

流域氮磷输出、河流输送与库区富营养化关联分析 ——以福建山仔水库为例

陈能汪¹, 吴殷琪¹, 张玉珍^{2*}, 苏玉萍³, 詹旋灿³, 莫秀娟⁴

(1. 厦门大学环境与生态学院/福建省海陆界面生态环境重点实验室, 厦门 361005; 2. 福建省环境科学研究院, 福州 350013; 3. 福建师范大学环境科学与工程学院, 福州 350007; 4. 福建省环境监测中心站, 福州 350003)

摘要: 建立流域氮磷输出、河流输送与入库通量的分析方法, 以福建省山仔水库为例, 基于 GIS 技术分析乡镇、子流域的氮磷污染分布和来源构成, 识别关键源区并探讨库区水质与流域污染输出和河流输送之间的关联性。结果表明, 2009 年山仔流域单位面积总氮输出负荷为 $13.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (生活污水和化肥流失占 64%), 总磷输出负荷为 $0.82 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (畜禽养殖和生活污水占 90%), 入库氮、磷负荷分别为 $3248 \text{ t N} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $192 \text{ t P} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中河流输入占 62% 和 89%, 环库区面源污染贡献小于 2%; 不同乡镇单位面积氮输出负荷为 $3.54 \sim 20.0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, 磷输出负荷为 $0.38 \sim 2.50 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中日溪乡和霍口乡临近库区, 化肥流失与畜禽养殖污染最重。上游乡镇污染较轻, 但生活污水比重大 (42%~84%)。皇帝洞溪子流域污染最重 ($19.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; $1.95 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$), 其次是霍口溪中下游和日溪子流域。库区总氮高值出现在坝区和日溪湾汊, 总磷高值在小沧至霍口溪七里入口之间, 水质有明显分区, 与流域污染分布、河流输送和库区沉积物的释放相关联, 河流输入对库区富营养化起决定性作用。流域氮磷输出负荷比值平均为 16, 库区水中氮磷比值在 15~20 之间, 意味着该生态系统处于磷的弱限制, 水华爆发风险较大, 建议采取“分区整治流域污染、氮磷联合削减、畜禽养殖和磷肥流失优先控制”的富营养化防控策略。

关键词: 库区-流域系统; 营养盐污染; 富营养化; 氮磷比值; 山仔水库

中图分类号: X830.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)09-1862-08 doi:10.11654/jaes.2013.09.023

Linking Watershed Nutrient Loads and Riverine Export to Reservoir Eutrophication: The Case of Shanzai Reservoir, Fujian Province

CHEN Neng-wang¹, WU Yin-qi¹, ZHANG Yu-zhen^{2*}, SU Yu-ping³, ZHAN Xuan-can³, MO Xiu-juan⁴

(1. College of the Environment and Ecology/Fujian Provincial Key Laboratory for Coastal Ecology and Environmental Studies, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Provincial Academy of Environmental Science, Fuzhou 350013, China; 3. Environmental Science and Engineering College of Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 4. Fujian Provincial Environmental Monitoring Center, Fuzhou 350003, China)

Abstract: A quantitative analysis of watershed nitrogen (N) and phosphorus (P) loads, riverine export and other inputs to reservoir was conducted for Shanzai reservoir in Fujian Province. Spatial variation of N and P pollution and major components were interpreted at town and sub-watershed scale using GIS techniques, and the critical source area (CSA) was indentified. The linkage between reservoir water quality and watershed nutrients loading and riverine export fluxes was examined. Results revealed that total N and P loads per unit area of the Shanzai watershed were $13.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and $0.82 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. Domestic sewage and fertilizer runoff accounted for 64% of total N load, and livestock waste and domestic sewage shared 90% of total P load. Total N and P loads to the Shanzai reservoir were $3248 \text{ t N} \cdot \text{a}^{-1}$ and $192 \text{ t P} \cdot \text{a}^{-1}$, 62% and 89% of which were through riverine transport and the remainder mostly from sediment release. Less than 2% of inputs were from non-point sources in the surrounding area. Town-level N and P loads per unit area ranged from $3.54 \sim 20.0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $0.38 \sim 2.50 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Two towns (Rixi and Huokou) adjacent to the reservoir were identified as CSA of fertilizer runoff and livestock waste, while human sewage dominated the nutrient load (42%~84% of total) in other towns in the upstream area. Huangdidong subwatershed was the most polluted catchment ($19.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; $1.95 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$), followed by the lower reaches of Huokou River and Rixi

收稿日期: 2013-06-08

基金项目: 公益类科研院所专项 (2011R1004-2); 中央高校基本科研业务费专项 (厦门大学基础创新科研基金项目) (2012121053)

作者简介: 陈能汪 (1976—), 男, 副教授, 主要研究方向为流域河口水环境过程与管理。E-mail: nwchen@xmu.edu.cn

通讯作者: 张玉珍 E-mail: zyz9893@163.com

subwatershed. The high value of total N concentration was observed near the dam head and Rixi inlet, whereas high total P concentration was found in channel from Huokuo inlet to Xiaocang. The spatial variation of the nutrients level in the reservoir was highly associated with watershed nutrient loads, riverine export and sediment-water exchange, indicating that riverine input is the decisive factor contributing to eutrophication of the reservoir. The average N:P ratio of the nutrient load was calculated as 16 for the whole watershed, which combined with the TN:TP ratio of 15~20 observed in reservoir surface water suggested that the reservoir ecosystem was weakly limited by P and tended to stimulate algal bloom. To mitigate eutrophication, reduction of both N and P pollution should be considered in those CSAs, with a priority given to P pollution from livestock and phosphate fertilizer loss.

Keywords: reservoir watershed; nutrients pollution; eutrophication; N:P ratio; Shanzai Reservoir

富营养化与有害藻华(水华、赤潮、绿潮等现象)是全球性水环境问题,主要与人为源氮和磷的过量排放有关^[1]。随着人口增加和社会经济发展,陆地上各种资源开发活动增强,土地利用/覆被快速变化,氮磷等各种陆源污染物排放增加,湖泊、水库、河口和近岸海域等各类水体营养盐富集,初级生产(有机碳)增加,从而导致所谓的富营养化问题^[2]。受流域污染来源变化和河流大坝建设等因素的综合影响,水中营养盐结构(氮、磷、硅)也会发生不同程度和方向的改变,进而影响生态系统群落结构和功能,并增加藻华发生概率的生态风险^[3]。营养盐氮磷是主要生源要素,但其过量的人为排放已造成一系列环境与生态效应^[4],包括水质超标、酸化、藻华、缺氧、恶臭、破坏生物多样性等,进而影响工农业和生活用水、水产养殖、旅游以及水上运输等水资源利用和区域经济社会的可持续发展。我国的湖泊、库区富营养化问题日益突出,有害藻华主要发生在人口密集、经济发达、污染严重的长江流域和东部沿海地区^[5]。国内外对湖泊、库区的富营养化发生机制和调控技术开展了广泛研究^[6-9]。然而解决富营养化问题的根本途径是削减外源污染输入^[10-11]。因此,从流域尺度上分析受纳水体的各种污染来源和关键源区,揭示流域污染输出负荷(入河量)、入库量与库区富营养化之间的机理联系,是水体富营养化防控的科学基础。国内外在流域氮磷污染的量化研究中发展了诸多方法,包括系数法、模型法和实测法。常用的污染负荷模型有经验式模型如全球流域营养盐输出模型(Global NEWS)和适用于区域评估的 SPARROW 模型等,这类模型可以模拟氮磷输入、河道迁移到最后入海的通量;有机理模型如 AnnAGNPS、SWAT 模型等,主要模拟氮磷物质在流域内的迁移转化过程和输出负荷。这些国际上开发的模型通常需要比较详尽的基础数据和水质水文数据。目前我国小流域普遍存在实测资料少、基础信息缺乏、面源污染估算困难的问题,亟需建立一种简便且能满足水库富营养化防控

需要的量化方法。本文提出将流域、河流和库区进行整体的氮磷污染量化研究的思路,综合污染排放系数法和实测数据建立流域氮磷输出负荷、河流输送通量和各种入库量的系统分析方法,为流域污染减排和库区富营养化防控提供方法支持。

福建省水库和湖泊众多,且相当一部分湖库是饮用水源地,其中山仔水库位于福建省敖江流域中游,为福州市饮用水源地。1994 年建坝蓄水,在流域各种人类活动和气候变化的叠加影响下,水库日趋富营养化,近年来蓝藻水华频发^[12],水华期间产生微囊藻毒素^[13],对城市供水安全构成了重大威胁。相关监测部门、高校和科研院所对山仔水库和流域分别开展了一系列的监测和研究工作,但目前对于该流域的氮磷污染及其与库区生态环境变动之间的关系仍然不清楚。本文将库区及其流域(山仔大坝以上汇水区)作为整体研究对象,基于乡镇、子流域和库区不同空间单元的量化分析,强调流域污染输出、河流输送与入库量之间的关联性,进而探讨流域氮磷污染削减和库区富营养化综合防控策略,为今后山仔水库的污染治理和生态修复工作提供一定的依据,也为我国同类研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山仔水库位于福建省东部,属于亚热带季风气候区,多年平均气温在 14.7~19.4℃ 之间,年降雨在 1310~1672 mm 之间,汛期为 4—9 月。山仔水库平均水深 30 m,总库容 1.72 亿 m³。据监测数据,2006—2012 年库心 TN 含量 0.14~2.17 mg·L⁻¹,TP 含量 0.003~0.884 mg·L⁻¹,水体富营养化问题突出,自 2000 年以来蓝藻水华不断。山仔坝址控制流域面积为 1646 km²,坡度范围是 0~63°,多属中低山地,河流平均坡降较大。直接入库河流包括日溪、霍口溪和皇帝洞溪。流域内主要涉及日溪、大湖、廷坪、小沧、飞竹、

霍口、下祝、鹤塘、杉洋、卓洋、大甲等 11 个乡镇,占流域总面积的 91%。

1.2 数据收集与处理

(1) 流域边界与分析单元的划定

基于 ArcGIS 软件水文模块,利用 30 m 精度数字高程模型(DEM)(数据源:国际科学数据服务平台, <http://datamirror.csdb.cn/>),综合地形因素和水文条件,划定山仔全流域及 9 个河流子流域和 1 个环库区汇水界线。利用行政界线图层和叠置分析方法,提取流域内 11 个主要乡镇的分布和相应面积,作为氮磷污染分析的基本空间单元。因流域内外村庄的分布基本均匀,将各乡镇的估算结果按面积比例折算得到各子流域和全流域的氮磷输出负荷。

(2) 基础数据收集与处理

各乡镇人口数,畜禽养殖数量,氮、磷肥折纯量等来自统计年鉴。降雨数据来自气象部门和中国天气网(<http://www.weather.com.cn/>);霍口溪月均流量数据来自当地水文部门,日溪和皇帝洞溪(汇入霍口溪)两条支流没有水文站,其月均流量根据霍口溪流量和汇水面积比例推算。河流、库区水质数据来自福建省环境监测中心站和课题组实测。环库区的土地利用类型及面积通过遥感影像数据目视解译得到。

(3) 现场观测与实验

分别于 2011 年 6 月、9 月、12 月和 2012 年 3 月、6 月,在库区和支流入库口 6 个不同站位采集表层水样,采用标准方法测定 TN、TP 浓度。同时在日溪口、小沧、大坝 3 个代表性点位,采集柱状沉积物,实验室培养测定氨氮和无机磷的释放速率,按 10 ℃(冬季)和 30 ℃(夏季)两个温度条件进行模拟实验,实验设计和氮磷释放量的估算方法参考文献[14]。

1.3 流域氮磷输出负荷、河流输送量和入库量估算与 GIS 分析

经资料分析和现场调研,识别山仔流域主要污染源为生活污水、化肥流失、畜禽养殖和大气沉降,库区污染源为河流输入、环库区面源、大气沉降和底泥释放。首先利用污染排放系数法,分乡镇估算畜禽养殖、生活污水、化肥流失的输出负荷(即入河量),再利用 GIS 和面积比例加权得到各子流域和全流域的污染输出负荷。相关系数的确定主要依据国家污染源普查手册和文献报道,综合考虑系数的普适性和研究区的特殊性,具体系数列于表 1。生活污染根据人口数量和人均排放系数计算;化肥流失采用氮肥和磷肥的施用量(按折纯量计,复合肥按氮磷各占 1/3 分别计入)

表 1 山仔水库各项氮磷负荷的估算系数

Table 1 Coefficients for nitrogen(N) and phosphorus(P) loads estimation in the Shanzai Reservoir

项目	分项	单位	N	P	参考文献
生活污水人均排放系数		$\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$	10.3	0.74	[22]
化肥流失系数		%	30	5	[23]
畜禽养殖每口排放系数	牛粪	$\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$	31.9	8.61	[24]
	牛尿		29.2	1.46	
	猪粪		2.34	1.36	
	猪尿		2.17	0.34	
	家禽类		0.275	0.115	
环库区面源入库系数	稻田	$\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$	2.15	0.43	[25]
	旱地		4.63	0.14	
	果园		0.18	0.52	
	草地		0.6	0.08	
	林地		0.25	0.015	
	村镇用地		1.3	0.18	
	荒地		1.1	0.02	
沉积物释放速率		$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	91.93	1.37	实测

和经验流失系数计算。畜禽养殖采用各类畜禽数量和每口排放系数计算(山仔流域主要涉及牛、猪和家禽,粪和尿分别计算后加总)。大气沉降为湿沉降和干沉降之和,湿沉降量利用年降雨量和雨水总氮平均浓度计算。根据作者实测的福建省九龙江流域(位于闽西南)雨水氮平均浓度为 $(2.79 \pm 1.79) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,综合已报道的东南沿海地区的大气湿沉降监测数据求得平均值^[15-19],最后确定雨水总氮浓度为 $2.53 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,作为本案例的计算依据;同九龙江流域,干沉降量按湿沉降量的 50% 计^[10]。相关研究表明,流域大气沉降的氮约只有 11%~12% 进入水体^[20-21]。考虑到山仔流域山地多和植被覆盖良好的特点,确定大气氮的入河量等于大气氮沉降量的 10%。

河流输送通量,首先利用实测氮磷浓度(C_i)和采样当月河流流量(Q_i)两者相乘得到氮磷输送通量(F_i)(假设一月内氮磷浓度不变)。进一步建立通量与流量之间的关系式 $F_i = a \times Q_i$ (a 相当于流量加权平均浓度),并通过统计学检验(三条支流的 $R^2 > 0.80$, $P < 0.05$),说明氮磷输送通量主要由水文条件(流量大小)控制,再根据 2009 年月平均流量估算逐月和全年的氮磷输入通量。山仔水库底泥的年释放量根据培养实验测定的沉积物氮磷的平均释放速率(表 1)和底泥面积(按库区水面的 10% 计)及有效释放时间(假定一年中有 10% 的时间,即 36.5 d)估算。环库区面源氮磷入库量根据不同土地利用类型的面积和相应的输

出系数计算并加总,具体方法和系数参考文献[25]。入库的大气沉降量的计算方法同流域,但仅考虑直接进入库区的部分,按平均沉降通量和水域面积计算。所有统计数据 and 估算结果以 2009 年计。

基于 ArcMap9.0,对山仔流域 11 个乡镇和 10 个子流域的人为污染(畜禽养殖、生活污水和化肥流失)进行空间分析和可视化表达。同时利用课题组在 2011 年 6 月、9 月、12 月和 2012 年 3 月、6 月实测的表层水 TN、TP 平均浓度数据,采用 IDW(距离加权倒数)空间插值法对水库氮磷污染进行初步分区。综合各类信息进行库区-流域系统的氮磷通量关联分析。

2 结果与分析

2.1 山仔流域氮磷污染输出负荷与入库通量

汇总山仔流域输出负荷和入库氮磷负荷(表 2)。山仔流域总氮、总磷负荷分别为 $2179 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $136 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,库区分别为 $3248 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $192 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。总氮污染主要来自生活污水和化肥流失(占全流域总氮负荷的 64%),总磷污染主要来自畜禽养殖和生活污水(占全流域总磷负荷的 90%)。山仔库区 98% 以上的氮磷污染来自河流输入和底泥释放,其中在磷污染中河流输入占绝对主导地位(89%),环库区面源污染贡献较小(<2%)。进一步按单位面积计算,得到山仔库区-流域系统氮磷污染通量(图 1)。流域氮、磷污染年输出通量分别为 $13.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $0.82 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,而按流域面积计的河流输送通量为 $12.3 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $1.0 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$,两者

表 2 山仔流域和山仔库区氮磷污染负荷及构成

Table 2 N and P pollution loads and major components in the Shanzai watershed and reservoir

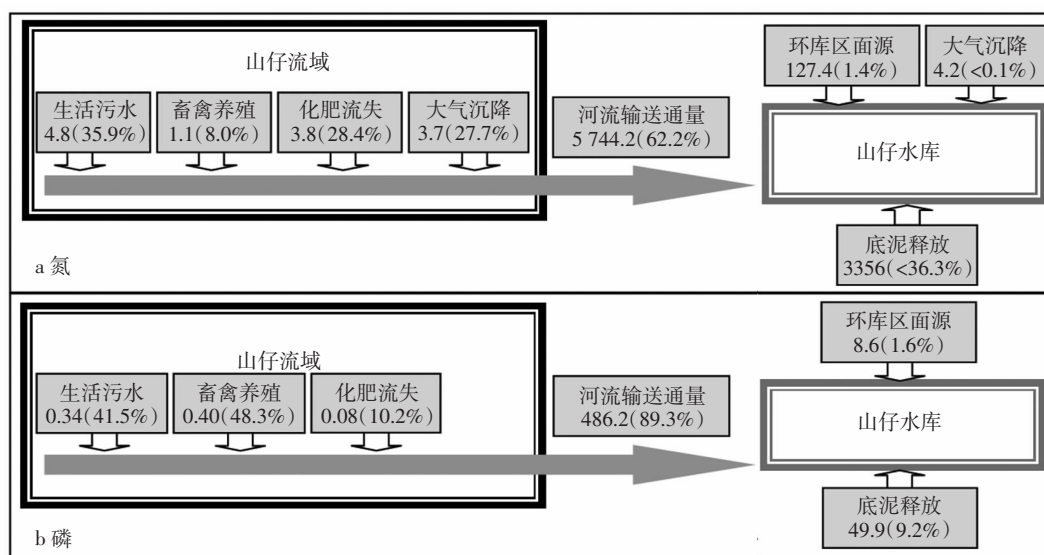
范围	氮磷来源	TN 负荷/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	比例/%	TP 负荷/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	比例/%
山仔流域	畜禽养殖	174	8.0	65	48.3
	生活污水	783	35.9	56	41.5
	化肥流失	619	28.4	14	10.2
	大气沉降	603	27.7	0	0.0
	合计	2179	100	136	100
山仔水库	河流输入	2021	62.2	171	89.3
	环库区面源	45	1.4	3	1.6
	大气沉降	1	0	0	0
	底泥释放	1181	36.3	18	9.2
	合计	3248	100	192	100

注:单位面积负荷或通量的单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,流域部分按陆域面积计,入库通量按库区水域面积计。

差额(氮相差 8%、磷相差 18%)可归为河流滞留、水土流失、生活垃圾等未计算项目以及估算误差。通过比较流域输出负荷的估算与基于实测水文水质数据计算的河流输送通量,说明本文建立的量化方法基本可靠。对于山仔库区来说,不确定性较大的是库区底泥氮磷的释放通量,由于采用的释放系数来自室内培养实验结果,估算结果可能偏高。

2.2 山仔流域氮磷污染空间分布和关键源区

基于乡镇和子流域的氮磷输出负荷估算结果,分析山仔流域氮磷污染空间分布和关键源区。其中以乡镇为单元的氮磷污染和来源构成有明显的空间差异(图 2)。不同乡镇单位面积氮磷负荷范围为 $3.54 \sim$



单位面积负荷或通量的单位为 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,流域部分按陆域面积计,入库通量按库区水域面积计

图 1 山仔库区-流域氮磷通量关系

Figure 1 N and P pollution fluxes in the Shanzai reservoir-watershed system

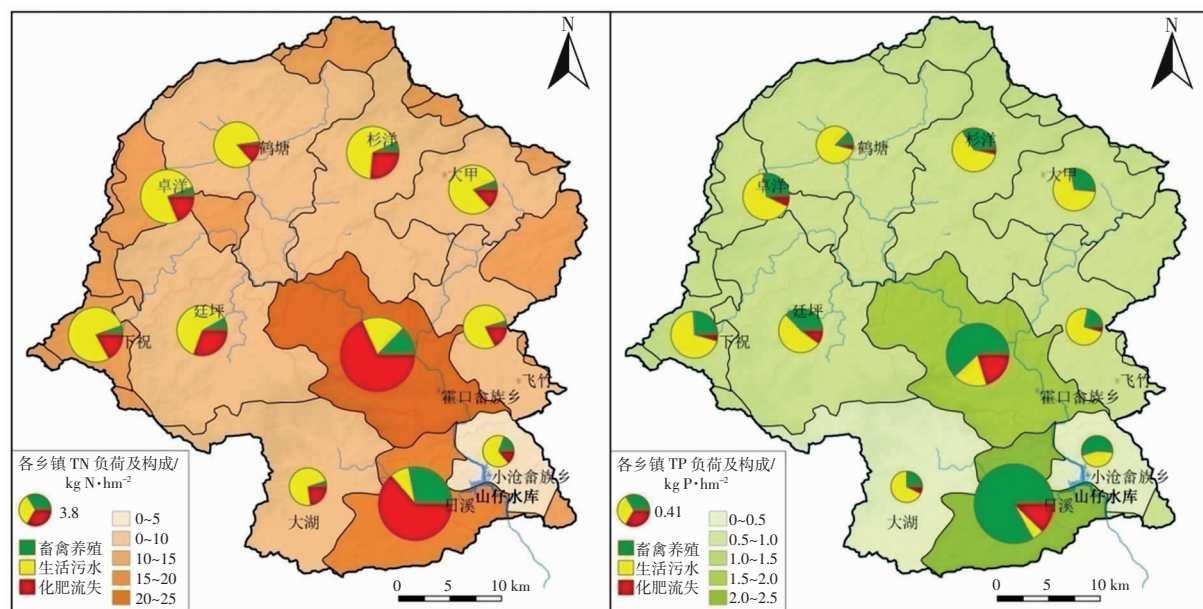


图2 山仔流域各乡镇单位面积氮磷输出负荷分布及来源构成

Figure 2 Spatial pattern of N and P loads per unit area and components at town-level in the Shanzai watershed

20.0 kg N·hm⁻²、0.38~2.50 kg P·hm⁻²,其中日溪和霍口最高,这两个乡镇种植业和养殖业发达,其化肥流失与畜禽养殖污染严重,化肥流失占总氮负荷的64%、68%,畜禽养殖占总磷负荷的83%、62%。日溪和霍口两镇紧临库区,对库区影响直接。其他乡镇(包括库区周边的小沧乡和上游乡镇)氮磷污染较轻,但人口集中,生活污水占很大比例(42%~84%)。各子流域氮磷污染空间分布见图3。位于库区西北侧的皇帝洞子流

域的污染最重(19.4 kg N·hm⁻²,1.95 kg P·hm⁻²),其次是霍口干流段(包括图3所示霍口上、下游子流域)和日溪子流域。显然,库区周边的各种人为污染较重,应重点关注。

2.3 山仔库区氮磷污染分区

山仔库区表层水总氮、总磷浓度分布见图4。2011—2012年调查库区总氮平均为0.496~1.04 mg N·L⁻¹,总磷平均为0.08~0.09 mg P·L⁻¹。总氮浓度高值

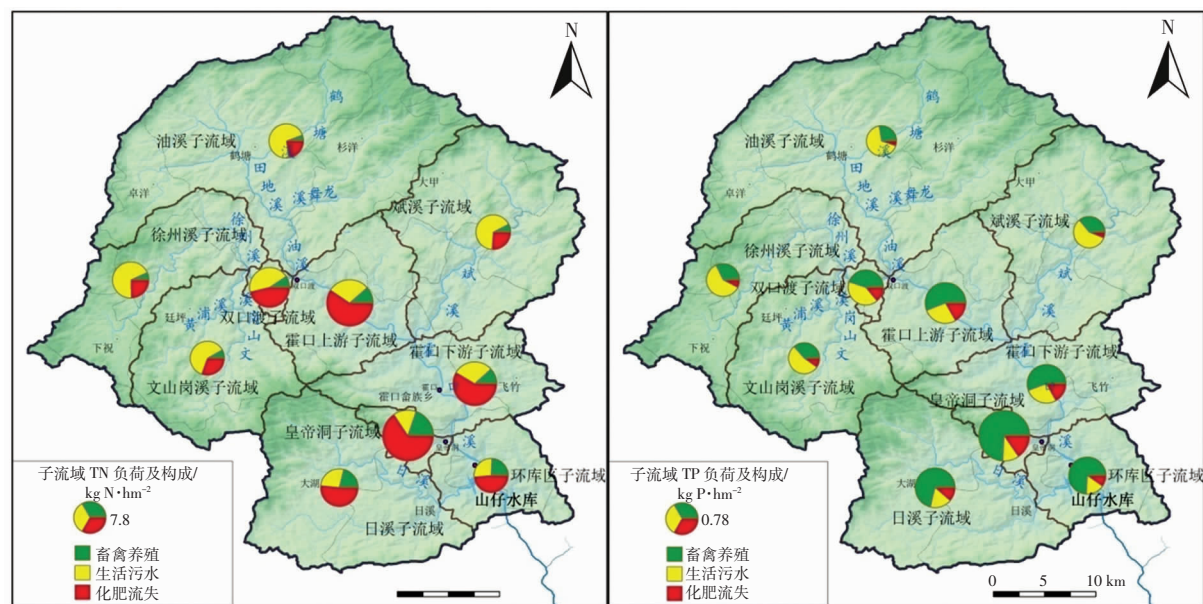


图3 山仔流域各子流域氮磷输出负荷分布及来源构成

Figure 3 Spatial pattern of N and P loads and components at subwatershed-level in the Shanzai watershed

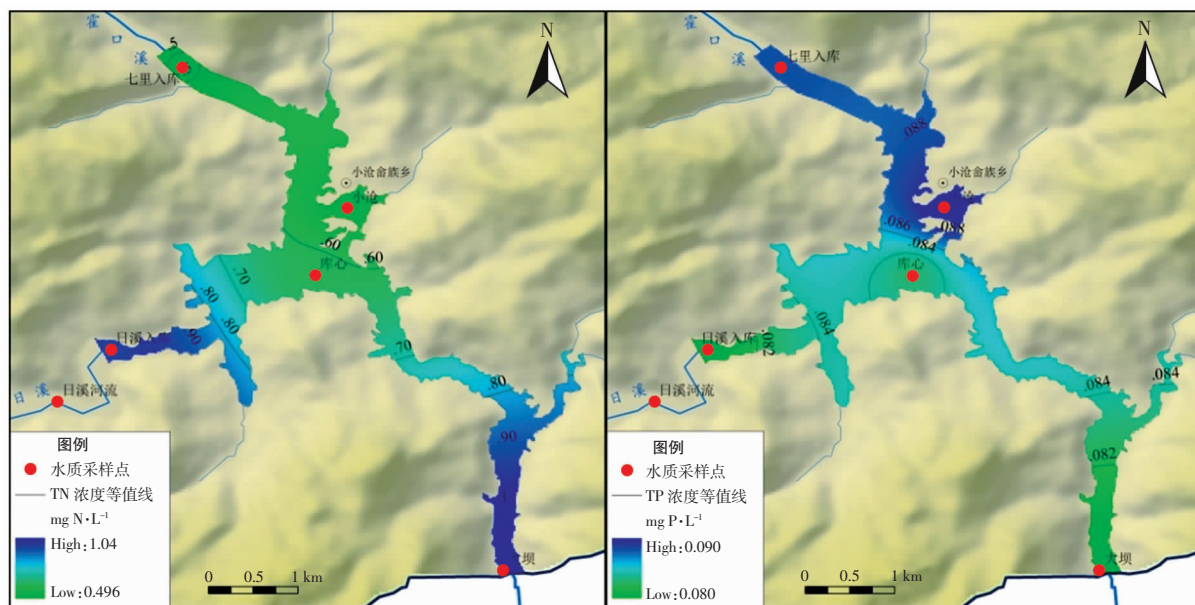


图 4 山仔库区表层水总氮、总磷平均浓度分区

Figure 4 Spatial variation of total N and total P average concentration in the Shanzai reservoir

出现在坝区($>1.0 \text{ mg N} \cdot \text{L}^{-1}$)和日溪湾汊($0.90 \sim 1.0 \text{ mg N} \cdot \text{L}^{-1}$);总磷浓度高值出现在小沧至霍口溪七里入口之间($0.088 \sim 0.090 \text{ mg P} \cdot \text{L}^{-1}$)。

3 讨论

3.1 山仔流域氮磷污染分布和结构化特征对库区富营养化的影响

通过乡镇、子流域不同空间尺度上的氮磷输出负荷分析发现,山仔流域氮磷污染呈现特殊的空间分异和结构化特征,且与山仔库区水质分区关系密切。总结起来,三大流域人为污染通过河流输送过程进入库区,是入库氮磷的主要来源,河流氮、磷输送通量分别占总入库通量的 62%和 89%,环库区面源贡献小于 2%。紧临库区的霍口和日溪两个乡镇的污染最重,这些区域的畜禽养殖粪污排放和农业生产过程中过量施肥以及不合理的施肥方式造成化肥流失,大量的氮磷营养物质通过霍口溪、皇帝洞溪和日溪直接入库,对库区水质产生决定性影响。日溪氮的河流输送通量($6.4 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)低于霍口溪($14.0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$);日溪磷的河流输入通量($1.3 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$)高于霍口溪($1.1 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$),这与流域氮磷输出负荷的分布相对应。库区表层水氮磷浓度呈现明显分区(图 4),日溪入口湾汊的高氮主要受河水输入影响。然而,日溪入口磷的浓度并没有霍口溪入口高,这可能与日溪入口湾汊水流缓、颗粒态磷易沉积有关。小沧湾汊至霍口溪七里入口之间磷含量很高,主要与周边畜禽养殖污染较重,

且动物粪尿中磷含量相对较高(氮磷比低)(表 1)的特点有关。坝区呈现高氮低磷的分布特征,可能与沉积物释放较多的无机氮(表 1)有关,还可能与环库区旱地果园耕作引起的氮磷排放有关(尽管环库区面源污染负荷较小,但可直接入库影响局部水质)。

流域氮和磷的人为污染来源基本相同,如畜禽养殖、生活污水和化肥流失物中均含氮和磷,但由于不同来源的氮和磷的排放系数不同(即进入水体的比例不同)(表 1),流域污染结构(三种人为污染源的相对比重)最终会影响受纳水体的氮磷比值。按照表 2 流域氮磷输出负荷的估算结果,平均氮磷负荷比为 $16(=2179/136)$,畜禽养殖为 2.7、生活污水为 14,化肥流失为 44。根据 2011—2012 年 5 次的实测数据计算,日溪入口水中 TN/TP 比值平均为 (17 ± 18) 、皇帝洞溪为 (7 ± 3) 、霍口溪七里入库为 (20 ± 16) ,库心为 (21 ± 18) 。水中氮磷比值基本与流域污染结构和空间分布相对应。当然,由于氮和磷的生物地球化学行为相差较大,如河流中氮以溶解态、磷以颗粒结合态为主要迁移形态,降雨、土壤、植被和河流坡降、大坝截留等因素均会影响氮、磷的迁移转化过程而呈现显著的时空变化,氮磷进入库区后受河道地形、生物吸收、内循环过程等综合影响,水中的氮磷比值处于动态变化,对应的是水中氮磷比值的标准偏差也较大。

显然,山仔库区的水质变化和生态系统演替与流域人为污染有直接关系。需要注意的是,山仔库区近 10 年来平均 TN/TP 比值在 15~20 之间波动,参照

Redfield 比值(N:P=16:1 摩尔比;7.2:1 质量比)理论^[26]和“TN/TP 质量比小于 29:1 时蓝藻占优”的规律^[27],意味着山仔水库生态系统的初级生产总体上受磷的弱限制。在外源氮磷的持续输入和内源循环(沉积物释放)的情况下,水中氮磷含量丰富,加上库区静水条件,易引起水华爆发现象,生态风险较大。

3.2 氮磷污染减排与富营养化综合防控策略

紧扣山仔库区水质改善和生态修复的总体目标,基于本文分析和已有研究成果,提出流域氮磷污染减排与库区富营养化综合防控策略:(1)分区分项整治流域污染。上游乡镇和紧邻库区湾汊的小沧要重点控制生活污染,可推行农村生活污水土地处理技术;日溪、霍口、延坪、杉洋有大量生猪养殖,下祝和大甲有不少家禽养殖,严禁新、扩建养殖场,已有养殖场要加强粪污处理(如堆肥还田),库区周边的养殖场应予以拆除并严格监控复建。霍口溪、日溪谷地以及环库区坡地应重点控制水土流失和化肥流失。(2)库区氮磷移除与生态修复。日溪入口和坝区沉积物释放的磷影响库区水体富营养化^[28],可通过适时清淤、深层杨水桶曝气或者生态调度^[29]等措施,减少库区营养盐的贮存。日溪入口和皇帝洞溪水质较差,可种植水生植物、设置生态浮岛或合理投放草食性和滤食性鱼类^[30]进行生态修复。(3)氮磷联合削减,磷污染优先。氮磷污染有不同的关键源区,应在流域尺度上研究规划氮磷污染联合控制方案,以全面改善水质。磷通常是淡水生态系统的限制因子^[31],应优先削减。随着社会经济发展和农业结构调整,山仔流域的氮磷污染结构呈现磷偏高、氮磷比值降低的趋势。从减少水华发生概率的角度,宜提高水体氮磷比值至磷的强限制状态,因此要优先控制富含磷污染的畜禽养殖和磷肥流失,紧临库区的日溪、皇帝洞溪、霍口溪中下游是重点治理区域。

4 结论

本文提出将流域、河流到库区作为整体的面源污染量化研究的思路,初步建立了流域氮磷输出、河流输送和入库量的分析方法,完成福建省山仔水库的案例应用,但需要今后更多的实测资料对相关系数和方法加以修正和验证。山仔流域氮污染主要来自生活污水和化肥流失(64%),磷污染主要来自畜禽养殖和生活污水(90%)。河流输入占库区氮、磷负荷的 62%和 89%,对库区富营养化起决定性影响。日溪乡和霍口乡临近库区,化肥流失与畜禽养殖污染最重,上游乡

镇污染较轻,但生活污染比重大(42%~84%)。皇帝洞溪子流域畜禽养殖污染严重,其次是霍口干流段和日溪子流域。库区水质有明显分区,与流域污染、河流输送和库区沉积物的释放相关联。库区氮磷比值在 15~20 之间,生态系统处于磷的弱限制,水华爆发风险较大,建议采取“分区整治流域污染、氮磷联合控制,畜禽养殖和磷肥流失优先削减”的富营养化防控策略。

参考文献:

- [1] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(5917): 1014–1015.
- [2] Nixon S W. Eutrophication and the macroscope[J]. *Hydrobiologia*, 2009, 629(1): 5–19.
- [3] Chen N W, Hong H S. Integrated management of nutrients from the watershed to coast in the subtropical region[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(2): 233–242.
- [4] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, et al. Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7(3): 737–750.
- [5] 陈能汪, 章颖瑶, 李延凤. 我国淡水藻华长期变动特征综合分析[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1994–1998.
CHEN Neng-wang, ZHANG Ying-yao, LI Yan-feng. An integrated analysis of dynamic characteristics of harmful algal bloom in fresh water in China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(8): 1994–1998.
- [6] QIN B Q, YANG L Y, CHEN F Z, et al. Mechanism and control of lake eutrophication[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(19): 2401–2412.
- [7] Qin B Q. Lake eutrophication: Control countermeasures and recycling exploitation[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(11): 1569–1573.
- [8] Harris T. Eutrophication of lakes and reservoirs in the United-Kingdom—cause, effects and controls[J]. *Geography*, 1995, 80(346): 60–71.
- [9] Smith V H, Schindler D W. Eutrophication science: Where do we go from here?[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(4): 201–207.
- [10] Paerl H W. Controlling eutrophication along the freshwater—marine continuum: Dual nutrient(N and P) reductions are essential[J]. *Estuaries and Coasts*, 2009, 32(4): 593–601.
- [11] Wang H J, Wang H Z. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(10): 1445–1451.
- [12] 苏玉萍, 陈娜蓉, 林婉珍, 等. 福建省山仔水库浮游植物特征与水体富营养状况分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2006, 1(2): 49–51.
SU Yu-ping, CHEN Na-rong, LIN Wan-zhen, et al. Analysis of phytoplankton characteristic and eutrophication in Shanzai Reservoir, Fujian Province [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2006, 1(2): 49–51.
- [13] 王菲凤, 全川, 杨芳, 等. 福州山仔水库水华微囊藻毒素时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 533–546.
WANG Fei-feng, TONG Chuan, YANG Fang, et al. Spatial and temporal distribution of microcystins in the Fuzhou Shanzai Reservoir[J]. *Ac-*

ta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(3): 533–546.

- [14] 钟厚璋, 苏玉萍, 何灵, 等. 杜塘水库春季沉积物内源磷的释放速率研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2010, 26(6): 85–91.
ZHONG Hou-zhang, SU Yu-ping, HE Ling, et al. Phosphorus release in the sediment of Dutang Reservoir in spring [J]. *Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition)*, 2010, 26(6):85–91.
- [15] Zhang H P, Zhu Y P, Li F P, et al. Nutrients in the wet deposition of Shanghai and ecological impacts[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, 36(9–11): 407–410.
- [16] 陈能汪, 洪华生, 张珞平. 九龙江流域大气氮湿沉降研究[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 38–46.
CHEN Neng-wang, HONG hua-sheng, ZHANG Luo-ping. Wet deposition of atmospheric nitrogen in Jiulong River Watershed[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 38–46.
- [17] 樊敏玲, 王雪梅, 王茜, 等. 珠江口横门大气氮、磷干湿沉降的初步研究[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 51–56.
FAN Min-ling, WANG Xue-mei, WANG Qian, et al. Atmospheric deposition of nitrogen and phosphorus into the Hengmen of Pearl River Estuary[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(1): 51–56.
- [18] 宋玉芝, 秦伯强, 杨龙元, 等. 大气湿沉降向太湖水生生态系统输送氮的初步估算[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 226–230.
SONG Yu-zhi, QIN Bo-qiang, YANG Long-yuan, et al. Primary estimation of atmospheric wet deposition of nitrogen to aquatic ecosystem of Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(3): 226–230.
- [19] 余辉, 张璐璐, 燕姝雯, 等. 太湖氮磷营养盐大气湿沉降特征及入湖贡献率[J]. 环境科学研究, 2011, 24(11): 1210–1219.
YU Hui, ZHANG Lu-lu, YAN Shu-wen, et al. Atmospheric wet deposition characteristics of nitrogen and phosphorus nutrients in Taihu Lake and contributions to the Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(11): 1210–1219.
- [20] Paerl H W, Dennis R L, Whitall D R. Atmospheric deposition of nitrogen: Implications for nutrient over-enrichment of coastal waters[J]. *Estuaries*, 2002, 25(4B): 677–693.
- [21] Clark H, Kremer J N. Estimating direct and episodic atmospheric nitrogen deposition to a coastal waterbody[J]. *Marine Environmental Research*, 2005, 59(4): 349–366.
- [22] 国务院第一次全国污染源普查领导小组办公室. 《第一次全国污染源普查城镇生活源产排污系数手册》[EB/OL]. <http://cpse.mep.gov.cn/>. 2008–08.
- The first national pollution source census leading group office of the state council. Discharge coefficient manual of the first national census of domestic source pollution[EB/OL]. <http://cpse.mep.gov.cn/>. 2008–08.
- [23] Chen N W, Peng B R, Hong H S, et al. Nutrient enrichment and N:P ratio decline in a coastal river–bay system in Southeast China: The need for a dual nutrient(N & P) management strategy[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2013, 81(SI):7–13.
- [24] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2): 148–153.
LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi, et al. Pollutants sources and their discharging amount in Taihu Lake area of Jiangsu Province [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(2): 148–153.
- [25] Ma X, Li Y, Zhang M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 412: 154–161.
- [26] Fujimoto N, Sudo R, Sugiura N, et al. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(2), 250–256.
- [27] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green-algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, 221(4611): 669–671.
- [28] 苏玉萍, 郑达贤, 林婉珍, 等. 福建省富营养化水库沉积物磷形态及对水体的贡献[J]. 湖泊科学, 2005, 17(4): 311–316.
SU Yu-ping, ZHENG Da-xian, LIN Wan-zhen, et al. Phosphorus forms in sediment and the release potential of phosphorus to water in eutrophic Shanzai Reservoir, Fujian Province[J]. *Journal of Lake Science*, 2005, 17(4): 311–316.
- [29] 贾海峰, 程声通, 丁建华, 等. 水库调度和营养物消减关系的探讨[J]. 环境科学, 2001, 22(4): 104–107.
JIA Hai-feng, CHENG Sheng-tong, DING Jian-hua, et al. Relationship between eutrophication control and reservoir operation[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(4): 104–107.
- [30] 曹溪禄. 孤东水库水体富营养化评价及其生态控制研究[J]. 环境科学, 2011, 32(8): 991–994.
CAO X L. Evaluation and ecological control of the eutrophic state of Gudong Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 991–994.