

高原深水湖泊主要污染源研究分析

——以抚仙湖为例

程浩亮, 段培涛, 郑凯, 胡能

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2022年6月14日; 录用日期: 2022年7月15日; 发布日期: 2022年7月25日

摘要

抚仙湖为深水型淡水湖泊, 近十年, 随着临湖经济的快速发展, 入湖河道污染物氮磷浓度提升显著, 富营养化加剧。为了找出抚仙湖的主要污染源, 为其保护和治理提供参考方向和理论指导, 本文基于多年实地调研和化学需氧量(COD)、总氮、总磷含量等指标检测分析, 分别从农村生活污染、农田径流污染、城镇生活污染、废弃磷矿区污染、旅游污染等方面对抚仙湖流域的污染现状进行了初步分析与评价。结果显示, 抚仙湖流域污染主要来源于农村面源污染、城镇生活污染、废弃磷矿区污染、旅游污染等方面, 其中, 最大的污染源是农村面源污染, 包括流域村落污染、人畜粪便污染、农村垃圾污染和农田径流污染。农村面源污染的COD、总氮、总磷分别占各自所有入湖污染量的94.81%, 94.85%, 87.79%。其中, 农田径流污染又是农村面源污染中最主要的组成部分。

关键词

抚仙湖, 污染源, 化学需氧量, 总氮, 总磷

Research and Analysis of the Main Pollution Sources in the Deep-Water Plateau Lake

—Taking Fuxian Lake as an Example

Haoliang Cheng, Peitao Duan, Kai Zheng, Neng Hu

School of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 14th, 2022; accepted: Jul. 15th, 2022; published: Jul. 25th, 2022

Abstract

Fuxian Lake is a plateau-based freshwater lake. In recent ten years, with the rapid development of the economy around the lake, the concentration of nitrogen and phosphorus in lake channels increased significantly. To identify the main sources of pollution in Fuxian lake and provide a reference for the protection and management direction and theoretical guidance, the pollution status of Fuxian Lake basin was analyzed and evaluated from the aspects of rural domestic pollution, farmland runoff pollution, urban domestic pollution, phosphorous chemical pollution and tourism pollution, respectively, based on years of field investigation and the indexes detection and analysis such as chemical oxygen demand (COD), total nitrogen, total phosphorus. The results showed that the pollution in Fuxian Lake basin mainly came from the rural non-point source pollution, urban domestic pollution, waste phosphate rock area pollution, tourism pollution and other aspects, among which the most important source of pollution was the rural non-point source pollution, including watershed village pollution, human and animal excrement pollution, rural waste pollution, and farmland runoff pollution in the basin. The COD, total nitrogen and total phosphorus from rural non-point source pollution accounted for 94.81%, 94.85% and 87.79% of the total pollution into the lake, respectively. Among them, the farmland runoff pollution was the most important component of rural non-point source pollution.

Keywords

Fuxian Lake, Pollution Sources, Chemical Oxygen Demand, Total Nitrogen, Total Phosphorus

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国淡水资源贫乏, 人均水资源较少, 湖泊是较容易开发利用的淡水资源[1] [2]。近年来, 随着中国经济发展, 工农业废水及生活污水的肆意排放, 导致湖泊水环境日趋恶化, 保护湖泊水资源环境势在必行[3] [4] [5]。孙浩[6]等人通过分析测试入湖河流特性及污染源特点, 提出以入湖河流所在集水范围为抚仙湖水污染防治基本控制区的思路。张维理[7]等人通过对我国几大湖泊的长期研究, 得出农村生活污水、畜禽养殖排放及农药排污是造成水体中氮、磷急剧增多的主因。郑粉莉[8]通过长期对国外湖泊的调查研究, 提出农业面源即非点源污染理论。刘春光[9]等通过对天河富营养化研究, 得出农业面源污染受季节的影响。针对湖泊农业面源污染严重问题, 本文在抚仙湖流域开展了长期的污染物排放调查研究, 主要分析污水中 COD、总氮、总磷等指标, 以期对抚仙湖的环保规划研究提供一定的理论前提。

2. 抚仙湖流域环境概况

2.1. 自然环境概况

抚仙湖位于云南省玉溪市东北部, 澄江、江川与华宁县三县交界处, 西北临滇池, 北距省会昆明约 60 km, 北纬 24°21'28"与 24°38'00"之间, 东经 102°49'12"与 102°57'26"之间。抚仙湖地处南盘江流域中西江水系, 不含星云湖的流域面积达 674.69 km², 湖面高程 1722.5 m 时, 水域面积约 216.6 km², 湖长约 31.4 km, 湖最宽处约 11.8 km, 湖岸线总长约 100.8 km。其中最大水深处可达 158.9 m, 平均为 95.2 m,

相应的蓄水量约 206.2 亿 m^3 ，为云南省湖泊蓄水量之最，约占云南省总湖泊蓄水量的 72.8% [10]。抚仙湖兼有灌溉、防洪、养殖、旅游及生活用水等综合功能。

抚仙湖流域属于滇中高原湖盆区，该区域地势四周高、中间低，相对落差大[11]。抚仙湖为亚热带季风气候，抚仙湖地区年平均气温为 $15.5^{\circ}C$ ，年降雨量为 800~1100 mm，蒸发量常年大于降雨量，位于 1200~1900 mm 之间，年日照小时数为 2000~2400 h [12]。

抚仙湖流域有入湖河道 103 条，其中较大河流 20 条。其中集水面积大于 $30 km^2$ 的有 3 条，面积处于 $10 km^2$ 到 $30 km^2$ 之间的有 6 条，小于 $10 km^2$ 的有 18 条[13]。出湖河道有海口河与出流改道后的隔河。

2.2. 社会经济概况

抚仙湖流域地处澄江、江川、华宁三县，其中澄江县涉及 5 个镇，约 117,869 余人(第六次人口普查，下同)；江川县涉及 2 个镇，约 29,229 人；华宁县仅涉青龙 1 个镇，约 8031 人。8 镇约有 238 个自然村，总人口约为 155,129 人[14]，见表 1。

Table 1. Administrative division table of the Fuxian Lake basin

表 1. 抚仙湖流域行政区划表

县名	陆地面积(km^2)	水域面积(km^2)	人口(人)	涉及乡镇
澄江县	299.5	129	117,869	凤麓镇、龙街镇、右所镇、海口镇、九村镇
江川县	104	68.1	29,229	路居镇(中坝、上坝、下坝、红石岩和小凹村)、江城镇(孤山、海门、三百亩、明星和牛摩村)
华宁县	59.5	19.5	8031	青龙镇(海关和海镜村)
合计	463	216.6	155,129	

磷矿为抚仙湖流域主要矿产，在湖泊周围建有几处磷矿开采点及磷化工工厂。流域周围旅游景点较丰富，旅游业发达，有禄充景区、月亮湾湿地及樱花谷景区。

抚仙湖流域土地利用情况见图 1，其中林业用地约 $222.67 km^2$ ，占 36.71%；抚仙湖湖面面积约 $214.61 km^2$ ，占 32.06%；农牧、交通等用地约 $198.71 km^2$ ，占 26.16%；剩余其他用地约占 5.07%。

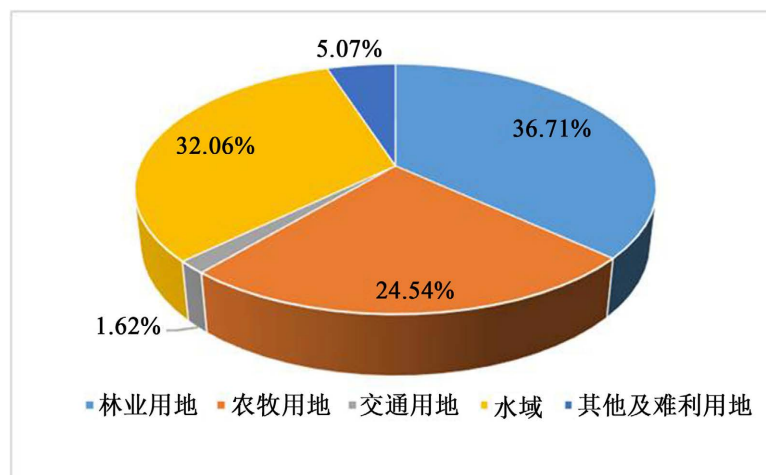


Figure 1. Land use type scale map of the Fuxian Lake basin

图 1. 抚仙湖流域土地利用类型比例图

3. 流域环境现状调研与问题分析

流域内主要污染源包括流域内农村居民生活污水、农田化肥及农药产生的径流污染、畜禽养殖产生的污染和工业点源污染(包括磷矿企业和磷化工企业)及旅游业污染等。

3.1. 农村面源污染调研分析

农村面源污染主要包括流域农村生活污染和流域农田径流污染。

3.1.1. 流域内农村生活污染排放调研分析

该流域内约有农村人口 13.47 万人, 其中农村居民生活污水、畜禽养殖及生活垃圾是农村生活污染的主要来源。据调研结果显示该流域农村人口的日污水量约为 37 L/(人·天), 生活污水的污染物排放量及入湖总量计算见表 2。

Table 2. Estimation of the village sewage discharge and the amount into the lake in the basin

表 2. 流域村落污水排放量及入湖量估算

指标	人均排放量	排放总量	入湖量[14]
水量(m ³ /a)	13.51	181.98 × 10 ⁴	90.99 × 10 ⁴
COD (t/a)	0.23 × 10 ⁻¹	3098.22	1549.11
总氮(t/a)	0.99 × 10 ⁻³	133.40	66.70
总磷(t/a)	0.20 × 10 ⁻³	26.90	13.45

从表 2 中可以看出由于没有有效的水处理设备, 农村居民生活污水未经有效处理直接排放到河流中, 其中生活污水中污染物 COD、总氮、总磷的 50%左右都排放到了抚仙湖的入湖河流中, 对抚仙湖水质造成了一定的影响。

流域内养殖业主要是农户散养为主, 猪共 70,313 头, 牛羊等大牲畜共计 9931 头, 约 95%农村居民使用公厕或自建旱厕, 人畜粪便产生量及入湖量的调研估算结果如表 3 所示。从表中可以看出人畜粪便中污染物经过沼气池简单处理后剩余约 10%排入入湖河道中, 由此可见农村小型沼气装置对人畜粪便中 COD、总氮、总磷有很好的去除作用。

Table 3. Estimation of human and animal manure production and inflow into the lake

表 3. 人畜粪便产生量及入湖量估算

指标	产生量(t/a)			入湖量(t/a)
	畜禽粪便	居民排泄	合计	
COD	5221.62	3704.31	8925.83	892.62
总氮	1150.43	592.70	1743.13	174.33
总磷	307.20	94.32	401.52	40.14

据调研结果显示, 农村居民每人每日产生生活垃圾约 0.50 kg, 按 13.47 万人口估算得出该流域的垃圾年产量约为 2.46 万吨, 经过调研估算, 收纳水体因其产生的 COD 约为 2.46 × 10³ t/a, 总氮约为 1.23 × 10² t/a, 总磷约为 49.20 t/a, 分别占垃圾总量的 10%、0.5%、0.2%左右; 其中, 垃圾未有效清运量约 4.92

$\times 10^3$ t/a, 占垃圾总量的 20%, 则收纳水体因其产生的 COD 约为 492 t/a, 总氮约为 24.6 t/a, 总磷约为 9.84 t/a, 分别占各自总量的 20%; 最后调研计算得出未有效清运量的 20%排入到抚仙湖中(表 4)。从表中分析得出居民的生活垃圾并未全部进行有效处理, 即排入入湖河流中, 对抚仙湖造成了一定的污染, 加重了湖内水体营养化进程。

Table 4. Estimation table of the rural garbage pollution

表 4. 农村垃圾污染估算表

指标	总量 (t/a)	未有效清运量 (t/a)	入湖量 (t/a)
垃圾总量	2.46×10^4	4.92×10^3	9.84×10^2
COD(取总量 10%)	2.46×10^3	4.92×10^2	98.40
总氮(取总量 0.5%)	1.23×10^2	24.60	4.92
总磷(取总量 0.2%)	49.20	9.84	1.97

3.1.2. 流域内农田径流污染调研分析

流域农田径流污染主要指施肥及喷药造成的径流污染。据调查显示, 抚仙湖流域有耕地约 6.86×10^3 hm^2 (坝区水地和山区旱地分别为 3.73×10^3 hm^2 和 3.13×10^3 hm^2), 化肥施用量达 20735.40 t/a。流域内大蒜、豌豆等经济作物种植面积较大, 耗用化肥较多, 约占总施肥量的 50%以上。流域内农田平均施肥量约为 3.00 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), 折算总氮、总磷施用量分别达 0.60~0.90 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)和 0.15~0.30 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$) (表 5)。

Table 5. Pollution table of farmland runoff in Fuxian Lake basin

表 5. 抚仙湖流域农田径流污染表

县	耕地面积 (hm^2)	污染物排放量 t/a			污染物入湖量 t/a		
		COD	总氮	总磷	COD	总氮	总磷
澄江	4292.92	1609.84	386.36	32.20	1126.89	270.45	22.54
江川	2153.13	807.41	193.78	16.15	565.19	135.64	11.30
华宁	429.64	161.11	38.67	3.22	112.78	27.07	2.26
合计	2291.90	2578.36	618.81	51.57	1804.85	433.16	36.10

从表 5 分析得出, 各县污染物的 COD 排放量合计约 2578.36 t/a、总氮排放量合计约 618.81 t/a、总磷排放量合计约 51.57 t/a, 污染物 COD、总氮、总磷入湖量分别为 1804.85 t/a、433.16 t/a、36.10 t/a。由于污染物未经过有效处理, 流域内农田化肥施加严重, 化肥中污染物 COD、总氮、总磷的 70%进入湖体中, 造成湖体污染。

农药污染也占据很大比重。据不完全调查显示流域当前正在使用 200 余种农药, 其中有机磷农药约占 70%, 磷污染严重。

3.2. 城镇生活污染现状调研分析

紧邻抚仙湖北部有澄江县县城, 城镇人口约 2.04 万人。据调研(表 6), 该县城居民人均污水量约 200 L/(人·天), 其中 COD 约 70 g/(人·天), 总氮约 10 g/(人·天), 总磷约 1.5 g/(人·天)。部分城镇生活污水经污水处理厂处理后排放, 但该污水厂规模较小, 现状处理量约 3000 t/d, 与 10,000 t/d 的设计规模相距甚远。

3.3. 流域废弃磷矿区水污染调研分析

抚仙湖流域磷矿资源丰富,过去30年磷矿开采及加工发展迅速,之前磷矿开采点共计22个。经磷矿污染整治后,各开采点基本都已停采,目前流域内磷矿区开采总面积208 hm²,尚有5.1 hm²的矿区开采后严重裸露,随降雨地表漫流后排入河道。另外,原料与废渣堆放也会造成污染:流域内有16家原料和矿渣堆场19.2 hm²,堆置方式原始,矿渣的浸出液使矿区邻近区域代村河和东大河水体受到污染,随河流入湖后造成水体严重污染。

Table 6. Analysis of urban domestic pollution

表 6. 城镇生活污染分析

指标	总量 (t/a)	集中收集处理量 (t/a)	集中处理消减量 (t/a)	集中处理排放入 湖量(t/a)	未处理入湖量 (t/a)	总入湖量 (t/a)
污水量	148.92 × 10 ⁴	-	-	-	-	-
COD	521.22	107.32	88.88	12.90	206.95	219.85
总氮	74.46	20.41	10.40	7.01	27.03	34.04
总磷	11.17	1.94	1.26	0.48	4.62	5.10
备注			参考污水处理效果	以污水处理厂 排出量70%考虑	以未处理污染物 的50%考虑	

经调研发现,流域内裸露的废弃磷矿石层和原料与废渣堆放场每年约流失总磷28.56 t,根据玉溪市环境监测站磷矿废弃地主要的地表径流(东大河和代村河)的平均径流量,对地标径流携带污染物量进行分析,得出流域内磷矿废弃地入湖的总磷约为7.50 t/a。

3.4. 旅游业污染现状调研分析

抚仙湖流域有酒店300多家,可用床位约7300张,旅游年污水量约18.27万t。其中污水厂处理约13.1万t,占71.7%,自建污水处理设施处理约2.3万t,占12.6%,剩余约15.7%污水直接或简易处理后排放,结果见表7。旅游区垃圾年产量为600t,均有效清运。

Table 7. Estimation of tourism pollution discharge and the amount into the lake in the basin

表 7. 流域旅游污染排放与入湖量估算

	水量 (t/a)	COD (t/a)	总氮 (t/a)	总磷 (t/a)	备注
污水厂处理	131,042	6.55	1.97	0.13	按照一级A排放标准计算
自建污水处理设施处理	22,970	8.37	0.92	0.18	
农田灌溉	11,250	4.10	0.45	0.09	计算标准:
简易处理	15,978	5.82	0.64	0.13	COD _{cr} : 364.5 mg/L
直接排放	1480	0.54	0.06	0.01	总氮: 40 mg/L
产生量合计	182,720	25.39	4.03	0.54	总磷: 8 mg/L
入湖量		17.77	2.82	0.38	

对上述结果进行分析可知,抚仙湖流域的污染源主要有农村面源污染、城镇生活污染、废弃磷矿区污染和旅游污染等四个方面,其中,农村面源污染(包括流域村落污染、人畜粪便污染、农村垃圾污染和

农田径流污染)是最大的污染源,其 COD、总氮、总磷分别占各自合计入湖污染量的 94.81%, 94.85%, 87.79%。农田径流污染又是农村面源污染中最主要的组成部分(表 8)。可见,若要对抚仙湖水质进行保护治理,应主要着手于农村面源污染治理,尤其是农田径流污染,合理控制农田化肥和农药的使用量。

4. 结论

通过对抚仙湖流域污染近年的调研及其数据分析,得出如下结论:

1) 抚仙湖流域的污染源主要有:农村面源污染、城镇生活污染、废弃磷矿区污染、旅游污染等。

Table 8. Statistics of pollution sources in Fuxian Lake basin

表 8. 抚仙湖流域污染源统计

污染源	COD (t/a) (总入湖量)	总氮(t/a) (总入湖量)	总磷(t/a) (总入湖量)
流域村落污染	1549.11	66.70	13.45
人畜粪便污染	892.62	174.33	40.14
农村面源污染			
农村垃圾污染	98.40	4.92	1.97
农田径流污染	1804.85	433.16	36.10
合计	4344.98	679.11	91.66
城镇生活污染	219.85	34.04	5.10
废弃磷矿区污染	-	-	7.50
旅游业污染	17.77	2.82	0.38
合计	4582.60	715.97	104.64

2) 农村面源污染包括流域村落污染、人畜粪便污染、农村垃圾污染和农田径流污染,是流域最大的污染源,其 COD、总氮、总磷分别占各自所有入湖污染量的 94.81%, 94.85%, 87.79%。其中,农田径流污染又是农村面源污染中最主要的组成部分。

可见,若要对抚仙湖水质进行保护治理,应主要着手于农村面源污染治理,并辅以城镇生活、磷化工、旅游污染等方面的治理,多管齐下。

基金项目

云南省教育厅科学研究基金(2022J0516); 云南省科技计划农业联合青年项目 2017FG001(-101)。

参考文献

- [1] 张水铭. 农田排水中磷素对苏南太湖水系的污染[J]. 环境科学, 1993, 14(6): 24-29.
- [2] 王晓燕, 汪清平. 北京市密云县耕地畜禽粪便负荷估算及风险评价[J]. 农村生态环境, 2005, 21(1): 30-34.
- [3] 陈尔金. 东张水库氮磷内源负荷定量分析[J]. 生态科学, 2006, 25(1): 78-81.
- [4] 由文辉. 淀山湖水生态系统的物质循环[J]. 中国环境科学, 1997, 17(4): 293-296.
- [5] 鲜敬鸣, 陈海东. 四种沉水植物的克藻效应[J]. 湖泊科学, 2005, 17(1): 75-80.
- [6] 孙浩, 马卓萃, 肖许沐. 抚仙湖污染物入湖过程分析与控制策略[J]. 人民珠江, 2015(6): 117-120.
- [7] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [8] 郑粉莉, 李靖, 刘国彬. 国外农业非点源污染(面源污染)研究动态[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 64-65.

- [9] 刘春光, 金相灿. 城市景观河流夏季污染状况及营养水平动态分析——以天津市津河为例[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(4): 312-316.
- [10] 胡小冬, 刘威. 浅谈云南高原湖泊的生态修复和保护[J]. 人民珠江, 2009(3): 33-34.
- [11] 牛远, 胡小贞, 王琳杰, 等. 抚仙湖流域山水林田湖草生态保护修复思路与实践[J]. 环境工程技术学报, 2019(5): 482-490.
- [12] 张晓旭, 孔德平, 张淑霞, 等. 贫营养湖水环境承载力及对策研究——以抚仙湖为例[J]. 环境科学导刊, 2014(4): 5-12.
- [13] 梁秋实, 张文翔, 林永静, 等. 滇中抚仙湖沉积物元素特征与流域侵蚀研究[J]. 中国环境科学, 2020(4): 1740-1747.
- [14] 朱康文, 陈玉成, 杨志敏, 等. 基于文献定量法的农业面源污染风险评估研究动态[J]. 生态与农村环境学报, 2020(4): 425-432.