

高州水库集水区污染源分布特征及污染负荷研究

周文婷^{1,2}, 邵瑞华¹, 马千里², 赵学敏², 王 丽², 许振成², 曾海龙²

(1. 西安工程大学环境与化学学院, 陕西 西安 710000;

2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

摘要:为探究高州水库集水区的污染状况,根据2008年污染源的调查结果,利用排污系数法和输出系数法,结合现场资料调查,分别对该地区点源和非点源污染负荷(COD、NH₃-N、TN、TP)进行估算,并应用地理信息系统(GIS)技术对集水区污染源空间分布特征及来源构成进行分析。结果表明,高州水库集区内COD、NH₃-N、TN、TP污染物输出总量分别为8192.83、394.13、1137.38、94.29 t/a,其中非点源污染COD、NH₃-N、TN、TP输出量为7114.79、336.91、1060.21、88.08 t/a,占污染物输出总量的比例分别为87%、85%、93%、93%。COD、TN和TP均以农林种植源排放为主,占总输出量的比例分别为50%、52%、50%。NH₃-N以农村生活源排放为主,占总输出量的比例为63%。在空间分布上,每年不同乡镇单位面积COD、NH₃-N、TN、TP的负荷强度分别为47.08~144.63、2.43~5.24 kg/hm²、6.70~20.34 kg/hm²、0.60~1.73 kg/hm²,其中此4项指标的污染负荷强度均以临近库区的平山镇最高。在来源构成上,集水区各镇COD、NH₃-N、TN、TP污染负荷的70%~94%来源于非点源。为保护高州水库水环境,应将集区内非点源(农村生活、散养畜禽、农林种植)作为重点控制源,同时根据其空间分布特征进行分区防治,重点防控区域为平山镇。

关键词:高州水库;非点源;污染负荷强度;地理信息系统

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2017)03-0023-09

水体富营养化是国内外密切关注的环境问题,点源和非点源污染物中氮磷等营养物质大量进入水体是造成富营养化的重要原因(Chang et al, 2004; Schaffner et al, 2009; Zhang et al, 2011)。点源污染具有污染集中、污染性大、破坏性强、相对容易控制的特点;而非点源污染具有分散性、隐蔽性、随机性、不确定性、潜伏性、累积性和模糊性等特点(Sun et al, 2009),因此非点源污染更不易监测,研究和防控的难度较大(Hong et al, 2012; 李发荣等, 2014)。近年来国内外在河流、湖泊和水库等水环境保护方面,已开展了大量关于非点源污染负荷的研究。在美国农业非点源污染是河流第一大污染源,农业径流污染已经超过污染总量50%(EPA, 2009);荷兰的水环境污染中60% TN和40%~50% TP是由农业非点源污染引起的(Boers et al, 1996)。我国非点源污

染是造成很多流域水体富营养化的主要影响因素,如青岛地区非点源污染COD和TN负荷分别达到70%和60%(Su et al, 2014);洱海流域农业非点源污染TN的贡献率为66%(Zhai et al, 2012);密云水库流域非点源污染COD、NH₃-N、TN、TP分别占水库污染总负荷的70%、90%、70%、90%(黄生斌等, 2008);宝象河流域非点源氮、磷污染所占比例分别为74%和68%(任玮等, 2015);长江流域农业非点源TP和TN污染的贡献率分别达到了86%和77%(Wang et al, 2011)。以上开展的流域范围内的污染负荷相关研究,对于掌握影响水环境质量主要污染来源以及采取适宜的控制措施具有重要意义。

高州水库是广东省茂名市唯一饮用水源地,对高州、化州、电白、吴川和茂南、茂港等区域社会和经济的发展至关重要。水库集水区各镇大多属高州市北部山区镇,耕地面积少,山地占土地面积的70%以上。库区群众为了发展经济,提高生活水平,在库区进行大量的开垦活动,种植了大量的荔枝、龙眼、香蕉和胡椒等一系列经济作物。近年来随着集区内经济的发展、农业生产方式的转变等导致水库富营养化程度加剧(姚玲爱等, 2011)。2009年与2010年高州水库连续2年春季暴发蓝藻水华,严重威胁了饮用水安全。本文结合2008年高州市统计年鉴

收稿日期:2016-05-12

基金项目:环保公益性行业科研专项(201509027);国家自然科学基金青年基金(41401115);广东省科技计划(2014A020216017);广东省科技计划(2014A040401037)。

作者简介:周文婷,1990年生,女,硕士研究生,研究方向为水污染控制。E-mail:1572408815@qq.com

通信作者:赵学敏,1981年生,女,研究员,主要从事水生态风险评估研究。E-mail:zhaoxuemin@scies.org

和基础调查资料,对高州水库集水区流域污染负荷估算,并且对集水区污染负荷空间分布状况进行分析,以探明集水区污染源现状,为集水区采取污染防治行动、实施污染物削减的具体工程措施以及生态恢复措施、保护高州水库水环境提供重要支撑作用;同时也可为其它同类型流域污染源研究积累资料,以期为全国同类型流域的水环境管理提供科学依据。

1 区域概况

高州水库位于广东省西部、高州市东北部(21°58′~22°19′N;110°59′~111°23′E),属于典型的北热带和南亚热带过渡的季风区,库区年平均温度为21.8℃,年平均降水量1 938.8 mm,雨量充沛,主要集中在4~9月,其雨量约占全年的85%。水库集水面积1 022 km²,包括马贵、大坡、古丁、深镇、平山5个镇和东岸、长坡2镇的部分区域,水库直接入库河流主要有朋情河、古丁河、深镇河。研究区域高州水库位置见图1。

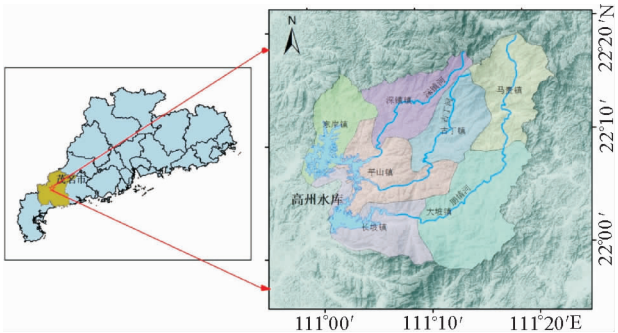


图1 研究区域
Fig.1 Location of the research area

2 研究方法

2.1 数据来源

高州水库集水区的点源污染包括工业生产、城镇生活、规模畜禽;非点源污染包括农村生活、散养

畜禽、农林种植。点源污染负荷采用排污系数法,调查资料包括2008年集水区工业企业废水排放量及污染物排放系数,城镇人口数及生活污水中污染物排放系数,规模化养殖畜禽出栏/存栏量、养殖污水中污染物排放系数等。非点源污染负荷采用输出系数法,调查资料包括污染物输出系数、2008年集水区各镇的农村人口数量以及猪、家禽数量、各乡镇的土地利用情况和植被覆盖数据。数据来源:(1)污染物排放系数及输出系数,主要通过查阅国内相关资料及文献(应兰兰等,2010;吴一鸣等,2012;周亮等,2013;孙秀秀等,2015)并结合高州水库集水区实际情况确定;(2)2008年库区内各镇的城镇人口数量、工业企业年废水排放量、农村人口数量、猪、牛、家禽数量以及各乡镇的土地利用情况和植被覆盖数据主要参考《2008年高州市地区统计年鉴》和茂名市人民政府印发的《高州水库污染防治与生态恢复规划》。2008年高州水库集水区各乡镇的基本情况统计见表1。

2.2 排污系数与输出系数的取值

工业污染物排污系数通过参考《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》和相关文献(杨龙元等,2013)确定;城镇生活污染物排污系数参考《第一次全国污染源普查城镇生活污染源排放系数手册资料》和相关文献确定;规模化畜禽养殖源强系数参考《第一次全国污染源普查畜禽养殖业产排污系数手册》和相关文献(杨飞等,2013)确定。点源污染物的产排污系数见表2。

输出系数法的关键是输出系数的确定,而流域内的地形地貌、水文、气候、土壤特征、土地利用结构、植被、管理措施以及人类活动等对污染物输出系数影响较大(Liu et al,2004;Yong et al,2006)。因此估算集水区污染负荷时必须先确定某种土地利用类型下的污染物输出系数。本研究中集水区非点源污染来源主要有农林种植、散养式畜禽养殖和

表1 2008年高州水库集水区土地利用、畜禽养殖及人口情况统计

Tab.1 Land area, livestock breeding and population in the watershed of Gaizhou Reservoir in 2008

镇名	林地/ 万 hm ²	耕地/ 万 hm ²	园地/ hm ²	经济林/ 万 hm ²	猪/ 万头	牛/ 头	家禽/ 万羽	农村人口/ 万	城镇人口/ 万	工业/ 家
长坡	0.15	0.04	2513	0.12	0.21	1620	5.96	3.18	0.12	8
大坡	0.04	0.13	—	0.07	0.25	502	3.97	7.15	0.35	14
东岸	0.04	0.04	42	0.10	0.41	980	4.90	2.09	0.15	2
古丁	0.72	0.07	99	0.04	0.10	1090	0.68	3.23	0.19	1
马贵	1.14	0.10	—	0.17	0.20	980	7.64	3.48	0.18	3
平山	0.15	0.05	5035	0.40	1.20	1056	6.94	3.76	0.35	4
深镇	0.02	0.09	97	0.12	0.19	580	4.00	2.51	0.56	2
合计	2.27	0.52	7786	1.03	2.57	6808	34.10	25.67	1.63	34

表 2 点源污染物产排污系数

Tab. 2 Pollution discharge coefficients of point source pollution

污染源	类别	产污系数				排污系数			
		COD	NH ₃ -N	TN	TP	COD	NH ₃ -N	TN	TP
工业生产	生产废水					347.00	0.25	—	—
城镇生活	生活污水 生活垃圾	25.19	2.96	4.27	0.35	20.40	2.90	3.58	0.30
规模畜禽	猪粪 猪尿	123.30	1.40	9.30	1.17	12.70	0.59	2.60	0.17

注:由于不同行业产排污系数不同,本研究共调查到工业污染源 34 家,排污系数是根据 34 家不同行业产生的废水比重进一步算出其加权平均排污系数,工业生产排污系数单位 kg/t;城镇生活、规模畜禽产排污系数单位 kg/a;城镇生活是生活污水和生活垃圾的平均值,规模畜禽产排污系数是猪粪和猪尿的平均值,单位 kg/a。其中畜禽养殖参照杨飞等(2013)的方法,将其它主要畜禽数量折合为当量猪数量。

Note: Due to different coefficients of pollution discharge in different industries, 34 industrial pollution sources were investigated in this study. The wastewater coefficient was calculated according to the proportion of wastewater produced by 34 different industries. The unit of industrial production coefficient was kg/t; Life, size of livestock and poultry production of sewage coefficient was kg/a; Urban life was the average of domestic sewage and domestic waste, the scale of livestock and poultry production wastewater coefficient was the average of pig manure and pig urine, kg/a. Livestock and poultry breeding with reference to Yang Fei et al (2013), the number of other major livestock was converted to equivalent number of pigs.

农村生活污水及生活垃圾等。

通过参考国内相似自然条件下的其他地区研究结果,结合高州水库集水区耕作方式和人类活动等实际情况,最终确定不同土地利用类型的输出系数。散养畜禽和农村生活污染物输出系数根据《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》、《第一次全国污染源普查城镇生活污染源排放系数手册资料》及相关文献(刘爱萍等,2011)确定。集水区非点源污染输出系数见表 3。

表 3 高州水库集水区非点源污染输出系数

Tab. 3 Export coefficient of non-point source pollution in the watershed of Gaozhou Reservoir

污染源	类别	输出系数的取值			
		COD	NH ₃ -N	TN	TP
农林种植	水田	148.57	2.47	20.95	1.49
	旱地	159.31	2.30	16.83	1.47
	果园	113.48	2.06	22.06	1.67
	香蕉	187.64	3.53	40.67	4.29
	其他经济林	78.95	1.40	11.59	1.53
散养畜禽	猪尿粪	14.80	0.17	1.12	0.14
农村生活	生活污染物	4.89	1.19	1.57	0.11

注:农林种植污染物输出系数单位为 kg/(hm²·a),畜禽养殖、农村生活污染物输出系数单位为(kg/a)。其中畜禽养殖参照杨飞等(2013)的方法,将其他主要畜禽数量折合为当量猪数量,即 1 头牛等于 13.55 头当量猪,1 只家禽等于 0.06 头当量猪。猪的污染物输出系数是猪粪和猪尿的均值,农村生活污染物输出系数是生活污水和生活垃圾的均值。

Note: The unit of export coefficient in agricultural and forestry planting was kg/(hm²·a), the export coefficient of livestock and poultry breeding and rural living pollutants was kg/a. One livestock and poultry breeding referenced methods of Yang et al (2013), the number of other major livestock and poultry was obtained according to the equivalent number of pigs, namely 1 cattle was equal to 13.55 pigs, 1 bird was equal to 0.06 pigs. The export coefficient of pig pollutants was the mean value of pig manure and pig urine. The export coefficient of rural life pollutants was the average of domestic sewage and domestic garbage.

2.3 计算方法

点源污染负荷估算利用排污系数法,点源污染物中工业污染、城镇生活污染和规模化畜禽养殖污染负荷的具体核算方法参照文献(李慧菁等,2015)。非点源污染负荷估算采用输出系数法,输出系数法的表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} A_i + P$$

式中: L_j 为污染物 j 在研究区中的总负荷 [kg/(hm²·a)]; E_{ij} 为污染物 j 在第 i 种土地利用类型中的输出系数[kg/(hm²·a)]或第 i 种牲畜的排泄系数(kg/a)、人均输出系数(kg/a); A_i 为第 i 种土地利用类型的面积(hm²)或第 i 种牲畜数量(头)、人口数量(人); j 为污染物类型; i 为流域中土地利用类型的种类或者牲畜、人口类型,共有 m 种污染类型; P 为降雨输入的污染物总量[kg/(hm²·a)],不考虑此项的影响。

3 结果与分析

3.1 集水区内污染负荷输出总量及比例

通过集水区内点源与非点源污染负荷估算,得到 2008 年集水区内污染物负荷输出总量。由图 2-a 可知,污染物 COD、NH₃-N、TN、TP 输出总量分别为 8 192.33、394.13、1137.38、94.29 t/a。其中非点源污染 COD、NH₃-N、TN、TP 输出量分别为7 114.79、336.91、1060.21、88.08 t/a,分别占集水区污染物总量的 87%、85%、93%、93%。由图 2-b 可知,农林种植是 COD、TN、TP 的主要污染源,贡献率分别为 50%、52%、50%;农村生活污染是 NH₃-N 的主要污染源,贡献率为 63%;工业生产和城镇生活对各类污染物有一定贡献,但是贡献率较低。

3.2 集水区各镇污染负荷输出量

由图3可知,高州水库集水区各乡镇中农林种植对COD贡献率最高,其次是散养畜禽。农林种植COD输出量以平山镇最高,达到了1428.27 t/a,大坡、长坡、马贵次之,输出量分别为812.29、630.5、512.72 t/a。散养畜禽COD输出量以平山镇最高,达到了422.42 t/a,大坡、东岸、马贵次之,输出量分别为403.93、296.44、284.86 t/a。点源方面以工业生产对COD贡献率最高,工业生产COD输出量以大坡镇最高,达到了593 t/a,其它各镇工业生产COD输出量均很小。农村生活对NH₃-N的贡献率最大,其次是农林种植和城镇生活。农村生活NH₃-N输出量以大坡镇最高,达到69.12 t/a,平山、

古丁镇次之,输出量分别为36.35、33.69 t/a。其它各镇对NH₃-N均有一定贡献率,但贡献率都相差不大。农林种植NH₃-N输出量以平山镇最高,达到23.32 t/a,大坡、长坡次之,输出量分别为13.33、9.87 t/a。畜禽养殖和工业生产对NH₃-N的贡献率均较小。

农林用地对TN、TP的贡献率最大,其次是农村生活,畜禽养殖和城镇生活对TN、TP的贡献率较小。农林用地TN、TP输出量以平山镇最高,分别达到了197.76、16.31 t/a,大坡、长坡、马贵次之,其他乡镇对TN、TP的贡献率较小。农村生活TN、TP输出量以大坡镇最高,分别达到了90.90、6.34 t/a,其他乡镇农村生活对TN贡献率相差不大。

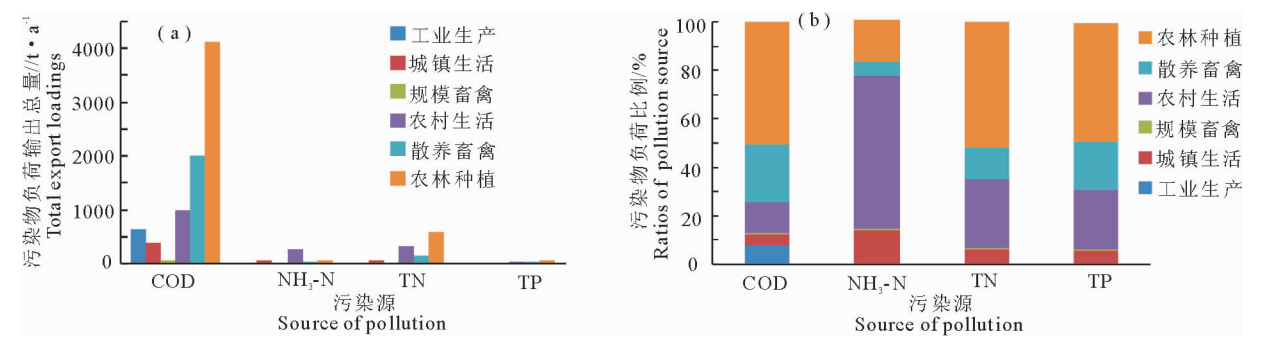


图2 高州水库集水区污染源污染负荷输出总量(a)及比例(b)

Fig.2 Total pollution loads(a) and ratios of point and non-point source pollution(b) in Gaozhou Reservoir

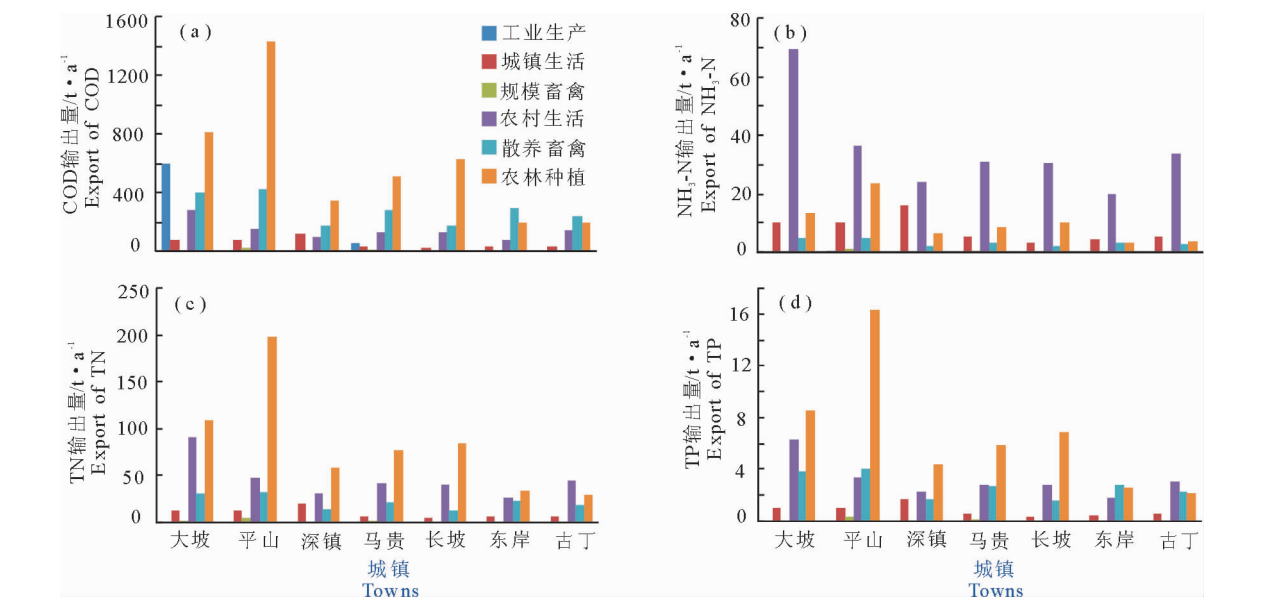


图3 高州水库集水区各镇COD(a)、NH₃-N(b)、TN(c)和TP(d)输出量

Fig.3 Pollution loads of COD(a), NH₃-N(b), TN(c) and TP(d) in different towns of Gaozhou Reservoir watershed

3.3 集水区污染源空间分布和关键源区

基于集水区各乡镇的污染输出负荷估算结果,分析高州水库污染源空间特征和关键源区,其中以乡镇为单元的污染和来源构成有明显的空间差异。

由图4可知,2008年集水区范围内不同镇单位面积COD负荷强度为47.08~144.63 kg/hm²,NH₃-N负荷强度2.43~5.24 kg/hm²,TN负荷强度6.70~20.34 kg/hm²,TP负荷强度0.60~1.73 kg/hm²。

其中临近库区的平山镇,农林种植和畜禽养殖污染最重,单位面积 COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷强度最高,分别为 144.64、5.24、20.34、1.73 kg/hm²,其次是深镇镇和大坡镇。深镇镇 COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷强度分别为 72.18、4.77、11.97、0.96 kg/hm²,大坡镇 COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷强度分别为 91.77、4.13、10.28、0.84 kg/hm²。从来源构成上来看,非点源污染是各镇的主要污染源,集水区内各镇 70% ~ 94% 的污染负荷是来自非点源。

非点源污染中,农林种植和散养畜禽占集水区各镇 COD、TN、TP 负荷比例较大(50% ~ 88%),非点源污染中农村生活是各镇 NH₃-N 主要污染源(47% ~ 73%)。点源污染中工业生产、城镇生活和规模畜禽对各镇 COD、NH₃-N、TN、TP 有一定的负荷,但贡献率均较小。因此,在控制管理污染源时,应将集水区内非点源(农村生活、散养畜禽、农林种植)作为重点控制源,同时根据其空间分布特征进行分区防治,重点防治控制区为平山镇。

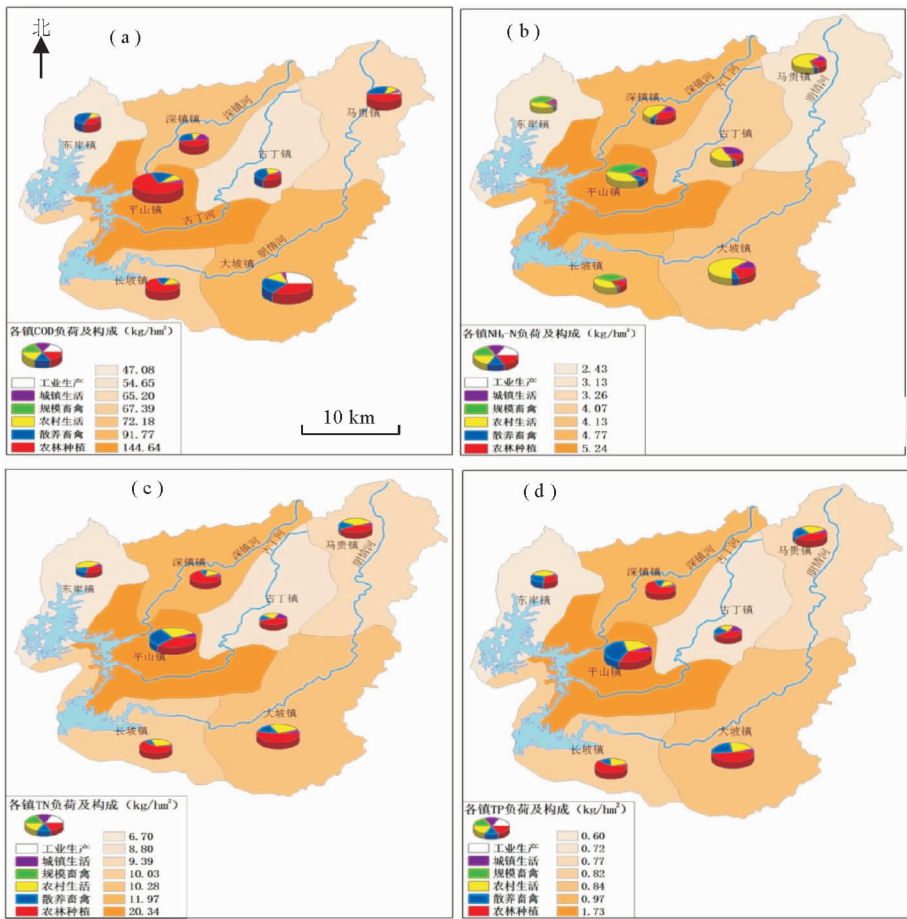


图 4 集水区各镇 COD(a)、NH₃-N(b)、TN(c)和 TP(d)的空间分布及来源构成

Fig. 4 Spatial distribution and pollution source composition of COD(a), NH₃-N(b), TN(c) and TP(d) loading in the Gaozhou Reservoir watershed

4 讨论

4.1 库区内污染源负荷及来源构成分析

随着我国各地点源污染治理程度的不断强化,非点源成为主要的污染源(Wu et al,2012; Lu et al, 2014)。与国内其他区域污染负荷相比(表 4),高州水库集水区 COD、NH₃-N 污染负荷高于西苕溪流域和密云水库,NH₃-N 负荷低于太湖的七浦塘河流域;TN 污染负荷高于其它流域污染负荷;TP 污染负荷

量介于西苕溪流域及密云水库之间,高于宝象河流域及天目湖沙河水库。高州水库集水区非点源污染物 COD、NH₃-N、TN、TP 占总排放量的比例达到 86.84%、85.48%、93.21%和 93.41%,与其他流域相比,非点源污染严重;其中农林种植、散养畜禽、农村生活是造成非点源污染严重的主要原因。

高州水库集雨区范围内的各镇多数位于山区,山地面积占土地面积的 70% 以上,有的甚至占 90% 以上,果林种植是集水区居民主要收入来源。2008

年集水区内林地 2.27 万 hm^2 、耕地 0.5 万 hm^2 ；林地多种植杉木、桉树、松树、荔枝龙眼等，耕地多种植香蕉、各种杂果等经济作物，耕地 COD 输出系数较大，为 $187.64 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，因此耕地 COD 输出量也较高。2008 年高州水库集水区内施用化肥 58 661 t、农药 374 t，在降雨集中期，不合理的施肥方式造成大量的 N、P 流失(刘俏等,2014)。因此库区内农林种植是造成 COD、TN、TP 负荷的主要来源。此结果与浙江西苕溪(吴一鸣等,2012)、三峡库区等流域(蔡金洲等,2012)的研究结论相似。

研究表明，畜禽养殖是 COD 的主要贡献污染源(周亮等,2013)，COD 污染负荷与畜禽养殖密度显著相关(王雪蕾等,2015)。高州水库集水区内畜禽养殖规模较大，主要包括散养畜禽和规模畜禽，其中以散养畜禽为主，2008 年集水区内养殖生猪 2.57 万头，牛 6808 头，家禽 34.10 万羽，其中平山镇所占比

例最大。在散养模式中畜禽污染物直接排入水体中，而畜禽废物 COD 输出系数较高。因此畜禽养殖是集水区内非点源污染 COD 负荷的又一重要来源，对 COD 的污染贡献仅次于农林种植。

有研究发现， $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染负荷与人口密度显著相关(王雪蕾等,2015)；海河流域中农村居民生活源 $\text{NH}_3\text{-N}$ 排放量占流域排放总量的 98%，成为流域中最主要的污染来源和控制对象(邱斌等,2012)。高州水库集水区内农村人口约 26.7 万，占比较大(约占 94%)，农村生活污水和农村生活垃圾产生量均较大，由于缺乏有效管理，污水随意排放及垃圾乱堆现象严重。生活污水及垃圾中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较高，直接导致 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷量迅速增加。2008 年集水区农村生活的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 输出量为 244.99 t/a ，占总输出量的 63%。由此可知，我国很多流域农村生活污染是水体 $\text{NH}_3\text{-N}$ 负荷的主要来源。

表 4 不同水体的 COD、NH₃-N、TN、TP 负荷对比

Tab. 4 Comparison of COD, NH₃-N, TN and TP pollution loads in different watersheds

名称	污染物类型	污染负荷/t · a ⁻¹	非点源污染/t · a ⁻¹	占比/%	资料来源
西苕溪流域	COD	3109.54	2236.12	71.9	吴一鸣等,2012
	NH ₃ -N	350.70	82.90	23.6	
	TN	143.87	1007.22	70.1	
	TP	93.52	78.11	83.5	
宝象河流域	TN	619.70	459.60	74.2	任玮等,2015
	TP	50.20	34.10	68.0	
太湖(七浦塘)	COD	888.79	748.10	84.2	Huang et al,2012
	NH ₃ -N	484.85	422.30	87.1	
天目湖沙河水库	TN	321.64	275.64	85.7	李恒鹏等,2013
	TP	13.42	9.06	67.5	
密云水库	COD	2758.76	2012.60	93.6	王晓燕等,2003
	NH ₃ -N	167.44	156.75	93.6	
	TN	664.25	495.35	74.6	
	TP	102.56	96.15	93.8	
高州水库	COD	8192.33	7114.79	87.0	本研究
	NH ₃ -N	394.13	336.91	85.0	
	TN	1137.38	1060.21	93.0	
	TP	94.29	88.08	93.0	

4.2 库区污染源负荷空间分布特征分析

高州水库集水区内污染源分布呈现明显的空间差异，2008 年不同镇的 COD、NH₃-N、TN、TP 负荷强度范围分别为 47.08 ~ 144.63、2.43 ~ 5.24、6.70 ~ 20.34、0.60 ~ 1.73 kg/hm^2 ，其中平山镇的 COD、NH₃-N、TN、TP 单位面积负荷强度最高，分别为 144.64、5.24、20.34、1.73 kg/hm^2 。主要原因是平山镇经济林和园地占地面积广，每年单位面积农药和化肥使用量相对较高，家畜家禽分布密度及单位面积人口相对较高。因此，根据空间分布特征进行分区防治，重点防治控制区为平山镇。东岸镇

COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷强度最低，其负荷强度分别为 47.08、2.43、6.70、0.60 kg/hm^2 ，主要是由于该镇仅有部分面积在集水区内，工业废水产排放量较低，人口密度和果林占地面积较其它各镇最低，单位面积农药和化肥使用量相对较低。集水区内长坡、大坡、深镇、马贵以及古丁镇的农林种植面积、家禽家畜分布密度、人口密度均相差不大，所以 COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷强度较为接近。

4.3 污染物减排与水体富营养化防控策略

高州水库是茂名市重要的饮用水源，但近年来水质下降呈现轻度富营养化状况(周杨等,2011；苟

婷等,2014),2009 年和 2010 年曾发生过蓝藻水华威胁供水安全的问题。加强集水区内污染防治,从源头削减与控制污染物,对于防范高州水库富营养化、保障水源安全具有十分重要的意义。为此,本研究提出如下流域污染物减排与水体富营养化防控策略:

(1)强化各镇畜禽养殖控制。调整畜牧业布局,以集约化、规模化经营为主,实现畜牧业区域布局集中化,配套无害化处理设施,减少畜禽污染物排放。同时根据集水区农业种植对畜禽废物的消纳能力,科学合理地确定畜禽养殖量和养殖规模,实现畜禽养殖废弃物产生与农业种植需肥在时间和空间上的匹配,最大限度减少废弃物处理压力。

(2)加强集水区农业污染控制。改进粗放的农业耕作方式,推广生态农业耕作方法,进行农业产业结构调整,减少集水区内化肥和农药使用。

(3)加强各镇农村生活污水污染控制。结合集水区内目前各镇污水处理现状、人口密度、排水特点、流域经济发展规划及污染控制总体要求,建议加强各乡镇生活污水处理管网建设。如将截污管网分解为 7 个收集片区,集水区内 7 个镇单独铺设截污干管,分别收集各集镇生活污水,采用深度处理生活污水处理技术,将乡镇生活污水集中处理,达标排放。

(4)加强对水库的 3 条入库河流深镇河、古丁河和朋情河的监管。由于污染物会随地表径流沿途汇入河流,并最终输送到受纳水体(Yan et al, 2011),成为水库、湖泊等受纳水体污染物的直接贡献源,影响水环境质量,因此应严禁将生产、生活废水未经处理直接排入河中,同时禁止堆放生活垃圾在河流沿岸。

5 结论

(1)高州水库集水区内 COD、NH₃-N、TN、TP 输出总量为 8192.33、394.13、1137.38、94.29 t/a。其中非点源污染 COD、NH₃-N、TN、TP 的输出量为 7114.79、336.91、1060.21、88.08 t/a,分别占集水区污染物总量的 87%、85%、93%、93%。所以库区内非点源(农村生活、散养畜禽、农林种植)是主要污染源。

(2)农林种植是 COD、TN、TP 的主要污染源,贡献率分别为 50%、52% 和 50%,农村生活污染是 NH₃-N 的主要污染源,贡献率为 63%。

(3)在空间分布上,种植及畜禽养殖业最发达

的平山镇污染最为严重,COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷强度最高,分别为 144.64、5.24、20.34、1.73 kg/hm²。在来源构成上,集水区各镇 COD、NH₃-N、TN、TP 污染负荷 70%~94% 来源于非点源,应将非点源(农村生活、散养畜禽、农林种植)作为重点控制源,同时需要根据其空间分布特征进行分区防治,重点防治控制区为平山镇。

综上所述,通过对高州水库集水区点源和非点源污染的统计学分析,初步掌握了该集水区主要污染物、污染源的空间分布特征,为深层次地认识库区及河流污染状况提供了基础数据,为流域环境整治和水污染防治提供决策依据;同时为其它同类型流域污染源研究积累资料,为水环境管理提供技术支撑。

参考文献

- 蔡金洲,范先鹏,黄敏,等,2012. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报, 31(7):1421-1430.
- 苟婷,李思阳,许振成,等,2014. 高州水库沉积物中总氮与总磷的分布特征研究[J]. 环境科学与管理,39(7):31-35.
- 黄生斌,叶芝菡,刘宝元,2008. 密云水库流域非点源污染研究概述[J]. 中国生态农业学报,16(5):1311-1316.
- 李发荣,邱学礼,周璟,等,2014. 滇池东南岸农业和富磷区入湖库流地表径流及污染特征[J]. 中国环境监测, 30(6):93-101.
- 李恒鹏,陈伟民,杨桂山,等,2013. 基于湖库水质目标的流域氮、磷减排与分区管理-以天目湖沙河水库为例[J]. 湖泊科学, 25(6):785-798.
- 李慧菁,贾尔恒·阿哈提,程艳,2015. 乌伦古湖流域污染负荷估算[J]. 环境工程技术学报, 5(2):121-128.
- 刘爱萍,刘晓文,陈中颖,等,2011. 珠江三角洲地区城镇生活污染源调查及其排污总量核算[J]. 中国环境科学, 31(S1):53-57.
- 刘俏,张丽萍,胡响明,等,2014. 红壤丘陵区经济林坡地氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 28(3):185-190.
- 庞燕,项颂,储昭升,等,2015. 基于 GIS 的洱海农村生活污水及其 TN 产排强度空间分析及控制对策[J]. 环境科学学报,35(10):3344-3352.
- 邱斌,李萍萍,钟晨宇,等,2012. 海河流域农村非点源污染现状及空间特征分析[J]. 中国环境科学,32(3):564-570.
- 任玮,代超,郭怀成,2015. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算[J]. 中国环境科学, 35(8):2400-2408.
- 孙秀秀,包丽颖,郁亚娟,等,2015. 哈尔滨地区农业面源污

- 染负荷估算与分析[J]. 安全与环境学报, 15(5):300-305.
- 王晓燕,郭芳,蔡新广,等,2003. 密云水库潮白河流域非点源污染负荷[J]. 城市环境与城市生态, 16(1):31-33.
- 王雪蕾,吴传庆,冯爱萍,等,2015. 利用DPeRS模型估算巢湖流域氨氮和化学需氧量的面源污染负荷[J]. 环境科学学报, 35(9):2883-2891.
- 吴一鸣,李伟,余昱葳,等,2012. 浙江省安吉县西苕溪流域非点源污染负荷研究[J]. 农业环境科学学报, 31(10):1976-1985.
- 杨飞,杨世琦,诸云强,等,2013. 中国近30年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J]. 农业工程学报, 29(5):1-11.
- 杨龙元,范成新,张路,2003. 太湖典型地区工矿企业废水中主要污染物排放特征研究:以江苏溧阳市为例[J]. 湖泊科学, 15(2):139-146.
- 姚玲爱,赵学敏,周广杰,等,2011. 广东省高州水库春季蓝藻水华成因初步探讨[J]. 湖泊科学, 23(4):534-540.
- 应兰兰,侯西勇,路晓,等,2010. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报, 21(6):90-95.
- 周亮,徐建刚,孙东琪,等,2013. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学, 34(2):547-554.
- 周杨,许振成,蔡立梅,等,2011. 高州水库水体富营养化评价与控制对策研究[J]. 环境科学与管理, 36(2):179-183.
- Boers, Paul C M, 1996. Nutrient Emission from Agriculture in the Netherlands: Causes and Remedies[J]. Water Science and Technology, 33(4/5):183-189.
- Chang M, Mcbroom M W, Beasley R S, 2004. Roofing as source of non-point water pollution[J]. Environmental Management, 73(4):307-315.
- EPA, 2009. National Water Quality Inventory: Report to Congress[R]. Tech Rep January.
- Hong Q, Sun Z, Chen L, et al, 2012. Small-scale watershed extended method for non-point source pollution estimation in part of the three Gorges Reservoir Region[J]. Environmental Science Technology, 9:595-604.
- Liu Q Q, Singh V P, 2004. Effect of microtopography, slope length and gradient and vegetative cover on overland flow through simulation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 9(5):375-382.
- Miao L, Chun L, Yu M, et al, 2014. Combining CLUE-S and SWAT models to forecast land use change and non-point source pollution impact at watershed scale in Liaoning Province, China[J]. Chinese Geographical Science, 24(5):540-550.
- Schaffner M, Bader H P, Scheidegger R, 2009. Modeling the contribution of point sources and non-point sources to Thachin River water pollution[J]. Science of the Total Environment, 407:4902-4915.
- Sun J H, Zhu Q D, Yan Z J, et al, 2009. A review of research and application of AGNPS model[J]. Advances in Water Science, 20(6):876-884.
- Su Y, Wang X L, Li K Q, et al, 2014. Estimation methods and monitoring network issues in the quantitative estimation of land-based COD and TN loads entering the sea: a case study in Qingdao City, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 21:10067-10082.
- Huang T Y, Wu W, Li W W, 2013. Identifying the major pollution sources and pollution loading status of Qiputang River in Taihu Lake basin of China[J]. Desalination and Water Treatment, 51:4736-4743.
- Wang X, Hao F H, Cheng H G, et al, 2011. Estimating non-point source pollutant load for the large-scale basin of the Yangtze River in china[J]. Environmental Earth Sciences, 63:1079-1092.
- Wu L, Long T Y, Cooper W J, 2012. Simulation of spatial and temporal distribution on dissolved non-point source nitrogen and phosphorus load in Jialing River Watershed, China[J]. Environmental Earth Sciences, 65(6):1795-1806.
- Yan W, Mayorga E, Li X Y, et al, 2010. Increasing anthropogenic nitrogen inputs and riverine DIN exports from the Yangtze River basin under changing human pressures[J]. Global Biogeochemical Cycles, 24(4):1134-1138.
- Yong L, Chao W, Hong L T, 2006. Research advance in nutrient runoff on sloping land in watersheds[J]. Aquatic Ecosystem Health and Management Logical Applications, 9(1):27-32.
- Zhang H, Huang G H, 2011. Assessment of non-point source pollution using a spatial multicriteria analysis approach[J]. Ecological Modelling, 222:313-321.
- Zhai Y, Shang X, Shen J, et al, 2012. Application of SWAT Model in Agricultural Non-Point Source Pollution Investigation in Lake Erhai Watershed[J]. Research of Environmental Sciences, 25(6):666-671.

(责任编辑 万月华)

Pollution Load Assessment in the Catchment Area of Gaozhou Reservoir

ZHOU Wen-ting^{1,2}, SHAO Rui-hua¹, MA Qian-li², ZHAO Xue-min²,
WANG Li², XU Zhen-cheng², ZENG Hai-long²

(1. School of Environmental and Chemical, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710000, P. R. China;
2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental
Protection, Guangzhou 510655, P. R. China)

Abstract: Gaozhou Reservoir is the only drinking water source of Maoming City, Guangzhou Province, and plays an important role in local social and economic development. The catchment area of Gaozhou Reservoir includes Magui, Dapo, Guding, Shenzhen and Pingshan Towns as well as some area of Dongan and Changpo towns, with the area of 1 022 km². In recent years, economic development and changes in agricultural production modes in the catchment area have increased the eutrophication of Gaozhou Reservoir. In the spring of 2009 and 2010, cyanobacteria blooms threatened drinking water safety. To assess the pollution status in the catchment area, point and non-point sources pollution loading were evaluated and, based on the 2008 pollution source investigation, emission coefficients and export coefficients were calculated. Spatial distribution features and sources of pollution were analyzed using GIS. The study supports pollution control and ecological restoration efforts in the Gaozhou Reservoir catchment. Point and non-point sources of pollution include chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH₃-N), total nitrogen (TN) and total phosphorous (TP). Point source pollution loading was evaluated using the emission coefficient method and investigation information included industrial wastewater discharge volume in the catchment area in 2008 and the pollutant discharge coefficient, urban population and pollutant discharge coefficient of domestic sewage, stock and marketing amounts of livestock and poultry in large scale breeding and the pollutant discharge coefficient of aquaculture wastewater. Non-point source pollution loading was evaluated using the export coefficient method and the investigation information included the rural population, number of poultry, land use of each town and the vegetation cover in the catchment area in 2008. The total pollution loads of COD, NH₃-N, TN and TP discharged from the catchment were 8 192.83, 394.13, 1 137.38 and 94.29 t/a, respectively. Among them, non-point source of COD, NH₃-N, TN and TP loads were 7 114.79, 336.91, 1 060.21 and 88.08 t/a, accounting for 87%, 85%, 93% and 93% of total pollution loads, respectively. The pollution loads of COD (50%), TN(52%) and TP(50%) were mainly agricultural non-point source pollution and the discharge load of NH₃-N (63%) was primarily rural domestic pollution. The pollution loads of COD, NH₃-N, TN and TP in different towns ranged from 47.08 – 144.63, 2.43 – 5.24, 6.70 – 20.34 and 0.60 – 1.73 kg/hm², respectively, with the highest pollution loads of COD, NH₃-N, TN and TP in Pingshan Town, the town nearest the reservoir. Non-point sources of pollution contributed 70% – 94% of the COD, NH₃-N, TN and TP loads among the towns in the catchment area. To conserve the water quality of Gaozhou reservoir, non-point sources of pollution coming from rural domestic, livestock breeding and agriculture should first be reduced. Moreover, the management strategies in different area should be established according to the spatial distribution characteristics of pollution and Pingshan town is the primary area.

Key words: Gaozhou Reservoir; non-point source; pollution load intensity; geographic information system