

基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算

李兆富¹, 杨桂山², 李恒鹏²

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 为合理估算流域非点源污染营养盐输出负荷, 针对广泛使用的输出系数模型方法, 通过实测数据推算获得流域主要土地利用类型氮磷营养盐输出系数, 并同时考虑流域降雨的空间差异, 对模型结构进行了改进, 并与 GIS 实现融合, 构建半分布式的输出系数模型. 利用该模型对太湖上游的西苕溪流域氮磷营养盐输出负荷进行了估算, 结果显示, 西苕溪流域 TN 输出负荷为 2 121.3 t, TP 输出负荷为 49.3 t, 这为太湖流域非点源污染治理提供了参考, 改进的输出系数模型具有很好的时空尺度适宜性和推广性.

关键词: 输出系数模型; 营养盐; 输出负荷; 西苕溪流域

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0668-05

Estimated Nutrient Export Loads Based on Improved Export Coefficient Model in Xitiaoqi Watershed

LI Zhao-fu¹, YANG Gui-shan², LI Heng-peng³

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: It is very important to estimate nutrient export loads from watershed, which is beneficial to water environmental management. The export coefficients for major landuse types were evaluated by field surveying data, in addition the spatial distributions of precipitation and runoff were considered, to improve on export coefficient model (ECM), then integrated ECM into geographical information system to compose half-distribution model of export coefficients. Estimated nutrients export loads based on the ECM in Xitiaoqi watershed located upper of Taihu Lake area. Results show that the export load for TN and TP was 2 121.3 t and 49.3 t respectively, which provides important reference value for nonpoint source pollution management.

Key words: export coefficient model; nutrient; export loads; Xitiaoqi watershed

近年来,在点源污染逐渐得到有效治理后,非点源污染对区域水环境的影响逐渐突出^[1],其中不合理的土地利用活动对水环境有重要的影响^[2~4],是导致非点源污染的重要因素之一.在此背景下,对区域污染物的产出量和土地利用的影响水平进行科学研究和预测非常重要^[5~7].流域作为自然界中以水为纽带的相对独立的自然综合体,是非点源污染研究的最佳单元^[8].对流域非点源污染物负荷研究的传统方法是开发基于污染物在流域中迁移的物理基础的模型,充分考虑污染物迁移的每个环节和过程,从而实现对流域非点源污染物的产出、输移过程以及输出水平的全面掌握和预测^[9].但是由于非点源污染机制过程的复杂性,物理模型建模和模拟对输入资料有很高的要求,从而导致建模费用昂贵且模型率定困难,使得这类模型大多只能在小流域尺度和建模的本流域应用.用于估算营养盐输出负荷的输出系数模型避开了物理模型的不足,通过输出系数以及相对容易获得的土地利用状况直接建立土地利用与接纳水体非点源污染物负荷的关系,避开了

复杂的非点源污染形成过程而降低了对流域内污染物迁移转化过程监测数据的要求,从而为大中尺度流域非点源污染负荷估算提供了一种有效方法^[10~13].尤其针对我国许多地区相对缺乏系列规范的非点源污染监测资料,输出系数法提供了一种行之有效的非点源污染物质的估算方法,在我国具有广阔的应用前景.本研究选择太湖地区典型的西苕溪流域为区域,对输出系数模型形式进行改进的基础上,分别获取模型建立所需的各种数据,构建用于西苕溪流域营养盐输出负荷估算的输出系数模型,并估算西苕溪流域氮磷营养盐输出负荷,以期能为流域水环境管理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 典型流域概况

收稿日期: 2008-04-18; 修订日期: 2008-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701174); 南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ07007)

作者简介: 李兆富(1977~),男,博士,讲师,主要研究方向为资源利用与环境效应, E-mail: lizhaofu@njau.edu.cn

西苕溪流域介于东经 119°14′ ~ 120°29′ 与北纬 30°23′ ~ 31°11′ 之间, 位于浙江省北部的湖州市境内, 太湖流域的西南部. 西苕溪干流总长约 157 km, 流域面积约 2 350 km², 占整个太湖流域 (36 500 km²) 的 6%, 但流域多年平均径流量大, 是太湖流域重要的来水支流之一. 流域地势西南高、东北低, 依次呈山地、丘陵、平原的梯度分布, 是一个界限相对比较完整封闭的流域. 由于西苕溪流域地势相对较高, 降雨径流时空差异较大^[14]. 流域内的土地利用类型以林地和耕地为主, 两者的面积占整个流域的 90% 以上.

1.2 输出系数模型及其改进

基于非点源污染负荷来源于流域内各种土地利用类型的产出总和的理论, 20 世纪 70 年代初期, 美国、加拿大在研究土地利用-营养盐负荷-湖泊富营养化关系的过程中提出并应用了输出系数法, 这种方法为非点源污染研究提供了一种新的途径, 其最大的优点是充分利用相对容易得到的土地利用状况等资料, 直接建立土地利用与受纳水体非点源污染负荷的关系. 随着输出系数模型的广泛应用, 许多学者对其进行了改进与发展, 对与输出系数分类密切相关的污染物来源全面考虑^[15], 而且增加了对污染物在流域传输过程中损失及降雨年际变化对污染物输出影响的考虑^[16]. 然而输出系数模型研究应用中仍有不少不足之处, 一方面, 目前模型应用的输出系数都是来自于其它参考文献的研究结果, 使得系数的适用性较差; 另外, 经验模型结构的限制也使其无法考虑降雨等因素的空间差异影响. 这都限制了输出系数模型的应用效果.

本研究针对输出系数模型的不足, 结合研究区的情况对其进行了一定改进. 一方面, 流域内主要土地利用类型的输出系数由小流域出口营养盐输出监测值与流域土地利用结构关系推算获得^[17], 这使得系数具有较好的流域尺度适用性. 另一方面, 利用西苕溪流域及周边地区的雨量站监测数据, 进行空间差值获得流域面雨量分布数据, 利用多年降雨径流关系计算流域径流深分布图^[18], 并将此数据引入模型以便考虑降雨径流的空间差异影响. 此外, 研究将输出系数模型与地理信息系统 (GIS) 与遥感 (RS) 技术相结合, 将原本属于经验统计模型的输出系数模型融入地理信息系统空间分析运算, 改进成半分布式模型, 使模型精度提高.

2 结果与分析

2.1 流域土地利用数据与主要土地利用输出系数

输出系数模型直接建立了土地利用与受纳水体非点源污染负荷的关系, 因此流域土地利用数据的获取十分重要. 首先对西苕溪流域 2004 年的 Spot5 的 10 m 分辨率多光谱影像数据, 进行几何精纠正, 影像投影定为 Albers 等积投影. 再利用人机交互目视解译的方法获得西苕溪流域的土地利用矢量数据. 解译采用统一的最小制图单元, 并通过选取若干样本区, 计算其混淆矩阵和 Kappa 指数, 对遥感影像的分类结果进行精度检验, 表明分类结果可信, 可以用于土地利用变化分析. 土地利用参考全国区域委员会 1985 年公布的土地利用分类标准, 结合西苕溪流域土地利用的特点, 土地利用类型分为耕地、林地、园地、草地、水域、居民建设用地 (城镇居民及工矿用地) 等 6 大类 (如图 1). 其中, 林地面积比例最大, 占流域土地总面积 59.5%, 主要分布于流域中低山与丘陵上; 耕地面积占 29.9%, 主要分布于山坡底部及河流两岸的冲积平原与阶地上; 城镇居民用地面积比例占 3.4%, 主要是河流下游的湖州市与中游的安吉县, 以及沿河岸分布的村镇; 园地、草地面积比例均不大, 分别占 4.1%、0.7%, 呈零散分布.

各种土地利用类型的营养盐输出系数是模型的关键. 由于耕地和林地面积的比例占全流域的 90% 左右, 其它土地利用类型面积比例相对较低, 对耕地和林地类型的初始值通过野外观测数据的分析运算获得^[17], 将增加系数的适用性; 而其它土地利用类型的输出系数参考相关的研究成果估算获得^[4]. 由于单位面积或时间内输出负荷表达的输出系数忽略了对降雨径流空间差异的考虑, 使系数的可移植性大大降低, 也因为浓度比负荷更能直接反映各种土地利用营养盐输出情况, 输出系数使用浓度表示. 各种土地利用类型的营养盐输出系数初始值如表 1.

2.2 西苕溪流域营养盐输出系数模型初建

在获得了西苕溪流域土地利用数据、径流量数据以及确定了输出系数的基础上, 根据输出系数模型的基本方程形式, 建立初步的输出系数模型形式:

$$L_j = \sum_{i=1}^n E_{i,j} \times A_i \times Q_i \tag{1}$$

式中, L_j 表示 j 种营养盐输出负荷, $E_{i,j}$ 表示 i 种土地利用类型的 j 营养盐的输出系数 (以浓度表示), A_i 表示 i 种土地利用类型的面积, 而 Q_i 为 i 类土地利用类型上产生的径流量. 其中 j 分别为 TN、TP 2 种营养盐, i 分别为耕地、林地、园地、草地、水体及居民地 6 种土地利用类型.

表 1 西苕溪流域各类土地利用类型输出系数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Export coefficient of all kinds land use types in Xitiaoqi watershed/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	类型	耕地	林地	园地	草地	居民地
初始输出系数	TN	4.747 3	0.271 3	2.509 3	1.390 3	1.79
	TP	0.089 6	0.007 5	0.048 6	0.028 1	0.117
调整后输出系数	TN	3.420 0	0.715 0	2.509 3	1.390 3	1.790 0
	TP	0.089 6	0.010 0	0.048 6	0.028 1	0.117 0

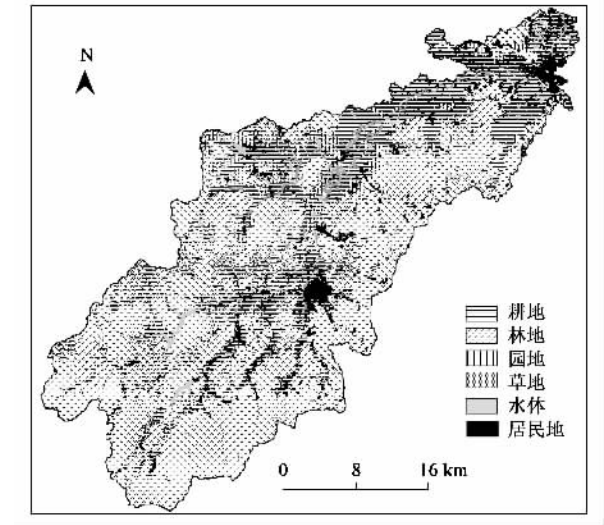


图 1 西苕溪流域 2004 年土地利用

Fig. 1 Landuse map of Xitiaoqi watershed in 2004

模型构建借助 IDRISI 的宏建模(Macro Modeler)工具实现.按照输出系数模型的基本形式,首先将模型所需要的土地利用数据、利用雨量站插值获得的降雨径流空间分布数据等,转化为 IDRISI 软件使用的格式,即将 ESRI 支持的 Coverage 以及栅格格式文件转换为 IDRISI 支持的栅格文件格式(栅格单元为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$);在 IDRISI 的宏建模环境下,分别对每一种土地利用类型的栅格图层使用变值(scalar)模块赋上其确定的输出系数初值,得到各种土地利用类型输出系数浓度图层,同时也利用变值模块将径流深图层转换为径流量;然后利用叠加(overlay)模块,将各土地利用输出系数浓度图层与径流量图层叠加(选择乘积运算)获得各种土地利用类型营养盐负荷图层;最后再次利用 overlay 模块将各个图层叠加(相加运算)获得整个西苕溪流域营养盐输出负荷栅格图层数据.对 TN、TP 的输出负荷空间分布栅格图层统计可以得到 2004 年西苕溪流域 TN、TP 的输出负荷分别 $2\,184.58\text{ t}$ 与 46.94 t .

2.3 模型检验与修正

采用典型小流域实际监测值计算的营养盐输出负荷与模型估算的小流域营养盐输出负荷结果,进

行比较并对模型估算的精度进行检验.在流域内选择了 11 个典型的小流域,在小流域出口设立监测点,于 2004 年 7 月、9 月、12 月 3 次监测了流域出口口的 TN、TP 输出浓度,并计算出流域氮、磷营养盐输出年负荷^[18],用于对输出系数模型的检验.对比模型估算结果及存在误差,分析误差存在原因并进行参数调整^[19].调整后的输出系数如表 1,利用调整后的系数输入模型计算的结果与实测值的误差如表 2.分析表 2 可以看出,调整后的输出系数模型模拟运算的结果与 2004 年实测值计算误差比用初始系数时有所降低,就 TN 来说,11 个小流域中有 6 个误差在 20% 以内,有 9 个误差在 30% 以内;就 TP 来说,误差稍大,但也有 6 个小流域误差在 20% 以内,而且 11 个小流域合计误差都控制在 10% 以内(TN 总误差为 6.6%,TP 总误差为 3.3%),基本符合模型的精度要求,因此确定以上系数为 2004 年氮磷营养盐输出系数.利用调整后的系数估算的氮磷营养盐输出分布结果如图 2.

2.4 西苕溪流域营养盐输出负荷结果与分析

利用修正的输出系数模型估算了西苕溪流域氮磷营养盐输出负荷与输出强度(单位面积输出负荷),其中西苕溪流域 2004 年 TN 输出负荷为 $2\,121.3\text{ t}$,TN 输出平均强度为 $9.023\,3\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$;TP 输出负荷为 49.3 t ,TP 输出平均强度为 $0.209\,8\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$.根据实测数据计算的西苕溪流域 TN 年负荷为 $2\,514.89\text{ t}$,TP 年负荷为 137.53 t ^[4].比较来看,模型估算结果小于实测数据结果,流域 TN 面源输出负荷占总负荷量 85%,TP 输出负荷占总负荷的 35%,这是由于本模型估算结果没有包含流域内的点源污染及畜、禽与人类的生活污染.此外可以看出,利用输出系数模型估算的 TN 负荷比例较高,而 TP 负荷比例较低,这一方面说明农业面源污染在河流水质污染中占有相当大的份额,另外也表明输出系数模型还需要进一步的改进,包括模型中用于计算径流量的降雨量空间插值方法与多年降雨径流关系,模型所考虑的因素与结构,不同土地利用类型营养盐输出系数获取与修正等方面.

表 2 典型小流域输出系数模型估算值与实测值误差比较

Table 2 Comparison between estimated loads by export coefficient model and measured loads of typical sub-watershed in Xitaoxi watershed						
典型流域编号	TN 估算值/kg	TN 实测值/kg	TN 误差/%	TP 估算值/kg	TP 实测值/kg	TP 误差/%
S1	14 877.7	29 203.9	- 49.1	261.8	482.3	- 45.7
S2	3 543.0	5 061.3	- 30.0	61.6	190.1	- 67.6
S3	7 360.5	9 465.0	- 22.2	132.6	241.8	- 45.1
S4	13 695.0	15 745.3	- 13.0	304.4	318.5	- 4.4
S5	3 243.7	3 054.7	6.2	66.8	65.5	1.9
S6	2 899.2	2 970.7	- 2.4	64.7	80.5	- 19.6
S7	5 990.6	6 430.2	- 6.8	137.2	114.8	19.5
S8	18 423.8	8 777.0	109.9	360.9	209.0	72.7
S9	24 006.2	25 346.4	- 5.3	352.6	288.5	22.2
S10	33 289.8	25 847.7	28.8	513.3	433.6	18.4
S11	41 307.2	48 680.9	- 15.1	676.9	608.5	11.2
合计	168 636.6	180 583.1	- 6.6	2 932.7	3 033.1	- 3.3

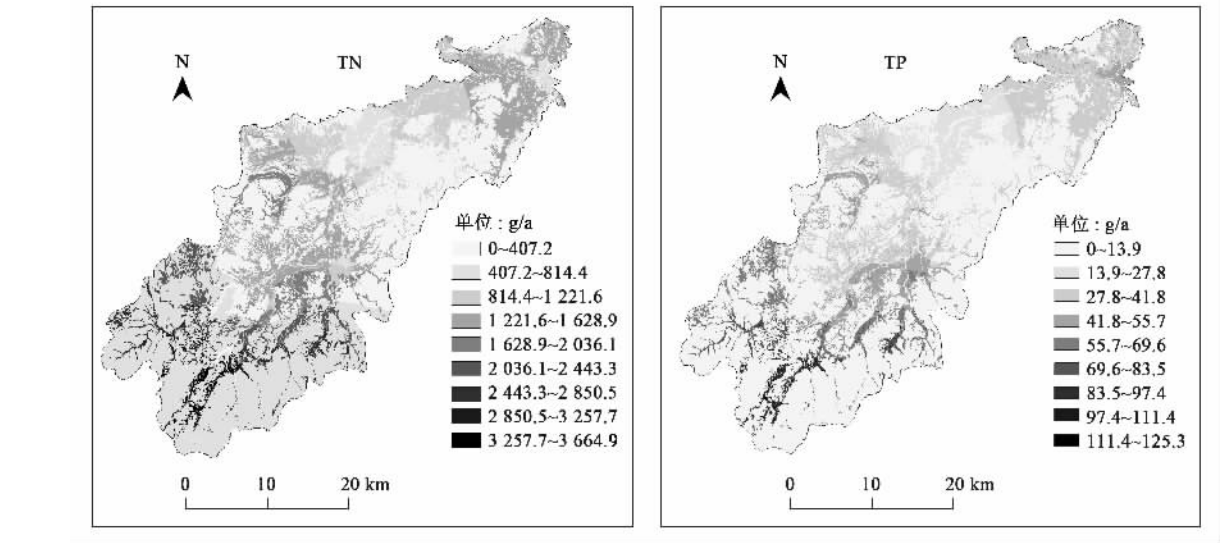


图 2 西苕溪流域 2004 年营养盐输出负荷空间分布
Fig.2 Spatial distribution of nutrient export loads in 2004

3 结论

(1)采用野外实测数据获取西苕溪流域主要土地利用类型营养盐输出系数,并考虑流域降雨径流的空间差异,通过遥感影像获取土地利用数据,把模型与地理信息系统技术结合,利用 IDRISI 的宏建模工具,对输出系数模型进行了改进与实现.

(2)利用改进的输出系数模型对 2004 年西苕溪流域营养盐输出进行估算,并以实测数据的计算结果对模型进行检验分析,对有关重要参数进行了必要的修正和调整,最后确定了西苕溪流域 2004 年氮磷营养盐输出系数模型.模型估算结果为西苕溪流域 2004 年 TN 输出负荷为2 121.3 t, TP 输出负荷为 49.3 t.

(3)分析表明,输出系数模型虽然不如分布式机

制模型考虑营养盐输出的过程和机制,但由于其应用具有与土地利用直接结合的优势,通过对其改进,使得建成的模型具有半分布式的性质,增加了模型模拟的精度并使其具有很好的时空尺度适宜性和推广性.

参考文献:

[1] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理和控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5):87-91.

[2] Susanna T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. J Environ Manage, 2002, 66: 377-393.

[3] 李俊然,陈利顶,郭旭东,等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学, 2000, 20(6):506-510.

[4] 李恒鹏,刘晓玫,黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地利用类型的面源污染产出[J]. 地理学报, 2004, 59(3):401-408.

- [5] 郑丙辉,曹承进,秦延文,等. 三峡水库主要入库河流氮营养盐特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2008, **29**(1):1-6.
- [6] 李琪,陈利顶,齐鑫,等. 妫水河流域农耕地非点源磷污染危险性评价与关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, **29**(1):32-37.
- [7] 李燕,李恒鹏. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(5):1319-1324.
- [8] 杨桂山,于秀波,李恒鹏,等. 流域综合管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 3-15.
- [9] 胡雪涛,陈吉宁. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, **23**(3):124-128.
- [10] Johnes P J. 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]. J Hydrol, 1996, **183**:323-349.
- [11] Helen B, Penny J, Robert F, *et al.* A comparison of diatom phosphorus transfer functions and export coefficient models as tools for reconstructing lake nutrient histories[J]. Freshwater Biol, 2005, **50**(10):1651-1670.
- [12] Zobrist J, Reichert P. Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds[J]. J Hydrol, 2006, **329**(1-2): 207-223.
- [13] Shrestha S, Kazama F, Newham L T H. A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data[J]. Environ Modell Softw, 2008, **23**(2): 182-194.
- [14] 许朋柱,姜彤,曹文清,等. 太湖地区西苕溪流域水文模型的设计与验证[J]. 地域研究与开发, 1996, **15**(3):49-54.
- [15] Nandish M M, Keith S R. Estimation of surface water quality changes in response to land use change: application of the export coefficient model using remote sensing and geographical information system[J]. J Environ Manage, 1996, **48**:263-282.
- [16] Worrall F, Burt T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models[J]. J Hydrol, 1999, **221**:75-90.
- [17] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 西苕溪流域不同土地利用类型营养盐输出系数估算[J]. 水土保持学报, 2007, **21**(1):1-4, 34.
- [18] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 西苕溪典型小流域土地利用对氮素输出的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(6):678-681.
- [19] 李兆富. 流域土地利用/覆被变化对营养盐输出影响研究[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2006. 73-82.