

抚仙湖-星云湖流域氮、磷污染防治对策研究

——以 2000 ~ 2015 年数据为例

罗 玉^{1,2}, 肖 尧³, 张晓旭^{1,2}, 孟祥琪⁴

- (1. 云南省生态环境科学研究院, 云南 昆明 650034;
2. 云南高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 云南 昆明 650034;
3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;
4. 云南省环境工程评估中心, 云南 昆明 650032)

摘 要: 抚仙湖是我国战略性水资源储备库, 星云湖是与其一衣带水的湖泊, 二者水质和水生态环境保护治理工作受到国家高度重视。为明确抚仙湖-星云湖流域水污染特征并提出有针对性的污染控制对策, 该研究对流域的污染特征进行分析。研究表明, 近 20 年来, 抚仙湖和星云湖水体中氮、磷污染指标浓度都呈现上升趋势, 这与流域面源污染负荷的产生量和入湖量显著增加相关。流域内的氮、磷主要污染源均来自于农田面源、农村生活污染水和畜禽粪便。根据氮、磷负荷排放特征, 识别出流域内的氮磷污染高风险区, 并结合流域内已有的氮磷污染防治措施现状, 进一步提出以空间管控和生态修复为核心的流域氮磷污染控制对策及措施。

关键词: 抚仙湖-星云湖流域; 氮磷污染防治; 空间管控

中图分类号: X524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.01.019

The Countermeasures of Nitrogen and Phosphorus Pollution Prevention and Control in the Watershed of Fuxian Lake and Xingyun Lake ——Based on the Data from 2000 to 2015

LUO Yu^{1,2}, XIAO Yao³, ZHANG Xiaoxu^{1,2}, MENG Xiangqi⁴

- (1. Yunnan Research Academy of Eco-environmental Sciences, Kunming 650034, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau-Lake Watershed, Kunming 650034, China; 3. Kunming Engineering Co. Ltd, China Power Construction Corporation, Kunming 650051, China; 4. Yunnan Provincial Appraisal Center for Environmental Engineering, Kunming 650032, China)

Abstract: Fuxian Lake is one of the water resource strategic reservoirs in China, Xingyun Lake is connected to Fuxian Lake. Chinese government has paid a high attention to their protection and management in water quality and their aquatic ecological environment. In order to understand the pollution characteristics of this area and propose some targeted countermeasures, this research investigated the variation of pollutions of the two lakes. Results showed that the nitrogen and phosphorus were the main pollution factors, and the concentration of them has showed an increasing trend in the past twenty years. The nitrogen and phosphorus mainly came from the farmland non-point source, the rural domestic sewage and the livestock wastewater. Based on the discharge characteristics of nitrogen and phosphorus in this area, the high-risk areas of nitrogen and phosphorus pollution were identified and the prevention and control countermeasures of the nitrogen and phosphorus pollution were put forward, focusing on spatial management and ecological restoration.

Keywords: Watershed of Fuxian Lake and Xingyun Lake; Nitrogen and Phosphorus Pollution Prevention and Control; Spatial Management

CLC number: X524

收稿日期: 2019-06-03

基金项目: 云南高原湖泊流域经济发展与湖泊污染情况的耦合关系(2017FD218); 滇池沉积物中正构烷烃分布特征研究(2017FD027)

作者简介: 罗 玉(1988-), 女, 硕士、工程师。研究方向: 水污染防治、规划, 水环境管理。E-mail: foreverkerry@126.com

通信作者: 张晓旭(1981-), 女, 硕士、高级工程师。研究方向: 地理信息系统, 水污染防治, 空间管控规划。E-mail: 21371395@qq.com

引用格式: 罗 玉, 肖 尧, 张晓旭, 等. 抚仙湖-星云湖流域氮、磷污染防治对策研究——以 2000 ~ 2015 年数据为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(1): 106-112.

我国是一个河流湖库众多的国家, 水体污染已成为环境污染的重要组成部分, 其中以氮、磷和水生态破坏问题为甚^[1-4]。据调查, 我国湖库水体 TP 浓度为 $0.018 \sim 0.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 普遍高于学术研究认为发生富营养化的磷浓度阈值 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 10~50 倍^[5-6], 长江、黄河和珠江等七大水系水体中的磷浓度也较高, 黄河干流 TP 的年均浓度达到 $2.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 珠江河口每年赤潮频发^[7-9]。可见, 控制氮、磷污染是我国水污染防治的重要工作。

云南是一个天然湖泊众多的省份, 其湖泊在湖沼学特征、营养化进程、水质本底、生态结构与脆弱性等方面呈现出多样性和独特性^[7-9]。九大高原湖泊由于其独特的社会经济地位和半封闭或全封闭的出流格局, 导致湖泊生态系统比较脆弱, 一旦被污染或破坏极难进行修复^[10-11]。针对此种情况, 九大高原湖泊自“九五”开始开展大规模的水污染防治和生态保护工作, 但随着湖泊流域经济社会快速发展, 氮、磷污染负荷入湖量仍呈持续增长态势, 使得控制氮、磷污染成为控制湖泊营养化的主要问题和难点^[9]。

抚仙湖是深水贫营养湖泊, 星云湖是浅水富营养湖泊, 二者均位于云南省玉溪市境内, 是云南省贫营养、富营养湖的典型代表^[10-11], 二者通过隔河相连, 属于同一流域(图 1)。近年来, 随着抚仙湖-星云湖流域农村生活污染和农田化肥大量使用、磷矿资源开发等活动, 对湖体水质造成严重污染^[11]。

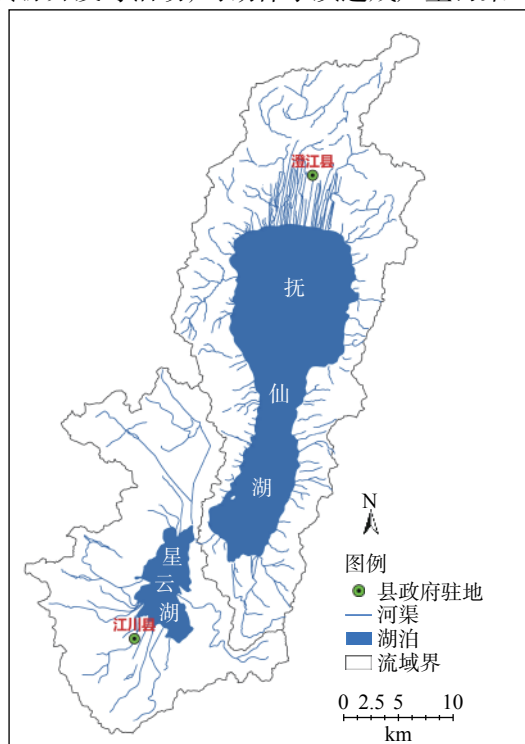


图 1 抚仙湖-星云湖流域区域示意图

1 湖泊概况

抚仙湖是我国第二大淡水湖泊, 是国家一类饮用水水源地, 水质常年保持 I 类。随着近年来当地社会经济发展, 特别是旅游业高速增长, 入湖污染负荷不断增加, 加之抚仙湖湖体换水周期长达 167 年, 导致湖体中 TP、TN 浓度呈逐年上升趋势, 且在 2018 年个别月份出现 TP 超标现象。星云湖水质由于入湖污染负荷激增, 从 2013 开始急剧恶化, 一直为劣 V 类, 主要超标指标为 pH、TP 和 COD, 2018 年星云湖年均叶绿素 a 浓度为 $0.0739 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 星云湖全年水质均处于中度富营养状态, 年均营养状态指数为 66.15。种种迹象表明, 进一步摸清抚仙湖-星云湖流域氮、磷污染现状及变化趋势、系统分析氮、磷污染原因及污染源时空分布特征, 提出针对性控制措施, 对提高流域水环境安全刻不容缓^[12]。

2 典型流域氮磷污染特征调查分析

2.1 抚仙湖流域水质及氮磷污染时空分布趋势

根据玉溪市环境监测站提供的监测数据显示, 抚仙湖近 20 年(1996~2015 年)综合水质基本稳定保持 I 类水质, 其中 TN 浓度从 1996~2015 年间呈现先波动上升, 随后平稳下降的趋势, 其中 1997、1999 和 2002 年超过 I 类标准, 其余年份均达到 I 类标准, 从 2003 年开始, 浓度变化幅度不大均趋于接近 I 类上限值。TP 浓度总体呈先平稳后下降的趋势, 1998 年达 $0.020 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 为 II 类, 其余年份均在 I 类限值以下波动。抚仙湖多年 TN、TP 变化情况见图 2。

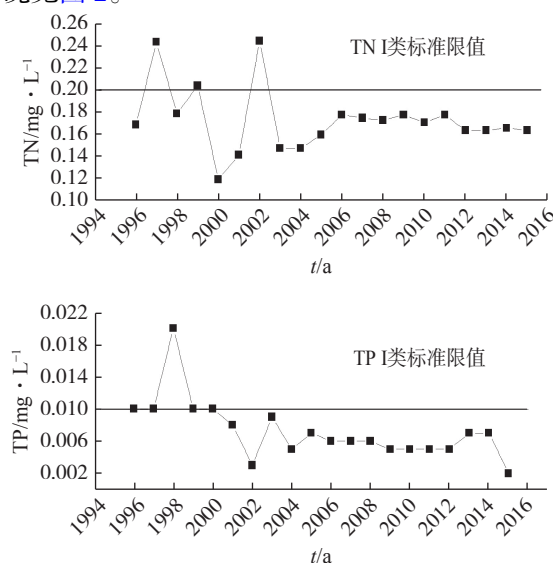


图 2 1996~2015 年抚仙湖 TN、TP 变化趋势图

2015 年,通过在抚仙湖全湖布置的 15 个监测点位的全年监测数据显示,湖体 TN 浓度总体上空间分布呈现北岸>南岸>东岸和西岸,岸边浓度高于湖心浓度格局,而时间分布上呈现出丰水期平均浓度较低,平水期平均浓度较高的状态。丰水期, TN 浓度在海关、海镜片区和路居片区分布较高,北岸和海口附近浓度较低;枯水期北岸浓度较高,南岸、西岸和东岸的小蛇沟附近浓度较低;平

水期湖体总体 TN 浓度偏高,仅在南岸和远离北岸的小片区域浓度较低,其余区域平均浓度都较高。从抚仙湖全湖水质空间分布来看,抚仙湖北部水质持续恶化,已经形成“北部一片、南部一点、沿岸一线”的Ⅱ类水质区域的水质分布格局,并且水污染呈现自北向南、由沿岸向湖心不断推进的现象。2015 年抚仙湖湖体 TN 浓度时空分布情况见图 3。

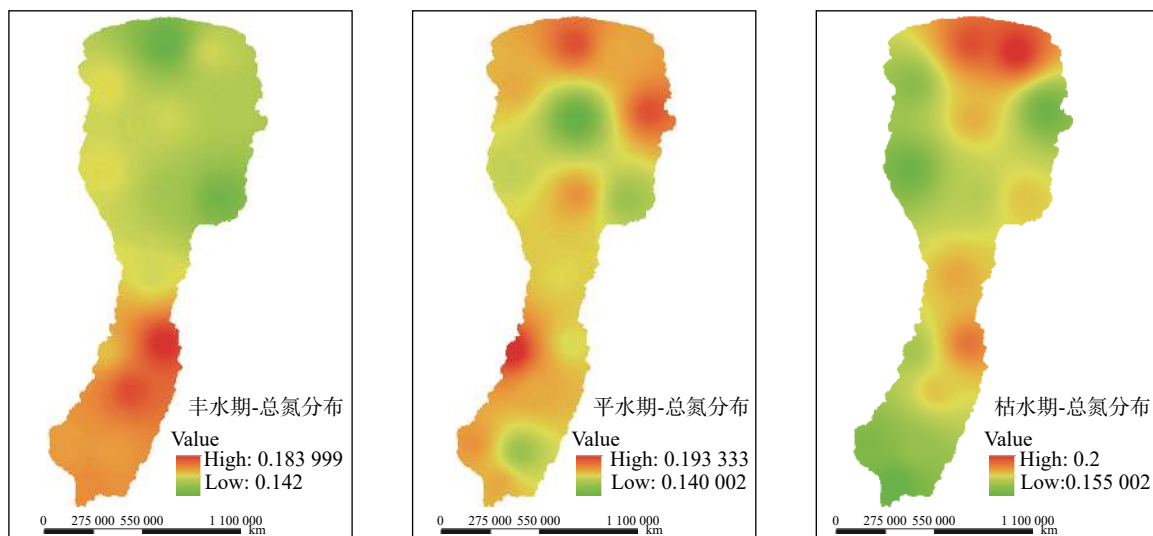


图 3 2015 年抚仙湖湖体 TN 时空分布图

2.2 星云湖流域水质及氮磷污染时空分布趋势

星云湖水质从 20 世纪 80 年代到 2015 年变化较大,在 20 世纪 80 年代一直保持在Ⅱ类优良水质;90 年代开始,星云湖水质由北向南逐渐降至Ⅲ类,2000 年后,全湖水质迅速下降至Ⅳ、Ⅴ类,2003~2012 年基本已处于Ⅴ类与劣Ⅴ类,2009~2015 年年均为劣Ⅴ类 TN 和 TP 超标程度严重。

从 1999~2015 年间,星云湖 TN 总体上呈波动上升趋势,在 $0.84 \sim 2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动。1999~2002 年, TN 浓度维持较低,保持在Ⅲ类水平,从 2003 年开始, TN 浓度急剧上升,在Ⅴ类和劣Ⅴ类之间波动,超过Ⅲ类标准 $0.52 \sim 1.13$ 倍。

星云湖全湖水质多年变化情况见图 4。1999~2002 年星云湖 TN、TP 变化情况见图 5。

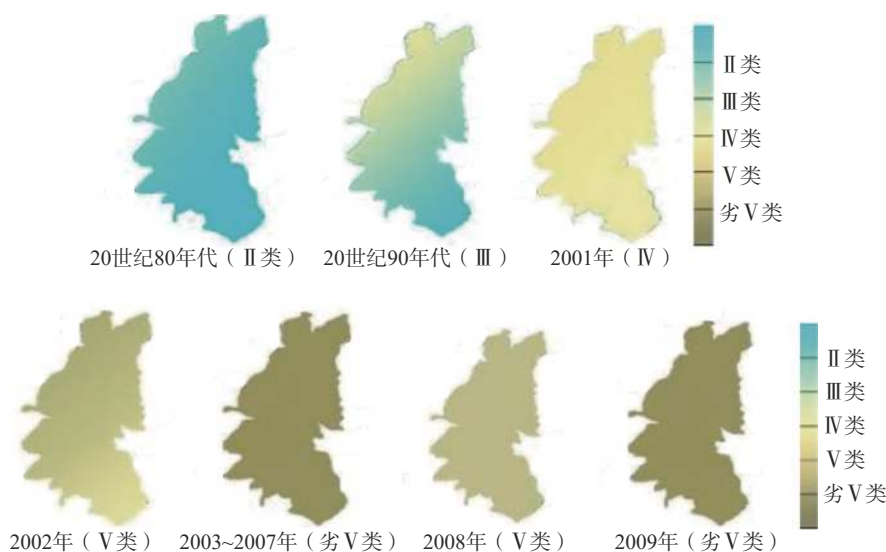


图 4 星云湖全湖水质多年变化

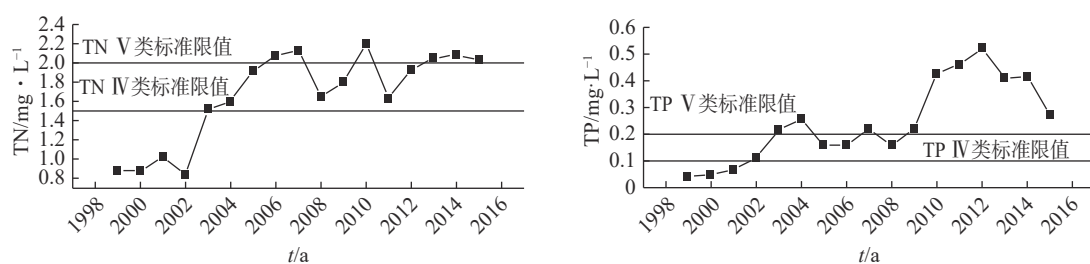


图 5 1999~2015 年星云湖 TN、TP 变化趋势图

从 2012 年星云湖 TN、TP 时空分布上来看, 在丰、枯、平 3 个水期内, 湖心浓度均较低。枯水期 TN 浓度呈北高南低的状态, 丰水期仅在大街镇附近部分区域浓度较低, 平水期北低南高; TP 高浓度地区全年分布情况随枯水期、丰水期和平水期

的变化由北向南再回北的变化趋势。丰水期呈由北向南逐渐增加的状态; 平水期和枯水期呈现由北向南逐渐降低的趋势。2012 年星云湖 TN、TP 时空分布(丰水期、枯水期和平水期)情况见图 6 和图 7。

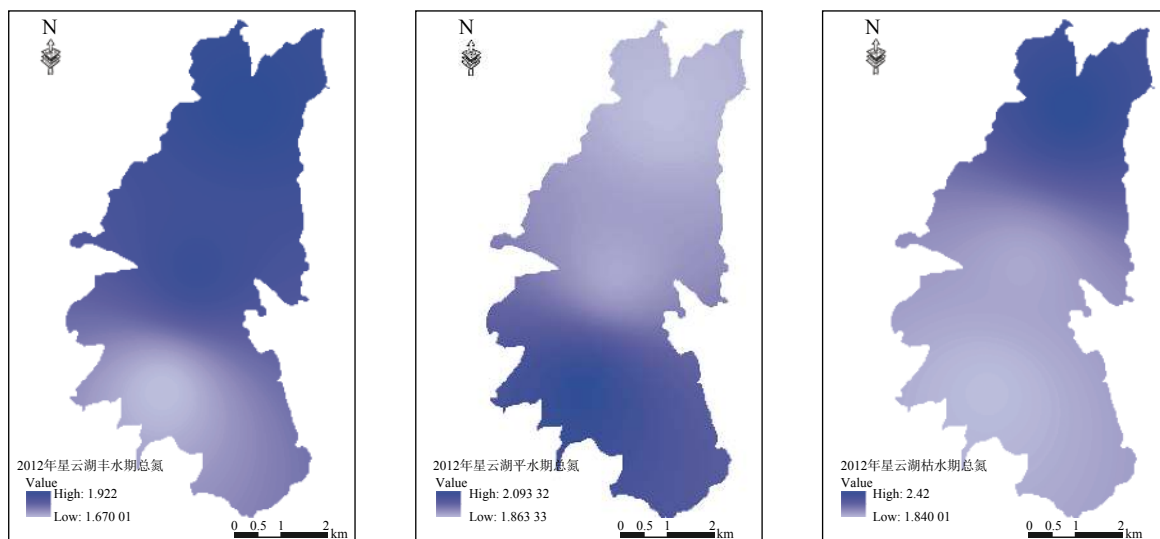


图 6 2012 年星云湖 TN 时空分布 (丰水期、平水期和枯水期)

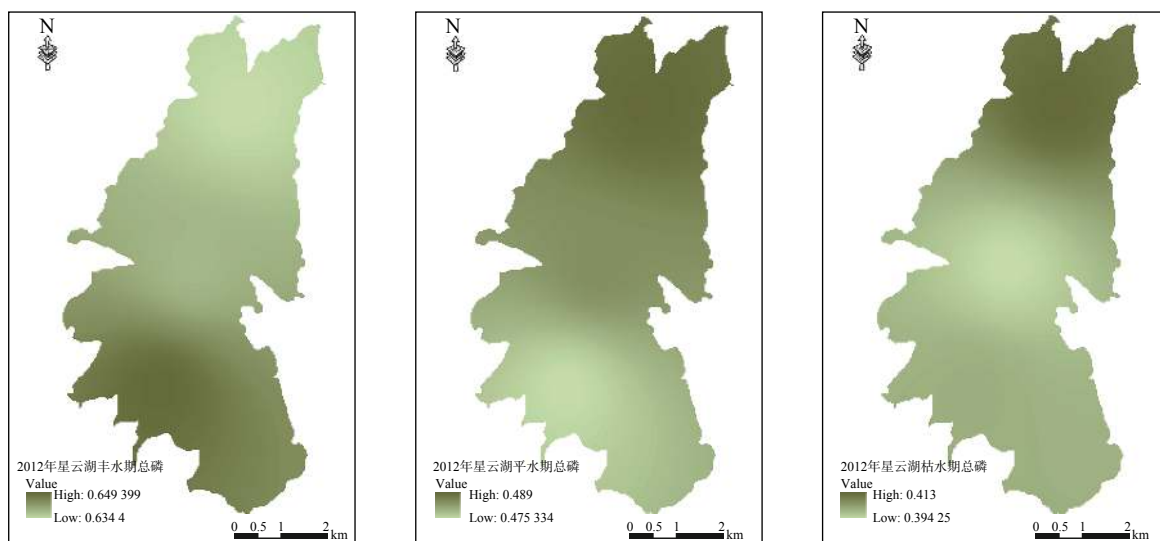


图 7 2012 年星云湖 TP 时空分布 (丰水期、平水期和枯水期)

2.3 流域氮、磷污染源构成分析

抚仙湖流域从“十五”到“十二五”期间产业结构逐步改善, 第一产业比重逐渐降低, 第二、第三

产业比重则持续上升, 到“十二五”第一、第二和第三产业分别占国内生产总值的 21.73%、38.67% 和 39.60%。从 TN、TP 污染负荷排放量变化情况看,

农田面源、畜禽养殖和农村污水仍是 TN、TP 的主要来源,从 TN、TP 入湖负荷空间布局来看,污染源主要布局于流域北岸及南岸路居片农田耕作区(表 1)。

表 1 抚仙湖流域 TP、TN 污染负荷排放量

污染物种类		“十五”				“十一五”				“十二五”			
		TN/t·a ⁻¹	占比/%	TP/t·a ⁻¹	占比/%	TN/t·a ⁻¹	占比/%	TP/t·a ⁻¹	占比/%	TN/t·a ⁻¹	占比/%	TP/t·a ⁻¹	占比/%
面源	农村污水	639.08	30.70	54.78	16.35	304.50	25.67	25.96	16.30	639.08	14.11	54.78	6.69
	畜禽粪便	687.24	33.02	95.00	28.35	124.74	10.51	33.99	21.34	687.24	15.17	95.00	11.60
	农田面源	582.50	27.98	107.76	32.10	433.40	36.53	36.18	22.72	2 000.06	44.15	479.54	58.58
	旅游污水	—	—	—	—	3.83	0.32	0.53	0.33	88.72	1.96	13.40	1.64
	农村垃圾	—	—	—	—	5.12	0.43	2.05	1.29	40.15	0.89	3.86	0.47
	水土流失	—	—	—	—	33.38	2.81	14.23	8.93	96.52	2.13	37.32	4.56
	降尘降水	—	—	—	—	182.85	15.41	17.18	10.79	584.22	12.90	46.60	5.69
点源	工业废水	7.60	0.37	0.90	0.27	0.67	0.06	0.02	0.01	5.18	0.11	0.00	0.00
	城镇污水	121.60	5.84	24.30	7.25	39.72	3.35	3.38	2.12	388.48	8.58	33.46	4.09
	磷矿污染	43.50	2.09	52.30	15.61	58.14	4.90	25.75	16.17	0.00	0.00	54.68	6.68
合计		2 081.50	100.00	335.04	100.00	1 186.35	100.00	159.27	100.00	4 529.65	100.00	818.64	100.00

星云湖流域“十五”到“十二五”期间,经济发展与湖泊环境保护之间的矛盾日趋突显,高污染经济作物种植、畜禽养殖,以及以磷化工产业为主的第二产业比重的上升使得入湖污染负荷急剧上升。从污染负荷排放情况看,农田化肥流失和农村生活污水成为星云湖流域内 TN、TP 污染的主要来源(表 2)。

表 2 星云湖流域 TP、TN 污染负荷排放量

污染物种类		“十五”				“十一五”				“十二五”			
		TN/t·a ⁻¹	占比/%	TP/t·a ⁻¹	占比/%	TN/t·a ⁻¹	占比/%	TP/t·a ⁻¹	占比/%	TN/t·a ⁻¹	占比/%	TP/t·a ⁻¹	占比/%
点源	城镇生活	37.60	1.40	7.50	1.96	78.32	2.38	14.24	2.41	128.29	7.02	12.60	3.63
	工业	3.80	0.14	3.60	0.94	—	—	—	—	—	—	—	—
	磷矿污染	—	—	—	—	185.07	5.62	99.67	16.90	—	—	—	—
	规模化养殖	690.60	25.63	138.10	36.13	—	—	—	—	196.64	10.76	37.61	10.84
	农村生活	812.20	30.14	158.80	41.55	853.44	25.92	88.09	14.93	—	—	—	—
	畜禽粪便	—	—	—	—	1 646.37	50.00	317.54	53.83	476.71	26.09	66.17	19.08
面源	农田化肥流失	968.30	35.93	59.60	15.59	518.04	15.73	43.17	7.32	1 014.27	55.51	203.32	58.63
	水土流失和湖面干、湿沉降	182.40	6.77	14.60	3.82	11.20	0.34	27.16	4.60	11.20	0.61	27.10	7.81
	合计	2 694.90	100.00	382.20	100.00	3 292.44	100.00	589.87	100.00	1 827.11	100.00	346.80	100.00

2.4 流域氮磷污染高风险区识别分析

基于抚仙湖污染负荷分区调查核算以及入河污染负荷通量监测调查结果,通过与重要生态功能区、生态敏感区及脆弱区的 GIS 空间叠加,最终识别出抚仙湖氮磷污染的 32 个高风险防控单元(图 8)。

这 32 个高风险防控单元位于抚仙湖流域控制开发管理区、生态保育区金和湖体及湖滨核心保护区内,主要包括抚仙湖主要入湖河流流域坝区、缓坡区、山区以及抚仙湖水体及最高水位线外 110 m 范围。32 个控制单元主要污染特征为城镇污染、农

业农村面源污染和水土流失。

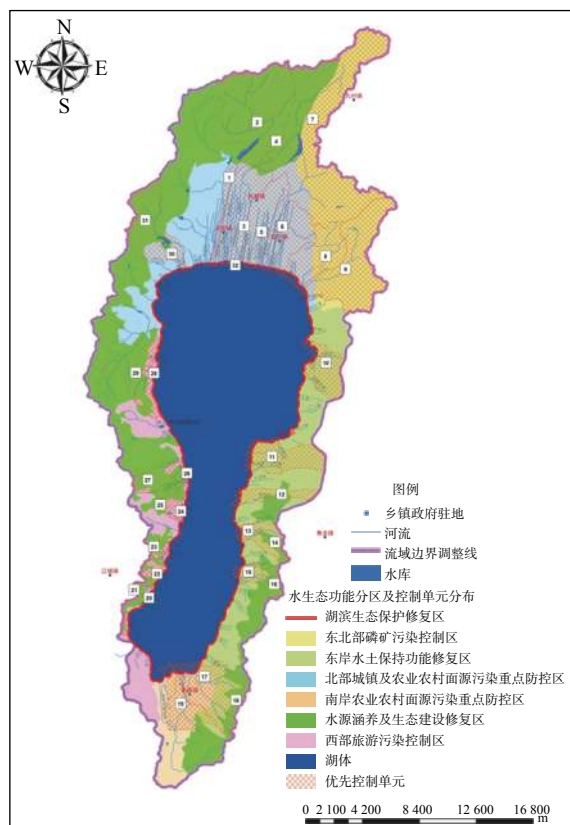


图8 抚仙湖流域氮、磷污染高风险防控单元

星云湖流域根据自然水系及灌溉渠系分布,划分小流域,作为污染控制单元。在星云湖流域划分19个污染控制单元的基础上,根据各控制单元氮、磷总量(2020年需削减入湖量)占流域控制总量(总入湖削减量)的比例,确定大街河、大寨河、东西大河、渔村大河、周官河和螺蛳铺河6个污染控制单元为氮、磷高风险控制单元。

3 流域氮、磷污染控制对策及措施

抚仙湖-星云湖流域内对氮、磷的污染防治措施从“十五”时期以单项污染治理为主逐步向系统化、源头化、长效化方向转变,形成了源头减排、过程削减、末端治理、生态修复与预防为主的污染控制措施。但在实施过程中仍发现污染控制设施效率不高等问题。针对抚仙湖和星云湖其湖体的自身特点和流域内氮、磷污染来源的特征进行分析,从“源头控制-过程阻断-末端净化受纳”开展氮、磷污染防治。

3.1 严守流域资源环境生态红线,强化流域空间管控

根据“山水林田湖”生态系统统筹的管理理念

和《水污染防治行动计划》^[13]提出的“优化空间布局,积极保护生态空间,建立流域水生态环境功能分区管理体系”的任务要求,基于流域重要生态功能区、生态敏感区和重点污染控制区的评价识别,将星云湖生态保护区划与污染防治分区结合,合理划分流域的生产、生活和生态空间,构建以抚仙湖-星云湖湖体及滨岸带、入库河道及河滨带、流域重点污染防治区、重要生态功能和生态敏感红线区为主线的流域社会经济与生态安全可持续发展的空间管控体系,以流域资源环境承载力的底线思维,合理确定区域开发建设容量,优化流域空间开发格局。

3.2 建立健全流域控制性环境总体规划体系和制度

在流域内开展资源环境综合承载力状况研究,系统分析流域资源环境和社会经济发展存在问题、制约因素和限制条件。以流域环境承载力为约束,探索建立抚仙湖-星云湖流域空间规划体系,研究配套管控措施,对流域空间进行分区管控,在流域空间规划体系构建的总体指导下,衔接流域相关规划内容,开展专项规划研究。

抚仙湖流域划分为1湖、3线、7区,实施流域分区分级管控,见图9。

星云湖生态红线区包括:湖滨生态保护带生态红线区,水源涵养及水土流失修复区生态红线区和河流廊道生态红线区。在湖滨生态红线控制区为星云湖最高运行水位外延水平距离100 m范围,在该区域内严格保护生态系统,开展湖滨湿地建设,提升生态系统质量。水源涵养及水土流失修复区生态红线区是基于星云湖流域重要生态功能区评价识别出;河流廊道生态红线区是以主要入湖河道两岸外延10~15 m的范围内,通过清理整治,恢复入河渠行洪和水域岸线生态功能。

3.3 加强农业农村面源污染防治

在划定流域禁养区的基础上,进一步划定限养区,在限养区实施大牲畜总量控制,推进流域种养一体化的标准化养殖小区建设,加强农村分散畜禽粪便收集 and 专业化收集转运设施建设,提升畜禽粪便资源化、能源化利用率。开展农村人居环境提升建设,提升农村“两污”收集和处理率,建立村庄人居环境管护长效机制,将农村生活污水治理任务层层分解落实到各部门、各乡镇和各行政村,确保责

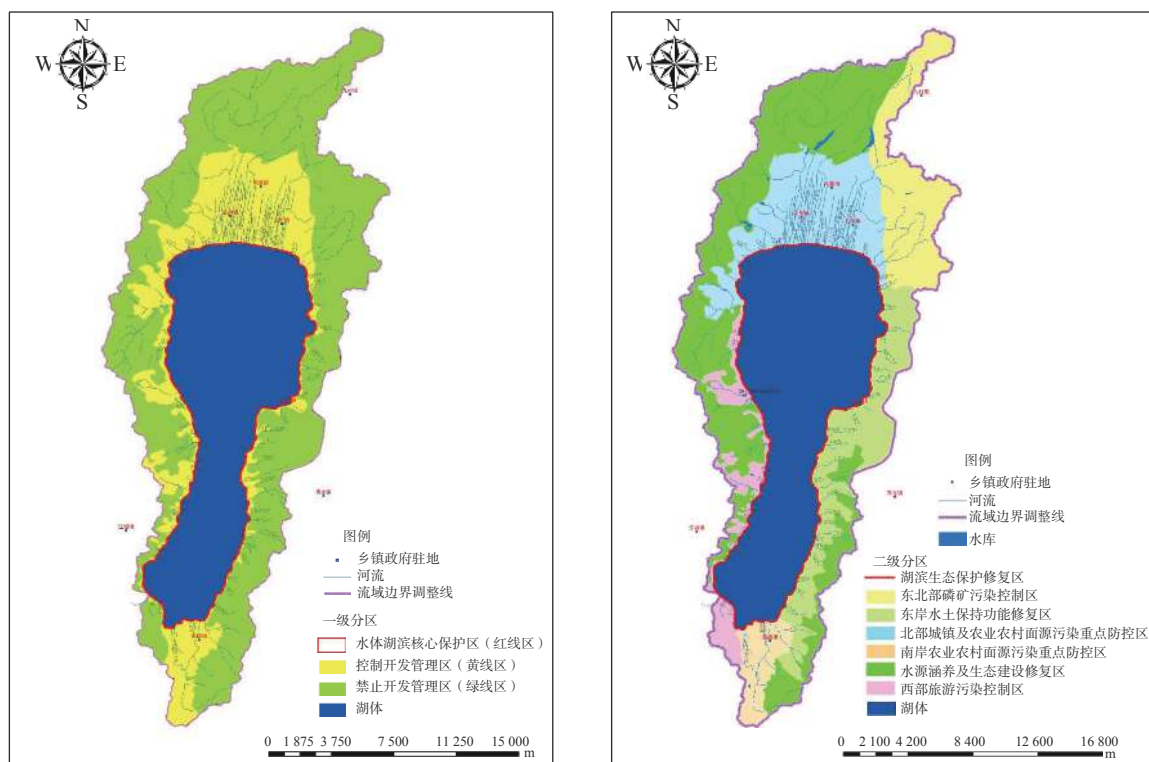


图 9 抚仙湖流域空间管控一级、二级分区图

任到位;研究制定农作物秸秆、畜禽粪便、生活垃圾及废旧农膜回收利用导向机制,将循环经济和农业环境评价体系的理念引入农业发展规划中。调整优化农业种植结构,发展绿色农业,适当发展农业生态旅游,限制发展房地产、高尔夫基地等命令禁止的项目。

3.4 深化流域截污治污,完善流域水污染防治工程体系

针对抚仙湖-星云湖流域氮、磷污染源的贡献源,通过进一步完善污水截污管网系统,增加支次管网,提高污水收集率,逐步推行雨污分流;提升一体化污水处理设施运维管理能力,提高其处理效率;建立畜禽养殖粪污资源化利用设施等,逐步完善流域截污治污体系。

3.5 加强流域生态修复,全面提升流域生态功能

完善入湖河流清水产流机制修复。以抚仙湖北部人口密集区域水质严重污染、东部和南部水土流失和淤积严重的中等河流为治理对象,开展水土流失治理、河道截污、农村农田面源污染控制、湿地生态净化、河滨河堤生态修复等措施;星云湖主要入湖河道主要流经区域开展生态水稻、莲藕+鱼或莲藕+泥鳅等种植模式,并与农田水系旁路形成有效衔接,形成河道-农田-塘库生态净化系统。调

取外流域优质水资源对星云湖进行补水,促进湖体生态修复;建设环湖调蓄截污干渠和生态截污调蓄带,提高星云湖水资源循环利用效率;推广农业高效节水项目,促进节水减排。加快流域内矿山生态修复以及抚仙湖环湖面山生态修复。

3.6 强化综合监管

提升流域管理机构行政级别,强化流域管理机构行政职能、优化管理模式,建立健全多元化融资机制,广泛吸引社会资金、民间资本参与其中;加强湖泊基础研究,提升湖泊富营养化控制关键技术的研发集成和转化推广,建立湖泊富营养化预警机制和监测监管平台,达到数据实时共享,提高工作效率。

4 结语

抚仙湖-星云湖流域是典型的贫营养湖和富营养湖的典型代表,星云湖近 15 年的变化也是一个湖泊从贫营养向富营养转变的一个典型过程。近年来,随着当地社会经济的发展,抚仙湖水体中 TP、TN 的浓度呈缓慢上升趋势,固废和农田化肥流失成为流域内氮、磷的主要污染源。为保护好抚仙湖 I 类水质,当地采取了一系列的工程措施,从

(下转第 161 页)