critical source areas so as to efficiently control the agricultural non – point source pollution in Jiulong river watershed. The results show that excess fertilizer use and livestock farm contribute significant N and P loadings from many counties. The contribution of livestock farm to N and P loadings from some counties such as Xinluo district and Zhangzhou could occupy up to 40% ~ 47% and 51% ~ 62%, respectively.

**Keywords:** geographic information systems; nitrogen and phosphorus loading; jiulong river watershed

收稿日期: 2004 – 01 – 11

基金项目: 福建省重大科技攻关项目 (2002H009)

作者简介: 黄金良 (1975—) 男, 博士后, 研究方向为流域非点源污染和环境规划管理。E – mail: jlhuang@tsinghua.edu.cn

联系人: 洪华生

福建省九龙江流域上游的龙岩畜禽养殖业发达，流域中下游的漳州平原是农业比较发达的地区，是闽东南的特色农业带，土地垦殖率、耕地产出率高。因此，农业非点源是构成九龙江流域水环境隐患的主要污染源。农业非点源是一种间歇性的、随机性、不确定性很强的复杂过程，估算其发生负荷的难度大<sup>[1]</sup>。地理信息系统(GIS)自 20 世纪 90 年代以来已被广泛应用于具有空间特征的农业非点源污染研究，尤其是将 GIS 与环境模型相结合进行非点源污染的国内外案例甚多<sup>[2]</sup>，展现了其强大的空间数据管理和分析能力，同时也弥补了环境模型处理空间数据能力的不足<sup>[3]</sup>。

本文探讨了应用地理信息系统进行九龙江流域农业非点源氮磷负荷研究，可为流域的水环境规划管理提供科学依据。

1 九龙江流域环境数据库建立及子流域划分

1.1 环境数据库及模型参数因子图的建立

在 ARC/INFO 及 ARCVIEW 地理信息系统软件和 VISUAL FOXPRO 数据库管理系统支持下建立了九龙江流域的环境数据库和模型因子图，具体见数据字典，见表 1。

1.2 九龙江子流域划分

表 1 九龙江流域非点源污染数据字典简表

Table 1 General situation of non - point source pollution in Jiulong river watershed

| 图层名           | 数据类型及格式  | 图层名           | 数据类型及格式  |
|---------------|----------|---------------|----------|
| 行政界线 xzjx     | 多边形, 矢量  | 作物管理因子图 C     | GRID, 栅格 |
| 土地利用图 landuse | 多边形, 矢量  | 植被与经营管理因子图 P  | GRID, 栅格 |
| 土壤图 soil      | 多边形, 矢量  | 降雨侵蚀力因子图 R    | GRID, 栅格 |
| 植被覆盖图 plant   | 多边形, 矢量  | 土壤全氮含量分布图 TPN | GRID, 栅格 |
| 水系图 stream    | 线, 矢量    | 土壤全磷含量分布图 TPP | GRID, 栅格 |
| 数字高程模型 DEM    | GRID, 栅格 | 年径流量分布图 flow  | GRID, 栅格 |
| 坡度因子图 L       | GRID, 栅格 | 可溶性氮浓度分布图 TDN | GRID, 栅格 |
| 坡长因子图 S       | GRID, 栅格 | 可溶性磷浓度分布图 TDP | GRID, 栅格 |
| 土壤可蚀性因子图 K    | GRID, 栅格 | 逐日雨量数据        | DBF 数据库  |

运用 ARC/INFO 对九龙江流域分幅数字高程模型(DEM)进行图幅拼接、网格重分及切割等处理分析，生成九龙江流域数字高程模型。基于 DEM 和 GIS，进行流域的水文模拟分析，包括洼地填充、水流方向计算、水流累积量计算、水网提取，最后进行了九龙江全流域及子流域界线的划分，生成了数字流域。

考虑到每一子流域出口处地表水质监测的便利和模型验证的需要，本研究大都以九龙江地表水省控断面为子流域出口处，进行子流域的划定。通过 ARC/INFO 的 GRID 模块划分了 14 个子流域，如图 1 所示。九龙江主要包括二大干流：北溪和西溪。模拟的北溪干流子流域及西溪干流子流域的总面积分别是 9 562. 22 km<sup>2</sup> 和 4 181. 92 km<sup>2</sup>。与漳州市水土办的统计面积 9 640 km<sup>2</sup> 和 3 940 km<sup>2</sup> 分别相差 - 0. 81% 和 + 6. 14%。

2 模型及其参数选择

降雨 - 径流过程是造成非点源污染物输出的源动力。水土流失是农业非点源污染发生的主要形式，也是污染物的迁移载体。本研究选用美国土壤保持局(SCS)开发的经验模型 - 径流曲线数法(Curve Num-

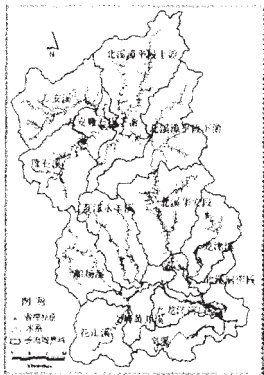


图 1 九龙江流域子流域划分

Figure 1 Dividing Jiulong river watershed into sub - watersheds

ber Method)进行年径流量的估算，运用美国通用土壤流失方程(USLE)进行土壤侵蚀量的估算，在此基础上，最后进行了氮磷污染物负荷输出的计算。

2.1 年径流量计算——SCS 曲线方程

SCS 曲线方程已得到公认和普遍推广，并被应用到在水文、土壤侵蚀和水质模型当中，如：CREAMS、AGNPS 和 EPIC 等。它是美国土壤保持局提出的计算降雨过程径流深度 Q 的经验公式，全年日径流量深的和就是年径流深<sup>[4,5]</sup>。公式为：

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

式中:  $Q$  为径流量, mm;  $P$  为降雨量, mm;  $S$  为水土保持参数。式中只有一个未知参数  $S$ , 由于其影响因素复杂, 不便取值。为此, SCS 在归纳了 3 000 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), 并规定如下关系:

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

$CN$  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。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<sup>[6]</sup>, 确定了不同土地利用方式的  $CN$  值。表 2 的数值是中等含水量时的  $CN$  值, 当土壤处于干旱或饱和含水量时, 则需分别以式(3)和式(4)进行校正。

$$CN_I=\frac{CN_{II}}{0.4036+0.0059CN_{II}} \quad (3)$$

$$CN_{III}=\frac{CN_{II}}{2.334-0.01334CN_{II}} \quad (4)$$

根据 2002 年生长期(3~11 月)雨量大于 10 mm, 冬眠期(12~2 月)雨量大于 20 mm 的所有场次的日降雨及其前五日雨量, 结合九龙江土地利用等, 确定其  $CN$  值和 AMC, 利用公式(1)(2) 计算不同土地利

表 2 九龙江流域不同土地利用  $CN$  值

Table 2 CN values of different land - uses in Jiulong river watershed

| 土地利用类型 | 水文条件 | 水文土壤类型组 |    |    |    | 土地利用类型 | 水文条件 | 水文土壤类型组 |     |     |     |
|--------|------|---------|----|----|----|--------|------|---------|-----|-----|-----|
|        |      | A       | B  | C  | D  |        |      | A       | B   | C   | D   |
| 旱地     | 差    | 72      | 81 | 85 | 91 | 林地     | 差    | 45      | 65  | 70  | 80  |
|        | 好    | 67      | 78 | 82 | 89 |        | 好    | 25      | 55  | 68  | 77  |
| 水田     | 差    | 77      | 88 | 91 | 93 | 灌木林    | 差    | 30      | 58  | 72  | 78  |
|        | 好    | 70      | 82 | 88 | 89 |        | 好    | 41      | 57  | 70  | 80  |
| 菜地     | 差    | 61      | 74 | 82 | 85 | 农村用地   | —    | 65      | 75  | 82  | 85  |
|        | 好    | 58      | 70 | 79 | 83 |        | 裸地   | 差       | 39  | 61  | 74  |
| 果园     | 差    | 60      | 70 | 81 | 87 | 湿地     | 好    | 49      | 69  | 79  | 84  |
|        | 好    | 50      | 65 | 75 | 85 |        | 差    | 92      | 94  | 95  | 97  |
| 幼龄果园   | 差    | 41      | 57 | 68 | 77 | 水体     | 好    | 90      | 92  | 93  | 95  |
|        | 好    | 40      | 55 | 66 | 75 |        | —    | 100     | 100 | 100 | 100 |
| 香蕉园    | 差    | 64      | 70 | 81 | 86 | 城市用地   | —    | 77      | 85  | 87  | 92  |
|        | 好    | 60      | 68 | 79 | 83 |        |      |         |     |     |     |

用方式下的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, 并累加为不同土地利用方式下的全年径流量数据  $Q_{kt}$  值。

2.2 土壤侵蚀量估算——通用土壤流失方程(USLE)

Wischmeier W H 在 60 年代提出的通用土壤流失方程(USLE)<sup>[7]</sup>, 由于因子的解释具有物理意义, 仍是目前预测土壤侵蚀广泛使用的方法。该方程是将影响水土流失的 6 个因子用连乘的形式组成, 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,  $L$  和  $S$  分别为坡度坡长因子,  $C$  为植被与经营管理因子,  $P$  为水土保持因子。模型中参数的具体取值和确定见文献[8]。

2.3 污染物输出模型

2.3.1 固态氮磷污染物负荷模型

参照王晓燕<sup>[9]</sup>、章北平<sup>[10]</sup>、施为光<sup>[11]</sup>、孙峰<sup>[12]</sup>及史志华等<sup>[13]</sup>研究, 负荷模型为:

$$LS_{kt}=a\cdot CS_{kt}\cdot X_{kt}\cdot TS_{kt}\cdot Sd$$

式中:  $a$  为单位换算常数;  $LS_{kt}$  为颗粒态氮磷污染物负荷,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $CS_{kt}$  为土壤氮磷污染物浓度,  $\%$ ;  $X_{kt}$  为土壤流失量,  $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ ;  $TS_{kt}$  为污染物富集比;  $Sd$  为流域泥沙输移比。本研究仅探讨氮磷空间分异, 未考虑迁移转化过程, 因此污染物富集比和  $Sd$  为 1。

2.3.2 溶解态氮磷污染物负荷模型

参照王晓燕<sup>[9]</sup>、章北平<sup>[10]</sup>、施为光<sup>[11]</sup>、孙峰<sup>[12]</sup>及史志华等<sup>[13]</sup>研究, 负荷模型为:

$$LD_{kt}=CD_{kt}\cdot Q_{kt}\cdot TD_{kt}$$

式中:  $LD_{kt}$  为溶解态污染物负荷,  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;  $CD_{kt}$  为径流溶解态污染物浓度,  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $Q_{kt}$  为径流量, mm;  $TD_{kt}$  为迁移系数, 表示溶解态污染物从地面向流域出口迁移的百分比, 此处仅探讨可溶态污染物的空间分异, 不考虑其迁移, 因此未考虑迁移百分比。  $CD_{kt}$  溶解态污染物浓度值由九龙江流域 2003 年 4 月—10 月通过 6 个具有代表性的土地利用方式的不同典型汇水区在暴雨事件下野外实地监测的数据<sup>[14]</sup> 并参照相关研究<sup>[12, 13]</sup>统计而来, 见表 3。

表 3 九龙江流域溶解态污染物  $CD_{ki}$  值范围

Table 3 value ranges of dissolved pollutants in Jiulong river watershed

| 土地利用类型 | 溶解态氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 溶解态磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 土地利用类型 | 溶解态氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 溶解态磷/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ |
|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 旱地     | 3.3                                   | 0.24                                  | 林地     | 1.25                                  | 0.065                                 |
| 水田     | 3.46                                  | 0.35                                  | 农村用地   | 1.6                                   | 0.12                                  |
| 菜地     | 3.63                                  | 0.12                                  | 城市用地   | 1.2                                   | 0.09                                  |
| 果园     | 4.73                                  | 0.18                                  | 湿地     | 0.00                                  | 0.00                                  |
| 幼龄果园   | 5.2                                   | 0.450.30                              | 裸地     | 0.30                                  | 0.025                                 |
| 香蕉园    | 5.0                                   | 0.52                                  | 水体     | 0.00                                  | 0.00                                  |
| 灌木林    | 0.92                                  | 0.09                                  |        |                                       |                                       |

3 结果与讨论

上述模型，在 ARC/INFO 系统支持下，运用 GRID 模块，对各因子图进行栅格化，网格大小取  $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ，利用 GIS 空间数据运算功能，依次获得年径流量分布图，流域溶解态氮磷分布图，土壤侵蚀量分布图，土壤氮磷含量分布图。根据污染物输出关系式，利用 GIS 运算，即可得到流域的固态氮磷负荷，溶解态氮磷负荷及其空间分布图（见图 2）。

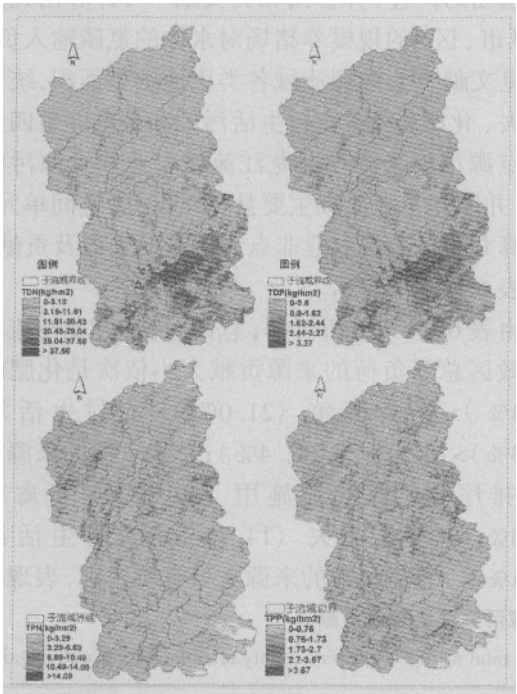


图 2 九龙江流域氮磷负荷空间分布  
Figure 2 Spatial distribution of N and P loadings in Jiulong river watershed

3.1 不同流域农业非点源污染氮磷负荷

由表 4 和图 2 可见，在空间分布上，九龙江漳州平原的南溪、龙海段、浦南段三子流域可溶态氮、磷负荷较高，颗粒态氮、磷负荷值较低。地处山区丘陵的龙

表 4 九龙江 14 个子流域氮磷负荷分布 ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

Table 4 Spatial distribution of N and P loadings in fourteen sub-watersheds of Jiulong river ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

| 子流域   | 可溶态氮负荷 | 可溶态磷负荷 | 颗粒态氮负荷 | 颗粒态磷负荷 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 黄井文峰溪 | 16.32  | 1.31   | 2.23   | 0.65   |
| 花山溪   | 14.41  | 1.10   | 3.30   | 0.94   |
| 南溪    | 16.58  | 1.15   | 1.73   | 0.63   |
| 龙海段   | 16.49  | 1.24   | 0.94   | 0.38   |
| 浦南段   | 20.36  | 1.65   | 1.11   | 0.35   |
| 龙津溪   | 17.33  | 1.33   | 2.06   | 0.53   |
| 芗江永丰溪 | 10.80  | 0.72   | 3.15   | 0.79   |
| 华安段   | 10.90  | 0.71   | 3.60   | 1.02   |
| 船场溪   | 12.29  | 0.78   | 4.07   | 0.96   |
| 漳平下游段 | 9.72   | 0.59   | 4.28   | 0.85   |
| 雁石下游段 | 9.30   | 0.06   | 3.12   | 0.69   |
| 雁石溪   | 9.94   | 0.62   | 4.53   | 0.80   |
| 漳平上游段 | 9.23   | 0.54   | 3.37   | 0.69   |
| 万安溪   | 8.23   | 0.45   | 4.36   | 0.76   |

岩市的几个子流域如雁石溪、雁石溪下游、万安溪、漳平上游段、漳平下游段的可溶态氮、磷负荷值低。花山溪、船场溪颗粒态氮、磷负荷值较高。这种现象发生的原因在于：漳州平原，包括平和、南靖农业活动强度较高，化肥施用量较大等因素，造成可溶态氮磷负荷值高于土地利用强度较低的龙岩漳平的几个流域；颗粒态氮磷负荷高低与土壤侵蚀强度有关，尤其反映在花山溪和船场溪两子域由于丘陵坡地果园开发较多，水土流失较严重，而龙岩万安溪、雁石下游、漳平下游几个子流域尽管地势较高，但由于植被保持较好，颗粒态氮磷负荷值也较低。

3.2 不同土地利用类型氮磷负荷

由表 5 可见，九龙江流域各种土地利用类型单位面积总氮和总磷负荷分别为  $1.03 \sim 40.67\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  和  $0.35 \sim 4.29\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其中香蕉和果园的单位面积总氮负荷最高，香蕉和幼龄果园单位面积总磷负荷最高。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，造成该现象的原因主要是由于总

表 5 九龙江流域不同土地利用类型氮磷负荷(kg · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)

Table 5 N and P loadings of different land – uses in Jiulong river watershed(kg · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)

| 用地类型 | 总氮     | 可溶态氮   | 颗粒态氮  | 总磷    | 可溶态磷  | 颗粒态磷  |
|------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 林地   | 11. 59 | 7. 75  | 3. 84 | 1. 53 | 0. 71 | 0. 82 |
| 果园   | 36. 20 | 35. 39 | 0. 81 | 1. 67 | 1. 35 | 0. 32 |
| 耕地   | 27. 70 | 26. 64 | 1. 06 | 2. 26 | 1. 94 | 0. 32 |
| 村庄   | 17. 74 | 14. 27 | 3. 47 | 2. 10 | 1. 07 | 1. 03 |
| 香蕉   | 40. 67 | 40. 43 | 0. 24 | 4. 29 | 4. 20 | 0. 09 |
| 裸地   | 8. 09  | 2. 84  | 5. 25 | 1. 90 | 0. 24 | 1. 66 |
| 幼龄果园 | 33. 32 | 31. 78 | 1. 54 | 3. 55 | 3. 06 | 0. 49 |
| 蔬菜地  | 28. 61 | 28. 60 | 0. 01 | 0. 93 | 0. 92 | 0. 01 |
| 灌木林  | 11. 31 | 6. 44  | 4. 87 | 1. 96 | 0. 63 | 1. 33 |
| 湿地   | 1. 03  | 0. 23  | 0. 08 | 0. 35 | 0. 06 | 0. 29 |
| 水田   | 30. 76 | 30. 72 | 0. 04 | 3. 12 | 3. 11 | 0. 01 |
| 城市用地 | 12. 09 | 11. 09 | 1. 00 | 1. 14 | 0. 83 | 0. 31 |

氮负荷中可溶态氮负荷占较大比重 ,并且受化肥施用量的影响较大 ;单位面积总磷负荷大小依次为 :香蕉> 幼龄果园> 水田> 耕地> 村庄> 灌木林> 裸地> 果园> 林地等 ,施肥量较高的香蕉地、幼龄果园和水田由于可溶性磷负荷在总磷中占有相当大的比重 ,裸地、灌木林、村庄和林地由于颗粒态磷占比重较大 ,因此 ,这几类用地类型单位面积总磷负荷较高。

3. 3 九龙江流域各县(市)农业非点源污染总氮来源及贡献

本研究尝试从水土流失、化肥施用、农村生活污染和畜禽养殖等四大非点源污染来源对九龙江主要行政区域的非点源污染来源、贡献进行定量表达。

可大致认为 ,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 ,本研究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 kg · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>) 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反映各行政区水土流失造成的氮磷贡献 ;其它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 2002 年农村统计年鉴和 2003 年 7 月课题组对九龙江全流域规模养殖场的调查 ,并参阅相关文献<sup>[15]</sup> ,计算出九龙江各县(市、区)的规模养猪场对水体的氮磷输入负荷 ,结果见文献<sup>[16]</sup>。参照流域各类用地类型面积 ,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 ,并以九龙江流域主要县(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 ,结果如表 6 和表 7 所示。

由表 6、表 7 分析可知 ,总体而言 ,九龙江流域主要行政区总氮负荷的来源贡献大小依次是化肥施用 (53. 4%) > 畜禽养殖 (21. 0%) > 农村生活污染 (13. 3%) > 水土流失 (12. 4%) ;总磷负荷的来源贡献大小排序分别是化肥施用 (40. 8%) > 畜禽养殖 (31. 4%) > 水土流失 (14. 7%) > 农村生活污染 (13. 1%)。总氮负荷的来源贡献有所区别 ,表现在总

表 6 九龙江流域各县(市)农业非点源污染总氮来源贡献

Table 6 Contributions of N from agricultural non – point source pollution to total nitrogen in every county of Jiulong river watershed

| 县(市) | 水土流失的<br>总氮负荷/t | 化肥施用的<br>总氮负荷/t | 生活污染贡献<br>总氮负荷/t | 养殖场贡献<br>总氮负荷/t | 各来源的<br>总氮负荷/t | 水土流失的<br>总氮负荷/% | 化肥施用的<br>总氮负荷/% | 生活污染贡献<br>总氮负荷/% | 养殖场贡献<br>总氮负荷/% |
|------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 平和   | 182. 0          | 181. 1          | 859. 2           | 211. 9          | 1 434. 2       | 12. 7           | 12. 6           | 59. 9            | 14. 8           |
| 南靖   | 200. 9          | 287. 9          | 1 013. 7         | 194. 3          | 1 696. 9       | 11. 8           | 17. 0           | 59. 7            | 11. 5           |
| 龙海   | 24. 7           | 316. 4          | 1 509. 2         | 370. 5          | 2 220. 8       | 1. 1            | 14. 2           | 68. 0            | 16. 7           |
| 漳州市郊 | 0. 3            | 57. 6           | 546. 6           | 534. 2          | 1 138. 7       | 0. 0            | 5. 1            | 48. 0            | 46. 9           |
| 长泰   | 31. 2           | 87. 6           | 1 131. 0         | 150. 3          | 1 400. 0       | 2. 2            | 6. 3            | 80. 8            | 10. 7           |
| 华安   | 182. 5          | 168. 3          | 583. 5           | 136. 7          | 1 071. 0       | 17. 0           | 15. 7           | 54. 5            | 12. 8           |
| 漳平   | 415. 6          | 280. 7          | 549. 7           | 169. 9          | 1 416. 0       | 29. 4           | 19. 8           | 38. 8            | 12. 0           |
| 新罗   | 505. 0          | 276. 2          | 456. 4           | 845. 8          | 2 083. 5       | 24. 2           | 13. 3           | 21. 9            | 40. 6           |
| 合计   | 1 542. 3        | 1 655. 8        | 6 649. 2         | 2 613. 7        | 12 461. 1      | 12. 4           | 13. 3           | 53. 4            | 21. 0           |

表 7 九龙江流域各县(市)农业非点源污染总磷来源贡献

Table 7 Contributions of P from agricultural non - point source pollution to total phosphorus in every county of Jiulong river watershed

| 县(市) | 水土流失的<br>总磷负荷/t | 化肥施用的<br>总磷负荷/t | 生活污染贡献<br>总磷负荷/t | 养殖场贡献<br>总磷负荷/t | 各来源的<br>总磷负荷/t | 水土流失的<br>总磷负荷/% | 化肥施用的<br>总磷负荷/% | 生活污染贡献<br>总磷负荷/% | 养殖场贡献<br>总磷负荷/% |
|------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| 平和   | 25.2            | 20.7            | 79.1             | 36.1            | 161.0          | 15.6            | 12.9            | 49.1             | 22.4            |
| 南靖   | 27.5            | 34.0            | 92.8             | 33.0            | 187.4          | 14.7            | 18.1            | 49.5             | 17.6            |
| 龙海   | 3.4             | 31.5            | 121.5            | 62.9            | 219.4          | 1.6             | 14.4            | 55.4             | 28.7            |
| 漳州市郊 | 0.0             | 6.0             | 51.9             | 91.1            | 149.0          | 0.0             | 4.0             | 34.8             | 61.1            |
| 长泰   | 4.3             | 9.9             | 99.1             | 25.7            | 138.9          | 3.1             | 7.1             | 71.3             | 18.5            |
| 华安   | 24.7            | 19.8            | 49.8             | 23.2            | 117.6          | 21.0            | 16.8            | 42.4             | 19.7            |
| 漳平   | 55.5            | 32.6            | 45.3             | 29.3            | 162.7          | 34.1            | 20.1            | 27.8             | 18.0            |
| 新罗   | 67.5            | 31.5            | 38.5             | 143.5           | 280.9          | 24.0            | 11.2            | 13.7             | 51.1            |
| 合计   | 208.1           | 186.1           | 577.9            | 444.8           | 1 416.9        | 14.7            | 13.1            | 40.8             | 31.4            |

氮的来源贡献中化肥施用占 50% 以上,而总磷负荷中,除了化肥施用外,畜禽养殖对磷的贡献显著,两者合占 70% 以上的贡献量。在贡献量大小上,农村生活污染的总氮贡献大于水土流失,而总磷正好相反,这与氮磷的来源机制差异有关。

进一步分析表可知,九龙江流域各主要县(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,分别占总氮来源的 40.6% 和 24.2%,占总磷来源的 51.1% 和 24.0%;漳平总氮贡献以化肥施用和水土流失为主,分别占总氮来源的 38.8% 和 29.4%,总磷贡献以水土流失和化肥施用为主,分别占总磷来源的 34.1% 和 27.8%;漳州市郊的氮负荷的贡献主要来自于化肥施用和畜禽养殖,分别占总氮来源的 48.0% 和 46.9%,总磷负荷的贡献主要来自于畜禽养殖与化肥施用,分别占的 61.1% 和 34.8%;化肥施用占龙海、长泰、华安、南靖和平和五个县(市、区)总氮来源的 50% 以上,而总磷来源在这五个行政区存在差异:龙海、平和和长泰总磷来源以化肥施用和畜禽养殖为主,华安总磷来源以化肥施用和水土流失为主,分别占总磷来源的 42.4% 和 21.0%;南靖总磷来源以化肥施用和农村生活污染为主。

#### 4 结语

本研究应用 ARC/INFO 的 GRID 模块,结合 SCS-CN 和 USLE 方程,进行了九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算,探讨了九龙江流域不同流域、不同土地利用类型及不同行政单元的氮磷空间分布特征和规律,标识了九龙江流域农业非点源污染的关键源区,并尝试分析了九龙江流域农业非点源污染的来源及其贡献量,为流域的水环境规划管理提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] Thum P G, Pickett S R, Niemann B J, et al. Integrating non - point pollution assessment with land development using a GIS: proceedings on remote sensing and GIS applications to non - point source planning[M]. U. S. EPA and Northeastern Illinois Planning Commission, Chicago, Illinois, 1990. 93 - 102.
- [2] Hamlett J M, Miller D A, Day R L. Statewide GIS - based ranking of watersheds for agricultural pollution prevention[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 47(5): 399 - 404.
- [3] Pullar D, Spinger D. Toward integrating GIS and Catchments Models[J]. *Environment Modeling & Software*, 2000, 15: 451 - 459.
- [4] Boughton W C. A review of the USDA SCS curve number method[J]. *Australia Journal of Soil Research*, 1989, 27: 511 - 523.
- [5] SCS, Hydrology, section 4. In: Soil Conservation Service National Engineering Handbook[M]. U. S. Department of Agricultural, Washington, D. C., 1985.
- [6] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service and Conservation Engineering Division. Urban Hydrology for Small Watersheds - Technical Release 55 second Edition[M]. 1986. 13 - 27.
- [7] Wischmeier W H, et al. A Soil Erodibility Nom orgraph Farm land and Construction sites[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, 26 :189 - 193.
- [8] 黄金良,洪华生,张珞平. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, (5).
- [9] 王晓燕. 非点源污染定量研究的理论及方法[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 1996, 17(1): 91 - 95.
- [10] 章北平. 东湖面源污染负荷的数学模型[J]. 武汉城市建设学院学报, 1996, 13(1): 1 - 8.
- [11] 施为光. 四川省清平水库流域非点源污染负荷计算[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 33 - 36.
- [12] 孙 峰. 基于 GIS 的官厅水库流域农业非点源污染负荷计算研究[D]. 北京师范大学硕士学位论文, 2002.
- [13] 史志华,蔡崇法. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 473 - 477.
- [14] 黄金良,洪华生,张珞平,等. 九龙江流域典型汇水区地表径流氮磷流失特征分析[J]. 农村生态环境, 2004, 20(3): 37 - 41.
- [15] 曹立业. 水产养殖中的氮磷污染[J]. 水产学杂志, 1996, 9(1): 76 - 77.
- [16] 黄金良. GIS 和模型支持下九龙江流域农业非点源污染研究[D]. 厦门大学博士学位论文, 2004.