

基于流域尺度的农业非点源污染物空间排放特征与总量控制研究

王夏晖¹, 陆军¹, 张庆忠², 王波¹, 姚瑞华¹, 张惠远¹, 黄峰³

(1. 环境保护部环境规划院, 北京 100012; 2. 中国农业科学院, 北京 100081; 3. 湖北省环境科学研究院, 武汉 430072)

摘要: 农业非点源污染是导致流域水质恶化的重要原因之一. 依据农业污染源主要污染物空间排放特征和排放强度分析, 划分农业非点源污染空间管理分区, 并研究设计分区污染物总量控制方案, 是提高农业非点源污染控制成效的重要途径之一. 以湖北省四湖流域为研究案例区, 系统开展了流域尺度的农业非点源污染空间排放特征识别与总量控制研究. 结果表明, 四湖流域水环境 COD、总氮、总磷、氨氮负荷主要来自于农业非点源污染, 4 类非点源污染物分别占到流域污染物排放总量的 67.6%、82.2%、84.7% 和 50.9%. 对四湖流域非点源污染物空间排放特征分析结果表明, 水产和畜禽养殖业发达的洪湖、监利、潜江、沙洋地区是流域非点源污染物的主要贡献源区. 根据污染物在流域空间上的排放特征和源强评价结果, 将四湖流域划分为 3 个农业非点源污染管理分区, 即长湖上游水产和畜禽养殖污染重点控制区、四湖干渠农村非点源污染综合控制区和洪湖水产养殖污染重点控制区, 针对不同管理分区分别提出了污染控制措施. 基于水质改善和水体纳污能力综合考虑, 设计了针对 3 个非点源污染管理分区的总量控制方案, 分阶段实现监测断面全指标达标和满足水体纳污能力要求. 主要污染物中, COD 主要削减区域为四湖干渠区和洪湖区, 分别占到流域 COD 削减量的 43% 和 42%; 氨氮主要削减区域为四湖干渠区, 占到氨氮总削减量的 66%; 总氮主要削减区域为四湖干渠区和洪湖区, 分别占到流域总氮削减量的 42% 和 31%; 总磷主要削减区域为四湖干渠区, 占到流域总磷削减量的 53%.

关键词: 流域; 非点源污染; 管理分区; 排放特征; 总量控制

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)09-2554-08

Spatial Discharge Characteristics and Total Load Control of Non-point Source Pollutants Based on the Catchment Scale

WANG Xia-hui¹, LU Jun¹, ZHANG Qing-zhong², WANG Bo¹, YAO Rui-hua¹, ZHANG Hui-yuan¹, HUANG Feng³

(1. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China; 2. Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Hubei Academy of Environmental Sciences, Wuhan 430072, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is one of the major causes of water quality deterioration. Based on the analysis of the spatial discharge characteristics and intensity of major pollutants from the agricultural pollution source, the establishment of spatial management subzones for controlling agricultural non-point pollution and a design of a plan for total load control of pollutants from each subzone is an important way to improve the efficiency of control measures. In this paper the Four Lake basin in Hubei Province is adopted as the research case region and a systematic research of the control countermeasures of agricultural non-point pollution based on the catchment scale is carried out. The results shows that in the Four Lake basin, the COD, total nitrogen, total phosphorus and ammonia nitrogen load of the water environment are mainly caused by agricultural non-point pollution. These four kinds of non-point source pollutants respectively account for 67.6%, 82.2%, 84.7% and 50.9% of the total pollutant discharge amount in the basin. The analysis of the spatial discharge characteristics of non-point source pollutants in the Four Lake basin shows that the major contributor source regions of non-point source pollutant in the basin are the four counties, including Honghu, Jianli, Qianjiang and Shayang where the aquatic and livestock production are relatively developed. According to the spatial discharge characteristics of the pollutants and the evaluation of the discharge intensity of pollutants, the Four Lake basin is divided into three agricultural non-point pollution management subzones, which including Changhu upstream aquatic and livestock production pollution control subzone, Four-lake trunk canal rural non-point source pollution control subzone and Honghu aquatic production pollution control subzone. Specific pollution control measures are put forward for each subzone. With a comprehensive consideration of the water quality amelioration and the allowable discharge of pollutants, a total load control solution is designed for the three non-point pollution management subzones, so as to fulfill the requirements of all indices of the monitoring sites and the requirements for the allowable discharge of pollutants of the water. Among the major pollutants, the major COD reduction area includes the Four-lake trunk canal subzone and the Honghu Lake subzone, which respectively account for 43% and 42% of the total COD reduction amount; the major ammonia nitrogen reduction area includes the Four-lake trunk canal subzone, accounting for 66% of the total ammonia nitrogen reduction amount; the major total

收稿日期: 2010-11-03; 修订日期: 2011-03-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07632-02); 国家自然科学基金项目(40601036)

作者简介: 王夏晖(1975~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为流域水生态和农村环境保护, E-mail: wangxh@caep.org.cn

nitrogen reduction area covers the Four-lake trunk canal subzone and the Honghu Lake subzone, accounting for 42% and 31% of the total nitrogen reduction amount in the basin respectively; the major total phosphorus reduction area is the Four-lake trunk canal subzone, accounting for 53% of the total phosphorus reduction amount in the basin.

Key words: catchment; non-point source pollution; division of spatial management; discharge characteristic; total load control

农业非点源污染是导致区域水环境恶化的重要原因^[1-4], 因其涉及的因素较多, 形成过程复杂, 是目前水环境保护科学中最为复杂的研究领域之一. 由于生产方式、土地利用类型、气候和水文特征在不同地理单元之间存在明显差异, 导致农业非点源污染在地理空间上呈现出均衡性^[5-9], 将流域空间范围划分为若干管理分区, 并制定针对不同分区的差异性管理措施, 将大大提高非点源污染控制工程和管理措施的有效性, 同时降低污染治理成本^[10-13].

实施污染物总量控制是我国水环境保护的主要措施之一, 近年来, 关于点源污染物总量分配方法、减排核算体系、污染源监控技术等研究日益趋于成熟和完善^[14-18]. 但发达国家水污染治理的实践表明, 单纯控制点源污染通常仍难以达到理想的水质改善效果, 非点源污染物必须同步纳入总量控制体系, 美国自 20 世纪 70 年代开始推行的 TMDL (total maximum daily loads) 计划因综合考虑了流域点源和非点源污染排放总量控制, 在一些地区取得了较好的成效^[19]. 由于非点源污染一般具有动态性, 其污染源空间位置和排放量都难以进行准确的量化, 因此, 对非点源污染实施总量控制的难度和复杂性相对较高. 近年来, 虽然国内一些研究者对我国非点源污染实施总量控制的相关技术方法开展了积极探索^[20,21], 但总体上这些研究仍处于摸索尝试阶段, 研究成果系统性不强, 仍难以在较大范围内推广应用. 基于流域尺度的非点源污染管理分区及其总量控制方法研究更是少有报道^[22], 这与当前综合改善区域水环境的迫切需求已不适应.

本研究选取位于我国粮食主产区的湖北省四湖流域为案例区, 系统评价非点源污染物在流域空间上的排放特征和强度分布, 识别关键污染负荷贡献单元, 划分非点源污染综合管理分区, 并制定针对不同管理分区的污染物总量控制方案, 探讨流域尺度的农业非点源污染系统管理模式, 进一步丰富和充实我国湖泊流域水环境综合管理技术框架体系.

1 材料与方 法

1.1 研究区域

四湖流域地处江汉平原腹地, 地跨荆州、荆门、

潜江 3 市, 位置优越, 交通发达, 介于东经 103°45' ~ 105°15', 北纬 30°31' ~ 31°42' 之间, 因境内有长湖、三湖、白露湖和洪湖而得名(图 1). 四湖流域包括荆州市的沙市区、荆州开发区、江陵县、监利县、洪湖市、荆州区的大部(不含弥市镇)、石首市的江北部分和荆门市沙洋县与掇刀区、潜江市的东荆河西岸部分, 共有 101 个乡(镇、办事处、农场), 总面积 11 547.5 km². 四湖流域属亚热带季风湿润区, 多年平均降雨量 1 000 ~ 1 350 mm, 季风气候明显, 雨热同季, 雨量丰沛, 无霜期长, 具备优越的农业发展气候条件. 流域地势平坦, 土地肥沃, 水域广阔, 粮食、生猪、禽、鱼等农产品生产规模较大, 是湖北省乃至全国重要的农业商品基地. 2008 年, 四湖流域总人口 528.2 万人, 其中城镇人口 195.9 万人, 农村人口 332.3 万人, 耕地面积 39.93 万 hm². 根据《中国综合农业区划》, 四湖流域地区位于长江下游平原丘陵农畜水产区(V1 区)以及长江中游平原农业水产区(V3 区)2 个 2 级农业区. 流域内主要河流(渠)有太湖港、龙会桥河、拾桥河、西荆河、内荆河故道、总干渠、田关河、东干渠、西干渠、洪排河、螺山干渠、子贝渊河、下新河等.

根据湖北省环境监测中心站 2009 年 1 ~ 9 月地表水水质监测数据, 在 27 个水质监测点位中, 仅有 8 个监测点位的水质达到水环境功能区标准, 占 29.6%; 其余监测点位的水质均有不同程度的超标, 超标项目主要为总氮、COD、总磷等. 在监测的 12 个水体中, 达到 III ~ IV 类的水体有洪湖、四湖总干渠、田关河、东干渠、西荆河和螺山干渠 6 个, 占 50%, 其余的为 V 类和劣 V 类水体.

1.2 数据来源

从污染物来源构成上, 农业非点源主要包括种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和农村生活源四大类. 种植业污染主要是粮食作物、经济作物和蔬菜作物肥料、农药和农膜使用产生的污染. 畜禽养殖业污染包括舍饲、半舍饲规模养殖的猪、奶牛、肉牛、蛋鸡和肉鸡在养殖过程中产生的粪便和污水污染. 本研究纳入计算范围的规模化养殖场为存栏或出栏: 生猪 ≥ 500 头(出栏)、奶牛 ≥ 100 头(存栏)、肉牛 ≥ 200 头(出栏)、蛋鸡 ≥ 20 000 羽(存栏)、肉鸡 ≥ 50 000 羽(出栏); 养殖专业户的存栏或出栏规模: 生

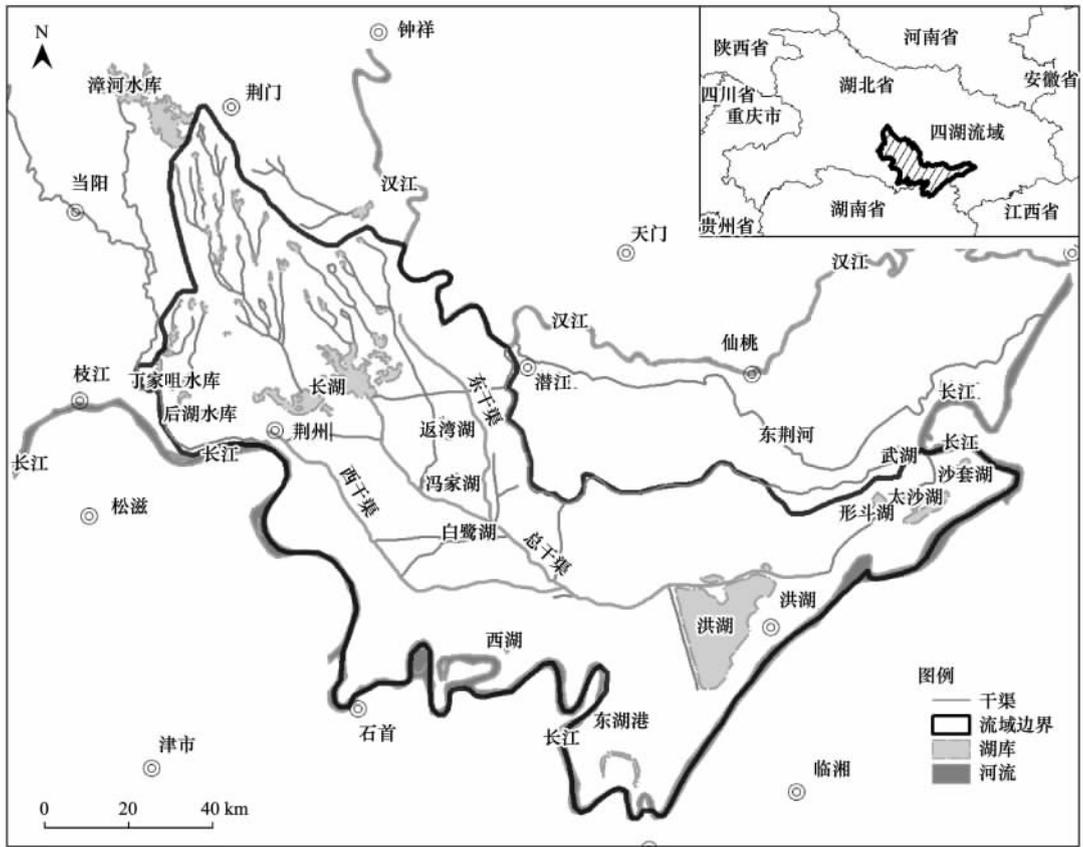


图1 研究区域地理位置示意

Fig.1 Map of study areas

猪 ≥ 50 (出栏)、奶牛 ≥ 5 头(存栏)、肉牛 ≥ 10 头(出栏)、蛋鸡 ≥ 500 羽(存栏)、肉鸡 ≥ 2000 羽(出栏)。水产养殖业污染包括池塘养殖、网箱养殖、围栏养殖的鱼、虾、蟹等养殖过程中产生的污染。农村生活源污染主要是村镇生活污水排放产生的污染。对不同污染源源强和排放特征进行评价,所需的基础数据主要包括:化肥、有机肥、农药施用量;猪、蛋鸡、肉鸡、奶牛、肉牛存栏和出栏量、粪污处理设施处理能力;鱼、虾、蟹等养殖面积、饵料投放量;农村人口、村镇生活污水处理设施处理能力。以上研究所需基础数据主要来自《荆州市统计年鉴》(2006~2008年)、《荆门市统计年鉴》(2006~2008年)、《潜江市统计年鉴》(2006~2008年)、《湖北省农村统计年鉴》(2006~2008年)和流域范围内9个县(区、市)农业统计资料。

1.3 源强估算方法

本研究采用源强估算法测算研究区范围内不同县(区、市)的农业非点源主要污染物(COD、总氮、总磷)排放量^[23,24],即基于各种农业非点源污染物的产生量及其排污系数进行估算。该方法不考虑非

点源污染产生和排放的中间过程,根据试验和调查获取的产排污系数,直接估算进入水体的非点源污染负荷,结构简明,参数较少,目前广泛运用于非点源污染定量研究。本研究采用的产排污系数主要参考第一次全国污染源普查农业污染源产排污系数手册。具体计算公式为:

$$P_{ij} = (C_{ij} \times Q_{ij}) \times K_{ij}$$

式中, P_{ij} 为第*j*类污染源的第*i*种污染物的排放量(t/a); C_{ij} 是第*j*类污染源中第*i*种污染物的产污系数; Q_{ij} 为计算第*j*类污染源第*i*种污染物产生量的基本参数,其中,种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和农村生活源分别是化肥施用量 $[t/(km^2 \cdot a)]$ 、畜禽存栏或出栏量(头/ t)、水产养殖面积(km^2)和农村人口数(人); K_{ij} 为第*j*个污染源第*i*种污染物排污系数(表1)。

1.4 管理分区划分方法

本研究根据影响流域非点源污染产生和迁移过程的主要因素,以及对非点源污染物空间排放特征的评价结果,以分区控制提高治理成效、综合改善流域水质为核心目标,采用主导因素法和聚类分析法

表 1 四湖流域农业污染源主要污染物排放系数

Table 1 Discharge coefficient of major pollutants from the agricultural pollution source in the Four Lake basin

污染源类型	系数选取条件	总氮	氨氮	总磷	COD	
种植业/kg·hm ⁻²	南方湿润平原区-平地-水田-稻油轮作	0.075	—	0.019	—	
	南方湿润平原区-平地-水田-双季稻	0.072	—	0.041	—	
畜禽养殖业/g·(头·d) ⁻¹	生猪育肥期	干清粪	7.17	2.87	0.47	34.93
		水冲清粪	12.36	5.56	2.58	186.67
		垫草垫料	0	0	0	0
水产养殖业/g·kg ⁻¹	淡水池塘养殖	鲢鱼	1.78	0.53	0.12	7.01
		青鱼	1.18	0.36	0.22	17.63
		草鱼	0.68	0.20	0.13	7.76
农村生活污水/g·(人·d) ⁻¹	生活污水排放	无污水处理设施	0.15	0.06	0.02	6.24

划分四湖流域农业非点源污染控制分区^[25,26]。主导因素法的作用是提取最能体现不同分区差异性的因素,聚类分析法则是要划分出污染状况相同或相近的区域。具体划分程序为:首先,利用 RS 和 GIS 技术对四湖流域地形地貌、土壤类型、植被覆盖、土地利用和水系分布等自然环境信息进行数字化,形成流域生态环境现状分析基础数据库,作为不同控制分区划分的基础;其次,鉴于非点源污染与水文过程的密切相关性,对四湖流域水文循环过程进行系统分析,根据非点源污染物传输通道分布情况,将流域划分为不同水文循环亚区;再次,根据种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和农村生活源污染物排放量计算结果,评价主要污染物在流域空间上的排放特征,遵循属地管理的原则,对流域范围内 9 个县级行政单元的排放强度进行分级;最后,根据以上自然环境、水文传输、污染物空间排放特征的分析评价结果,划分农业非点源污染控制分区。

2 结果与分析

2.1 流域非点源污染物排放特征评价

2.1.1 流域非点源污染物来源构成分析

根据各类污染源主要污染物排放计算结果,分析四湖流域水环境非点源污染物来源构成(表 2)。2007 年,四湖流域来自农业和农村的非点源污染总氮排放量 25 636.8 t,其中,种植业排放量 10 400.0 t,畜禽养殖业排放量 3 460.1 t,水产养殖业排放量 5 881.5 t,农村生活源排放量 5 918.3 t,分别占流域非点源总氮排放量的 40.6%、13.4%、22.9% 和 23.1%。流域非点源氨氮排放量为 5 378.3 t,其中,畜禽养殖业排放量 547.4 t,水产养殖业排放量 392.2 t,农村生活源排放量 4 438.7 t,分别占四湖流域农业源总氮排放量的 10.2%、7.3% 和 82.5%。流域非点源总磷排放量为

2 553.1 t,其中,种植业排量 627.3 t,畜禽养殖业排放量 456.9 t,水产养殖业排放量 1 167.5 t,农村生活源排放量 394.5 t,分别占四湖流域农业源总磷排放量的 24.6%、14.2%、45.7% 和 15.5%。流域非点源 COD 排放量为 129 984.9 t,其中,畜禽养殖业排放量 37 317.7 t,水产养殖业排放量 63 076.4 t,农村生活源排放量 29 591.2 t,分别占四湖流域农业源 COD 排放量的 28.7%、48.5% 和 22.8%。

根据表 2 和图 2 可知,四湖流域非点源污染负荷中,总氮最主要来源为种植业,占到 40.57%,与流域化肥施用强度普遍较高,氮肥在不合理施用方式下流失量较高密切相关。四湖流域农村人口密集,农村生活污水年排放量达到 9 863.8 万 t,农村生活污水处理设施建设严重滞后、生活污水携带的大量氨氮直排进入周边水体,导致流域水环境 80% 以上氨氮来自于农村生活源。四湖流域水产养殖业十分

表 2 四湖流域水环境非点源污染物来源构成分析/t

Table 2 Analysis of contribution source of non-point source pollutants in the Four Lake basin/t

地区	污染源类型	氮排放量		总磷	COD
		总氮	氨氮		
荆门	种植业	1 233.4	—	73.0	—
	畜禽养殖业	459.2	76.4	87.0	4 339.4
	水产养殖业	519.0	18.6	102.0	5 732.4
	农村生活	4 418.8	3 314.1	294.5	22 093.5
荆州	种植业	7 800.1	—	481.1	—
	畜禽养殖业	2 030.3	297.4	189.9	24 555.5
	水产养殖业	5 021.9	350.3	1 001.1	54 197
	农村生活	758.4	568.8	50.6	3 792.2
潜江	种植业	1 366.6	—	73.2	—
	畜禽养殖业	947.4	173.6	86.9	8 422.4
	水产养殖业	340.6	23.3	64.4	3 147
	农村生活	741.1	555.8	49.4	3 705.5
全流域	种植业	10 400.1	—	627.3	—
	畜禽养殖业	3 436.9	547.4	363.8	37 317.3
	水产养殖业	5 881.5	392.2	1 167.5	63 076.4
	农村生活	5 918.3	4 438.7	394.5	29 591.2
	总计	25 636.8	5 378.3	2 553.1	129 984.9

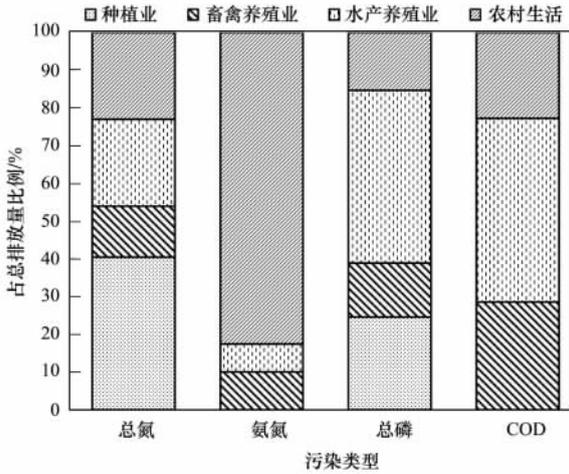


图2 四湖流域不同来源的农业非点源污染物比例构成
Fig.2 Proportion constitution of non-point source pollutants from different source in the Four Lake Basin

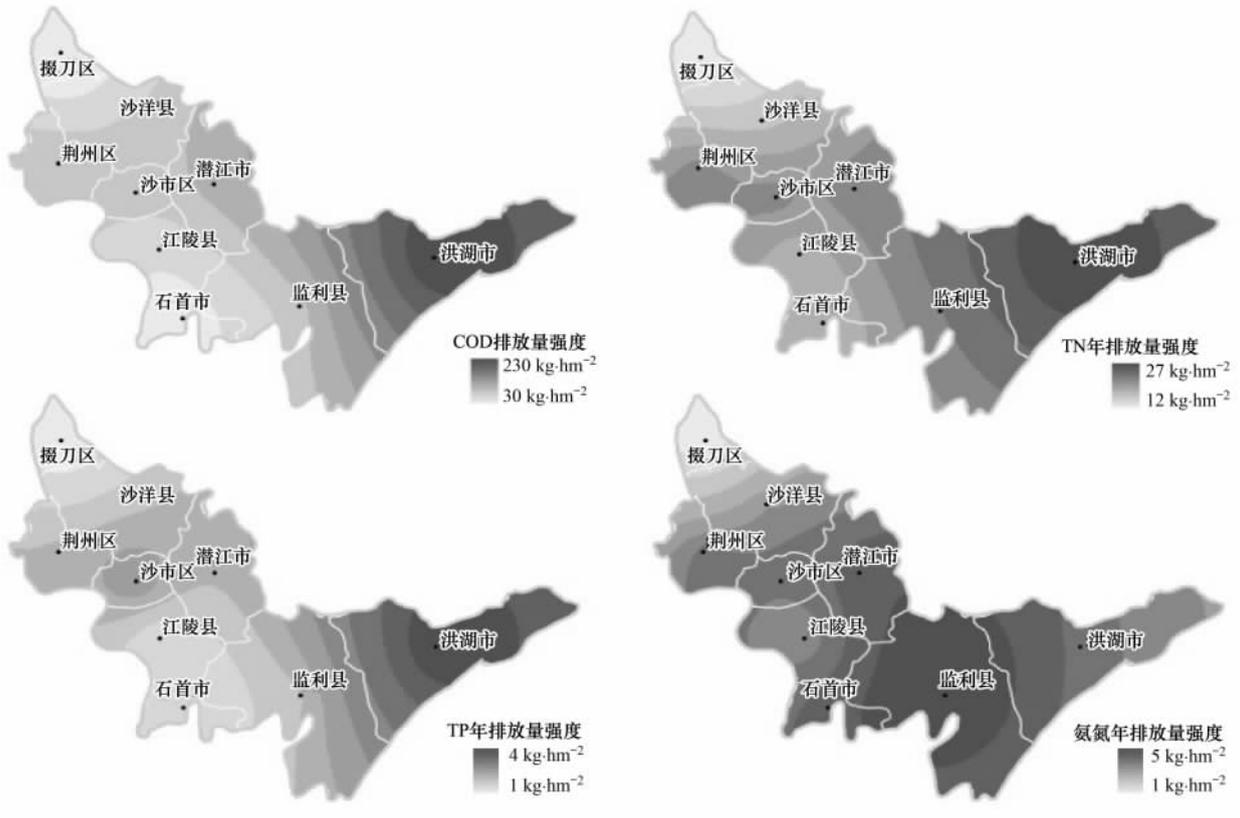


图3 四湖流域农业非点源污染物空间排放强度分布
Fig.3 Spatial discharge intensity of major non-point source pollutants in the Four Lake Basin

个县市成为重点控制源区。

2.2 流域非点源污染控制分区划分

四湖流域地势西北高、东南低,周边高、中间低,总干渠纵贯中间低洼地带,长湖上游为丘陵地区,长湖以南属平原湖泊,流域整体上可分为上、中、下三区。为体现流域不同空间区位的地域差异,提高非点

源污染控制成效,主要根据4项分区指标,即流域地形地貌特征、水系分布、土地利用现状方式、不同类型农业污染源空间分布情况,将四湖流域非点源污染控制划分为3个管理分区,即长湖上游水产和畜禽养殖污染重点控制区(长湖上游区)、四湖干渠农业和农村非点源污染综合控制区(四湖干渠区)、洪

2.1.2 非点源污染物在流域空间的排放格局分析

根据表3和图3,各类污染物的贡献源区主要分布在洪湖市、监利县和潜江市,其中洪湖市对总氮、氨氮、总磷和COD排放量的贡献率分别达到27.8%、19.7%、39.9%和41.7%;监利县对总氮、氨氮、总磷和COD排放量的贡献率分别为26.2%、32.6%、19.9%和20.6%;潜江市对总氮、氨氮、总磷和COD排放量的贡献率则均在10%以上。以上3个县市总氮、氨氮、总磷和COD排放量之和分别占到四湖流域该类污染物总排放量的67.2%、66.3%、70.6%和74.0%。对于流域污染物排放总量控制和水质改善来说,洪湖市、监利县和潜江市3

表 3 四湖流域不同地区非点源污染物排放总量分布情况

Table 3 Distribution of total non-point source pollutants load discharged from different area in the Four Lake Basin

地区	总氮/t	比例/%	氨氮/t	比例/%	总磷/t	比例/%	COD/t	比例/%
掇刀区	374.3	1.5	37.1	0.7	43.6	1.7	1 755.9	1.4
沙洋县	2 595.7	10.1	626.7	11.7	269	10.6	12 108.1	9.3
沙市区	1 053.7	4.1	190.4	3.5	120.7	4.7	3 740	2.9
荆州区	2 088.2	8.1	372.7	6.9	157.1	6.2	7 515.4	5.8
石首市	651.3	2.5	189.3	3.5	53	2.1	1 873.9	1.4
洪湖市	7 114.4	27.8	1 059.3	19.7	1 019.8	39.9	54 187.2	41.7
江陵县	14 655.7	6.5	397.5	7.4	106.9	4.2	6 630.7	5.1
监利县	6 707.8	26.2	1 752.6	32.6	509.1	19.9	26 898.8	20.6
潜江市	3 395.7	13.2	752.7	14.0	273.9	10.7	15 274.9	11.8
四湖流域	25 636.8	100.0	5 378.3	100.0	2 553.1	100.0	129 984.9	100.0

湖水产养殖污染重点控制区(洪湖区),针对不同分区有重点、有区别地实施污染控制措施。

2.2.1 长湖上游水产和畜禽养殖污染重点控制区

该控制分区位于四湖流域北部,长湖上游地区,田关河以北,主要包括荆门市的掇刀区和沙洋县,荆州市荆州区,潜江市田关河以北地区。该区的长湖、借粮湖和田关河为水产养殖主产区,由于围网养殖和精养鱼塘大量投放饲料和化肥,导致水体污染严重,以沙洋县后港镇等地区水产养殖污染最为突出。沙洋县规模化养牛场和潜江市田关河北部规模化养猪场比较密集,畜禽养殖污染问题较重。根据该控制分区特点,主要控制措施包括:在长湖、借粮湖、拾桥河、田关河周边地区建立植被缓冲带等拦截工程,阻隔和缓冲非点源污染对水体的直接影响;划定水产养殖和畜禽养殖类型区,包括禁养区、限养区和宜养区,水产养殖区又可以划分为围栏养殖撤围区、湖滨湿地恢复区、精养鱼塘限制区和清水塘养区;实施长湖撤围和退垸还湖,控制围网养殖量;在沙洋县后港镇等水产养殖污染严重的地区推广清水养殖模式。

2.2.2 四湖干渠农业和农村非点源污染的综合控制区

该控制分区位于四湖流域中部,长湖和田关河以南,洪排河以北,主要包括荆州市沙市区、江陵县、石首市、监利县和洪湖市北部地区,潜江市田关河以南地区。区内有四湖总干渠、西干渠和东干渠等水系。该区种植业污染、畜禽养殖污染和村镇生活污染均较为突出,污染综合特征明显。该区是四湖流域粮食主产区,化肥和农药施用量大,地表径流将未利用化肥和农药直接带入水体。荆州市沙市区、江陵县、石首市、监利县是家禽养殖集中分布区,田关河以南地区以规模化生猪和家禽养殖为主。村庄生活污水处理设施缺乏,污染问题比较突出。该控制分区主要控制措施包括:严格控制荆州市沙市区、江陵县、石

首市、监利县家禽养殖污染和潜江市田关河以南地区生猪养殖污染;在监利县、洪湖市北部、潜江市田关河以南化肥使用强度较高地区,推广测土配方施肥和缓释肥,建立农田非点源污染拦截工程;在洪湖市、监利县等农村人口密集地区,建设村镇生活污染治理设施,提高生活污水处理能力。

2.2.3 洪湖水产养殖污染重点控制区

该控制分区位于四湖流域南部,以洪排河为界以南的地区,主要在洪湖市境内。区内有洪湖、大沙湖、形斗湖和内荆河。区内洪湖、大沙湖、形斗湖和内荆河为水产养殖集中区,是四湖流域水产养殖污染的重点地区。该控制分区主要控制措施包括:在洪湖、大沙湖、形斗湖、内荆河周边建立林草一体的植被缓冲带工程,拦截地表径流携带的污染物;实施洪湖湖内撤围和退垸还湖。

2.3 基于分区管理的总量控制方案

流域水质改善需同时考虑点源和非点源污染物排放总量削减,本研究基于流域水环境功能区划,制定了基于水质持续改善目标的总量控制方案。在总量控制基数方面,2007年,四湖流域 COD 总排放量为 19.23 万 t,其中非点源占 67.6%;氨氮总排放量为 1.06 万 t,其中非点源占 50.9%;总氮排放量为 3.12 万 t,其中非点源占 82.2%;总磷排放量为 0.31 万 t,其中非点源占 84.7%。从以上分析可以看出,四湖流域来自农业和农村的非点源污染负荷占到了全流域水环境污染负荷的绝对比例,其中,非点源总氮、总磷的排放量占总排放量的比例高达 80% 以上。因此,对非点源污染物实施总量控制成为改善流域水质的关键环节,流域非点源污染控制分区也成为实施流域水环境综合管理的基本分区。根据 3 个分区的污染物排污现状、污染源区分布、新增排放量预测、水体环境容量等条件,分别设计了不同分区的总量控制方案(表 4)。

表 4 四湖流域 3 个非点源污染管理分区总量控制方案

Table 4 Total pollutants load control plan of three non-point source pollution management subzones in the Four Lake Basin

控制分区	项目	2015 年				2020 年			
		总氮	氨氮	总磷	COD	总氮	氨氮	总磷	COD
长湖上游区	排放基数/t	6 353.4	2 178.5	556	34 421.9	6 353.4	2 178.5	556	34 421.9
	净削减量/t	1 334.2	108.9	88.9	3 442.2	1 778.9	522.8	150.7	5 507.5
	削减比例/%	21.0	5.0	16.0	10.0	28.0	24.0	27.1	16.0
洪湖区	排放基数/t	8 236.0	2 338.0	1 093	62 921.6	8 236.0	2 338.0	1 093.0	62 921.6
	净削减量/t	1 153.0	140.3	43.7	6 921.4	1 951.9	607.9	170.5	15 101.2
	削减比例/%	14.0	6.0	4.0	11.0	23.7	26.0	15.6	24.0
四湖干渠区	排放基数/t	16 591.8	6 048.6	1 365.2	94 959.0	16 591.8	6 048.6	1 365.2	94 959.0
	净削减量/t	829.6	1 814.6	232.1	13 294.3	2 654.7	2 238.0	363.1	15 193.4
	削减比例/%	5.0	30.0	17.0	14.0	16.0	37.0	26.6	16.0
全流域合计	排放基数/t	31 181.2	10 565.1	3 014.2	192 302.5	31 181.2	10 565.1	3 014.2	192 302.5
	净削减量/t	3 316.8	2 063.8	364.8	23 657.8	6 385.6	3 368.7	684.3	35 802.1
	削减比例/%	10.6	19.5	12.1	12.3	20.5	31.9	22.7	18.6

从表 4 可以看出,由于不同控制分区的水环境功能要求、排污现状、水体纳污能力等存在差异,不同类型污染物在 3 个控制分区的削减量和削减比例均不同.根据水质评价结果,洪湖区主要超标因子为总氮,平均超标倍数为 1.80,COD 平均超标倍数为 0.14;长湖上游区主要超标因子为 TN,其次是 COD 和 TP,平均超标倍数分别为 2.40、0.88 和 0.64;四湖干渠区主要超标因子为氨氮、COD 和总磷,平均超标倍数分别为 4.13、1.96 和 1.92.根据对 3 个管理分区水体纳污能力计算结果,洪湖区纳污能力最高,四湖干渠区居中,长湖上游区最小.

以 2015 年各控制分区水质监测断面全指标达标、2020 年满足水体纳污能力要求为总量控制目标,主要污染物中,COD 主要削减区域为四湖干渠区和洪湖区,分别占到 COD 总削减量的 43% 和 42%;氨氮主要削减区域为四湖干渠区,占到氨氮总削减量的 66%;总氮主要削减区域为四湖干渠区和洪湖区,分别占到总氮总削减量的 42% 和 31%;总磷主要削减区域为四湖干渠区,占到总磷总削减量的 53%.而从每个控制分区削减率来看,COD 削减率最高的是洪湖区,较目前排放基数削减 24%;氨氮削减率最高的是四湖干渠区,较目前排放基数削减 37%;总氮、总磷削减率最高的均是长湖上游区,削减率分别为 28% 和 27%.

3 讨论

3.1 流域尺度非点源污染的系统控制思路

流域是相对封闭的汇水单元,为实施非点源污染系统控制提供了基本前提条件.针对非点源污染“涉及范围广、随机性强、发生机制复杂、控制难度

大”的特点,应采用“控源、阻输、治汇”的系统控制策略.对于四湖流域非点源污染控制,“控源”即根据流域污染源评价结果,针对非点源污染物产生的主要来源,重点在洪湖和长湖等水产养殖发达地区实施围栏养殖撤围和清水养殖,在沙阳县、监利县、洪湖市等农产品主产区推广测土配方施肥和病虫害综合防治,在沙市区、潜江市、石首市等规模化畜禽养殖集中地区开展养殖废弃物综合利用;“阻输”,即在四湖流域总干渠、东干渠、西干渠、西荆河、长湖、洪湖周边建设植被缓冲带、生态拦截沟渠、前置塘(库),在非点源污染物从污染源区进入水体前,削减进入水体的污染负荷量;“治汇”,即对已经受到污染的太湖港渠、西干渠、豉湖渠等水体,实施岸边带修复、底泥清淤等措施,加快水体生态功能恢复进程.

3.2 非点源污染物总量控制目标的确定

本研究在确定流域水环境非点源污染物总量控制方案时,同时进行了 3 个方案情景设计,分别是基于各控制分区水体纳污能力的理想化目标方案(方案 1)、基于水环境维持现状的目标方案(方案 2)和基于水质持续改善分阶段目标方案(方案 3).其中,方案 1 是以近期全流域水质均达到水环境功能要求为目标,根据主要污染物入河排放量和纳污能力计算结果,设计的高要求总量控制方案;方案 2 仅削减各目标年污染物新增排放量,仅遏制水质进一步恶化的低要求总量控制方案;方案 3 是近期水质监测断面全面达标、远期满足水体纳污能力要求,既防止水质恶化、又可以逐步改善水质的总量控制方案.方案 1 对水质要求较高,污染物削减比例大,时间要求短,在实际操作过程中很难完成削减任务或出现成

本过高问题;方案 2 仅削减新增排放量,未设定水质改善目标,仅适用于水环境质量未出现恶化的地区;方案 3 基于水环境质量达标要求和水环境纳污能力综合考虑,是既考虑污染控制成本和时间要求,又便于实际操作的方案。

4 结论

(1) 四湖流域水环境 COD、总氮、总磷、氨氮负荷主要来自于农业非点源污染,4 类非点源污染物分别占到流域污染物排放总量的 67.6%、82.2%、84.7% 和 50.9%。水产养殖和畜禽养殖业发达的洪湖、监利、潜江、沙洋地区是四湖流域非点源污染物的主要贡献源区。

(2) 农业非点源污染物在四湖流域空间上呈现明显的不均衡分布特征,不同污染物的主要贡献源和排放强度均存在差异性。将流域空间范围划分为不同污染管控分区,并制定针对不同区域的差异性控制措施,是提高流域尺度非点源污染控制工程和管理措施有效性的重要途径。

(3) 确定非点源污染物总量控制目标时,需要综合考虑流域水质现状、污染物贡献源构成、水体纳污能力、水环境功能、未来可能的新增排放量等因素,进行不同情景方案设计,通过对时间和成本的综合考虑,选取可行方案。

(4) 流域是相对封闭的汇水单元,可建立“控源、阻输、治汇”的非点源污染系统控制体系。实施针对性的源头控制措施,降低污染治理成本,在非点源污染物传输路径上设置生态拦截沟渠、前置塘(库)等进行拦截,通过水体岸边带修复、内源清理、生物调控等措施,加快水生态系统自身调节功能的恢复进程。

参考文献:

- [1] 高超,张桃林. 农业非点源污染对水体富营养化的影响及对策[J]. 湖泊科学,1999,11(4):396-375.
- [2] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术[M]. 北京:化学工业出版社,2001. 1-10.
- [3] Wang X J,Zhang W,Huang Y N,et al. Modeling and simulation of point-non-point source effluent trading in Taihu Lake area: perspective of non-point sources control in China [J]. Science of the Total Environment,2004,325(1-3):39-50.
- [4] 洪华生,黄金良,曹文志. 九龙江流域农业非点源污染机理与控制研究[M]. 北京:科学出版社,2008. 1-10.
- [5] 高超,朱继业,窦俭怡,等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则[J]. 生态学报,2004,24(1):109-116.
- [6] Wang X H,Yin C Q,Shan B Q. The role of diversified landscape buffer structures for water quality improvement in an agricultural watershed, North China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2005,107:381-396.
- [7] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [8] 周慧平,高超,朱晓东. 关键源区识别:农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报,2005,25(12):3368-3375.
- [9] 叶飞,卞新民,胡大伟,等. 江苏省水环境农业非点源污染地区差异评价与控制对策研究[J]. 水资源保护,2006,6:86-88.
- [10] 卓慕宁,吴志峰,王继增,等. 珠海非点源污染控制区划[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(1):28-30.
- [11] 杨胜天,程红光,郝芳华,等. 全国非点源污染分区分级[J]. 环境科学学报,2006,26(3):398-402.
- [12] 杨柳,马克明,郭青海,等. 汉阳非点源污染控制区划[J]. 环境科学,2006,27(1):31-36.
- [13] 肖伟华,秦大庸,李玮,等. 基于基尼系数的湖泊流域分区水污染物总量分配[J]. 环境科学学报,2009,29(8):6-16.
- [14] 梁博,王晓燕. 我国水环境污染物总量控制研究的现状与展望[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2005,26(1):93-98.
- [15] 周海阳,黄娟,程炜. 常熟河网区水污染物总量控制研究[J]. 污染防治技术,2006,19(5):15-20.
- [16] 吴悦颖,李云生,刘伟江. 基于公平性的水污染物总量分配评估方法研究[J]. 环境科学研究,2006,19(2):66-70.
- [17] 孟伟,刘征涛,张楠,等. 流域水质目标管理技术研究(II)——水环境基准、标准与总量控制[J]. 环境科学研究,2008,21(1):1-8.
- [18] 杨占红,罗宏,吕连宏,等. 城市工业 COD 总量优化分配研究[J]. 中国人口·资源与环境,2010,20(3):124-129.
- [19] USEPA. Protocol for Developing Nutrient TMDLs [R]. EPA-841-B-99-007. Washington DC: USEPA, Office of Water, 1999. 1-10.
- [20] 张巍,王学军,李莹. 在总量控制体系下实施点源与非点源排污交易的理论研究[J]. 环境科学学报,2001,21(6):748-753.
- [21] 戴晓燕,过仲阳,石纯,等. 上海市青浦区农业非点源污染的流域分配研究[J]. 环境污染与防治,2004,26(4):278-280.
- [22] 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,1998,10(3):55-60.
- [23] 钱秀红. 杭嘉湖平原农业非点源污染的调查评价及控制对策研究[D]. 杭州:浙江大学,2001.
- [24] 焦隼,李慧,冯其谱,等. 江苏省内陆水产养殖非点源污染负荷评价及控制对策[J]. 江苏农业科学,2007,6:340-342.
- [25] 刘闯. 土地类型与自然区划[J]. 地理学报,1985,40(3):256-263.
- [26] 汤国安,杨昕. 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2008. 25-34.