

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0527

廖义善, 卓慕宁, 李定强, 等. 2014. 基于“径流-地类”参数的非点源氮磷负荷估算方法[J]. 环境科学学报, 34(8): 2126-2132

Liao Y S, Zhuo M N, Li D Q, et al. 2014. Estimation of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus load based on rainfall-runoff and landuse types[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 34(8): 2126-2132

基于“径流-地类”参数的非点源氮磷负荷估算方法

廖义善, 卓慕宁*, 李定强, 谢真越, 郭太龙

广东省生态环境与土壤研究所, 广州 510650

收稿日期: 2013-10-21 修回日期: 2013-11-30 录用日期: 2013-11-30

摘要: 东江作为广东省重要的饮用水源, 其上游农业集水区非点源氮磷流失量备受关注. 因此, 本文以东江上游上莞河小流域为研究区, 利用 2011 年的集水区水质监测数据, 在平均浓度法及输出系数法的基础上, 构建基于“径流-地类”参数的非点源氮磷负荷计算式, 其径流、地类参数分别通过校正后的 SCS 模型和土地利用现状图获取, 并分别对上莞河流域及流域各地类的非点源氮磷流失量进行估算. 研究表明, 汛期上莞河流域氮磷流失量主要来源于非点源污染, 其非点源氮、磷流失量分别占氮、磷流失总量的 97.32%、98.05%. 坡度对流域非点源氮磷流失影响较小, 地类是影响非点源氮磷输出的重要因素. 构建的计算式能较好地估算非点源氮、磷负荷量, 在次暴雨尺度非点源氮、磷输出量模拟精度分别为 84.78%、81.06%. 2011 年度上莞河流域非点源氮、磷输出量分别为 48923.4、7189.3 kg, 耕地、居民地分别是非点源氮、磷输出的关键源区, 其非点源氮、磷输出量分别占流域非点源氮、磷输出总量的 84.20%、58.54%.

关键词: SCS 模型; 农业非点源污染; 氮磷流失; 地类; 负荷估算

文章编号: 0253-2468(2014)08-2126-07 中图分类号: X17 文献标识码: A

Estimation of agricultural non-point source nitrogen and phosphorus load based on rainfall-runoff and landuse types

LIAO Yishan, ZHUO Muning*, LI Dingqiang, XIE Zhenyue, GUO Tailong

Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650

Received 21 October 2013; received in revised form 30 November 2013; accepted 30 November 2013

Abstract: Dongjiang River is one of the important drinking water source areas in Guangdong province, and the nitrogen and phosphorus losses from the Dongjiang upstream have achieved much concern in recent years. A small catchment of the Shangwan River basin, located in upstream of Dongjiang River, was selected in our study. Using the monitoring dataset in 2011, the parameters of runoff and land use types were derived from SCS model and land use maps, and the “runoff-land use type” based non-point source load equations were constructed using mean contents and output coefficient for the elements. The nitrogen and phosphorus losses of non-point source were then assessed using the constructed equation, and meaningful results were obtained in our paper. In 2011, 97.32% of nitrogen and 98.05% of phosphorus loss came from non-point source pollution in rainy reason, and the influence of land use types was larger than that of topography. The mean simulation accuracies of nitrogen and phosphorus loadings for single rainfall event were 84.78% and 81.06% respectively. Cultivated land and settlement were regarded as the main source of nitrogen and phosphorus pollution area. In 2011, the estimated nitrogen and phosphorus loading were 48923.4 kg and 7189.3 kg, respectively. The non-point source nitrogen and phosphorus loads from these two areas occupied 84.20% and 58.54% of the total for the study catchment.

Keywords: SCS model; agricultural non-point source pollution; loss of nitrogen and phosphorus; landuse types; load estimation

基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作项目 (No.2011B090300055); 广东省自然科学基金研究团队项目 (No.S2012030006144); 中国科学院院地合作项目 (No.2BY2332301); 广东省教育部产学研结合项目 (No.2012B091100471)

Supported by the Comprehensive Strategic Cooperation Project between Guangdong Province and Chinese Academy of Sciences (No.2011B090300055), the Guangdong Natural Science Foundation of Partnership Program for Creative Research Teams (No. S2012030006144), the Research Fund of Cooperation between Academy and Region (No.2BY2332301) and the Cooperation Project in Industry, Education and Research of Guangdong Province and Ministry of Education of P.R.China (No.2012B091100471)

作者简介: 廖义善 (1980—), 男, 助研, E-mail: yishan_liao@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: mnzhuo@soil.cn

Biography: LIAO Yishan (1980—), male, assistant professor, E-mail: yishan_liao@163.com; * **Corresponding author**, E-mail: mnzhuo@soil.cn

1 引言 (Introduction)

非点源污染是污染物以广域、分散、微量的形式进入地表及地下水体 (Lane *et al.*, 1989), 从而导致水体污染. 按其来源主要分为农业非点源污染和城市非点源污染, 且以农业非点源污染危害最大 (Corwin *et al.*, 1997; Thorburn *et al.*, 2003), 其中, 氮、磷是农业非点源污染的特征污染物 (Carpenter *et al.*, 1998; Weld *et al.*, 2002). 有关学者对非点源氮磷流失的影响因素 (于会彬等, 2009; 罗璇等, 2010)、流失机理 (Flanagan *et al.*, 1989)、空间异质性 (Gao *et al.*, 2012)、迁移特征 (许其功等, 2007; 杨小林等, 2013)、污染量化 (龙天渝等, 2008; 耿润哲等, 2013) 进行了大量的研究, 其中, 非点源污染量化是当今国际研究的热点 (夏军等, 2012). 现今非点源污染量化模型已由简单的统计模型发展到复杂的机制模型, AGNPS、AnnAGNPS、SWAT、WEPP 等模型已较为广泛地应用于农业非点源污染研究 (Vining *et al.*, 2001; Cho *et al.*, 2008; Luo *et al.*, 2009). 但大多数机制模型对参数的要求很高, 且率定困难, 很难推广和应用 (张燕等, 2009; 丁晓雯等, 2012). 因此, 研究有限资料条件下非点源污染负荷的估算方法在今后一段时期仍将是我国非点源污染研究的重点和热点 (姚瑞华等, 2012). 非点源污染估算方法中的平均浓度法 (李怀恩, 2000)、输出系数法 (Johns, 1996) 分别基于集水区的径流、地类要素, 所需参数少, 操作简单易行, 又具有一定的精度, 被广泛应用于无资料或资料不全条件下的非点源污染负荷估算. 但该两种方法未能同时兼顾径流、地类要素, 其应用的时间尺度及空间范围有限. 为此, 本研究在农业耕作较为频繁的广东省东江流域上游典型农业集水区, 开展有限资料条件下的农业非点源氮磷污染负荷研究, 构建一种基于“径流-地类”的非点源氮磷污染负荷估算方法, 以期农业非点源污染治理提供参考依据.

2 研究区概况 (Overview of the study area)

上莞河流域 (114°56'19.1"~115°3'33.3"E, 24°3'39.0"~24°8'49.2"N) 位于广东省东源县上莞镇境内, 流域面积 89.15 km², 属东江一级支流新丰江的上游; 该流域地处亚热带季风区, 年均气温 20.7 °C, 年均相对湿度为 77%, 年均降雨量 2142.6 mm. 流域内四周为高山, 中部为平原, 平均坡度为 13.6°. 流域

主要地类为林地、耕地、草地, 其中, 耕地占流域面积的 19.5%, 主要集中在流域中部平原地区. 流域内种植业具有一定的规模, 村落中农户散养的畜禽或鱼塘淡水养殖产生的废水、废弃物等亦不容忽视, 流域农业非点源污染较为典型.

3 材料与方法 (Materials and methods)

3.1 水质监测点布设

依据上莞河流域的水文、地类情况, 采用嵌套式布点的方法在流域河道断面布设了 4 个水质监测点 (图 1), 分别位于上莞河总出口、下罗村支流汇流处、下寨村支流汇流处和下寨村支流上游水坝处, 其编号分别为 W1、W2、W3 和 W4, 主要监测水质指标为 TN、TP.

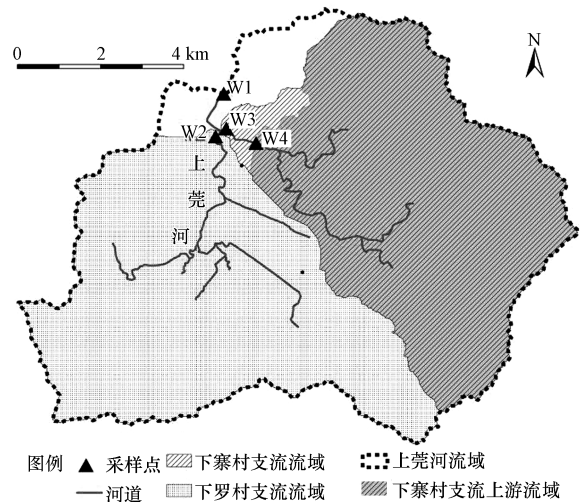


图 1 监测点分布示意

Fig.1 Distribution of monitoring points

3.2 水样采集及其测试分析方法

各集水区水质监测点的监测时段为 2011 年 4—10 月, 所监测次暴雨的降雨量为 15.5~41.5 mm, 降雨时长为 3~5 h, 降雨前 5 d 累计降雨量为 12.0~168.5 mm. 在降雨之前分别在各水质监测点采集 1 个河水背景水样, 并记录采样时刻的水位、流速, 其中, 水位采用标尺、流速采用旋浆式流速仪 (LS25-3C) 置于水面之下 0.3 m 测量. 在次降雨过程中, 根据水位和流速变化合理安排采样频次, 并记录采样时刻的水位、流速. 当降雨过程水样采集完毕后, 以每个水样采集时刻的水位与流速的乘积为体积权重制备混合水样. 每场降雨在各监测点采集雨前河水背景水样及降雨过程混合水样各 1 个, 其体积均为 500 mL, 采用白色塑料瓶盛装带回实验室进行水

质分析.其水样中的 TN、TP 指标分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法、过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法进行测定.

3.3 非点源氮磷负荷量测算方法

降雨时段河水中的氮、磷污染物分别来源于点源及非点源途径,而雨前河道基流中的氮、磷污染物几乎全部来源于点源污染(蔡明等,2007).则非点源氮、磷流失量即为汛期河水氮、磷总量与点源氮、磷流失量之差,故采用公式(1)可求出因降雨地表径流而引起的非点源氮、磷流失量.公式(1)中的 $V_{\text{基流}}$ 、 $V_{\text{洪流}}$ 可通过在较为规则的河流断面丈量河道宽度、河水深度,利用流速仪测量河水流速获得; $C_{\text{雨前}}$ 、 $C_{\text{降雨}}$ 值可通过对雨前及降雨时段采集的河水水样进行测试分析获取.将 2011 年上半年(4 月)、下半年(9—10 月)间于监测点 W1~W4 采集的 4 场次降雨河道水质及径流数据带入公式(1),可测算每个监测点次降雨时段内的非点源 TN、TP 负荷量.

$$\text{OUT}_{\text{非点源}} = C_{\text{降雨}} \times V_{\text{洪流}} - C_{\text{雨前}} \times V_{\text{基流}} \quad (1)$$

式中, $\text{OUT}_{\text{非点源}}$ 为次降雨非点源 TN、TP 负荷总量(kg), $C_{\text{雨前}}$ 、 $C_{\text{降雨}}$ 分别为雨前、雨中(后)水体中 TN、TP 的平均浓度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), $V_{\text{基流}}$ 、 $V_{\text{洪流}}$ 分别为监测时段内的河道基流、河道洪水径流的体积(m^3).

3.4 产流估算方法

各集水区次暴雨产流量可通过 SCS 模型获取,其 SCS 模型及 CN 值(径流曲线数)根据流域下垫面土壤、坡度进行校正,SCS 模型介绍及 CN 值校正方法详见文献(廖义善,2008).为了简化透水地面土壤前期含水量对下垫面产流的影响,本研究在对 CN 值进行优化运算时,把土壤前期含水量归入到降雨量中,因而本研究采用的 CN 值表现为各地类固有的产流能力,与土壤前期降雨量无关,经过校正后的不同地类 CN 值见表 1.初损量与潜在滞蓄量的关系式如下所示:

$$I_a = \lambda S \quad (2)$$

$$\begin{cases} S = 254 \left(\frac{100}{\text{CN}} - 1 \right) \\ Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S}, P \geq \lambda S \text{ 时} \\ Q = 0, P < \lambda S \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

式中, P 为降雨雨量(mm), Q 为实际径流量(mm), S 为潜在最大滞蓄量(mm), λ 为初损量(I_a)与潜在滞蓄量(S)的比值, CN 值为无量纲参数.

表 1 不同地类的 CN 值

Table 1 CN value of the different land type

地类	CN 值
水田(灌溉期)	65
水田(晒田期)	90
居民地	93
旱地	85
林地	73
草地	80
水塘	100
河渠	100

3.5 相关非点源氮磷负荷估算方法

平均浓度法,即根据各次降雨径流过程的水量、水质同步监测资料,先计算每次暴雨各种污染物非点源污染的平均浓度,再以各次暴雨产生的径流量为权重,求出加权平均浓度.然后假定年地表径流的平均浓度近似等于上述多场暴雨的加权平均浓度,则可求出非点源污染年负荷量(李怀恩,2000):

$$W_T = \int_{t_0}^{t_e} C(t) Q(t) dt \quad (4)$$

式中, $C(t)$ 为年内浓度变化过程($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), $Q(t)$ 为年径流过程(m^3), t_0 和 t_e 分别为年初和年末时刻.

输出系数模型于 20 世纪 70 年代初期在北美地区首先提出,其主要用来评价土地利用和湖泊富营养之间的关系.早期的模型假定所有的土地利用类型的输出系数固定不变, John(1996)在实际应用中不断改进输出系数模型,使其得到了进一步完善和广泛应用.模型的一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i \quad (5)$$

式中, j 为污染物类型, m 为流域中土地利用类型的种类, L_j 为污染物 j 在该流域的总负荷量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$), E_{ij} 为污染物 j 在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), A_i 为第 i 种土地利用类型的面积(hm^2).

平均浓度法及输出系数法操作简单,所需参数较少,且容易获取,并具备一定的模拟精度.但平均浓度法仅侧重于径流要素,下垫面地类要素对非点源污染的影响暗含于平均浓度参数之中,该方法未能直观地反映农业非点源污染物的输出地类及关键源区.输出系数法虽侧重于地类要素,而忽略了降雨地表径流差异对非点源污染的影响,限制了其在次暴雨尺度的应用.倘若在平均浓度法及输出系数

法的基础上,构建的非点源污染负荷估算式能同时考虑径流、地类要素,则不仅能保留平均浓度法及输出系数法简单、实用的优点,而且能弥补平均浓度法及输出系数法的以上不足之处.本研究将在平均浓度法与输出系数法的基础上,构建一种基于“径流-地类”的非点源氮磷污染负荷估算方法.

4 结果与讨论(Results and discussion)

4.1 流域非点源污染现状

对采集于 2011 年 4—10 月间的 4 场汛期河流混合水样进行测试分析,结果表明,在次降雨时段内所采集的水样中 83.3% 的总氮指标和 66.7% 的总磷指标劣于地表 II 类水标准(地表水环境质量标准 GB3838—2002).上莞河流域水质距下游新丰江库区的目标水质标准(地表水 I~II 类)尚存一定差距.各集水区在所监测次暴雨时段的非点源氮、磷流失量见图 2.汛期非点源氮、磷流失量分别占氮、磷流失总量的 97.32%、98.05%.可见,次降雨洪水时段内该农业集水区氮、磷流失形式以非点源为主,集水区非点源氮磷流失对下游水质影响至关重要.而在晴天或雨天不产生地表径流时流域的污染基本来源于点源污染(李怀恩,2000).

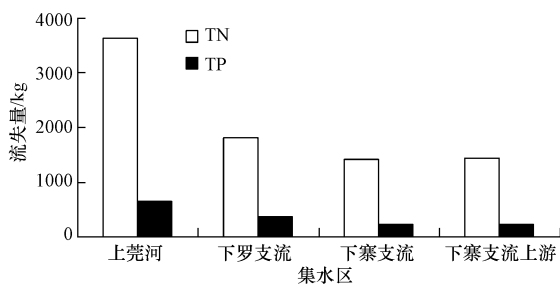


图 2 非点源氮磷流失量

Fig.2 Non-point source nitrogen and phosphorus loss

上莞河流域内水体(河渠、水塘)、草地、林地、居民地、耕地(水田、旱地)等地类的面积分别为 107.03、1722.58、4774.63、574.16、1736.96 hm^2 ,其平均坡度分别为 4.6°、14.8°、18.2°、3.2°、3.9°,林、草地所处的坡度值较大,耕地、居民地所处的坡度较小.将次降雨各集水区河水氮、磷含量与集水区坡度进行 Pearson 相关分析,其相关系数分别为 -0.84、-0.80($n=16$),坡度与氮、磷输出强度呈现负相关关系.一般认为坡度越大,其坡面的水土流失强度越大,氮磷的流失量也随之增大.但研究表明,集水区内部坡度对氮、磷输出强度的影响不是表现为坡度对

水土流失的影响,而是体现为坡度对地类空间布局的影响.集水区内坡度较大的区域主要为林、草地,其受人为施肥影响较小,且在林草植被的固持作用下,林、草地的氮磷流失相对较少.而为了便于出行、耕作,居民地和耕地一般位于集水区内坡度较小的区域,该区域受人为影响较大,畜禽粪便的随意堆放及化肥的大量施用,使得居民地、耕地成为集水区氮磷流失的主要源地.致使集水区内坡度较小的区域产生的氮磷流失量反而要大于坡度较大的区域,可知地类是影响非点源氮磷输出的直接原因.

4.2 负荷估算关系式的建立

非点源污染平均浓度估算法及输出系数估算法表明,径流及地类是影响非点源污染的重要因素(李怀恩,2000;Johns, 1996).将各集水区在 2011 年 4—10 月间的 4 场次暴雨的非点源氮磷流失量、地表径流量及其下垫面地类要素进行 Pearson 相关分析,结果表明,径流量、耕地面积、居民地面积与降雨时段非点源氮、磷流失量具有显著的相关关系,其与氮流失量的相关系数分别为 0.90、0.99、0.95($n=16$),其与磷流失量的相关系数分别为 0.87、0.97、0.91($n=16$).综合非点源污染常用计算公式中“平均浓度法”及“输出系数法”的径流、地类要素,将次暴雨洪水时段内各集水区非点源氮磷流失量与各集水区的径流量、耕地面积、居民地面积进行回归分析,构建基于“径流-地类”要素的非点源氮磷负荷估算关系式(6)、(7),其中, R^2 分别为 0.903、0.866($n=16$).将式(6)拆分成式(8)、(9),将式(7)拆分成式(10)、(11),并根据限定条件将式(6)改写成式(12),将式(7)改写成式(13).集水区某时段非点源 TN、TP 负荷估算见式(14)、(15).

$$[\text{TN}]_{\text{NPS}} = 0.000264 \times Q_{\text{径流量}} + (0.7285 \times A_{\text{耕地}} + 0.1482 \times A_{\text{居民地}} - 29.792) \quad (6)$$

$$[\text{TP}]_{\text{NPS}} = 0.0000703 \times Q_{\text{径流量}} + (0.008 \times A_{\text{耕地}} + 0.096 \times A_{\text{居民地}} + 41.62) \quad (7)$$

$$A = 0.000264 \times Q_{\text{径流量}} \quad (8)$$

$$B = 0.7285 \times A_{\text{耕地}} + 0.1482 \times A_{\text{居民地}} - 29.792 \quad (9)$$

$$C = 0.0000703 \times Q_{\text{径流量}} \quad (10)$$

$$D = 0.008 \times A_{\text{耕地}} + 0.096 \times A_{\text{居民地}} + 41.62 \quad (11)$$

$$\begin{cases} [\text{TN}]_{\text{NPS}} = A + B & (B > 0 \text{ 且 } Q_{\text{径流量}} > 0) \\ [\text{TN}]_{\text{NPS}} = 0 & (Q_{\text{径流量}} = 0) \\ [\text{TN}]_{\text{NPS}} = A & (B < 0 \text{ 且 } Q_{\text{径流量}} > 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} [\text{TP}]_{\text{NPS}} = C + D & (C + D > 0 \text{ 且 } Q_{\text{径流量}} > 0) \\ [\text{TP}]_{\text{NPS}} = 0 & (C + D < 0 \text{ 或 } Q_{\text{径流量}} = 0) \end{cases} \quad (13)$$

$$[\text{TN}]_{\text{T}} = \int_{t_0}^{t_e} [\text{TN}]_{\text{NPS}} dt \quad (14)$$

$$[\text{TP}]_{\text{T}} = \int_{t_0}^{t_e} [\text{TP}]_{\text{NPS}} dt \quad (15)$$

式中, $[\text{TN}]_{\text{NPS}}$ ($[\text{TP}]_{\text{NPS}}$)、 $[\text{TN}]_{\text{T}}$ ($[\text{TP}]_{\text{T}}$) 分别为监测点集水区次暴雨尺度、某时段内的非点源 TN (TP) 负荷量 (kg); $Q_{\text{径流量}}$ 为监测点所控制集水区内降雨地表径流产生量 (m^3); $A_{\text{耕地}}$ 、 $A_{\text{居民地}}$ 分别为集水区内耕地、农村居民地等地类的面积 (hm^2); t_0 、 t_e 分别为开始时刻、结束时刻. 其中, 式 (8)、(10) 形同于非点源负荷估算公式中的“平均浓度法”, 其系数可视为平均浓度值 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). 式 (9)、(11) 形同于非点源负荷估算公式中的“输出系数法”, 其各参数的系数可视为其输出系数 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其常数项为集水区居民地、耕地地表径流在汇流过程中的氮磷“源、汇”量 (kg). 式 (6)、(7) 中的 $Q_{\text{径流量}}$ 参数可通过 SCS 模型计算 (式 (2)、(3)) 及集水区面积获取.

4.3 负荷估算关系式的检验及其关键源区分析

将 2011 年 5—7 月的 3 场次降雨数据及地类数据分别带入径流量及负荷量计算公式, 其计算结果见表 2, 其中, 监测点的 2 位数编号的第 1 位为监测点点位编号 (1~4), 后 1 位为监测时段的月份 (5—7 月). 如表 2 所示, 非点源氮、磷负荷量估算的平均精度分别为 84.78%、81.06%, 其非点源氮磷负荷估算公式具有一定的模拟精度. 其模拟精度呈现一定的季节性变化规律, 各监测点在 5 月份的模拟量较实测量均偏小, 而 7 月份的模拟量, 特别是对非点源磷素的模拟量较实测量要偏大. 这可能与当地施肥时间有关, 5 月是耕地施肥的重要时段, 而 7 月当地重

要的农作物水稻已开始成熟, 该月施肥量较小, 而集水区耕地施肥量大小直接关系到集水区非点源氮磷输出量. 因而, 在今后的研究中, 在模型中增加一个施肥参数, 可能有助于提高模型在小时间尺度的模拟精度.

表 2 计算式模拟精度

Table 2 Simulation accuracy

监测点	监测值/kg		计算值/kg		误差	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP
W15	2298.2	382.5	1726.4	218.8	-24.9%	-42.8%
W25	1304.0	193.7	1131.1	174.5	-13.3%	-9.9%
W35	848.5	133.1	534.9	86.8	-37.0%	-34.8%
W45	595.7	114.6	486.0	84.8	-18.4%	-26.0%
W16	3941.1	836.5	3991.3	822.8	1.3%	-1.6%
W26	2262.0	394.7	1983.2	401.7	-12.3%	1.8%
W36	1352.0	350.3	1622.3	376.7	20.0%	7.5%
W46	1594.9	436.7	1438.6	338.8	-9.8%	-22.4%
W17	2160.0	323.1	2132.5	327.1	-1.3%	1.3%
W27	1087.2	220.0	1234.2	202.0	13.5%	-8.2%
W37	872.6	115.2	761.4	147.2	-12.7%	27.7%
W47	842.8	97.2	690.0	139.2	-18.1%	43.2%

依据布设于广东省东源县上莞镇下寨村的自动雨量计获取集水区内的次降雨数据, 将 2011 年上莞河流域的全部次降雨数据分别带入公式 (3), 计算出次暴雨时段各地类的产流量, 并将产流量带入公式 (14)、(15), 计算出 2011 年度上莞河流域非点源氮、磷流失量分别为 48923.4、7189.3 kg, 流域内非点源氮、磷年输出强度分别为 5.49 、 $0.81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 产流次暴雨事件的非点源氮、磷平均输出强度分别为 103.5 、 $15.2 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$. 流域非点源氮磷输出强度较其它区域要小 (黄金良, 2004).

将公式 (6)、(7) 式展开, 得到适用于流域各地类非点源氮、磷流失量的计算公式 (16)、(17).

$$\begin{cases} [\text{TN}]_{\text{NPS}} = 0.000264 \times (Q_{\text{林地}} + Q_{\text{草地}} + Q_{\text{水体}}) + (0.000264 \times Q_{\text{耕地}} + 0.7285 \times A_{\text{耕地}} - 29.792 \times \frac{A_{\text{耕地}}}{A_{\text{耕地}} + A_{\text{居民地}}}) + (0.000264 \times Q_{\text{居民地}} + 0.1482 \times A_{\text{居民地}} - 29.792 \times \frac{A_{\text{居民地}}}{A_{\text{耕地}} + A_{\text{居民地}}}) (B > 0) \\ [\text{TN}]_{\text{NPS}} = 0.000264 \times Q_{\text{径流量}} (B < 0) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} [\text{TP}]_{\text{NPS}} = & 0.0000703 \times (Q_{\text{林地}} + Q_{\text{草地}} + Q_{\text{水体}}) + (0.0000703 \times Q_{\text{耕地}} + 0.008 \times A_{\text{耕地}} + 41.62 \times \frac{A_{\text{耕地}}}{A_{\text{耕地}} + A_{\text{居民地}}}) \\ & + (0.0000703 \times Q_{\text{居民地}} + 0.096 \times A_{\text{居民地}} + 41.62 \times \frac{A_{\text{居民地}}}{A_{\text{耕地}} + A_{\text{居民地}}}) \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $Q_{\text{林地}}$ 、 $Q_{\text{草地}}$ 、 $Q_{\text{水体}}$ 、 $Q_{\text{耕地}}$ 、 $Q_{\text{居民地}}$ 分别为为林地、草地、水体、耕地、居民地等地类在次暴雨尺度的产流量(m^3),其它参数意义同公式(6)、(7)。

将前文计算的 2011 年次暴雨尺度各地类的产流量带入公式(16)、(17)计算出 2011 年度上莞河流域内林地、草地、耕地、居民地、水体等地类的非点源氮输出量分别为 2052.3、1206.5、41195.3、4096.7、372.6 kg, 磷输出量分别为 592.2、348.1、

1933.1、4208.4、107.5 kg. 流域内耕地、居民地分别是非点源氮、磷输出的关键源区,其非点源氮、磷输出量分别占流域非点源氮、磷输出总量的 84.20%、58.54%。基于式(2)、(3)、(16)、(17),结合降雨数据,在 ARCGIS 中对地类、坡度图层进行叠置计算,2011 年度上莞河流域各地块的非点源氮磷输出强度见图 3,各地类的非点源氮磷输出强度与相关学者研究成果对比见表 3。

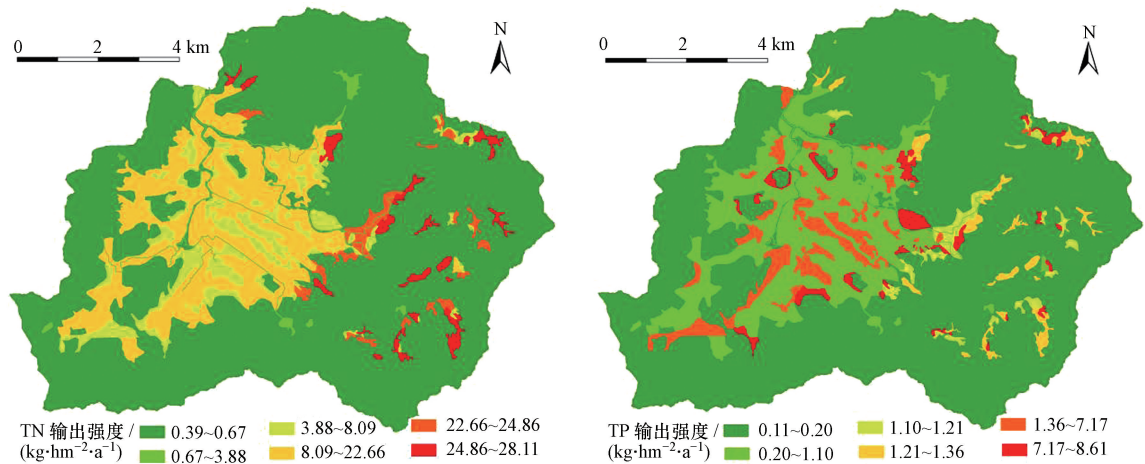


图 3 集水区 TN 和 TP 输出强度

Fig.3 Export of non-point source TN and TP in catchments

表 3 非点源氮磷输出强度比较

Table 3 Comparison of non-point source nitrogen and phosphorus export

研究区域	污染物	地类输出强度/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)					数据来源
		林地	草地	耕地	居民地	水体	
福建九龙江	TN	11.90	-	27.70	17.74	-	黄金良等,2004
	TP	1.53	-	2.26	2.10	-	
长江上游	TN	2.38	10.00	29.00	11.00	-	刘瑞民等,2006
	TP	0.15	0.20	0.90	0.24	-	
洪湖地区	TN	2.38	10.00	29.00	11.00	-	王欢欢等,2011
	TP	0.15	0.20	0.90	0.24	-	
太湖流域	TN	2.38	8.00	19.40	-	12.75	赵广举等,2012
	TP	0.15	0.20	1.22	-	0.36	
东江流域	TN	0.43	0.70	23.72	7.14	3.48	本文
	TP	0.12	0.20	1.11	7.33	1.00	

由图 3 可知,从非点源氮磷输出的区域分布、地类、地形要素来看,非点源氮磷输出强度较大的地块主要集中在流域中部,此外流域东部有零星分布;主要非点源氮磷输出地类为耕地和居民地;相同地类中坡度较大地块的非点源氮磷输出强度要大于坡度较小地块.由表 3 可知,耕地的非点源氮磷输出强度的区域差异性相对较小,而其它地类在不同区域的非点源氮磷输出强度具有较大差异,这可

能与耕地的耕作方式特别是施肥量、方式受地域影响较小,而其它地类受地域影响较大有关.上莞河流域内林地、草地、水体的非点源氮素输出量均小于其它区域,这可能与这些地类处于不同的生态功能分区有关.上莞河流域位于广东省重要的水源地新丰江水库上游,区域内林、草地多为自然生长,且植被覆盖度较高,水体中养殖水体所占比例较小,使得该研究区域内林地、草地、水体的非点源氮素输

出强度较其它区域要小.但上莞河流域内居民地、水体的非点源磷素输出强度要远大于其它区域,这可能与区域内生活用水量且生活污水直排,而生活用水含磷量较高有关.此外,流域内林地、草地的非点源磷输出量与其它区域均较为接近.

5 结论 (Conclusions)

1) 次降雨洪水时段内上莞河流域氮磷流失量主要来源于非点源污染,其非点源氮、磷流失量分别占该时段氮、磷流失总量的 97.32%、98.05%.

2) 上莞河流域内坡度与氮、磷输出强度呈现负相关关系,其相关系数分别为-0.84、-0.80,坡度通过影响地类空间布局,从而影响不同坡度的非点源氮磷输出量.

3) 基于“径流-地类”要素,构建非点源氮磷负荷计算式,其中,径流量参数由校正后的 SCS 模型计算获取.负荷计算式具有一定的模拟精度,在次暴雨尺度非点源氮、磷流失量的模拟精度分别为 84.78%、81.06%.

4) 2011 年度上莞河非点源氮、磷输出量分别为 48923.4、7189.3 kg,产流次暴雨事件的非点源氮、磷平均输出强度为 103.5、15.2 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,耕地、居民地分别是非点源氮、磷输出的关键源区,且耕地的非点源氮、磷输出强度较其它地类区域性变化较小.

致谢: 水样分析得到了佛山市南海区环境保护监测站吴文勇工程师、陈鉴祥工程师的帮助,在此一并表示感谢!

责任作者简介: 卓慕宁,女,研究员,从事水土保持及非点源污染方面研究. E-mail: mnzhuo@soil.cn.

参考文献 (References):

蔡明,李怀恩,刘晓军. 2007.非点源污染负荷估算方法研究[J].人民黄河,29(7): 36-37,39

Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. 1998. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications, 8(3): 559-568

Cho J, Park S, Im S. 2008. Evaluation of agricultural nonpoint source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation [J]. Agricultural Water Management, 95(4): 400-408

Corwin D L, Vaughan P J, Loague K. 1997. Model Non-point source pollution in the Vadose Zone with GIS[J]. Environment Science and Technology, 31(8): 2157-2175

丁晓雯,沈珍瑶. 2012. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学, 33(11): 4025-4032

Flanagan D C, Foster G R. 1989. Storm pattern effect on nitrogen and

phosphorus losses in surface runoff[J]. Transactions of the ASABE, 32(2): 535-544

Gao Y, Zhu B, Wang T, et al. 2012. Seasonal change of non-point source pollution-induced bioavailable phosphorus loss: A case study of southwestern China[J]. Journal of Hydrology, 420: 373-379

耿润哲,王晓燕,焦帅,等. 2013. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J]. 环境科学学报, 33(5): 1484-1492

黄金良,洪华生,张璐平,等. 2004. 基于 GIS 的九龙江流域农业非点源氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报, 23(5): 866-871

Johns P J. 1996. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach [J]. Journal of Hydrology, 183(3/4): 323-349

Lane L J, Nicks A D, Laflen J M, et al. 1989. The water erosion prediction project: model overview [A]. National Water Conference [C]. 487-494

李怀恩. 2000. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 20(4): 397-400

廖义善. 2008. 基于 GIS 黄土丘陵沟壑区流域侵蚀产沙模拟及尺度研究[D]. 武汉: 华中农业大学. 66-67

刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 2006. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 27(12): 2407-2414

龙天渝,梁常德,李继承,等. 2008. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 28(3): 574-581

Luo Y Z, Zhang M H. 2009. Management-oriented sensitivity analysis for pesticide transport in watershed-scale water quality modeling using SWAT[J]. Environmental Pollution, 157(12): 3370-3378

罗璇,史志华,尹炜,等. 2010. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学, 31(1): 58-62

Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L, et al. 2003. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal northeastern Australia [J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 94(1): 49-58

Vining R C, Flanagan D C, Grigar J. 2001. Watershed application of WEPP to a Michigan water quality problem [A]//Soil Erosion Research for the 21th Century Symposium and 2nd International Symposium on Preferential Flow [C]. Honolulu, Hawaii, USA: ASAE Publication. 123-126

王欢欢,陈世俭. 2011. 土地利用结构变化对非点源污染的影响研究[J]. 环境科学与技术, 34(12H): 25-28

Weld J L, Parsons R L, Beegle D B, et al. 2002. Evaluation of phosphorus based nutrient management strategies in Pennsylvania [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 57(6): 448-454

夏军,翟晓燕,张永勇. 2012. 水环境非点源污染模型研究进展[J]. 地理科学进展, 31(7): 941-952

许其功,刘鸿亮,沈珍瑶,等. 2007. 三峡库区典型小流域氮磷流失特征[J]. 环境科学学报, 27(2): 326-331

杨小林,朱波,董玉龙,等. 2013. 紫色土丘陵区小流域非点源氮迁移特征研究[J]. 水利学报, 44(3): 276-283

姚瑞华,王东,赵越,等. 2012. 非点源污染负荷模型的研究进展[J]. 水文, 32(2): 11-15

于会彬,席北斗,郭旭晶,等. 2009. 降水对农田排水沟渠中氮磷流失的影响[J]. 环境科学研究, 22(4): 409-414

张燕,张志强,谢宝元,等. 2009. 饮用水源区小流域氮素污染负荷估算方法比较[J]. 中国水土保持科学, 7(1): 84-91

赵广举,田鹏,穆兴民,等. 2012. 基于 PCRaster 的流域非点源氮磷负荷估算[J]. 水科学进展, 23(1): 80-86