

面源磷负荷改进输出系数模型及其应用

李思思^{1,2}, 张亮^{1*}, 杜耘¹, 刘蜀治³

(1. 环境与灾害监测评估湖北省重点实验室, 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 昆明市环境科学研究院, 云南 昆明 650032)

摘要: 传统的输出系数模型是模拟较大流域面源污染的有效手段, 但它假设同一土地利用类型的输出系数相同, 忽视了营养物径流和截留过程中其他流域特征对输出系数空间分布的影响, 难以为流域分区管理提供依据。在传统输出系数模型基础上, 引入产污因子(CI)和截留因子(RI), 校正地形、降雨、植被缓冲带对面源磷流失空间格局的影响。用改进输出系数模型模拟滇池流域面源磷负荷并将模拟结果应用于流域管理。结果表明, 改进的输出系数模型能更好地模拟面源磷污染的空间格局, 识别出面源总磷的关键风险区——湖滨平原地带以及与入滇河流邻近的山谷、台地。以2008年滇池流域面源总磷的模拟结果(352.5 t)为基准, 若单位面积磷肥施用量减少20%, 面源总磷负荷将减少8.6%; 若环湖公路内侧全部实现退耕还林或还草, 面源总磷负荷将减少6.0%; 若同时实施减少磷肥施用量和环湖公路内侧退耕两项措施, 面源总磷负荷将减少13.0%。

关键词: 改进输出系数模型; 产污因子; 截留因子; 地形; 降雨; 植被缓冲带; 滇池流域; 面源污染

中图分类号: X502 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-8227(2014)09-1330-07

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201409021

营养物质的大量排放造成水环境恶化问题日益突出。水体富营养化限制了水资源供给、渔业养殖和休闲娱乐等水体功能^[1]; 而且增加了水处理成本^[2]。与点源污染相比, 面源污染的发生随机而不连续、机理过程复杂、污染负荷时空分布差异大, 监测、模拟和控制困难^[3]。污染负荷估算和关键风险区识别是有效控制面源污染的重要前提^[4,5]。面源污染负荷的模拟主要有经验模型和过程模型两种。输出系数模型, 作为应用广泛的经验模型, 忽略复杂的水文和污染物迁移转化过程, 结构简单、数据需求较少、模拟精度可以接受, 特别适用于数据缺乏的较大流域^[5,6]。但是, 输出系数模型是一种集总式的模型, 无法表征面源污染在流域的空间分布, 因此无法识别关键风险区, 无法为污染控制和水环境管理提供依据。为了识别关键风险区和准确模拟污染负荷量, 许多研究引入流域特性的空间异质性改进或改造输出系数模型。Soranno等^[7]构造的磷通量模型, 引入传输系数表征污染物向水体传播过程中的

损失, 结合地理信息系统构造半分布式模型, 识别出不同水文时期水体磷污染的有效贡献区。但用磷通量系数代替输出系数, 改变了输出系数模型的基本结构, 不利于利用输出系数的经验值, 运用时需反复试算对系数进行率定。李兆富等^[8]提出用浓度代替输出负荷, 并考虑降雨量的空间异质性, 模拟结果与观测值接近。丁晓雯等^[9]提出用降雨因子和地形因子对输出系数的时空差异性做校正, 使模拟结果在空间上有更好的表现。Endreny等^[6]通过上坡贡献区和下坡分配区的识别, 引入径流可能性因子和截污因子校正输出系数, 识别出对地表水质影响较大的关键风险区。以上研究均通过表征一个或几个流域特征的空间异质性改进输出系数模型, 而忽略了其他因素的影响。本文在不改变输出系数模型基本结构的前提下, 综合考虑降雨、地形、植被缓冲带的空间异质性对面源污染空间格局的影响, 用改进输出系数模型识别污染流失的关键风险区, 并对流域面源负荷进行模拟和预测。由于面源氮中溶解氮比

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2013-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001333); 武汉市青年科技晨光计划项目(201150431072); 湖北省自然科学基金项目(2011CDB404); 农业部面源污染控制重点实验室开放基金项目(20130102)

作者简介: 李思思(1988~), 女, 硕士研究生, 主要从事面源污染控制方面的研究。E-mail: gyluohan@gmail.com

* 通讯作者 E-mail: lzhang@whigg.ac.cn

例高且地下水传播在面源氮传播过程中的重要作用,植被缓冲带对总氮的截留效果不如总磷^[7]。且磷是使内陆水体加速富营养化和发生藻类水华的主要营养物质^[10]。本文的改进输出系数模型只限于对面源总磷的模拟。

1 改进输出系数模型

1.1 输出系数模型(ECM)

经典的输出系数模型把流域内地表水排水网络中某一点的面源污染负荷看作是其上游流域内所有营养源污染物输出量的总和。模型表达式为:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i (I_i) + p \quad (1)$$

式中: L 是面源污染总负荷; E_i 是第 i 种污染源的输出系数; A_i 是第 i 种土地利用类型的面积,或第 i 种牲畜的数量,或人口数; I_i 是第 i 种污染源的输入量; p 是由降雨输入的污染物质^[11]。

1.2 改进输出系数模型(CIRI-ECM)

经典的输出系数模型假设每种土地利用类型的输出系数相同,忽略了降水、地形、植被缓冲带的空间异质性的影响。径流是面源污染产生和传输的驱动力,有研究表明径流量和面源总磷负荷正相关^[12]。对营养物质传输过程的研究表明植被缓冲带可减少进入地表水体的面源污染^[13~16]。本文构造产污因子(CI)描述径流可能性对面源污染产生的影响,构造截留因子(RI)描述植被缓冲带的截留作用对面源污染传输的影响。用标准化的产污因子和截留因子作为权重,校正输出系数的空间差异,用校正后的输出系数识别面源污染关键风险区,并估算流域面源污染负荷。

1.2.1 产污因子(CI)

对径流过程的研究表明流域的地形特征,如坡度、坡度等,可用来解释和预测土壤湿度和径流的差异性^[17,18]。在分布式水文模型 TOPMODEL 中,用地形因子 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 表示流域上某一点产生径流的潜力^[19]。其中 α 是流域上某一点的累积汇水面积与等高线长度的比值; β 是该点的坡度角。对降水径流关系的研究表明径流量可表示为降水量的函数^[20]。本文将降水量权重引入地形因子,构造产污因子(CI),表示流域上某一点的污染物随径流发生的可能性:

$$CI = \ln(\alpha'/\tan\beta) \quad (2)$$

式中: α' 是流域上某一点的累积汇水量参数; β

是该点的坡度角。利用 DEM 数据和格点化年降水量数据在 ARCGIS 中计算产污因子。原始 DEM 经湖泊水库、河流校正后,填洼,用 D8 算法^[21] 计算流向。以标准化降水格点数据与栅格单元面积的乘积为权重栅格,进行 flow accumulation 运算,结果加上权重栅格后再除以栅格单元的边长,即得到式(2)中的 α' 。用 slope 函数求取坡度,结果以百分比表示,除以 100 后得 $\tan\beta$ 。为防止除法运算中分母为 0,将坡度为 0 的值改为最小坡度值。根据式(2)计算 CI 值。

1.2.2 截留因子(RI)

研究表明,截留带宽度越大,坡度越小,截留效率越高^[16,22~24];植被类型为林地或草地对截留效率的影响不显著^[15,23]。据此,构造截留因子(RI),表示流域上某一点的污染物向水体传输过程中被植被缓冲带截留的可能性:

$$RI = \ln\left(\sum_{k=1}^K \frac{W_k}{\tan\beta_k}\right) \quad (3)$$

式中: W_k 是下游流线上点 k 处的植被截留带宽度; β_k 是该点的坡度角; K 是流域上某点在下游流线上土地利用类型为林地或草地的栅格数。利用土地利用图和 DEM 数据在 ARCGIS 中计算截留因子(RI)。土地利用类型为林地或草地的栅格设为 1,其他土地利用类型的栅格值设为 0,即得植被截留带的二值图。以植被截留带二值图与 $1/\tan\beta_k$ 的乘积为权重栅格,进行 flow length 运算,结果取对数得 RI 值。

1.2.3 权重因子标准化及改进输出系数模型(CIRI-ECM)

流域上某一点的产污可能性越大、截留可能性越小,则对地表水体的污染风险越大。以 CI 和 RI 的比值作为权重因子,校正输出系数。由于 CI 和 RI 都是可能性因子,且改进输出系数模型力求不改变原模型结构,将权重因子除以其平均值进行标准化。改进输出系数模型如下:

$$L = \sum_{i=1}^n Z\left(\frac{CI}{RI}\right) \cdot E_i A_i (I_i) + \sum_{j=1}^m E_j A_j \quad (4)$$

式中: L 是面源污染总负荷; $Z(CI/RI)$ 是标准化的权重因子; E_i 是第 i 种土地利用类型的输出系数; A_i 是第 i 种土地利用类型的面积; I_i 是第 i 种土地利用类型的输入量; E_j 是第 j 种牲畜或农村生活的输出系数; A_j 是第 j 种牲畜的数量或人口数。降水输入的磷含量很少,本模型不予考虑。

2 模型参数确定

2.1 研究区概况

滇池地处云南省中部,金沙江、红河、珠江三大水系的分水岭地带,流域面积 2 920 km²,其中山地、丘陵占 69.5%,湖滨平原占 20.2%,滇池湖水占 10.3%。滇池流域土壤为红壤和水稻土。气候属北亚热带湿润季风气候,多年平均气温 14.7℃,多年平均降雨量 953 mm,约 80%的降雨集中在 5~10 月,冬干夏湿。滇池分草海和外海两部分,主要补给

水源是入湖河道,主要河流有 29 条,较大的有新河、老运粮河、盘龙江、宝象河、老宝象河、海河、马料河、洛龙河、捞鱼河、柴河、大河、东大河等。草海和外海各有一人工控制出口,分别为草海的西园隧道和外海的海口中滩闸,西园隧道最终汇入螳螂川支流沙河,中滩闸出水直接进入螳螂川。

2.2 数据来源与数据预处理

改进输出系数模型建立的数据有:土地利用数据,DEM 数据,格点化降水量数据,滇池流域水系图,人口、牲畜养殖量、磷肥施用量等统计数据,如表 1 所示。

表 1 改进输出系数模型建立的数据需求

Tab.1 Data Needed for CIRI-ECM Construction

| 数据类型 | 数据格式 | 数据描述 | 数据来源 |
|----------------|------|--|--|
| DEM | 栅格 | 90m 分辨率 SRTM DEM | 中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 http://datamirror.csdb.cn |
| 遥感数据 | 栅格 | 30m 分辨率 HJ-1B CCD2,轨道号 14/87,生产时间 2008 年 11 月 20 日 | 中国资源卫星应用中心 http://www.cres-da.com/n16/index.html |
| 降雨数据 | 栅格 | 2008 年中国自动站与 CMORPH 融合的逐时降水量 0.1° 网格数据集(1.0 版) | 中国气象科学数据共享服务网 http://cdc.cma.gov.cn/home.do |
| 水系图 | 矢量 | 滇池流域主要入湖河流图 | |
| 人口、禽畜养殖、农业生产数据 | 统计数据 | 滇池流域人口、禽畜养殖量、磷肥施用量统计量 | 《滇池流域水污染防治“十二五”规划研究报告》 ^[25] |

HJ-1B 遥感数据在 ENVI 中解译,分为 6 种土地利用类型:林地、草地、耕地、水体、建设用地、未利用地,分类后转成 30 m 分辨率的栅格图。在 GrADS 软件中处理降水数据,求和得到 2008 年滇池流域年降水量格点数据,并转化成 ARCGIS 可用的文本格式。以地表高程为协同变量,将格点化降水量数据进行协同克里格插值,得到与 DEM 分辨率相同的格点化年降水量数据。90 m DEM 数据和 90 m 降水数据分别重采样得与土地利用图分辨率相同的 30 m 格点数据。

2.3 输出系数的确定

改进模型不改变原模型结构,引用传统输出系数的经验值。传统的输出系数可通过田间试验或土地利用类型单一的小流域监测获得,较大流域的输出系数常根据多年长期水质水量数据估算,而在资料缺乏地区可采用文献资料值^[26]。田间试验不考虑流域产、汇流过程,得到的输出系数是产生量而不是入水体量,小流域监测难度大,得到的输出系数不确定性大。基于长期水质水量数据估算的输出系数更适合改进输出系数模型,本文参考用该方法估算输出系数的文献资料^[11,27,28],确定输出系数如表 2。

表 2 滇池流域不同土地利用类型的输出系数取值

Tab.2 Export Coefficient Values Used for Different Land Use Types in Dianchi Watershed

| 污染源 | 输出系数[t/(km ² ·a)] |
|------|------------------------------|
| 林地 | 0.015 |
| 草地 | 0.020 |
| 耕地* | 0.161 |
| 建设用地 | 0.050 |
| 未利用地 | 0.051 |

注: *耕地的输出系数与磷肥施用量成正比,表中值为磷肥施用量为 10 t/(km²·a)时的输出系数。

3 模拟结果与分析

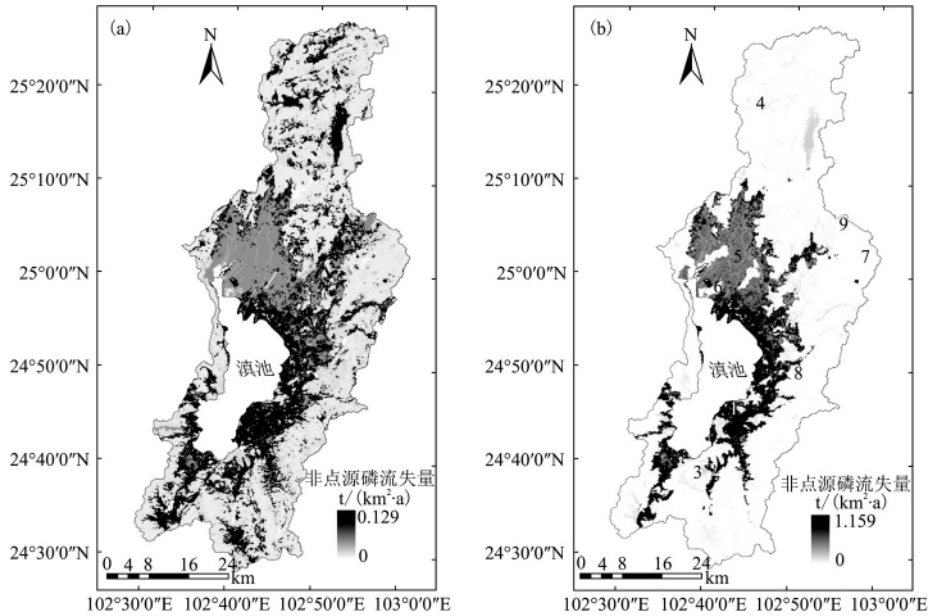
3.1 模型验证

本文用 2008 年主要入滇河流的平均浓度和多年平均径流量(2008 年为平水年)计算总磷污染总负荷,减去点源负荷(假设点源污染均通过河道排放),得到面源负荷观测值,对模型进行验证。水质、水量和点源负荷数据来源于昆明市环境科学研究院及环境监测站监测与调查结果^[25]。通过散流进入滇池的磷负荷量无法测量,且点源和农村生活、禽畜养殖的非点源数据难以在空间上定位,因此只对入滇河流的面源

负荷进行验证。结果表明,2008 年滇池流域入滇河
 流面源总磷负荷观测值为 293.1 t,改进输出系数模
 型的模拟值为 290.9 t,误差-0.8%,优于经典输出
 系数模型的模拟结果(242.8 t,-17.2%)。

由于数据资料缺乏,本文未能定量验证改进模
 型的空间特性。然而,可对改进模型进行定性评价。
 图 1 是输出系数模型(ECM)和改进输出系数模型

(CIRI-ECM)模拟的滇池流域面源磷污染流失量对
 比。由图可见,改进模型对流域面源磷污染的空间
 模拟与其他文献更一致:杨文龙等^[29]将滇池流域由
 外到内划分为山地区、台地区、湖滨区 3 个圈层,指
 出超过 95%的面源污染由湖滨区和台地区贡献,滇
 池南部、西部散流区和东部的磷污染比北部严重。



注:滇池水体、入滇河流、主要水库均以白色显示。图中的面源磷流失量未考虑农村生活和禽畜养殖污染源。

图 1 输出系数模型(a)和改进输出系数模型(b)模拟的面源总磷流失量分布图

Fig.1 Non-point Total Phosphorus Losses from Land Sources Simulated by ECM (a) and CIRI-ECM (b)

3.2 面源磷负荷关键风险区识别

传统模型的输出系数值(ECV)和经改进模型
 权重因子校正后的输出系数值(CIRI-weighted
 ECV)对比如表 3 所示。改进输出系数模型的结果
 表明,面源磷污染关键风险区为上游产流面积大、当
 地坡度平缓,下游流线上缺乏植被缓冲带、或植被缓

冲带坡度很陡的地区。在滇池流域表现为:下游流
 线上缺乏植被缓冲带的湖滨带耕地(如表 3 典型地
 块 1)和城镇建设用地(如表 3 典型地块 5),与入滇
 河流邻近而缺乏植被缓冲带的山谷和台地的农用地
 (如表 3 典型地块 2)。

由表 3 和图 1(a)可见,输出系数模型只考虑土

表 3 模型改进前后典型地块磷输出系数对比

Tab.3 Comparison of Export Coefficient Values of ECM and CIRI-weighted Export Coefficient Values of CIRI-ECM in Some Typical Land Use Types

| 地块类型 | 输出系数(ECV) [t/(km ² ·a)] | 权重因子校正后的输出系数 均值(最小值-最大值) [t/(km ² ·a)] | 典型地块 | CI | RI | 权重因子校正后的 输出系数 [t/(km ² ·a)] |
|------|---------------------------------------|---|--------|--------|--------|--|
| 耕地 | 0.129 | 0.232(0.014~1.159) | 1-湖滨平原 | 10.548 | 1.000 | 0.554 |
| | | | 2-台地 | 8.518 | 1.000 | 0.447 |
| | | | 3-台地 | 7.145 | 10.502 | 0.036 |
| | | | 4-山地 | 6.756 | 12.534 | 0.028 |
| 建设用地 | 0.050 | 0.139(0.007~0.449) | 5-湖滨平原 | 6.488 | 1.000 | 0.132 |
| | | | 6-湖滨平原 | 11.450 | 10.698 | 0.022 |
| 林地 | 0.015 | 0.004(0.002~0.112) | 7-山地 | 4.851 | 11.027 | 0.004 |
| 草地 | 0.020 | 0.006(0.002~0.165) | 8-台地 | 6.873 | 9.378 | 0.006 |
| 未利用地 | 0.051 | 0.056(0.007~0.408) | 9-山地 | 10.057 | 11.819 | 0.018 |

地利用状况,湖滨带的耕地和远离水体的山谷、台地中的耕地输出系数相同。而表 3 和图 1(b)则显示,改进输出系数模型能表征降水、地形、植被缓冲带的空间异质性对输出系数的影响;滇池流域北部的大部分耕地对滇池水体总磷负荷的贡献很小,只有松华坝水库北部的台地,由于与水库和盘龙江距离较近,面源磷流失量较山区的耕地略高。南部的晋宁县虽然耕地较多,但关键风险区集中在东大河、柴河、大河沿岸。滇池湖滨带的城市用地和耕地,若下游流线上有植被缓冲带,如:昆明城区的大观公园、滇池海埂公园、滇池西岸的西华湿地、滇池东岸的长腰山等,其面源磷流失明显低于下游缺少植被缓冲带的周围地区。

3.3 管理措施下面源磷负荷预测

通过污水处理厂的改扩建,到 2008 年滇池流域点源总磷搜集量达 87%,总磷去除率约 90%,但滇池水富营养化程度高:按Ⅳ类水标准,草海总磷超标 11.4 倍,按Ⅲ类水标准,外海总磷超标 1.5 倍^[25]。面源负荷比例高是重要原因之一,改进输出系数模型的模拟结果显示 2008 年滇池流域面源总磷负荷为 352.5 t,占总负荷量的 61.2%(点源负荷量为 223.7 t^[25])。为控制滇池流域面源污染,杨文龙等^[29]提出将滇池流域划分为山地区、台地区、湖滨区 3 个圈层,并提出改造水源地疏林、调整台地生态结构、合理施肥、调整坡地耕作模式、在湖滨区建设人工湿地等措施。昆明市政府从 2008 年开始实施湖滨带“四退三还一护”(即通过退塘、退田、退人、退房,实现还湖、还林、还湿地,护水)生态建设工作,并在滇池流域内推广测土配方施肥,减少化肥施用量,预计可在 2008 年基础上减少磷肥 20%。本文对减少磷肥施用量和环湖公路内退田还林或还草两种管理措施下的滇池流域面源总磷负荷进行估算,结果表明:以 2008 年面源总磷负荷为基准,若磷肥施用量减少 20%,面源总磷负荷将减少 8.6%;若环湖公路内全部实现退田,面源总磷负荷将减少 6.0%;若同时实施两项措施,面源总磷负荷将减少 13.0%。

4 结论与讨论

本文在不改变输出系数模型基本结构的前提下,引入产污因子(CI)和截留因子(RI),校正降水、地形、植被截留带的空间异质性对流域面源磷污染空间分布的影响。改进输出系数模型(CIRI-ECM)

应用于滇池流域,得到如下结论:

(1)改进输出系数模型(CIRI-ECM)比输出系数模型(ECM)对滇池流域面源磷污染的模拟结果好。对入滇河流面源磷负荷总量模拟的定量验证表明 CIRI-ECM 的误差(-0.8%)小于 ECM 的误差(-17.2%),对整个流域面源磷流失空间分布模拟的定性验证表明 CIRI-ECM 比 ECM 更符合经验知识和其他文献的结论。

(2)用改进输出系数模型(CIRI-ECM)可识别出滇池流域面源磷污染的关键风险区为:下游流线上缺乏植被缓冲带的湖滨带耕地和城镇建设用地,以及与入滇河流邻近而下游缺乏植被缓冲带的山谷和台地的农用地。

(3)用改进输出系数模型(CIRI-ECM)预测不同管理措施下滇池流域的面源磷负荷,结果表明:以 2008 年流域面源总磷负荷为基准,若磷肥施用量减少 20%,面源总磷负荷将减少 8.6%;若环湖公路内全部实现退田,面源总磷负荷将减少 6.0%;若同时实施两项措施,面源总磷负荷将减少 13.0%。

通过产污因子和截留因子的引入,校正传统输出系数,可以更好地模拟面源磷污染在流域的空间分布,从而识别面源磷污染的关键风险区,并为污染控制和流域管理提供依据。输出系数的确定会直接影响模型的模拟结果,是模型不确定性的主要来源。理想的方式是用研究区域长期的水质水量数据和社会经济数据率定输出系数。这依赖于完善的水质、流量监测站网络和信息公开。在数据有限的情况下,本文选择文献中相似区域的输出系数,并校正肥料用量对耕地输出系数的影响,经验验证模拟结果合理。改进输出系数模型(CIRI-ECM)由于不改变传统模型结构,可引用输出系数文献值;且能更好地模拟流域磷流失量的空间分布,为环境管理提供依据,可在其他流域推广,特别适用于降雨、地形、植被缓冲带等流域特征有较大空间差异性的大中型流域。

参考文献:

- [1] ICWE. The Dublin Statement and report of the conference [R]. Dublin: International Conference on Water and the Environment: Development Issues, 1992.
- [2] HOWARTH R, ANDERSON D, CLOERN J, et al. Nutrient pollution of coastal rivers, bays, and seas[J]. Issues Ecology, 2002, 7: 1-16.
- [3] SHEN Z Y, LIAO Q, HONG Q, et al. An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China

- [J]. Separation and Purification Technology, 2012, 84: 104-111.
- [4] SHEN Z Y, HONG Q, CHU Z, et al. A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujiang Watershed, China[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 977-989.
- [5] CHEN H, TENG Y, WANG J. Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: A case study in the Jinjiang River, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 2009-2021.
- [6] ENDRENY T A, WOOD E F. Watershed weighting of export coefficients to map critical phosphorous loading areas[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, 39(1): 165-181.
- [7] SORANNO P A, HUBLER S L, Carpenter S R, et al. Phosphorus loads to surface waters: A simple model to account for spatial pattern of land use[J]. Ecological Applications, 1996, 6(3): 865-878.
- [8] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. 环境科学, 2009(3): 668-672.
- [9] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 306-309.
- [10] KHASAWNEH F E, SAMPLE E C, KAMPRATH E J. The role of phosphorous in agriculture[M]. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1980.
- [11] 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 modelling approach [J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3-4): 323-349.
- [12] MALVE O, TATTARI S, RIIHIMAKI J, et al. Estimation of diffuse pollution loads in Europe for continental scale modelling of loads and in-stream river water quality[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(16): 2385-2394.
- [13] HICKE M B C, DORAN B A. A review of the efficiency of buffer strips for the maintenance and enhancement of riparian ecosystems[J]. Water Quality Research Journal of Canada, 2004, 39(3): 311-317.
- [14] HOFFMANN C C, KJAERGAARD C, UUSI-KAMPPA J, et al. Phosphorus retention in riparian buffers: Review of their efficiency[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(5): 1942-1955.
- [15] DUCHEMIN M, HOGUE R. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec(Canada) [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 131(1-2): 85-97.
- [16] ROBERTS W M, STUTTER M I, HAYGARTH P M. Phosphorus retention and remobilization in vegetated buffer strips: A review[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(2): 389-399.
- [17] BEVEN K J, KIRKBY M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Sciences Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.
- [18] ANDERSON M G, BURT T P. Process studies in hillslope hydrology[M]. Chichester, UK: Wiley, 1990.
- [19] BEVEN K, LAMB R, QUINN P, et al. TOPMODEL[C]// SINGH V P. Computer models of Watershed Hydrology, 1995: 627-668.
- [20] 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(6): 678-681.
- [21] O'CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28: 323-344.
- [22] UUSI-KAMPPA J, BRASKERUD B, JANSSON H, et al. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus[J]. Journal of Environmental Quality, 2000, 29(1): 151-158.
- [23] SYVERSEN N. Effect and design of buffer zones in the Nordic climate: The influence of width, amount of surface runoff, seasonal variation and vegetation type on retention efficiency for nutrient and particle runoff[J]. Ecological Engineering, 2005, 24(5): 483-490.
- [24] ZIEGLER A D, TRAN L T, GIAMBELLUCA T W, et al. Effective slope lengths for buffering hillslope surface runoff in fragmented landscapes in northern Vietnam[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(1-2): 104-118.
- [25] 滇池流域水污染防治“十二五”规划研究报告[R]. 中国环境科学研究院, 昆明环境科学研究院, 2010.
- [26] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009(4): 755-761.
- [27] WINTER J G, DUTHIE H C. Export coefficient modeling to assess phosphorus loading in an urban watershed [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2000, 36(5): 1053-1061.
- [28] 李怀恩, 庄咏涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. 西安理工大学学报, 2003(4): 307-312.
- [29] 杨文龙, 杨树华. 滇池流域非点源污染控制区划研究[J]. 湖泊科学, 1998(3): 55-60.

ESTIMATION OF NON-POINT PHOSPHORUS LOAD USING IMPROVED EXPORT COEFFICIENT MODEL AND ITS APPLICATION IN WATERSHED MANAGEMENT

LI Si-si^{1,2}, ZHANG Liang¹, DU Yun¹, LIU Shu-zhi¹

(1.Key Laboratory of Environment and Disaster Monitoring and Evaluation, Hubei, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Kunming Institute of Environmental Science, Kunming 650032, China)

Abstract: Export Coefficient Model (ECM) is effectively used in generating reasonable estimates of non-point pollution load in large watershed. In its classical form, ECM assumes that export coefficients are homogeneous within each land use type, ignoring the impacts of spatial heterogeneity of other watershed characteristics on spatial distribution of non-point pollution. However, phosphorus, which is regarded as the critical nutrient for water eutrophication and algae bloom, is largely affected by runoff, terrain and vegetated buffer strips in its transfer process from land to surface waters. By integrating a weighting function of Contributing Index (CI) and Retention Index (RI) into ECM, the spatial heterogeneity of terrain, precipitation, and vegetated buffer strips were considered to represent the potential of phosphorus losses in a specific site of a watershed land to its receiving waters. The data needed to construct the improved Export Coefficient Model with CI and RI index (CIRI-ECM) are easily available and the calculation process can be done in geographic information system. Since the improved model has not changed the structure of ECM, export coefficient values from literatures can be used in CIRI-ECM if reasonably selected. The CIRI-ECM was applied in the Dianchi Watershed in China. Firstly, the CIRI-ECM was quantitatively tested in its lumped estimating capability with observed data and qualitatively assessed in its distributed representing effects with other research results. The results showed that the error of CIRI-ECM in estimating annual lumped phosphorus load of Dianchi watershed in 2008 was -0.8% , smaller than that of ECM (-17.2%). Also, CIRI-ECM performed better in depicting the spatial pattern of phosphorus losses from land sources in the Dianchi watershed. Then, the CIRI-ECM was used to estimate watershed phosphorus load, to identify the critical source areas of phosphorous pollution from non-point sources, and to predict phosphorus load under particular management practices. The critical source areas of phosphorus pollution were identified as the farmland and the urban built-up land in the floodplain area of the Dianchi Lake where their downslope flowing paths lacked effective vegetated buffer strips, and the farmland in the valleys and the terraces that were hydrologically connected to the streams flowing into the Dianchi Lake. According to CIRI-ECM, the annual phosphorus load of the Dianchi Watershed from non-point sources in 2008 was 352.5 tons. The load would reduce by 8.6% if the use of phosphorus fertilizers was reduced by 20% ; the load would reduce by 6.0% if all the agricultural fields inside the lakeside road were turned into forests or grassland; the load would reduce by 13.0% if both of the above management practices were taken. Overall, by integrating Contributing Index and Retention Index into classical Export Coefficient Model, the CIRI-ECM was demonstrated to perform better both in watershed phosphorus load estimation and critical source area identification. CIRI-ECM can be used as an assistant tool for non-point phosphorus pollution control and watershed management, especially in middle-scaled and large-scaled watersheds with great spatial heterogeneity of precipitation, terrain and vegetated buffer strips.

Key words: Improved Export Coefficient Model; Contributing Index(CI); Retention Index(RI); terrain; precipitation; vegetated buffer strips(VBS); Dianchi Watershed; non-point source pollution(NPS)