基于输出系数模型的红枫湖保护区非点源污染负荷研究

李政道[1], 刘鸿雁[1,2], 姜 畅[2], 顾小凤[1], 涂 宇[1]

(1. 贵州大学 农学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: [目的] 探究红枫湖保护区非点源污染及其与水质的关系,了解红枫湖非点源污染负荷现状,为红枫湖保护区非点源污染的防控提供科学依据。[方法] 通过改进的输出系数模型(IECM)研究红枫湖总氮(TN)和总磷(TP)污染负荷。[结果] 2016 年 TN,TP 的非点源污染排放量为 863.78 和 77.14 t,用经验系数计算的非点源污染排放量 TN 为 701.19 t,TP 为 232.99 t,改进的输出系数模型加入了地形影响因子,具有更高的准确性。2016 年非点源排放的 TN,TP 占总污染负荷的 73.54%和 82.54%,相较于 2008 年非点源污染负荷 TN,TP 占比分别增加了 27.03%和 19.69%,但水质总体为Ⅱ类。[结论] 目前非点源污染是红枫湖的主要污染源,但对水质的影响较小。

关键词: 红枫湖保护区; 总氮; 总磷; 污染负荷; 输出系数模型

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)02-0193-06 **中图分类号**: X52, X503

文献参数: 李政道, 刘鸿雁, 姜畅, 等. 基于输出系数模型的红枫湖保护区非点源污染负荷研究[J]. 水土保持通报,2020,40(2):193-198. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.028; Li Zhengdao, Liu Hongyan, Jiang Chang, et al. Non-point source pollution load of Hongfeng Lake reserve based on export coefficient model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(2):193-198.

Non-point Source Pollution Load of Hongfeng Lake Reserve Based on Export Coefficient Model

Li Zhengdao[1], Liu Hongyan[1,2], Jiang Chang[2], Gu Xiaofeng[1], Tu Yu[1]

(1. *College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*;
2. *College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou* 550025, *China*)

Abstract: [Objective] This paper aims to explore the non-point source pollution in Hongfeng Lake reserve and the relationship with it water quality, and understand the current status of non-point source pollution land, in order to provide the scientific evidence to prevent the non-point source pollution. [Methods] The total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) pollution load of Hongfeng Lake was studied by improved export coefficient model (IECM). [Results] The non-point source pollution emissions of TN and TP in 2016 were 863.78 t and 77.14 t respectively, and the non-point source pollution emissions of TN calculated by the empirical coefficient was 701.19 t, TP was 232.99 t, and the improved output coefficient model incorporated terrain factors increased accuracy greatly. In 2016, TN and TP of non-point source emissions accounted for 73.54% and 82.54% of the total pollution load. Compared with the non-point source pollution load in 2008, TN and TP accounted for 27.03% and 19.69%, respectively, but the water quality was generally Class Ⅱ. [Conclusion] At present, non-point source pollution is the main source of pollution of Hongfeng Lake, but it has little impact on water quality.

Keywords: **Hongfeng Lake reserve; total nitrogen; total phosphorus; pollution load; improved export coefficient model**

收稿日期:2019-10-07 **修回日期**:2019-11-07

资助项目:国家基金委—贵州省人民政府联合资助项目"喀斯特地区重金属污染过程与防控机制研究"(U1616442-2); 贵州省土壤质量安全与水肥调控重点实验室(黔教合 KY 字[2016]001); 贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)

第一作者:李政道(1994—),男(苗族),贵州省施秉县人,硕士研究生,研究方向为水体污染控制研究。Email:1213969978@qq.com。

通讯作者:刘鸿雁(1969—),女(汉族),贵州省贵阳市人,博士,教授,主要从事环境生物修复与生态修复。Email:hyliu@gzu.edu.cn。

随着工业点源被逐步的控制,非点源污染已经成为水环境污染的主要来源[1]。我国湖泊中存在的氮磷污染有着 50%以上来自于农业非点源污染[2];非点源污染具有形成过程复杂,随机性大,机理模糊,分布范围广,影响因子复杂,潜伏周期长和影响危害较大等特点,不利于管理者进行监测和管理[3]。国外非点源污染研究始于 20 世纪 50—60 年代,在美国、英国、日本等发达国家首先开始,研发了包括物理模型和经验模型等在内的一系列非点源污染负荷计算模型[4],其中包括输出系数法、清单分析法以及机理模型模拟估算法等[5],使得非点源污染研究逐步走向成熟。荆延德等[6]利用输出风险模型分析非点源污染和土地覆盖与坡度的关系。Shen 等[7]通过水土评估工具(SWAT)和小规模流域扩展法(SWEM)来确定 NPS 污染物和高污染区域的时空分布;张彩玲等[8]、王文章等[9]通过输出系数模型计算非点源氮磷污染负荷及其产生规律。由于流域监测资料不完备,采用较为简单的经验模型比机理模型具备更高的可操作性和可行性[10]。输出系数法于 20 世纪 70 年代由美国和加拿大首次提出。输出系数法是一种基于污染物的输出系数来估算该流域内输出的面源污染负荷,利用土地利用方式等资料,集成来估算面源污染负荷[11]。输出系数模型是一种输出系数法的具体体现,通过土地利用类型等容易收集到的数据,对数据进行多元线性相关分析,然后建立起流域内土地利用类型与面源污染输出量的关系,对不同污染源类型的污染负荷求和,得到研究区域污染的总负荷[12-13]。

红枫湖是贵阳市的"三大水缸"之一,水质质量直接关乎区域用水安全。近年来已有较多关于红枫湖的研究,但对非点源污染负荷以及与水质的关系鲜有研究。为此,本研究通过改进的输出系数模型,探究红枫湖非点源污染及其与水质的关系,了解红枫湖非点源污染负荷现状,为红枫湖保护区非点源污染的防控提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

红枫湖保护区地处贵州高原中部,是贵州省最大的高原人工湖泊之一,也是喀斯特高原深水型湖泊;其横跨贵阳市清镇市、安顺市平坝区 2 区县境内。主湖距离省会贵阳市约 33 km,保护区地理坐标为东经 106°19′—106°28′,北纬 26°26′—26°35′,红枫湖保护区总面积为 1 596 km^2,湖泊水面面积 57.2 km^2,总库容 6.01×10^8 m^3。由于保护区内地质构造较复杂,故保护区内地貌类型多样。保护区地势从东南向西北减弱,地层岩性以碳酸盐岩分布最广。红枫湖气候类型属于亚热带季风湿润气候,年平均降水量约为 1 200 mm,降雨主要集中在 5—10 月;保护区内的植被属于亚热带常绿阔叶林。

1.2 数据获取与分析

本研究以 2016 年为基准年,所涉及的数据包括数字高程图、土地利用数据、土壤类型数据等,数据详见表 1。

统一各类型空间数据的地理坐标和投影,所有操作基于 ArcGIS 10.4 软件进行,并将获得的数据资料通过汇总软件进行分析(见封 3 附图 5)。

表 1 研究区数据及来源

数据分类	数据名称	数据来源
基础数据	畜禽养殖源 生活污染源 人口、边界	贵阳市与安顺市统计年鉴、贵阳市"两湖一库"防治规划及相关资料
空间数据	30 mDEM 数字高程图	地理空间数据云
属性数据	30 m 分辨率土地利用类型图	清华大学 FROM-GLC
	土壤类型图	全国土壤普查资料

1.3 输出系数模型

在输出系数模型的基础上,加入坡度影响因子对模型进行优化。

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

式中:L_j 为污染物 j 在流域中的总负荷量(t/a);β 为地形影响因子;i 为流域中的土地利用类型,共 m 种;E_{ij} 为污染物 j 在 i 种土地利用类型的输出系数或第 i 种畜禽每头输出系数或人口每人输出系数(t/a);A_i 为流域中第 i 种土地利用类型面积,km^2 或第 i 种牲畜数量或者人口数量。

1.3.1 地形影响因子 地形影响着污染负荷在降雨径流作用。因此,本研究把坡度因子作为影响权重来对污染负荷进行校正计算;主要是通过坡度对影响径流量的大小来控制非点源总氮和总磷的流失量。研

究表明[22],径流量等于坡度的幂函数与常量的乘积。

$$Q=aS^d \tag{2}$$

式中:Q 为流量;S 为坡降;a,d 为常量。

通过径流量与地形的关系,则地形影响因子 β 可以表示为:

$$\beta=\frac{Q(S_j)}{Q(S_{ave})}=\frac{aS_j^d}{aS_{ave}^d}=\frac{S_j^d}{S_{ave}^d} \tag{3}$$

式中:S_j 为研究区域内空间单元 j 的坡度;S_{ave} 为研究区内平均坡度。

根据有关研究成果[23-24],d 为 0.610 4,并且利用 GIS 软件对红枫湖保护区 DEM 数据进行计算,得到红枫湖保护区地面的平均坡度为 7.68°,通过公式(3)可得红枫湖地形影响因子公式为:

$$\beta=\frac{S_j^{0.610\,4}}{7.68^{0.610\,4}} \tag{4}$$

通过 GIS 模板与公式(4)计算得到红枫湖保护区地形影响因子为 0～3.591 1。

1.3.2　输出系数　在输出系数模型中,最为关键一环是输出系数的确定。确定合理的输出系数能够有效的计算出流域内的污染负荷。影响输出系数的因素有很多,包括流域内的地形地貌、水文、气候、土地利用方式等及人类活动。目前,确定输出系数的途径分为 3 类:查阅文献法、实地野外检测法和数学统计方法。相对于国外而言已经累计的大量的成果,而在国内,由于输出系数模型的研究起步不久。因此,本文参照国内外研究以及《全国水环境容量核定技术指南》和《第一次全国污染普查畜禽养殖业源产排污手册》,结合研究区域实际情况确定输出系数的取值,农村生活的输出系数表示着当地农村人口对生活污水及废弃物的利用和处理水平[14-21]。最终得到不同土地利用方式输出系数(表 2),人、畜禽养殖输出系数(表 3)。

表 2　研究区土地利用方式输出系数　t/(km² · a)

指标	输出系数					
	耕地	建设用地	林地	草地	未利用地	水域
TN	2.9	1.21	0.25	1.05	1.26	无
TP	0.18	0.032	0.03	0.038	0.063	无

表 3　人、畜禽养殖输出系数

指标	输出系数			
	农村生活/〔kg·(人·a)⁻¹〕	猪/〔kg·(头·a)⁻¹〕	家禽/〔kg·(只·a)⁻¹〕	大牲畜/〔kg·(头·a)⁻¹〕
TN	1.58	0.45	0.027	7.36
TP	0.16	0.31	0.013	0.31

1.4　入湖量计算

非点源污染入湖量是指在一定时期,由地表径流携带进入河流等水体的污染负荷。入湖量＝产生量×入湖系数。要估算入河量,需要确定入河指数。入河系数是污染物入河量和流失量的比率。根据中国环境规划院发布《全国水环境容量核定工作常见问题辨析》,非点源污染物入河系数在 0.01～0.1 的范围内选取。入湖系数分为 3 类:土地利用方式入湖系数、畜禽养殖入湖系数和农村生活入湖系数。土地利用方式入湖系数来源根据周怀东等[25]研究分析,西南流域内 TN,TP 产生量分别为:1.81×10⁶ t 和 4.86×10⁵ t,而入河量 TN,TP 分别为:2.11×10⁵ t 和 4.40×10⁴ t,入湖系数 TN,TP 分别为 0.13,0.09;畜禽养殖入湖系数来源根据 2000 年《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策》以及研究成果[26-27];农村生活入湖系数来源根据相关研究[28]建议方法确定。同时,由于降雨与地形能够影响入河系数[29-32],根据红枫湖保护区地形与降雨径流划分,结合得到红枫湖保护区入河系数修正系数,结果详见表 4。最终入湖系数＝最初入湖系数×修正系数,结果详见表 5。

表 4　研究区入河修正系数

修正项	修正系数
地形	1.0
降雨径流	1.2

表 5　研究区最终入湖系数　%

类型	TN	TP
土地利用方式	15.6	10.8
农村生活	30.0	30.0
畜禽养殖	8.4	8.4

1.5　工业源与城市生活源

1.5.1　工业源　由于国民经济需求,在 20 世纪末期红枫湖周边大力发展工业,先后建立很多不同规模的工矿企业。这些企业在给当地带来经济增长的同时也给红枫湖带来较大的环境污染。企业工厂在建立初期布局规划不合理,生产方式粗放、耗水量大、污水处理措施不完善,使得企业工厂生产排放的污水直接进去河流进而流入湖内,从而造成水体严重污染。在 2003—2007 年红枫湖水质从开始的Ⅲ类水质急剧恶化劣Ⅴ类水质,其营养物质最高时达到 49.5[33]。2007 年开始,面对红枫湖水质不断恶化的条件下,

省、市加大企业结构调整以及对污染源的从头治理；红枫湖流域周围企业相继关停拆迁、或进行结构调整、或加装污水处理措施，企业工厂等点源污染来源逐渐得到有效控制，排放污水得到处理后排放。根据两湖防治规划以及实地现场调查，红枫湖流域大小污染源约有157家，企业工厂主要涉及化工、冶炼、电力等行业。其中重点企业有贵州美丰化工有限公司、贵州平水机械有限公司、贵州华电清镇发电有限公司等。重点企业年排放废水总量为 3.30×10^6 t，COD约为140 t，氨氮为40 t。通过对重点企业工厂实际监测以及环保部门的排污申报数据计算，红枫湖流域工业企业2016年TN排放量为99.34 t，TP排放量为12.27 t。

1.5.2 *城市生活源* 红枫湖保护区范围涉及清镇市青龙街道办、红枫湖镇、站街镇以及平坝区高峰镇、马场镇、夏云镇。根据两湖水资源环境保护总体规划数据，主要城镇生活2016年污水量TN，TP分别为211.4和3.82 t。

2 结果分析

2.1 地形校正前后TN，TP排放量分析

未加地形影响因子计算得到TN，TP的排放量负荷与加入地形影响因子差异详见表6。从表6得到，校正后的畜禽养殖的TN，TP相对偏差分别为83.75%和87.65%；未加入地形影响因子计算的非点源污染负荷的各类型负荷均偏大。由于地势相对平坦的区域地形限制了产生和排放的过程，所以在计算的时候会偏小，因此造成未经过地形影响因子改进的模型计算值偏大。

表6 地形校正前后非点源污染TN和TP负荷 t

类型	TN		TP	
	校正后	校正前	校正后	校正前
农村生活	204.94	310.25	20.75	32.25
畜禽养殖	46.45	85.35	20.32	38.13
土地利用	612.39	752.96	36.06	45.63
总计	863.78	1 148.56	77.13	116.01

2.2 TN，TP输出量分析

2.2.1 *土地利用方式对TN，TP排放量分析* 通过地形影响因子校正的改进输出系数模型，利用基础数据计算出红枫湖保护区不同土地利用类型的TN和TP污染负荷及负荷强度，计算结果详表7。通过表7看出，在不同土地利用类型下的入湖污染负荷及负荷强度有着很大的差异。在TN与TP的污染负荷方面，耕地贡献率最大，其次是草地以及建设用地；在污染负荷强度方面，耕地最大，依次是荒地以及建设用地。单方面从TN来分析，平均的污染负荷为102.65 t/a，其中作为农用地的耕地对TN的贡献最大，达到了446.06 t/a，占总负荷的72.84%，成为TN负荷的最大来源；其次是草地和建设用地，分别为79.36和52.00 t/a，对TN的贡献比分别为12.96%，8.49%；TN的污染负荷强度平均为1.11 t/(km^2 · a)，耕地、荒地、建设用地的负荷强度均超过流域内平均负荷值。TP平均污染负荷为6.01 t/a，最大的贡献来自于耕地，为27.69 t/a，贡献率于TN贡献率相差无几，高达76.79%，其次为林地、草地，分别为4.06和2.87 t/a，贡献率分别为11.27%和7.97%。TP的污染负荷强度平均值为0.06 t/(km^2 · a)，只有耕地的污染负荷强度大于平均值，其余均小于等于平均污染负荷。

表7 红枫湖保护区不同土地利用类型TN和TP负荷

土地利用类型	面积/km^2	面积百分比/%	TN			TP		
			负荷强度/(t · km^{-2} · a^{-1})	负荷量/(t · a^{-1})	负荷百分比/%	负荷强度/(t · km^{-2} · a^{-1})	负荷量/(t · a^{-1})	负荷百分比/%
耕地	153.82	0.34	2.90	446.06	72.84	0.18	27.69	76.79
林地	135.47	0.30	0.25	33.87	5.53	0.03	4.06	11.27
草地	75.57	0.17	1.05	79.36	12.96	0.04	2.87	7.97
建设用地	42.97	0.09	1.21	52.00	8.49	0.03	1.38	3.81
荒地	0.88	0.00	1.26	1.11	0.18	0.06	0.06	0.15
水域	47.84	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

2.2.2 *畜禽养殖与农村生活源对TN，TP排放量的分析* 对农村生活源与畜禽养殖源进行分析，结果详见表8。从表8得知，农村生活产生的TN和TP负荷分别为204.94和20.75 t/a，畜禽养殖产生的TN，TP负荷分别为46.46和21.23 t/a。农村生活所产生的污染负荷大于畜禽养殖所产生的污染负荷，农村生活对TN，TP的贡献率高达81.52%，50.51%。而家禽养殖所产生的TN，TP污染负荷分别占总的畜禽养殖负荷的90.08%，99.09%。

2.2.3 *输出系数模型分析* 通过改进的输出系数模型，计算得到红枫湖非点源污染负荷TN为863.78 t，TP为77.13 t。而通过经验模型计算得到TN为

701.19 t,TP 为 232.99 t(表 9)。通过表 9 可知,经验模型与改进后的输出系数模型在 TN 和 TP 排放量差比为 23.19%和−66.89%。其中农村生活源两者计算的值差距不大,两者的差距主要体现在畜禽养殖方面和土地利用方面。畜禽养殖方面,TN,TP 相较于经验模型分别少了 236.62 和 132.28 t。土地利用方面,TN 相较于经验模型多出 375.64 t,而 TP 却少了 28.51 t。

表 8　农村生活和畜禽养殖 TN 和 TP 入湖负荷

类型		TN		TP	
		负荷量/(t·a^{-1})	百分比/%	负荷量/(t·a^{-1})	百分比/%
畜禽养殖	牛	3.68	1.46	0.15	0.38
	猪	0.92	0.37	0.029	0.07
	家禽	41.85	16.65	20.15	49.04
农村生活		204.94	81.52	20.75	50.51

表 9　经典模型与输出系数模型比较

污染源	经验模型[34]		改进输出系数模型	
	TN/t	TP/t	TN/t	TP/t
农村生活	181.37	15.72	204.94	20.75
畜禽养殖	283.07	152.70	46.45	20.32
土地利用	236.75	64.57	612.39	36.06

2.3　非点源污染负荷占比分析

通过收集的城市生活源数据、工业源数据以及非点源污染负荷,对红枫湖污染环境负荷进行分析(表 10)。从表 10 可知,红枫湖环境污染负荷 TN 为 1 174.57 t,环境污染负荷 TP 为 93.23 t,TN∶TP=12.59∶1。非点源污染负荷 TN,TP 占环境污染负荷 TN,TP 的 73.54%,82.54%;而根据《"两湖一库"污染治理科技攻关预研究报告》得到,2008 年非点源污染负荷 TN 与 TP 占比分别为:46.51%,62.85%[35]。相比较 2008 年,非点源 TN,TP 占比分别提高了 27.03%,19.69%。

表 10　红枫湖保护区各污染负荷量

污染来源	TN 污染负荷/t	TP 污染负荷/t
非点源污染	863.78	77.13
工业源	99.34	12.27
城市源	211.45	3.82
总 计	1174.57	93.23

2.4　入湖量分析

通过改进输出系数模型,计算得到红枫湖非点源污染负荷 TN 为 863.78 t,TP 为 77.13 t。结合表 5 中的入河系数计算得到红枫湖非点源污染 TN,TP 入湖量(表 11)。从表 11 得到,红枫湖 2016 年非点源入湖量 TN 为 97.35 t,TP 为 11.37 t。其中对入湖量 TN 贡献率最大为畜禽养殖源,占比为 52.84%;入湖量 TP 贡献率最大为农村生活源,占比为 53.56%。

表 11　红枫湖流域入湖量

污染源	TN 入湖量/t	TP 入湖量/t
农村生活	13.94	6.09
畜禽养殖	51.44	3.03
土地利用	31.97	2.24
总 计	97.35	11.37

3　讨论与结论

(1) 非点源污染负荷大小为:土地利用方式>农村生活>畜禽养殖。在土地利用方式中 TN 排放贡献率大小为:耕地>草地>建设用地>林地>荒地;TP 排放贡献率大小为:耕地>林地>草地>建设用地>荒地;耕地是非点源污染的重要来源,其排放的 TN,TP 占非点源污染负荷的 51.64%和 35.90%。

(2) 通过改进的输出系数模型计算,2016 年红枫湖保护区非点源污染负荷 TN,TP 为 863.78 和 77.14 t,占总污染负荷的 73.54%和 82.54%,水质总体为Ⅱ类;相较于 2008 年非点源 TN,TP 占比分别提高了 27.03%,19.69%;根据研究可知 2008 年红枫湖总体水质为Ⅳ和劣Ⅴ水质,2016 年红枫湖总体水质为Ⅱ类水质[36]。2008 年的非点源污染负荷占比低于 2016 年,但水质依然处于Ⅳ水质甚至劣Ⅴ水质,这是由于城市生活污染源与工业源的粗排放以及部分的河床硬化,大部分污染在降雨径流等作用下直接进入水体,导致水质恶化。而 2016 年的非点源污染负荷虽然占比重较大,但在工业污染源和生活污染源得到治理后,非点源污染成为红枫湖流域的主要污染源;而 2016 年红枫湖水质总体为Ⅱ类水质,由于近些年湖岸生态系统完善、植物缓冲带的多样性以及生产方式的改善。说明非点源污染虽然是红枫湖的主要污染源,但对水质的影响较小。

(3) 经验模型在土地利用源计算中未加入土地利用方式中建设用地的影响,同时在畜禽养殖的计算中,经验模型计算是将每种牲畜转换为猪粪当量计算;而改进的输出系数模型增加了坡度系数,与 SWAT 等经典模型相比,所需参数少,操作简便;与经验系数计算法相比,具有更高的准确性,可为喀斯特深水型湖泊非点源污染负荷的计算提供方法和依据。

[参 考 文 献]

[1] 林明,丁晓雯,卢博鑫.降雨、地形对非点源污染产输影响机理综述[J].环境工程,2015,33(6):19-23.

[2] 任军,边秀芝,郭金瑞,等.我国农业面源污染的现状与

对策(Ⅰ):农业面源污染的现状与成因[J]. 吉林农业科学,2010,35(2):48-52.

[3] 荆延德,樊蕊. 基于CNKI和WOS的非点源污染模型的研究热点及趋势分析[J]. 生态学报,2018,38(11):4077-4087.

[4] 朱永华,李畅游,史小红,等. 基于输出系数模型的赤峰农业非点源污染分析[J]. 灌溉排水学报,2016,35(10):109-112.

[5] 杨雯,敖天其,王文章,等. 基于输出系数模型的琼江流域(安居段)农村非点源污染负荷评估[J]. 环境工程,2018,36(10):140-144.

[6] 荆延德,张华美,孙笑笑. 基于输出系数模型的南四湖流域非点源污染输出风险评估[J]. 水土保持通报,2017,37(3):270-274,278.

[7] Shen Zhenyao, Qiu Jiali, Hong Qian, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges reservoir region [J]. Science of The Total Environment, 2014,493:138-146.

[8] 张彩玲,刘增进,张关超. 基于输出系数法的河南省农业非点源氨氮负荷研究[J]. 中国农村水利水电,2017(10):35-39.

[9] 王文章,敖天其,史小春,等. 基于输出系数模型的射洪县农村面源污染负荷估算[J]. 环境工程,2018,36(1):173-177.

[10] Singh J, Knapp H V, Arnold J G, et al. Hydrological modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005,41(2):343-360.

[11] 杨彦兰,申丽娟,谢德体,等. 基于输出系数模型的三峡库区(重庆段)农业面源污染负荷估算[J]. 西南大学学报(自然科学版),2015,37(3):112-119.

[12] 孟凡祥,赵倩,马建,等. 农业非点源污染负荷及现状评价:以大苏河地区为例[J]. 农业环境科学学报,2010,29(S1):145-150.

[13] 涂刚琴,刘鸿雁,赵志鹏,等. 黔中平寨水库保护区非点源污染风险评价与敏感区域识别[J]. 水资源保护,2015,31(4):87-93,110.

[14] 张辰,陆建忠,陈晓玲. 基于输出系数模型的云南洱海流域农业非点源污染研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(1):108-114.

[15] 任玮,代超,郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. 中国环境科学,2015,35(8):2400-2408.

[16] 周跃龙,汪怀建,余辉,等. 应用输出系数模型对太湖流域面源污染负荷测算研究[J]. 江西农业大学学报,2014,36(3):678-683.

[17] 张立坤,香宝,胡钰,等. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析[J]. 农业环境科学学报,2014,33(1):148-154.

[18] 刘亚琼,杨玉林,李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报,2011,27(7):7-12.

[19] 方怒放,史志华,李璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J]. 水生态学杂志,2011,32(4):7-12.

[20] 王宁. 农业非点源污染发生潜力指数模型及在宜兴市的应用研究[D]. 江苏 南京:南京大学,2011.

[21] 刘瑞民,沈珍瑶,丁晓雯,等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报,2008,27(2):677-682.

[22] Qingquan Liu, Vijay P. Singh. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2004,9(5):375-382.

[23] Yong Li, Chao Wang, Hongliang Tang. Research advances in nutrient runoff on sloping land in watersheds [J]. Aquatic Ecosystem Health & Management, 2006, 9(1):27-32.

[24] Xiaowen Ding, Zhenyao Shen, Qian Hong, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4):233-244.

[25] 周怀东,彭文启,杜霞,等. 中国地表水水质评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2004,2(4):255-264.

[26] 麻德明,彭文,池源,等. 海岛非点源污染负荷估算方法研究[J]. 中国环境科学,2016,36(10):3150-3158.

[27] 王家齐. 高原深水湖泊磷污染源解析及控制技术研究:以贵州红枫湖为例[D]. 江苏 南京:南京大学,2012.

[28] 孙瑞敏. 我国农村生活污水排水现状分析[J]. 能源与环境,2010(5):33-34,42.

[29] 程红光,郝芳华,任希岩,等. 不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究[J]. 环境科学学报,2006,26(3):392-397.

[30] 桂平婧,王丰,李善朴,等. 基于阶段输出系数模型的农业非点源污染负荷估算与评价:以四川省为例[J]. 浙江农业学报,2016,28(1):110-118.

[31] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京:中国农业科学院,2011.

[32] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京:中国环境规划院,2003.

[33] 杨通铨,刘鸿雁,喻阳华. 红枫湖水质变化趋势及原因分析[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(S1):96-102.

[34] 杨通铨,喻阳华,刘鸿雁. 贵阳市红枫湖饮用水源保护区的农业面源污染分析[J]. 贵州农业科学,2016,44(1):161-165,170.

[35] 贵州省山地环境重点实验室. "两湖一库"污染治理科技攻关预研究报告[R]. 贵州 贵阳:贵州省山地环境重点实验室,2008.

[36] 姜畅,刘鸿雁,陈竹,等. 基于GIS的红枫湖流域土地利用变化与水质响应[J]. 农业环境科学学报,2018,37(6):1232-1239.