

# 琼江流域(安居段)水质及面源污染综合评价

刘凌雪<sup>1</sup>, 敖天其<sup>1,2</sup>, 胡正<sup>1</sup>, 胡富昶<sup>1</sup>, 李孟芮<sup>1</sup>

(1.四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2.四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

**摘要:**为了明确琼江流域(安居段)的水质情况,准确评估该流域的主要污染源、主要污染物、重点治理乡镇等,为当地水环境污染控制及治理提供理论依据。采用改进的内梅罗指数法对研究区水质进行了评价,并且将输出系数法和源强系数法相结合,从安居区 21 个乡镇、5 种污染源、3 种污染物角度分析了其面源污染情况。结果表明:整个研究区水质较差,水体丰水期的水质劣于枯水期;流域面源污染严重,主要污染源为城镇居民区污水、农田地表径流及畜禽养殖场;污染物主要为氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ ),其次为总磷(TP);安居镇、拦江镇和西梅镇则是对研究区污染贡献较大的乡镇。研究区面源污染在空间分布上具有较大差异,应根据其分布情况和特征,采取相应措施控制及治理水质污染。

**关键词:**琼江流域;面源污染;水质评价;输出系数法;源强系数法

中图分类号:X522; X824

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0372-05

## Comprehensive Evaluation of Water Quality and Non-point Source Pollution in Anju Section of Qiongzjiang River Basin

LIU Lingxue<sup>1</sup>, AO Tianqi<sup>1,2</sup>, HU Zheng<sup>1</sup>, HU Fuchang<sup>1</sup>, LI Mengrui<sup>1</sup>

(1.College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2.State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to clarify the water quality of Anju Section of the Qiongzjiang River Basin, the main pollution sources, major pollutants and key townships in the basin were accurately assessed to provide the theoretical basis for local water pollution control and treatment. The improved Nemero index method was used to evaluate the water quality of the study area, the export coefficient method and source strength coefficient method were combined to analyze the non-point source pollution from 21 townships, 5 pollution sources and 3 pollutants in Anju District. The results showed that the water quality of the whole study area was poor, and the water quality during the flooding season was inferior to that in the dry season; the non-point source pollution of the basin was serious, and the main pollution sources were sewage of urban residential areas, farmland surface runoff and livestock and poultry farms; the main pollutant was ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), total phosphorus (TP) came to the next; Anju Town, Lanjiang Town and Ximei Town contributed greatly to the pollution of the study area. In general, the non-point source pollution in the study area was greatly different in spatial distribution. It is suggested that the corresponding measures should be taken according to non-point source pollution distribution and its characteristics in the process of control and governance.

**Keywords:** Qiongzjiang River Basin; non-point source pollution; water quality evaluation; export coefficient method; source strength coefficient method

水环境污染可分为点源污染和非点源污染两种,其中非点源污染是指在降水和径流冲刷作用下,溶解的或固体污染物从非特定的污染排放点通过径流过

程汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库等)而引起的水体污染<sup>[1]</sup>。有大量数据及成果表明<sup>[2-3]</sup>,农村面源污染(畜禽养殖、农药化肥、生活污水等)在流域水体污

收稿日期:2018-07-19

修回日期:2019-01-19

资助项目:科技部国家国际科技合作专项“流域非点源污染防治关键技术联合研究”(2012DFG21780)

第一作者:刘凌雪(1995—),女,宁夏西吉人,硕士研究生,研究方向为水文模型不确定性分析和面源污染评价。E-mail:liulingxue3@163.com

通信作者:敖天其(1964—),男,重庆铜梁人,博士生导师,主要从事农村非点源污染与分布式水温模型研究。E-mail:ao123Scu@163.com

染中所占的比重已超过工业点源污染,主要涉及两个方面的原因:(1) 我国是农业大国,随着农业的大力发展,化肥农药等的施用量明显增大,其中所含多种污染物随着农田排水或者降水进入到地表水体,从而造成水体污染;(2) 在我国农村地区,人口数量不断增多,并且除了发展农业之外,畜牧养殖业也得到迅速发展,但相对来说农村排污管道和污水集中处理系统尚未健全,导致大量污水、污染物被随意排放,对水环境造成极为严重的影响<sup>[4]</sup>。所以,若要从根本上解决我国的水污染问题,关键在于要高度重视流域农业面源污染的防治<sup>[5]</sup>。

如何改善水污染现状已成为水环境研究中迫切需要解决的问题,而水质评价、污染物来源分析等是提出相应措施和改善水环境质量的前提,水质评价及污染物确定的合理性将直接影响水环境整治决策的准确性<sup>[6]</sup>。近年来,各类评价方法被广泛用于水质评价,其中,单因子环境质量评价方法虽然能直观表达水质类别、反映水体达标情况<sup>[7]</sup>,但不能全面反映水环境污染的综合情况;多因子环境质量评价方法则是在评价水质时综合考虑所有评价参数,能更直观地定性描述水质的总体水平,且能给出综合性的评价结论,常用的有内梅罗指数法以及在其基础上进行改进的方法等。对于面源污染而言,我国通过对国外模型经验的学习,从结合国情出发,提出了适合实际面源污染研究的方法,如单位负荷法、输出系数法、源强系数法、降雨量—径流量插值法等<sup>[8]</sup>集现代技术与传统经验统计于一体的污染负荷预测方法。

本文选取琼江流域(安居段)作为研究区,采用改进的内梅罗指数法对该流域水质进行评价,并将输出系数法和源强系数法联合应用于研究区 TP、NH<sub>3</sub>-N 和 COD 等污染物的评估,以综合评价研究区的面源污染情况,提出合理的治理措施及建议。

## 1 研究区概况

安居区位于四川盆地中部,涪江中游,遂宁市西南方,东经 105°4′0″—105°43′45″,北纬 30°10′30″—30°34′10″。全区辖 14 个镇,7 个乡,辖区面积 1 258.2 km<sup>2</sup>。安居区境内有大小溪河共 37 条,主要河流为琼江和蟠龙河。琼江为涪江一级支流:安居镇以上为上游,亦称白马河;安居镇以下至潼南县太安镇为中游,始称琼江。琼江全长 235 km,全流域面积 4 560 km<sup>2</sup>,河曲发育,市境内流程 117 km,流域面积 1 008.4 km<sup>2</sup>,占全区幅员面积的 81.2%,天然落差 40 m,河道平均比降 0.34‰,琼江水量来源于自然降水,洪枯流量差异较大:枯水期时流量很小甚至断流,平均流

量约 2 m<sup>3</sup>/s;洪水期最大洪峰流量约 2 370 m<sup>3</sup>/s;琼江洪、枯水位变幅一般为 5 m,最大 10 m。

## 2 研究方法

### 2.1 资料来源

本研究以乡镇为尺度,研究区共涉及 21 个乡镇(14 个镇,7 个乡)。数据资料包括乡镇人口(农业与非农业)及面积、畜禽养殖情况、化肥施用量、土地坡度及土壤类型等。数据具体来源有:(1) 土地利用现状数据。参照第二次全国土地利用调查资料;(2) 社会经济数据。参照遂宁市安居区 2013—2015 年统计年鉴及乡镇提供调查资料;(3) 水质监测数据。来源于安居区环保局;(4) 其他数据。来源于国土资源分局、水务局、气象站、林业局、农业局等调查资料。

### 2.2 水质评价方法

传统的内梅罗指数法是一种突出最大值的计权型多因子环境质量评价法<sup>[9]</sup>,强调了污染指数最大的污染物对环境的影响和作用,反映了水体被污染的程度<sup>[10]</sup>。改进的内梅罗指数法在传统方法基础上同时对均值和最大因子项加以修正,避免了忽视重要因子这一弊端<sup>[11-12]</sup>,提升了水质评价的整体性和准确性。公式如下:

$$P=\sqrt{\frac{F_{\max}'^2+\overline{F'}^2}{2}} \tag{1}$$

$$F_{\max}'=\frac{F_{\max}+F_{\omega}}{2},\overline{F'}=\sum_{i=1}^n\omega_iF_i \tag{2}$$

$$F_{\omega}=\frac{\sum_{i=1}^mF_i}{m} \tag{3}$$

$$\omega_i=\frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^n\gamma_i} \tag{4}$$

$$\gamma_i=\frac{S_{0\max}}{S_{0i}},\quad F_i=\frac{S_i}{S_{0i}} \tag{5}$$

式中: $P$  为改进的内梅罗指数; $F_{\max}'$  为带权重的水污染指数最大值; $\overline{F'}$  为带权重的水的污染指数均值; $n$  为评价指标的数目; $F_{\omega}$  为权重值前  $m$  项的评分均值; $m$  为前  $n$  项中  $F_i\geq 1$  的项数; $\omega_i$  为第  $i$  种污染因子的权重值; $F_i$  为Ⅲ类水质标准下第  $i$  种参评指标的实测浓度与相应指标标准值的比值; $\gamma_i$  为第  $i$  种评价指标的相关性比值; $S_i$  为评价指标  $i$  在取样点的实测值(mg/L); $S_{0i}$  为评价指标  $i$  的标准值,一般选择Ⅲ类水质标准作为基准(mg/L)。

### 2.3 面源污染分析方法

2.3.1 输出系数法 输出系数法由 Johnes 等<sup>[13]</sup>于 1989 年提出。1990 年,Johnes 考虑了植被、林地、居

民生活污水处理系统等方面对该方法进行了修正<sup>[14]</sup>。公式如下：

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + p \tag{6}$$

式中： $L$  为营养物流失量(t/a)； $E_i$  为营养源  $i$  的输出系数[t/(km<sup>2</sup>·a)]或[kg/(per·a)]； $A_i$  为土地利用类型  $i$  的面积(km<sup>2</sup>)，或畜禽类型  $i$  的数量(头)，或流域内人口数量(人)； $I_i$  为对污染源  $i$  的输入量(t/a)； $p$  为来自降水的营养物输入(t/a)。

输出系数的大小决定了不同污染源向水体排放营养物(TN,TP)的输出率，主要通过相关文献、试验结果和水文统计方法来确定<sup>[14]</sup>。相比较而言，文献查找更为方便，但受多种因素影响具有较低的准确度；水文统计法因能够反映营养物迁移的水文机理而具有较高准确度，但需要大量相关数据，这对于我国小流域而言是很难实现的；试验方法的准确度最高，但需要投入大量的人力物力和财力。琼江流域监测资料短缺，作为长江上游的一部分，本文则主要参考长江上游地区，尤其是四川省境内与输出系数相关的文献，结合研究区污染物输出特征，修正并确定了本文的输出系数(表 1)。

表 1 不同面源的综合输出系数

类型	TP/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	类型	TP/ (kg·per <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )
旱地	0.00552	居民生活污水	0.1284
水稻田	0.00564	大牲口	0.186
天然林地	0.009	猪	0.0852
荒地	0.0306	羊	0.027
建设用地	0.0144	家禽	0.003

2.3.2 源强系数法 源强系数法由中国环境规划院于 2003 年在《中国水环境容量核定技术指南》<sup>[15]</sup>中提出，被广泛用于估算国内非点源污染负荷。本文采用四川地区源强系数表(表 2)。

表 2 各标准污染源的源强系数及其入河系数

项目	单位	COD	NH <sub>3</sub> -N	入河系数
农田地表径流	t/(hm <sup>2</sup> ·a)	0.149	0.03	0.1
畜禽(猪)	g/(头·d)	50	10	0.1
农村居民生活污水	g/(人·d)	40	4	0.1
城镇居民生活污水	g/(人·d)	40	8	0.1
建设用地	t/a	50	12	0.9
工业污染	t/a	—	—	0.9

注：依据《中国水环境容量核定技术指南》、《四川省水环境容量核定技术指南》、《中国饮用水源环境保护规划编制技术大纲》、《釜溪河流域水污染综合治理实施方案》。入河系数指不同污染源的污染物排放量中进入水体的比率<sup>[14]</sup>，该数据来源于琼江流域及周边的调查报告和相关文献。每种污染源都具有相应的标准污染源特征组合及修正方法，可以通过这些特征对标准源强系数进行修正，并用于估算非标准污染源的污染物排放量<sup>[15]</sup>。

以农田地表径流为例，其特征组合包括地形、作物类型、化肥施用量、年降雨量等，利用公式(7)对农田地表径流的源强系数进行修正，其他污染源类似。

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i P_i C_i F_i E_i \tag{7}$$

式中： $L$  为农田地表径流的污染物排放量(t/a)； $E_i$  为标准农田[标准农田指处于平原地带，种植作物为小麦，土壤类型为壤土，化肥施用量为 375~523 kg/(hm<sup>2</sup>·a)，平均年降雨量为 400~800 mm/a 的农田区<sup>[14]</sup>]地表径流的源强系数[t/(hm<sup>2</sup>·a)]； $\alpha_i$  为农田  $i$  的坡度修正值； $S_i, P_i, C_i, F_i$  分别为土壤类型、降雨量、作物类型和化肥施用量的修正值，均无量纲。

3 结果与分析

3.1 水质评价

根据安居区琼江流域水质监测断面的分布及采样情况，选取跑马滩水库、大安琼江监测断面进行水质评价，所处位置见图 1。基于 2013 年水质监测资料及当地水污染特点，选取化学需氧量(COD)、氨氮(NH<sup>3</sup>-N)、5 日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)及高锰酸盐指数这 6 个评价因子对琼江流域(安居段)进行水质评价。

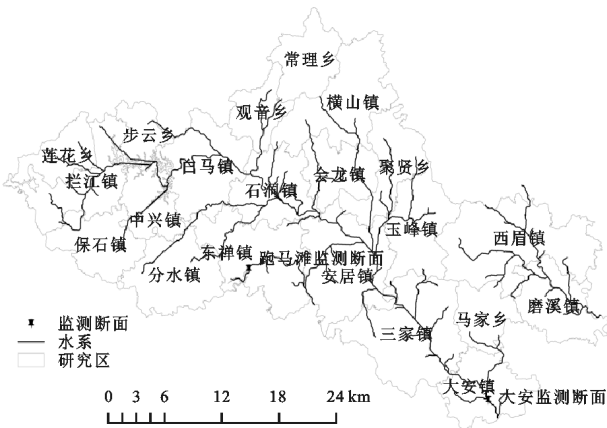


图 1 监测断面位置关系

计算两个水质监测断面的改进内梅罗指数  $P$ ，并以Ⅲ类水质标准为基础划分污染等级(表 3)。跑马滩监测断面除 1 月、2 月、3 月、4 月、5 月水质达标外，其余 7 月均超标；大安监测断面的水质情况相对好一些，除 6 月、7 月、9 月、10 月、12 月未达标之外，其余月份全部达到Ⅲ类水标准。此外，逐月对比两监测断面的改进内梅罗指数  $P$  发现，除 2 月、3 月、5 月、6 月、12 月之外，大安监测断面的内梅罗指数均小于跑马滩监测断面。总体而言，两监测断面的水质情况都比较好，其中跑马滩监测断面的水质情况略差于大安监测断面。

将两监测断面的改进内梅罗指数  $P$  的算术平均值



作为琼江(安居段)流域全年综合水质指数(图 2)。以Ⅲ类水质标准为基准,2013 年上半年的内梅罗指数均小于Ⅲ类水质标准,水质较好;在 5 月猛增后稳定波动至 7 月达到最大,可能原因是:汛期降水逐步增多,地表径流增大,随径流的不断冲刷使累积污染物得以充分释放,内

梅罗指数迅速增大。7 月之后,地表累积污染物减少,但地表径流量依旧较大,污染物被迅速稀释,内梅罗指数减小。枯水期,非点源污染作用减弱,内梅罗指数减小。也就是说,琼江水体丰水期水质劣于枯水期水质,可推测该流域面源污染较严重。

表 3 改进的内梅罗指数法评价结果

监测断面	项目	月份											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
跑马滩	指数 $P$	0.93	0.88	0.88	1.00	0.80	1.05	1.20	1.10	1.26	1.14	1.11	1.01
	污染等级	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅳ
大安	指数 $P$	0.93	0.90	0.91	0.93	0.96	1.23	1.02	1.00	1.08	1.04	0.98	1.02
	污染等级	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅳ

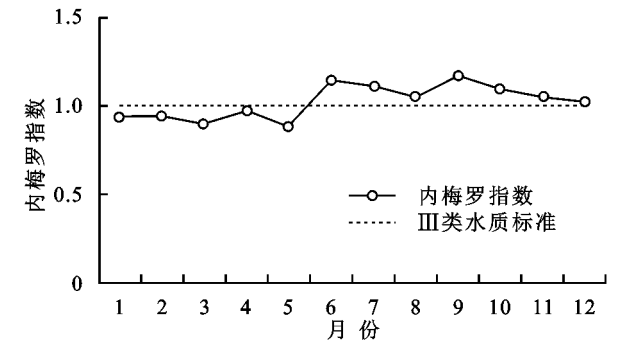


图 2 2013 年琼江流域综合水质指数变化趋势

3.2 面源污染综合分析

通过对琼江流域(安居段)的水质分析,可以看出该研究区水质情况不容乐观,且推测出水污染主要来源于面源污染。为了验证这一推测并得到研究区主要污染类型、主要污染物、主要污染源及重点治理乡镇等相关内容,本文结合输出系数法和源强系数法对该流域面源污染进行评估,经对研究区 2016 年所收集资料的简单分析,本文选取了 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TP 作为评价污染物。研究区 2016 年入河等标污染负荷计算结果见表 4。

表 4 研究区污染源指标分级及对应入河等标污染负荷 (t/a)/(mg/L)					
一级	二级	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	TP	合计
面源	农田	32.77	131.09	97.30	261.16
	畜禽养殖	30.98	123.92	97.75	252.65
	城镇生活污水	94.86	294.20	150.90	539.96
	农村居民生活	50.89	101.80	44.80	197.49
点源	工业污染	25.65	29.94	8.01	63.60
合计		235.15	680.95	398.75	1314.86

3.2.1 主要污染类型 通过分析研究区点源和面源污染的总等标污染负荷比发现,研究区主要污染类型为面源污染,约占总等标污染负荷的 95.16%(表 4)。因此,面源污染将成为研究区水污染治理的主要方向。

3.2.2 主要污染物 根据总等标污染负荷比将研究

区内 3 种污染物进行排序,其中, $\text{NH}_3\text{-N}$  的等标污染负荷最大,约占总负荷的 51.79%,为主要污染物;其次为 TP,占 30.33%(表 4)。

3.2.3 主要污染源 由表 4 可知,(1)  $\text{NH}_3\text{-N}$  主要来源于城镇生活污水、农田地表径流及畜禽养殖。其中,城镇生活污水最为严重,约占总排放负荷的 43.20%,其他污染源排序如下:农田地表径流(19.25%)、畜禽养殖(18.20%)、农村居民生活和工业污染。(2) TP:城镇生活污水(37.84%)、畜禽养殖(24.51%)、农田地表径流(24.40%)、农村居民生活和工业污染。(3) COD:城镇生活污水(40.34%)、农村居民生活(21.64%)、农田地表径流(13.94%)、畜禽养殖和工业污染。综上,研究区的主要污染源为城镇生活污水、农田地表径流及畜禽养殖,这些污染源将是研究区水污染治理的主要对象。

3.2.4 重点治理乡镇 分别计算 3 种主要污染物在研究区 21 个镇的污染负荷比(图 3)。可以看出,3 种污染物在 21 个镇的空间变化趋势大体一致。污染最严重的乡镇为安居镇,其次为拦江镇。此外,从  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 的角度来看,排在 3,4,5 的乡镇为西眉、三家和东禅镇;从 COD 的角度为西眉、三家和衡山镇。总之,研究区的主要污染负荷来源于安居、拦江、西眉、三家、东禅等乡镇,这些镇将成为研究区水污染的主要治理乡镇。

3.3 治理对策及建议

- (1)研究区水污染治理重点是面源污染,尤其是居民生活污水、农田地表径流和畜禽养殖。因此,需要投入更多的资金在居民生活污水设施建设、化肥农药的科学管理应用及畜禽养殖标准化等方面。
- (2)流域水污染治理的重点应放在安居、拦江、西眉、三家、东禅等乡镇,各乡镇需根据当地主要污染物及污染源有针对性地进行水污染治理。

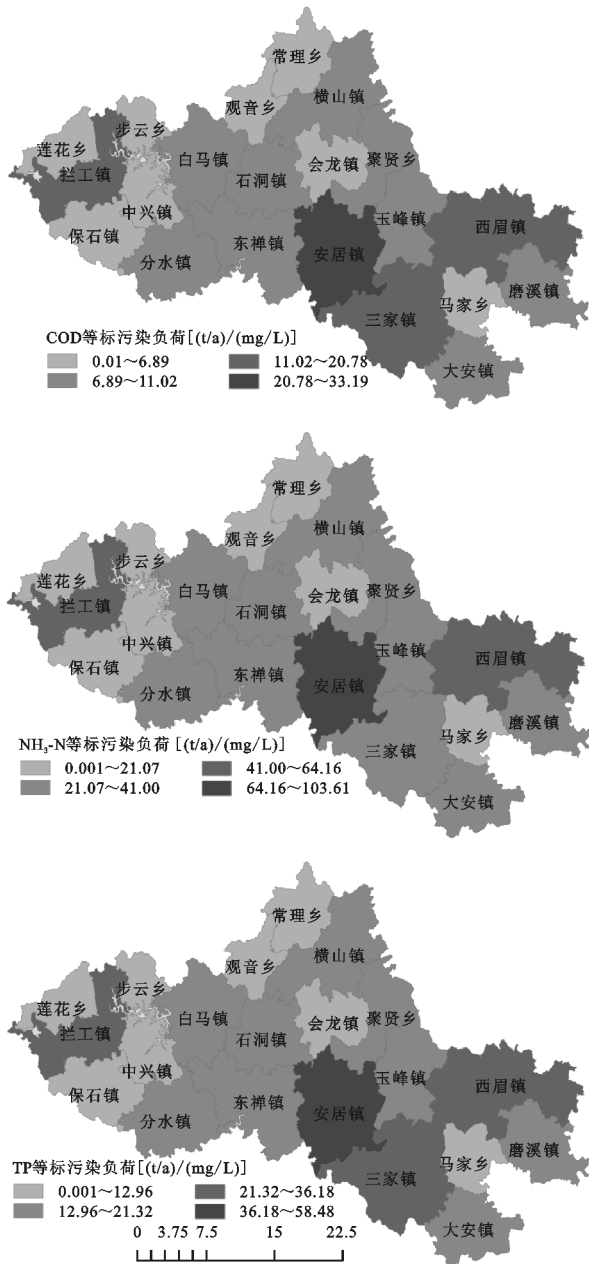


图 3 各污染物等标污染负荷的空间分布

4 结论

琼江流域(安居段)水质较差,且丰水期水质劣于枯水期水质,流域面源污染严重;主要污染物为 NH<sub>3</sub>-N 和 TP,所对应等标污染负荷比分别为 51.79%,30.33%;主要污染源为城镇生活污水、农田地表径流及畜禽养殖,其所对应等标污染负荷比分别为 41.06%,19.86%,19.21%;对研究区污染贡献较大的乡镇依次为安居镇、拦江镇、西眉镇、三家镇和东禅镇。所以,在该流域进行水污染治理时,应将治理重点放在安居、拦江、西

眉、三家、东禅等乡镇,以 NH<sub>3</sub>-N 和 TP 作为主要治理对象,着重治理由城镇生活用水、农田地表径流和畜禽养殖等方面所造成的面源污染。

参考文献:

[1] Olness A. Water quality: Prevention, identification and management of diffuse pollution[J]. Journal of Environmental Quality, 1995,24(2):383.

[2] Wu C, Chau K. Mathematical model of water quality rehabilitation with rainwater utilization: a case study at Haigang[J]. International Journal of Environment & Pollution, 2006,28(3):534-545.

[3] Haregeweyn N, Yohannes F. Testing and evaluation of the agricultural non-point source pollution model (AG-NPS) on Augucho catchment, western Hararghe, Ethiopia[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2003, 99(1/3):201-212.

[4] 李小丽,敖天其,黎小东.古蔺河流域古蔺县段农业非点源污染综合评价[J].水土保持研究,2016,23(5):327-331.

[5] 李伟.茗溪流域地表水水质综合评价与非点源污染模拟研究[D].杭州:浙江大学,2013.

[6] 谭渝峰,张琪,朱莎,等.基于简单建模与因子分析的湖泊水质评价[J].生态与农村环境学报,2015,31(3):432-439.

[7] 张龙玲,徐慧,管桂玲,等.改进的综合水质标识指数法在上海市长宁区水质评价中的应用[J].水资源保护, 2014(3):81-84.

[8] 郑涛,马友华,胡宏祥,等.农业面源污染生态风险评价研究进展[J].环境保护与循环经济,2016,36(7):35-39.

[9] 张从.环境评价教程[M].北京:中国环境科学出版社, 2005.

[10] 蔡晔,林怡雯,李月娥,等.利用改进的内梅罗指数法模型评价苏州市内外城河水质[J].化学分析计量,2015 (2):84-87.

[11] 闫欣荣.修正的内梅罗指数法及其在城市地下饮用水源地水质评价中的应用[J].地下水,2010,32(1):6-7.

[12] 李亚松,张兆吉,费宇红,等.内梅罗指数评价法的修正及其应用[J].水资源保护,2009,25(6):48-50.

[13] Johnes P, O'Sullivan. Nitrogen and phosphorus losses from the catchment of Slapton Ley, Devon-an export coefficient approach[J]. Field Studies, 1989,7(2):285-309.

[14] 张洪波,李俊,黎小东,等.缺资料地区农村面源污染评估方法研究[J].四川大学学报:工程科学版,2013,45 (6):58-66.

[15] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准 GB3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.