

## 湘江流域长株潭段水污染负荷时空分布规律及成因

彭亚辉 周科平\* 蒋俊伟

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

**摘 要** 为厘清湘江流域长株潭段水污染现状,运用输出系数法及等标污染负荷法对 2002—2015 年长株潭三市下辖全部 23 个区县工业废水、城镇生活及农村农业水污染进行计算分析,全面解析水污染负荷的时空分布规律及成因。研究表明:水污染负荷尤其是工业废水污染负荷总体下降,工业废水污染物排放主要集中在株洲和湘潭段,城镇生活水污染负荷由大到小地区分布依次是长沙、株洲、湘潭,农业面源污染为三市主导水污染源,其污染负荷最大地区均是粮食种植和禽畜养殖规模大的区县;水体主要污染物为总氮、总磷、氨氮、化学需氧量、石油类及重金属,主要污染源为农业面源污染、城镇生活污水。产业结构不合理、污水处理能力不足及分散粗放的粮猪型经营模式,是湘江水污染的重要原因。本研究提出 3 条控制策略:优质高速发展株洲和湘潭的第三产业,优化产业结构及布局;继续加快推进三市污水处理设施建设与改造,提高县城污水处理能力;发展集约式粮猪业经营模式。

**关键词** 水污染负荷; 时空分布; 产业结构; 污水处理; 集约式粮猪业

中图分类号 x131.2

文章编号 1007-4333(2018)09-0108-09

文献标志码 A

## The spatial-temporal distribution and causes of water pollution loads on Xiangjiang River Basin in Changzhutan

PENG Yahui, ZHOU Keping\*, JIANG Junwei

(School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract** To clarify the current status of water pollution on Xiangjiang River Basin in Changzhutan, export coefficient modeling and equal standard pollution method are used to calculate the water pollution loads composing of industry waste water, city lives and agricultural pollution in Changzhutan's 23 counties from 2002 to 2015. The spatial-temporal distribution and causes of water pollution loads are fully analyzed. The results show that the water pollution loads especially industrial wastewater decreased in general, and the pollutions from industrial wastewater emission are mainly concentrated in Zhuzhou and Xiangtan City. The ascending order of contribution-rate of urban domestic sewage is Changsha, Zhuzhou and Xiangtan. The agricultural non-point source pollution is mainly contributed by the counties where are large scale of grain cultivations and livestock. The main pollutants includes total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, chemical oxygen demand, petroleum and heavy metals. The primary pollution sources are agricultural non-point source pollution and urban waste water. The important reasons of water pollution in Xiangjiang River are irrational structure, inadequate sewage treatment and extensive operation of planting and pig-breeding. Three countermeasures are put forwarded at last: Rapid and high-quality tertiary industry should be developed in Xiangtan and Zhuzhou. Their industrial structures and region layouts should be optimized; The sewage treatment facilities in these three cities should be continually constructed and innovated; And the capacity of the sewage treatment in the counties should be improved; Intensive operation of planting and pig-breeding should be developed.

**Keywords** water pollution load; spatial-temporal distribution; industrial structures; sewage treatment; intensive operation of planting and pig-breeding

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674287)

第一作者: 彭亚辉, 博士研究生, E-mail: 252820154@qq.com

通讯作者: 周科平, 教授, 主要从事采矿工程及矿业经济等研究, E-mail: kpzhou@vip.163.com

湘江,湖南境内最大河流,长江水系第五大支流。流域总面积 9.47 万 km<sup>2</sup>,湖南境内占 90%,湘江干流长株潭段全长 128 km,承载沿岸三市的生产生活用水及纳污、航运、灌溉等功能,在沿岸城市社会经济发展中的作用举足轻重。长株潭城市群是省内经济社会发展的核心地区,工农业生产较发达,2015 年人均生产总值 8.85 万元,远高于全省的 4.27 万及全国的 4.94 万元;人口 1 426 万,密度大,城镇密集,2016 年长株潭城市群对全省经济增长的贡献率达 44.4%。而湘江水污染历久经年,自 20 世纪 90 年代后,总体水质日趋恶化,其中长株潭河段污染最为严重<sup>[1-2]</sup>,同时湘江重金属污染堪称全国之最,污染事件频发<sup>[3]</sup>,2011 年国务院批准在湘江流域试点实施全国首个重金属污染治理方案。近年来,湘江干流长株潭段的水污染治理取得了一定的成果,污染状况有所缓解,但部分地区、部分污染物依然比较严重<sup>[4]</sup>。湘江流域 141 个省级水功能区中,水质达标率为 87.2%,其中长沙地区水质的达标率仅为 79.2%,长株潭地区水质总的达标率为 88.24%,水质较差的河段为:干流长沙马厂段,涟水娄底和湘乡段,郴江、浏阳河、洑水和捞刀河的下河段,除郴江外,其他河段属于长株潭地区<sup>[5]</sup>。目前实证研究主要集中在湘江和洞庭湖水污染排放格局的分析<sup>[6-7]</sup>,对长株潭段的研究则集中在底泥沉积物的重金属污染<sup>[8-10]</sup>。对湘江长株潭段水污染物及排放规律的全面评价及多因素影响分析研究尚欠缺,本研究拟对此展开深入探讨,以期为湘江水污染物消减与防治相关政策提供参考。

## 1 水污染负荷分析方法

水污染负荷估算的典型方法有两类:一类是源强系数法,由国家环保部《全国水环境容量核定技术指南》所推荐,调查工业污染源、城市生活污染、农村生活污染及农业面源污染源,确定排污系数,计算污染排放量;另一类是模型模拟法:可采用的模型有 SWAT、BASINS、AGNPS 等;流域污染负荷预测方法有趋势外推法、系统动力学方法、回归分析法、人工智能法等。专门针对非点源污染的估算源于 20 世纪 60 和 70 年代的美国,开发了诸如输出系数法模型以及机理模型等估算方法<sup>[11]</sup>,而后这一领域引起世界各国的广泛关注,尤其近年来的研究异常活跃。目前常用的估算方法可总结为三类:输出系数模型<sup>[12-13]</sup>、机理模型<sup>[14-15]</sup>及实证模型<sup>[16-17]</sup>。因实证

模型需要数据量大而复杂,本研究采用输出系数法来估算非点源污染负荷。

### 1.1 非点源污染负荷估算方法

综合全国第一次农业污染源普查及“十二五”面源污染报告,种植业、禽畜水产养殖业是农业面源污染的主要组成部分。此次调查农村及农业非点源污染也主要围绕以上内容展开。各污染物排放估算公式列示如下。

农村生活源污染物排放量计算式:

$$G_p = 3\ 650 N F_p \quad (1)$$

式中: $G_p$  表示农村居民生活污染物年排放量, $N$  表示农村居民常住人口, $F_p$  表示农村居民生活污染物排放系数。目前并没有权威部门发布农村生活污染源产排污系数,单独针对对农村生活污染源现状的研究相对较少,大多数是在研究某一地区或流域的农业面源污染时,将农村生活涵盖进来<sup>[18-19]</sup>。农村生活污染源产排放系数取城镇产污系数的 40% 的 85%<sup>[20]</sup>。

种植业污染物排放量(流失量)=

$$\text{化肥施用量} \times \text{农田化肥源污染物流失率} \quad (2)$$

有文献研究表明湖南长沙地区双季稻期间总氮流失系数为 1.870%~3.771%,总磷流失系数为 0.327%~0.966%<sup>[21]</sup>。本研究总氮和总磷的流失系数采用第一次全国污染源普查中的农业污染源肥料流失系数。

禽畜养殖污染物排放量=禽畜年末存栏数×

$$\text{禽畜养殖源污染物排污系数} \quad (3)$$

渔业污染物排放量=水产养殖产量×

$$\text{污染物排放系数} \quad (4)$$

### 1.2 等标污染负荷换算评价法

等标污染负荷反映污染源本身污染水平,是单位时间排放污染物的废水的等标体积,用以评价各污染源和各污染物的相对危害程度,污染物的等标排放量计算式如下:

$$P_i = \frac{W_i}{(W_0 \times 10^6)} \quad (5)$$

$P_i$  为污染物  $i$  的等标排放量; $W_i$  为污染物  $i$  的流失量; $W_0$  为污染物按《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)Ⅲ类标准系数的浓度。

## 2 水污染负荷年际变化分析

污染物负荷相关系数主要来自《第一次全国污染源来源普查公报》中各污染源产排污系数手册,结

合历年《中国环境年鉴》、《湖南统计年鉴》及《湖南农村统计年鉴》数据,对长株潭城市群的浏阳市、醴陵市、湘乡市及韶山市等4个县级市、长沙县、宁乡县、株洲县、攸县、茶陵县、炎陵县及湘潭县等7个县、芙蓉区、天心区、岳麓区、开福区、雨花区、望城区、荷塘区、芦淞区、石峰区、天元区、雨湖区及岳塘区等12

个市辖区的,共计23个市县的工业点源污染排放量、城镇生活污水排放量、农村生活及农业污染排放量进行统计分析。

## 2.1 工业水污染负荷分析

2002—2015年湘江流域长株潭段工业污染物等标排放量如图1。

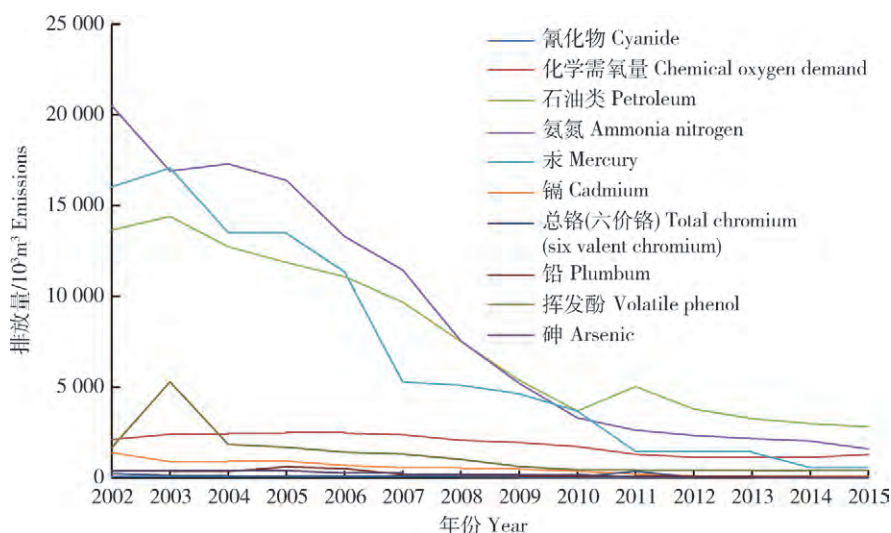


图1 长株潭工业废水污染物历年排放量

Fig. 1 Annual emission of pollutants in industrial waste water of Changzhutan

由图1可知,2002—2015年的14年间,湘江流域长株潭段工业废水中的各类污染物排量,无论绝对排放值还是等标排放总量,均呈快速下降趋势。等标排放总量由2002年的 $56\,401.60 \times 10^3 \text{ m}^3$ 下降到2015年的 $6\,811.69 \times 10^3 \text{ m}^3$ ,降幅达88%;2011年前,氨氮、汞及石油类污染物排放量居前三位,2014年后化学需氧量替代汞,与石油类及氨氮排放量居前三位。从历年的污染物贡献率来看,化学需氧量、石油类、氨氮、重金属汞及挥发酚一直处于前五大主要污染物之列,总量占比为95%以上。

## 2.2 城镇生活水污染负荷分析

2002—2015年城镇生活水污染物等标排放量如图2,2014年前氨氮排放量变化大致可分为3个阶段,每一阶段有波峰波谷,大体呈曲折上升的趋势,而2015年排放量骤降,出现历史最低位;化学需氧量排放趋势较平稳,2008年之前是稳步增长的趋势,2008年后呈平缓下降趋势,同样在2015年下降到历史最低位。很明显,城镇生活污水中氨氮是主要污染物,排放贡献率达2/3。

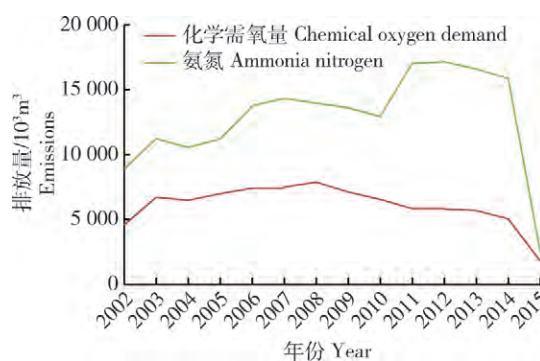


图2 长株潭城镇生活水污染物历年排放量

Fig. 2 Annual emission of pollutants in urban waste water of Changzhutan

## 2.3 农村及农业面源水污染负荷分析

2002—2015年的农业面源污染等标排放情况如图3,大体来看,除总磷外,化学需氧量、总氮及氨氮污染物排放呈下降趋势,但降幅不大;总氮和总磷是主要污染物,合计贡献率历年达75%左右。氨氮和化学需氧量的等标排放量依次靠后。

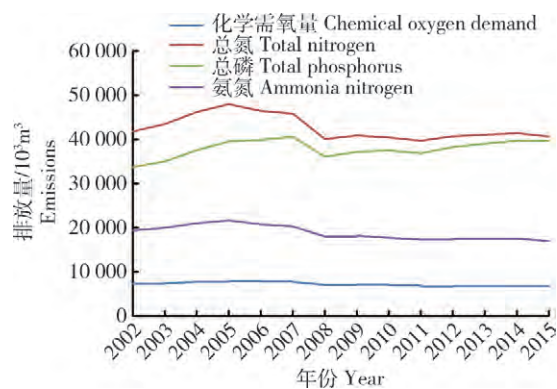


图 3 长株潭农业面源污染历年排放量

Fig. 3 Annual emission of agricultural non-point source pollution of Changzhutan

2.4 水污染总负荷情况

综合工业废水、城镇生活污水及农业面源水污染数据,2002—2015 年湘江流域长株潭段 14 年间各污染物等标排放量由 2002 年  $172\,194.23 \times 10^3 \text{ m}^3$  下降到 2015 年的  $114\,867.66 \times 10^3 \text{ m}^3$ ,降幅达 33.29%,前六大污染物为总氮、总磷、氨氮、化学需氧量、石油类及重金属(汞、镉、总铬、砷和铅),具体等标排放及贡献见表 1。

从主要污染物排放贡献率的年际变化来看,总磷总氮及化学需氧量的排放贡献大体呈上升趋势,排放占比分别由 2002 年的 19.59%、24.29%及 8.14%上升至 2015 年的 34.39%、35.41%及 8.40%,而氨氮重金属及石油类污染物的排放却相反,呈下降状态。

表 1 2002—2015 年主要污染物的等标负荷

Table 1 Equal standard load of major pollutants from 2002 to 2015

污 染 物 Pollutant	2002		2008		2015	
	排放量/ $10^3 \text{ m}^3$	占比/%	排放量/ $10^3 \text{ m}^3$	占比/%	排放量/ $10^3 \text{ m}^3$	占比/%
	Emissions	Proportion	Emissions	Proportion	Emissions	Proportion
氨氮	48 142.40	27.96	39 521.60	26.83	21 119.70	18.39
总氮	41 821.59	24.29	40 113.63	27.23	40 678.42	35.41
总磷	33 739.51	19.59	36 101.76	24.51	39 505.67	34.39
化学需氧量	14 019.02	8.14	17 027.05	11.56	9 650.41	8.40
石油类	13 648.00	7.93	7 514.00	5.10	2 812.00	2.45
重金属	18 405.92	10.69	5 983.12	4.06	655.93	0.57
总排放量	172 194.23	98.60	147 301.86	99.29	114 867.66	99.61

湘江流域长株潭段 2015 年主要水污染产生来源如图 4,可知除石油类污染主要来自工业点源外,农业面源是化学需氧量、氨氮、总氮及总磷污染的第一大来源,其次是农村生活污染,工业点源在化学需氧量和氨氮两类污染物的等标排放总量中贡献最小。

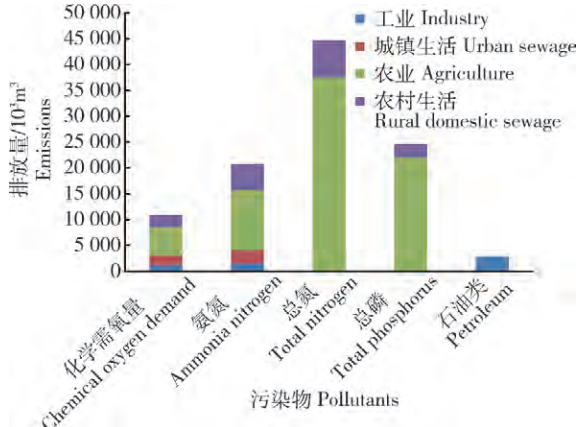


图 4 长株潭水污染来源情况

Fig. 4 Major sources of water pollution of Changzhutan

3 水污染负荷空间特征分析

3.1 污染负荷的空间分布

工业废水污染物等标排放的空间分布如表 2,表现为如下特征:

1)废水重金属排放空间变化。镉排放分布地区由最初的长沙株洲为主,之后随着长沙镉排放的骤减,转变为株洲湘潭为主;汞排放一直以来株洲是主要来源,2007—2010 年湘潭地区汞排放持续维持在略超 75%的水平,近几年基本只有株洲在排放。总铬排放分布地区由初始的长沙湘潭为主逐渐变为湘潭地区为绝对大的排放区;铅排放分布地区由株洲、湘潭地区为主转变为以湘潭地区为主,株洲次之;砷的排放格局由株洲地区为主转变为株洲和湘潭地区为主;综合来看,目前长沙已经不再是工业废水重金属污染排放的主要区域,株洲是汞、镉和砷的主要排放区域;湘潭是总

铬、铅和砷的主要排放区；

2) 氰化物、石油类、挥发酚排放空间格局演化。氰化物和石油类的地区排放格局相近，排放量最大的是湘潭地区，株洲次之，长沙占比最小；挥发酚的排放格局由株洲湘潭为主演化为以湘潭排放为主，占 83.03%，长沙实现零排放。

3) 化学需氧量和氨氮排放的空间格局演化。化学需氧量排放贡献由最初的株洲、湘潭为主，合计占比 87.06%，随时间此消彼长，最终长沙地区成为排

放贡献最大的地区，占地区比近 2/3，株洲和湘潭合计占比略超 1/3。氨氮排放最初的格局是株洲为主，长沙次之，湘潭最小，至 2015 年，各地区占比都在 1/3 左右。

综上，大部分工业废水污染物排放集中在株洲和湘潭段，尤其是湘潭地区，氰化物、石油类、总铬、铅及挥发酚造成的水污染大部分都来自湘潭，而汞和镉污染绝大部分都来自株洲，化学需氧量和氨氮污染主要来自长沙地区。

表 2 工业水污染物空间分布  
Table 2 Spatial distribution of industrial water pollutants

年份 Year	地区 Regional	污染物 Pollutants										%
		氰化物 Cyanide	化学 需氧量 Chemical oxygen demand	石油类 Petroleum	氨氮 Ammonia nitrogen	汞 Mercury	镉 Cadmium	总铬 Total chromium	铅 Plumbum	挥发酚 Volatile phenol	砷 Arsenic	
2002	长沙	1.52	12.93	1.42	25.31	0.25	48.32	20.30	5.17	0.89	5.19	
	株洲	58.33	36.61	53.31	58.51	99.75	35.77	0.85	52.53	31.47	82.77	
	湘潭	40.15	50.46	45.27	16.18	—	15.91	78.85	42.30	67.65	12.04	
2008	长沙	1.69	12.02	6.79	2.79	—	7.62	21.65	2.32	2.83	4.49	
	株洲	55.93	36.77	39.42	55.72	21.57	57.66	1.64	34.33	65.09	85.03	
	湘潭	42.37	51.21	53.79	41.48	78.43	34.71	76.72	63.35	32.08	10.47	
2015	长沙	0.70	63.22	10.74	29.35	—	1.97	2.80	3.39	—	6.96	
	株洲	30.36	19.67	25.60	37.97	100.00	68.86	5.73	17.17	16.97	40.51	
	湘潭	68.94	17.10	63.66	32.68	—	29.17	91.48	79.45	83.03	52.53	

城镇生活污水化学需氧量的地区排放如图 5，2002—2015 年，地区排放贡献从大到小依次为：长沙、株洲、湘潭。长沙地区化学需氧量排放呈曲折上升趋势，地区占比基本维持在 40%~57%，个别年份<40%，但不影响大体分布；而湘潭和株洲的化学需氧量呈波动下降趋势。氨氮排放地区贡献与化学需氧量大体相似。这与长沙城镇面积和城镇人口扩展速度快于湘潭和株洲的趋势相一致。

2002—2015 年农业源化学需氧量地区排放如图 6 所示，长沙地区贡献占比为 45%左右，其次是湘潭和株洲，长沙大约超过湘潭、株洲 15 个百分点左右。其他 3 项农业面源(含农村生活)主要水污染物总氮、总磷、氨氮排放与化学需氧量地区分布趋势极为相似，不再赘述。

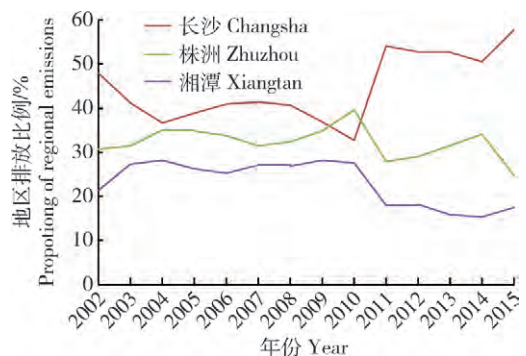


图 5 长株潭城镇生活污水化学需氧量地区排放  
Fig. 5 Spatial distribution of COD emission from urban sewage of Changzhutan



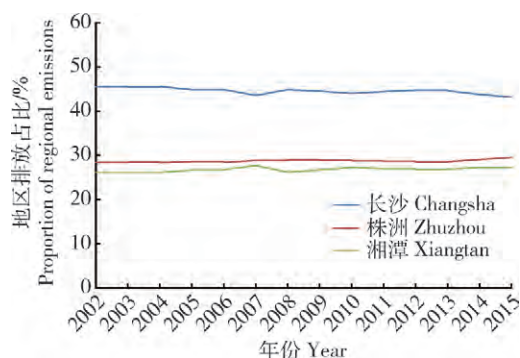


图6 长株潭农业面源化学需氧量地区排放图

Fig. 6 The spatial distribution of COD emission from agricultural non-point source of Changzhutan

2015年的农业面源污染绝对排放量中,禽畜养殖是第一大污染源,其次是农业种植。由图7可知,2015年长株潭地区禽畜养殖业和种植业总氮和总磷水污染物高排放地区主要分布在宁乡县、浏阳市、湘乡市和湘潭县,这4个县市占整个长株潭地区排放量的51%,其次是望城区、长沙县、雨湖区、株洲县、醴陵市、攸县及茶陵县,这7个区县排放占比40%。

综合来看,长沙和湘潭地区的农业水污染比株洲地区严重。化学需氧量和氨氮的分布格局大致与总氮和总磷的相似。

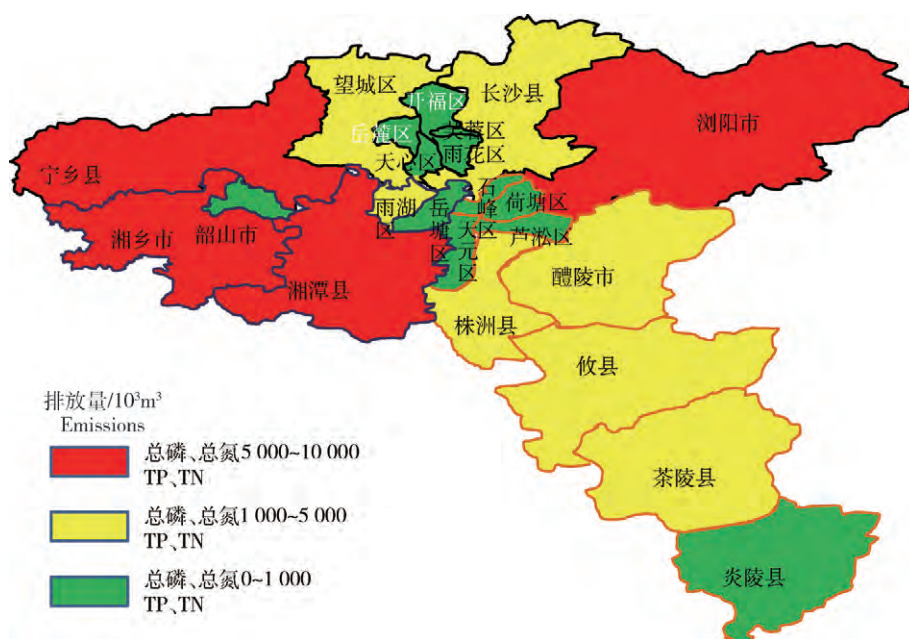


图7 长株潭禽畜业及种植业总磷、总氮等标排放地区图

Fig. 7 Spatial distribution of TP and TN emissions from the livestock industry and planting of Changzhutan

### 3.2 各城市水污染类型

2015年长沙市主要水污染物等标排放占比如图8所示,农村生活及农业面源产生的总氮和总磷污染合计占比达67.64%,而城镇生活、农村生活及农业面源产生的化学需氧量及氨氮污染合计占比达29.75%,工业废水产生的污染物占比不到3%,可以认为长沙地区的水污染是农业面源主导型。农业农村产生的水污染物(总氮、总磷、氨氮及化学需氧量)等标排放占比达90%。

株洲、湘潭主要水污染物等标排放占比与长沙略同,同属于农村及农业面源主导型污染,占比分别达到65.77%及64.23%,两市城镇生活污染占比都略

超28%,工业废水产生的污染物等标排放占比分别为5.46%及7.73%。农业农村产生的水污染物(总氮、总磷、氨氮及化学需氧量)等标排放占比达89%左右。

## 4 水污染原因与控制策略

### 4.1 水污染负荷特征成因

#### 4.1.1 城市群内产业结构不合理

城市群内产业结构偏重且高相似度,是湘江水污染的一个重要原因。如表3计算所示,2015年三市产业结构以第二产业为主,顺序是第二产业、第三产业、第一产业。三市都是国家的老工业基地,工业主要以冶金、机电、化工、建材等传统产业为主,株洲

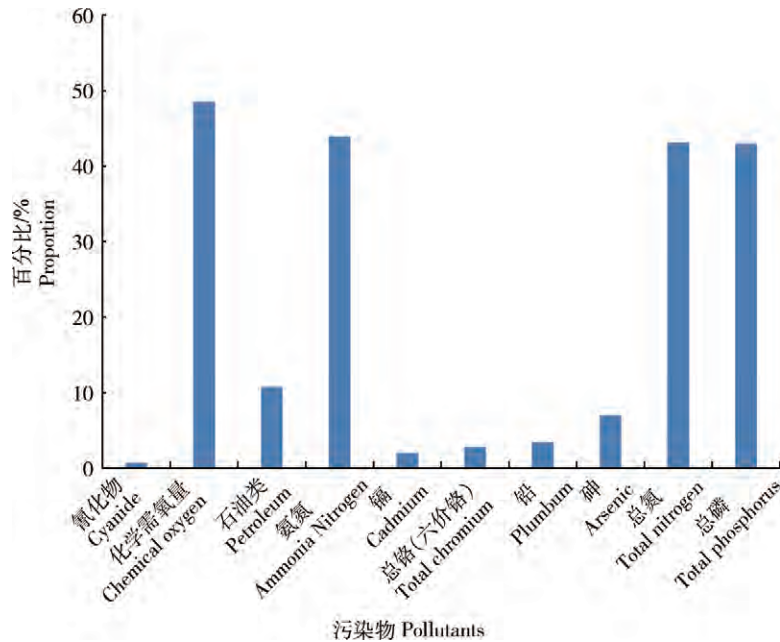


图8 长沙主要水污染物等标排放占比

Fig. 8 Major water pollutant discharge ratio of Changsha

清水塘和湘潭竹埠港是湘江干流长株潭段上游地区重金属污染最严重的工业园区,工业废水污染物排放量大,历史生态欠账大,这是湘江流域长株潭段重金属(汞、镉、铅、砷及总铬)水污染的重要污染源。三市第一产业均是粮猪型主导的产业模式,农业水污染严重,第三产业非水污染的主要原因。三市产

业结构的两两相似度在 0.98 以上,株洲和湘潭的产业相似度更是接近 1,说明 2 个地区的 3 次产业结构几乎相同。从三市产业发展的现状来看,产业布局重复及结构趋同问题比较突出,互补性差,同质化竞争现象比较明显,尤其在二产领域,多年来布局近似情况更加明显。

表3 长株潭产业结构

Table 3 Industrial structure of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan region

城市 City	比重/%			相似度 Similarity
	第一产业 Proportion of the primary industry	第二产业 Proportion of the secondary industry	第三产业 Proportion of the tertiary industry	
长沙	4.02	50.92	45.06	0.983 3
株洲	7.69	57.26	35.05	0.999 0
湘潭	8.26	54.83	36.91	0.989 3

#### 4.1.2 城市化水平大幅提高,污水处理能力有限

城市化水平大幅提高,但污水处理能力有限,是湘江水污染的另一个重要原因。三市 2002 年城市化水平较低,长沙地区最高仅为 46.90%,城镇人口 279 万;2015 年城市化水平最低的湘潭市也到了 58.28%,长沙地区更是达到了 74.38%,城镇人口增至 553 万;城镇人口扩张引起生活污水排放量持续增长并呈加快趋势。伴随而来,三市城镇污水排

放量由 2002 年 2.68 亿增至 2015 年的 8.77 亿 t,平均年复合增长率 8.82%,而三市城市污水处理率在 2008 年以前均低于 64%,三市主城区 2014 年后综合污水处理率才达到 95%。长株潭三市 2015 年排水管道密度分别为:6.96、10.69、13.36 km/km<sup>2</sup>,全省平均为 9.33 km/km<sup>2</sup>,三市城区仍有生活废水直排现象,郊区及县城直排更严重,老城区污水管网仍然是雨污合流,很多县城没有污水处理厂,大量富含

有机物、氨氮及磷的城镇污水未经处理直接排入湘江,可导致湘江长株潭段水体的化学需氧量、氨氮及总磷浓度超标。

综上,在过去14年间长株潭城市群社会经济地位日益突出,时至今日更是成为湖南经济增长的核心级,主城区不断扩容,城镇规模日益扩大,与相对滞后的环境基础设施规划建设及污水收集处理能力的矛盾加大,城镇生活水污染比较严重。

#### 4.1.3 农业粗放经营模式

农业粗放经营模式是水污染的第3个重要污染。传统的家庭联产承包责任制限制了农户的经营规模及生产效率,规模化经营来大幅提高经济效益不可行,加大化肥等生产要素的投入就成了农户高产增收的唯一选择。粮食生产和生猪养殖是三市的传统优势产业,近10年三市农牧业产值占农林牧副渔总产值的90%左右,平均每公顷播种面积化肥施用量为300 kg左右,2015年湘潭地区每公顷播种面积化肥施用量更是达到了323.42 kg,高于长沙和株洲地区分别为31及52 kg,三市化肥使用强度长期高于225 kg/hm<sup>2</sup>的国际上限标准;三市2015出栏生猪1762.37万头,养殖密度为627头/km<sup>2</sup>,多年来稳居湖南五大生猪养殖密度之首。据畜牧部门统计,出栏一头生猪所产生的尿、粪和冲洗产生的污水大概有2 t多,那么三市2015年因此而产生的粪污超3500万t,加上低层次的污染处理,使得禽畜养殖污染远超水环境承载能力;粮猪为主的农牧业分散粗放经营模式使得湘江水的化学需氧量、总氮、总磷和氨氮超标。

#### 4.2 水污染控制策略

通过以上对湘江流域长株潭段水污染负荷的时空分布特征及成因的分析研究,特提出以下几点控制策略。

1)全面提高株洲和湘潭的第三产业的总量和质量,优化产业结构及布局。加快发展株洲和湘潭的第三产业,大力发展较高层次的金融、信息咨询、技术服务等现代服务业,优化产业结构并提升产业质量;按照资源禀赋和产业基础,继续推进重点行业企业整合、升级,进入产业园区聚集发展,做优做强优势主导产业。调整农业产品结构,让污染物超标的农田休耕轮耕。

2)继续加快推进污水处理设施建设与改造,提高污水处理能力。加大对三市改造和新建城镇污水处理设施的投入,大力推进污水配套管网建设,扩大

污水处理覆盖区域,强化对生活污水处理薄弱地区例如城乡结合部及老旧城区等区域的污水收集、截流,加快实施对合流制排水系统的雨污分流改造或对其进行截流、调蓄、治理等措施,提高县城污水处理率。敏感区域城镇污水处理应达到一级A排放标准。

3)发展粮猪型集约式产业经营模式。采取措施控制养殖规模和降低养殖密度,严控畜禽养殖污染。改善农业经营模式,采用种养结合的方式资源化利用畜禽养殖废弃物,发展循环绿色农业。普及测土配肥技术,提高化肥利用率。

## 5 结 论

通过分析工业废水、城镇生活污水、农村及农业面源污染,全面评价了湘江流域长株潭段2002—2015年污染时空分布规律及成因,得出以下结论:

1)水污染物排放量尤其是工业废水污染物总体下降。工业废水污染物排放集中在株洲和湘潭段。城镇生活水污染贡献由大到小地区分布依次是长沙、株洲、湘潭。农业面源污染为长株潭三市主导水污染,其排放最大贡献地区主要三市的是粮食种植和禽畜养殖规模大的区县。

2)水污染主要污染物为总氮、总磷、氨氮、化学需氧量、石油类及重金属。冶金、机电、化工、建材等传统重化工业是湘江重金属污染的重要原因,三市工业布局近似加剧了水污染。水污染原因还包括:污水处理能力不足;分散粗放的粮猪型产业经营模式。

3)据此提出了三市水污染控制策略。加快并高质量发展株洲和湘潭的第三产业,优化产业结构及布局,继续加快推进三市污水处理设施建设与改造,提高污水处理能力;发展粮猪型集约式产业经营模式。

## 参考文献 References

- [1] 陈咏淑,吴甫成,吕焕哲,姚成胜.近20年来湘江水质变化分析[J].长江流域资源与环境,2004,13(5):508-512  
Chen Y S, Wu F C, Lv H Z, Yao C S. Analysis on the water quality changes in the Xiangjiang river from 1981 to 2000 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, 13 (5):508-512 (in Chinese)
- [2] 唐敬知,杨仁斌,谈健.湘江流域水质环境演变特征研究[J].环境科学与管理,2014,5(39):62-66  
Tang J Z, Yang R B, Tan J. Study on water environment evolution characters of Xiangjiang River [J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 5(39):62-66 (in Chinese)
- [3] 刘耀驰,高粟,李志光,刘素琴,黄可龙,李倦生.湘江重金属污



- 染现状、污染原因及对策探讨[J]. 环境保护科学, 2010, 36(4): 26-29
- Liu Y C, Gao L, Li Z G, Liu S Q, Huang K L, Li J S. Analysis on heavy metal pollution status and reasons in Xiangjiang River and discussion on its countermeasures[J]. *Environmental Protection Science*, 2010, 36(4): 26-29 (in Chinese)
- [4] 何甜, 帅红, 朱翔. 长株潭城市群污染空间识别与污染分布研究[J]. 地理科学, 2016, 36(7): 1081-1090
- He T, Shuai H, Zhu X. Pollution space recognition and pollution distribution of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(7): 1081-1090 (in Chinese)
- [5] 湖南省水利厅 湖南省水资源公报 2016[M]. 长沙: 湖南地图出版社, 2017
- Hunan Water Conservancy Bureau. *Hunan Water Resources Bulletin 2016* [M]. Changsha: Hunan Map Publishing Company, 2017 (in Chinese)
- [6] 熊剑, 喻方琴, 田琪, 黄代中, 李利强. 近 30 年来洞庭湖水质营养状况演变特征分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1217-1225
- Xiong J, Yu F Q, Tian Q, Huang D Z, Li L Q. The evolution of water quality and nutrient condition in Lake Dongting in recent 30 years [J]. *Lake Science*, 2016, 28(6): 1217-1225 (in Chinese)
- [7] 卢少勇, 张萍, 潘成荣, 彭书传, 刘晓晖. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6): 2278-2286
- Lu S Y, Zhang P, Pan C R, Peng S C, Liu X H. Agricultural non-point source pollution discharge characteristic and its control measures of Dongtinghu Lake [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(6): 2278-2286
- [8] 刘潭秋, 王巧玲. 基于 ARIMA 模型的湘江流域 DO 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量贝叶斯预测湖南农业大学学报: 自然科学版, 2017, 5(43): 575-580
- Liu T Q, Wang Q L. Prediction the contents of DO and  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  in Xiangjiang river basin using Bayesian approach based on the ARIMA model [J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2017, 5(43): 575-580 (in Chinese)
- [9] 朱余银, 戴塔根, 吴堃虹. 湘江长株潭段底泥重金属污染现状评价[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(9): 3710-3717
- Zhu Y Y, Dai T G, Wu Q H. Assessment on heavy metals contamination in sediments of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan section of Xiangjiang River [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(9): 3710-3717 (in Chinese)
- [10] 李欢, 潘琼, 钟琼. 湘江(长株潭段)表层沉积物 Zn 污染现状分析[J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 174-175
- Li H, Pan Q, Zhong Q. Analysis of Zn in surface sediment in Xiangjiang River Changzhan section [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2016, 41(5): 174-175 (in Chinese)
- [11] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 1159-1168
- [12] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modeling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183: 323-349
- [13] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agriculture catchments [J]. *Hydrological Processes*, 1997, (11): 269-286
- [14] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. Answers: A model for water-shed planning [J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4): 938-944
- [15] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, Williams J R. Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89
- [16] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397-400
- Li H E. Mean concentration method for estimation of nonpoint source load and its application [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2000, 20(4): 397-400 (in Chinese)
- [17] 杨珏, 钱新, 张玉超, 钱瑜. 两种新型流域非点源污染负荷估算模型的比较[J]. 中国环境科学, 2009, 29(7): 762-766
- Yang J, Qian X, Zhang Y C, Qian Y. Comparison of two machine learning models for non-point source pollution load of watershed [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(7): 762-766 (in Chinese)
- [18] 胡芸芸, 王永东, 李廷轩, 郑子成, 蒲勇. 沱江流域农业面源污染排放特征解析[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3654-3665
- Hu Y Y, Wang Y D, Li T X, Zheng Z C, Pu Y. Characteristics analysis of agricultural nonpoint source pollution on Tuojiang River Basin [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(18): 3654-3665, (in Chinese)
- [19] 王雁, 高俊峰, 刘正文, 张志明. 潼湖流域污染负荷与水环境容量[J]. 湿地科学, 2016, 14(3): 354-359
- Wang Y, Gao J F, Liu Z W, Zhang Z M. Pollution load and environment capacity in Tonghu Lake Basin [J]. *Wetland Science*, 2016, 14(3): 354-359 (in Chinese)
- [20] 黄亚丽, 张丽, 朱昌雄. 山东省南四湖流域农业面源污染状况分析[J]. 环境科学研究, 2012, 25(11): 1243-1249
- Huang Y L, Zhang L, Zhu C X. Survey and analysis of agricultural non-point source pollution in Nansi Lake Basin, Shandong Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(11): 1243-1249 (in Chinese)
- [21] 石丽红, 纪雄辉, 李洪顺, 田发祥, 彭华. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4): 551-557
- Shi L H, Ji X H. Nitrogen and phosphorus losses from surface runoff under different application in the double cropping rice fields in Hunan [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(4): 551-557 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华