

沱江流域河流氮、磷浓度时空分布特征及 污染状况评价*

张云霞^{1,2} 魏 晓³ 汪 涛^{1#}

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,四川 成都 610041;

2.中国科学院大学,北京 100049;3.四川省生态环境科学研究院,四川 成都 610041)

摘要 沱江是长江上游水污染问题最严重的支流之一,氮、磷是其最主要的污染物,但是其全流域尺度时空分布特征尚不清楚。利用2008—2018年国(省)控断面监测数据研究沱江流域主要河流中总氮、总磷浓度的时空分布特征,并利用内梅罗综合污染指数法评价沱江流域河流氮、磷污染的状况,以期为沱江流域地表水氮、磷污染防治提供科学依据。结果表明:(1)沱江流域85.51%的水样总氮浓度高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅴ类标准,53.90%的水样总磷浓度超过Ⅲ类标准。(2)2008年以来,沱江入长江口水体总氮浓度年际间趋于稳定,但年内月变化大;总磷浓度年际间呈下降趋势,年内月变化大。(3)上游河流总氮、总磷浓度普遍低于中下游。其中,青白江、北河、阳化河总氮、总磷浓度较低,而球溪河、九曲河、釜溪河和威远河是沱江流域河流中总氮、总磷浓度较高的。(4)沱江流域河流氮、磷内梅罗综合污染指数均处于重度污染水平。

关键词 沱江流域 氮 磷 时空分布 污染状况评价

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.08.018

Pollution assessment and spatiotemporal distribution of nitrogen and phosphorus concentrations of rivers in Tuojiang River Basin ZHANG Yunxia^{1,2}, WEI Yao³, WANG Tao¹. (1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu Sichuan 610041; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: Nitrogen and phosphorus were the main pollutants of Tuojiang River which located in the upstream of the Yangtze River and had the most serious water pollution problem. However, spatiotemporal distribution was still unclear for the Tuojiang River Basin. In this study, the concentrations of TN and TP in Tuojiang River Basin from 2008 to 2018 were collected from national and provincial monitoring sites. Spatiotemporal distribution of TN and TP concentrations in the Tuojiang River Basin were investigated. The pollution assessment of TN and TP were conducted by Nemerow comprehensive pollution index method. Results showed that: (1) TN concentration in 85.51% of samples in the Tuojiang River Basin was higher than the Class V limit of "Environmental quality standards for surface water" (GB 3838-2002), and TP concentration in 53.90% of samples was higher than the Class III limit. (2) Since 2008, there were significant monthly variations of TN concentrations in Tuojiang River at the Yangtze River Estuary. However, there were significant monthly variations of TP concentrations. The TP concentration showed a downward annual trend, but the TN was stable. (3) The concentrations of TN and TP in the upstream were generally lower than those in the middlestream and downstream. Lower TN and TP concentrations were observed in Qingbai River, Beihe River and Yanghua River, while higher TN and TP concentrations were observed in Qiuxi River, Jiuqu River, Fuxi River and Weiyuan River. (4) All of the Nemerow comprehensive pollution indexes of TN and TP in the Tuojiang River Basin were severe pollution.

Keywords: Tuojiang River Basin; nitrogen; phosphorus; spatiotemporal distribution; pollution assessment

氮、磷是植物生长必需的营养元素。但是,随着经济的快速发展,大量富含氮、磷的污水直排或随地表径流进入江河湖泊,造成水体氮、磷含量激增,导致水体富营养化^[1-2],造成严重的环境污染及经济损

失^[3-4]。2018年《长江流域水资源公报》显示,长江流域61个湖泊和365座水库中,中营养湖泊和水库分别占到13.10%和64.90%,富营养湖泊和水库分别占到86.90%和35.10%。可见,水体富营养化已

第一作者:张云霞,女,1995年生,硕士研究生,主要从事农业面源污染生态控制研究。# 通讯作者。

* 四川省科技计划资助项目(No.2018SZDZX0025)。

经成为长江流域重要的水环境问题。

沱江是长江上游水污染问题最为突出的支流之一。已有研究表明,氮、磷是沱江流域水体污染的主要污染物^[5-6]。氮、磷易溶于水中进行长途迁移。因此,沱江的氮、磷污染输入可能直接加重三峡库区乃至长江流域的水体富营养化风险。关于沱江流域水质的研究已有报道。一些学者对沱江流域水质现状进行了研究,发现干流水质大多数处于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类^[7-9]。杨耿^[10]研究发现,沱江流域河流磷污染较重,且以溶解态总磷为主,德阳市、资阳市河段中总磷浓度较高。还有一些学者对沱江流域部分支流历史年份的水质变化及污染物来源等进行了分析^[11-12]。尽管关于沱江流域河流氮、磷污染的研究很多,但大部分的研究仅关注沱江干流或部分支流,缺乏全流域长时间尺度的时空变化研究,尤其缺乏全流域尺度的整体评价。因此,本研究根据沱江流域 2008—2018 年河流总氮、总磷的长期监测数据,研究沱江流域河流总氮、总磷浓度的时空分布,并从全流域尺度进行污染评价,以期对沱江流域地表水氮、磷污染治理及长江流域水环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

沱江位于长江上游四川盆地中东部(103.68°E ~ 105.76°E, 28.87°N ~ 31.70°N),发源于四川西北部的九顶山,在泸州市江阳区汇入长江。沱江长 627.40 km,河道总落差 4 756.70 m。沱江流域地处亚热带温湿气候区,夏季高温多雨,冬季温和少雨,整个流域年平均气温为 17.10 °C,多年平均降水量约 1 029 mm,多年平均径流量约 149.40 亿 m³,丰水年径流量为 262.40 亿 m³,枯水年径流量为 66.20 亿 m³。

沱江流经四川德阳市、成都市、资阳市、内江市、自贡市及泸州市的 16 个县(市、区)、108 个乡(镇、街道),流域面积 2.78 万 km²。流域内城市化进程较快,人口密集;流域内经济发展迅速,2015 年流域内人均 GDP 达 4.12 × 10⁴ 元,较 2000 年增涨了近 8 倍^[13];流域内农业发达,农业总人口达 1 515 万^[14]。流域内磷矿资源丰富,德阳市绵远河、石亭江一带分布着金河、清平等大型磷矿工业。

1.2 样品采集与分析

本研究数据采集于 2008—2018 年沱江流域 24 个地表水水质监测国(省)控断面。这些断面分布在沱江上、中、下游干流和支流(见图 1)。自上游而

下,依次分别有:绵远河(W1)、石亭江(W2)、鸭子河(W3)、北河(W4)、青白江(W5、W6)、毗河(W7)、绛溪河(W9)、阳化河(W10)、九曲河(W11)、球溪河(W14、W15)、威远河(W17)、旭水河(W18)、釜溪河(W19、W20)、濑溪河(W23)、沱江干流(W8、W12、W13、W16、W21、W22、W24)。利用水样采集器在所选断面采集混合水样(至少 5 点混合),用经过稀硫酸处理并以蒸馏水洗净的玻璃瓶收集 500 mL 混合水样。采样频率为每月 1 次。

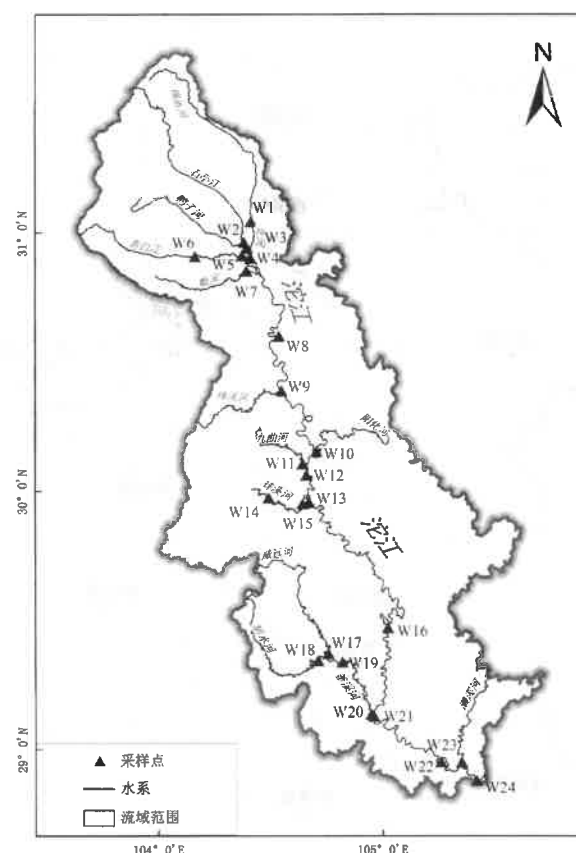


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points

采集的水样首先放入冷藏箱保存,然后送回实验室进行分析,24 h 内分析完毕,如来不及分析,加硫酸酸化到 pH < 2,一周内必须分析完毕。水样在实验室内测定总氮、总磷浓度。总氮测定采用《水质总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法》(GB 11894—89),总磷测定采用《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—89)。

1.3 污染风险评价方法

采用内梅罗综合污染指数法进行评价^[15],水质等级划分见表 1。评价标准选取 GB 3838—2002 Ⅲ类标准限值(总氮 1.0 mg/L,总磷 0.2 mg/L)。

表1 水质等级划分
Table 1 Water quality degree

等级划分	总氮单因子污染指数	总磷单因子污染指数	内梅罗综合污染指数	等级
1	<1.0	<0.5	<1.0	清洁
2	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	轻度污染
3	>1.5~2.0	>1.0~1.5	>1.5~2.0	中度污染
4	>2.0	>1.5	>2.0	重度污染

2 结果与分析

2.1 沱江流域河流氮、磷浓度的统计特征

2008—2018年沱江干流及主要支流总氮、总磷统计特征见表2。由表2可见,沱江干流总氮为0.50~7.96 mg/L,干流上、中、下游总氮多年平均质量浓度分别为4.04、3.43、4.06 mg/L。沱江干流总磷为0.02~0.55 mg/L,干流上、中、下游总磷多年平均质量浓度分别为0.24、0.21、0.23 mg/L。14条支流氮、磷浓度差异较大。其中,釜溪河总氮多年平均质量浓度最高,达到7.53 mg/L;威远河总磷多年平均质量浓度最高,达到0.65 mg/L。北河总氮多年平均浓度最低,阳化河总磷多年平均浓度最低。值得注意的是,总氮、总磷浓度极大值均出现在釜溪河,分别为32.90、16.00 mg/L。

根据GB 3838—2002,沱江流域85.51%的水样总氮浓度高于Ⅴ类标准(2.0 mg/L),53.90%的水样总磷浓度超过Ⅲ类标准(0.2 mg/L)(见图2)。其中,干流中91.94%的水样总氮浓度高于Ⅴ类标准,支流中43.31%~100.00%的水样总氮浓度超过Ⅲ类标准(1.0 mg/L),威远河所有水样总氮浓度都超

过Ⅴ类标准。干流中42.86%~68.86%的水样总磷浓度超过Ⅲ类标准,支流中阳化河83.08%的水样总磷浓度低于Ⅲ类标准。值得注意的是,釜溪河40.91%的水样总磷浓度超过Ⅴ类标准(0.4 mg/L)。

2.2 河流氮、磷浓度的时空分布

2.2.1 时间分布

以沱江干流入长江口断面(W24)为例,分析2008—2018年沱江流域河流总氮、总磷浓度的时间变化特征,结果见图3。由图3(a)可知,河流总氮浓度呈现出明显的高浓度与低浓度随时间交替变化的规律,前期浓度极大值(>4.00 mg/L)出现频率较高,而后期大部分质量浓度小于4.00 mg/L。总氮浓度年内波动的现象较为明显,但年际间浓度变化趋势平稳,至2018年,总氮浓度总体上较2016年前浓度略有下降,但仍高于GB 3838—2002中Ⅴ类标准。总磷浓度在2008年出现极大值(0.50 mg/L),2009—2016年总体上较平稳,但年内波动明显。整体上,总磷浓度年际变化呈逐渐下降趋势。特别是2017—2018年,总磷逐渐下降至低于GB 3838—2002Ⅲ类标准的水平。沱江入长江口断面总氮、总磷浓度的年内波动可能与沱江流域丰

表2 沱江流域河流总氮、总磷质量浓度统计

Table 2 Statistics of TN and TP mass concentrations of rivers in Tuojiang River Basin

河流		总氮/(mg·L ⁻¹)			总磷/(mg·L ⁻¹)		
		最大值	最小值	平均值±标准差	最大值	最小值	平均值±标准差
支流	绵远河	15.77	0.67	3.86±2.29	2.04	0.04	0.26±0.25
	石亭江	6.31	0.64	2.68±1.36	0.70	0.07	0.29±0.15
	鸭子河	6.59	0.51	2.99±1.31	1.02	0.03	0.30±0.16
	北河	6.04	0.10	1.62±1.16	0.47	0.03	0.18±0.08
	青白江	13.20	0.43	2.31±1.67	3.29	0.03	0.22±0.25
	毗河	12.80	0.84	4.77±2.64	1.94	0.02	0.30±0.22
	绛溪河	11.10	0.98	3.86±1.87	0.74	0.07	0.19±0.08
	阳化河	8.71	0.60	2.36±1.05	0.49	0.04	0.17±0.07
	九曲河	13.90	1.41	5.44±2.29	1.56	0.05	0.31±0.23
	球溪河	9.43	1.40	4.41±0.95	0.90	0.03	0.30±0.13
	威远河	17.00	2.04	5.81±3.12	3.70	0.06	0.65±0.73
	旭水河	8.71	1.32	4.37±1.72	0.57	0.13	0.30±0.11
	釜溪河	32.90	1.30	7.53±4.78	16.00	0.05	0.54±1.03
濑溪河	7.14	1.42	3.43±1.05	0.64	0.05	0.21±0.10	
干流	上游	7.17	0.50	4.04±1.34	0.53	0.02	0.24±0.09
	中游	6.55	1.14	3.43±0.93	0.48	0.04	0.21±0.07
	下游	7.96	1.48	4.06±0.99	0.55	0.06	0.23±0.06

水期和枯水期的动态交替变化有关。

沱江入长江口断面(W24)多年月平均总氮、总磷浓度见图4。由图4可见,2—4月总氮平均浓度出现极大值,其后逐渐降低,至9月出现极低值,9月后逐渐升高。这可能与沱江流域降水量季节变化有关。沱江流域降水春冬少、夏秋多,2—4月降水

量仅为全年降水量的3%^[16],且随着春季农业用水量的增加,河流径流量进一步减少,降低了河流的稀释自净能力,造成河流总氮浓度偏高。夏秋季(6—10月)降水径流增加,径流的稀释作用导致总氮浓度降低。与总氮不同,总磷浓度在5—7月较高,9月出现极低值,其他月份总磷浓度差异不大。5—7月

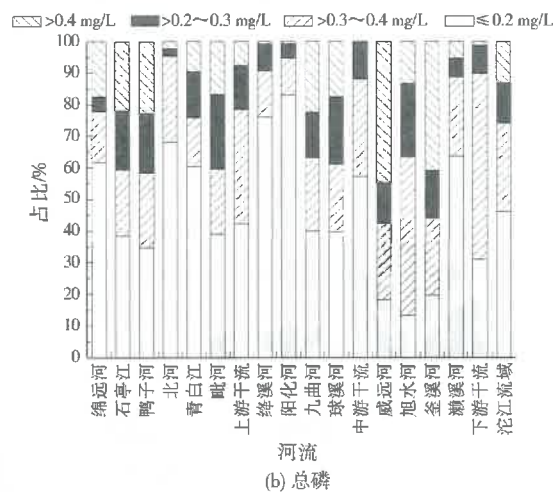
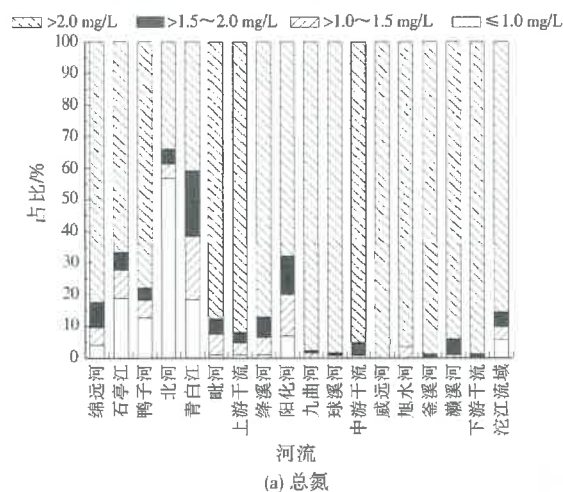


图2 沱江流域河流总氮、总磷浓度占比分布

Fig.2 Proportion distribution of TN and TP concentrations of rivers in Tuojiang River Basin

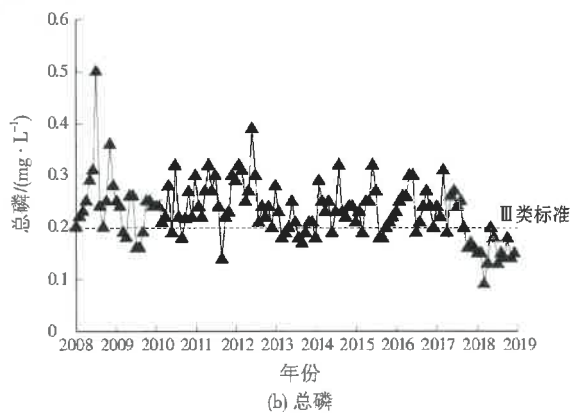
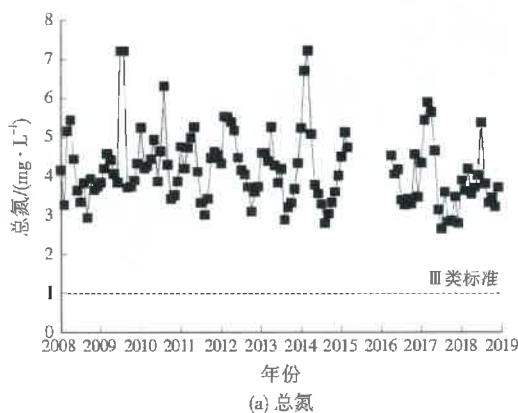


图3 断面W24的总氮、总磷年变化

Fig.3 Annual variation of TN and TP concentrations in the site of W24

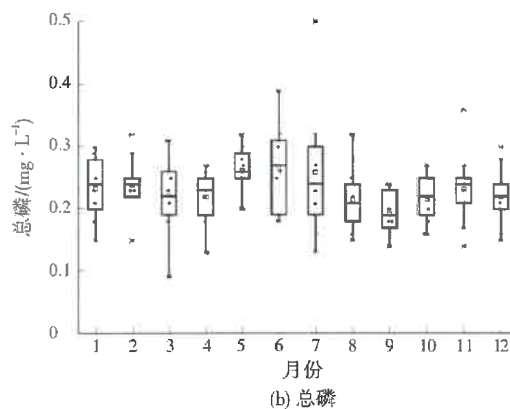
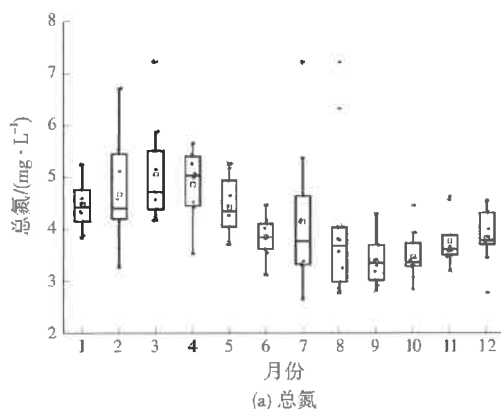


图4 断面W24的总氮、总磷月变化

Fig.4 Monthly variation of TN and TP concentrations in the site of W24

总磷浓度略高,可能与高温条件下底泥中磷的释放有关^[17]。尽管 5—7 月降水较多,稀释作用增强,但温度较高,底泥中磷释放进入水体导致总磷浓度增加。

2.2.2 空间分布

沱江流域 2008、2013、2018 年总氮和总磷年平均浓度见表 3。由表 3 可见,沱江流域 2008、2013 年总氮呈现明显的空间变异,下游总氮浓度明显高于上游和中游,其中下游威远河、釜溪河是沱江流域总氮浓度最高的。2018 年沱江流域河流总氮浓度空间变异较小,特别是下游总氮浓度明显降低。与总氮不同,2008 年上游和下游总磷浓度较高,中游较低;2013 年总磷浓度较 2008 年有明显降低,但空间

上上游支流石亭江、鸭子河和下游威远河、釜溪河总磷浓度较高;2018 年沱江流域除球溪河、九曲河总磷浓度较高外,其他区域总磷浓度空间差异较小。

2.3 综合评价结果

沱江流域主要河流总氮、总磷污染状况评价结果见表 4。从总氮来看,仅北河处于中度污染水平,其他河流均处于重度污染水平。从总磷来看,北河、绛溪河和阳化河处于轻度污染水平,毗河、九曲河、威远河和釜溪河处于重度污染水平,其余支流及沱江干流处于中度污染水平。污染综合评价结果显示,沱江流域主要河流氮、磷内梅罗综合污染指数处于重度污染水平。

表 3 沱江流域河流 2008、2013、2018 年的总氮和总磷

Table 3 Concentrations of TN and TP of rivers in Tuojiang River Basin in 2008, 2013 and 2018

河流		总氮/(mg·L ⁻¹)			总磷/(mg·L ⁻¹)		
		2008 年	2013 年	2018 年	2008 年	2013 年	2018 年
上游	绵远河	6.47	4.76	3.21	0.43	0.19	0.14
	石亭江	3.26	3.59	3.30	0.27	0.34	0.22
	鸭子河	3.63	3.55	3.50	0.37	0.33	0.21
	北河	0.67	0.88	3.53	0.17	0.19	0.18
	青白江	1.03	2.42	2.78	0.31	0.24	0.17
	毗河	4.24	7.85	4.68	0.27	0.21	0.25
	干流	4.40	4.26	3.72	0.13	0.20	0.21
中游	绛溪河	4.96	3.88	4.20	0.18	0.17	0.24
	阳化河	2.01	2.65	2.54	0.18	0.15	0.15
	九曲河	3.40	4.96	6.25	0.23	0.18	0.33
	球溪河	4.60	4.75	4.08	0.29	0.18	0.33
	干流	3.49	2.83	3.90	0.21	0.16	0.16
下游	威远河	9.29	5.57	4.40	1.35	0.38	0.19
	旭水河			3.88			0.25
	釜溪河	8.02	10.41	4.57	0.58	0.32	0.22
	濑溪河	3.87	3.32	3.08	0.22	0.21	0.13
	干流	3.92	3.72	3.90	0.26	0.19	0.15

表 4 沱江流域河流总氮、总磷污染状况评价

Table 4 Pollution assessment of TN and TP of rivers in Tuojiang River Basin

河流	总氮单因子污染指数	总氮污染等级	总磷单因子污染指数	总磷污染等级	内梅罗综合污染指数	综合污染等级
绵远河	3.86	4	1.28	3	11.30	4
石亭江	2.68	4	1.44	3	4.69	4
鸭子河	2.99	4	1.49	3	4.92	4
北河	1.62	3	0.89	2	4.36	4
青白江	2.31	4	1.24	3	11.69	4
毗河	4.77	4	1.51	4	9.31	4
上游干流	4.04	4	1.18	3	5.39	4
绛溪河	3.86	4	0.97	2	8.03	4
阳化河	2.36	4	0.85	2	6.26	4
九曲河	5.44	4	1.57	4	10.14	4
球溪河	4.41	4	1.48	3	6.99	4
中游干流	3.43	4	1.03	3	4.89	4
威远河	5.81	4	3.23	4	13.47	4
旭水河	4.37	4	1.48	3	6.50	4
釜溪河	7.53	4	2.70	4	23.53	4
濑溪河	3.43	4	1.04	3	5.28	4
下游干流	4.06	4	1.15	3	5.91	4

2.4 聚类分析

对沱江流域 14 条支流进行聚类分析,结果见图 5。由图 5 可知,14 条支流可以分为 3 类。第 1 类支流包括青白江、北河和阳化河。此类支流氮、磷浓度较低,且总磷平均浓度甚至低于 GB 3838—2002 中Ⅲ类标准(见图 6)。第 2 类支流包括毗河、鸭子河、濑溪河、绵远河、石亭江、绛溪河、旭水河,氮、磷含量较高。第 3 类支流包括釜溪河、威远河、九曲河和球溪河。这类支流流经资阳市、内江市、自贡市的主要乡镇和城区,氮、磷浓度显著高于其他两类。



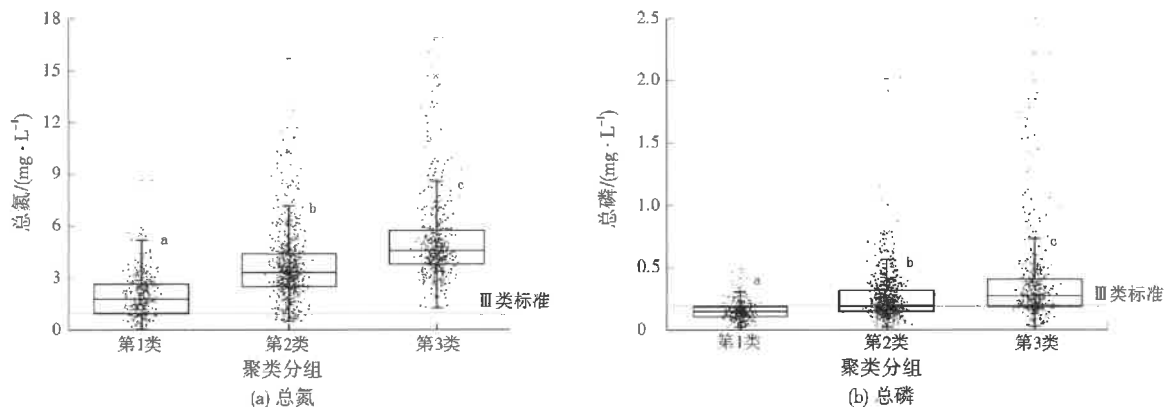
图 5 沱江流域各支流聚类分析结果
Fig.5 Clustering results of tributaries in the Tuojiang River Basin

3 讨论

沱江流域自北向南区域跨度大,流域内气候、地形地貌和经济社会发展状况均差异较大,造成流域内河流氮、磷污染来源复杂。总的来说,导致沱江流域河流氮、磷污染的原因主要有以下几点^[18]:(1)水资源短缺,每平方千米水资源量仅 38.40万 m^3 ,流

域以占四川 3.50%的水资源量支撑四川 20%以上的人口和 GDP。(2)水污染物排放量大,单位面积水污染物排放量是四川平均水平的 3 倍以上。(3)流域径流年内分配不均匀,水资源供需矛盾大。(4)存在结构性污染,产业结构和布局仍待优化,特别是由于历史布局遗留问题,大量废水排放企业沿江分布,污染风险较大。(5)流域城镇化水平持续提高,但生活污水处理率低。据调查,2015 年流域内城镇生活污水处理率仅 64%,乡镇污水处理厂建设比例仅 22.70%,而且处理能力不足与配套管网不完善的问题并存,雨污分流不彻底,生活污水直排现象突出。(6)农业与农村污染问题突出,特别是农村生活污水基本处于无序排放状态,而流域内农业面源污染的治理则缺乏有效手段。

沱江流域河流氮、磷浓度的时空分布主要受到区域内降雨、产业结构和城镇化水平等因素的影响^[19]。降水量的年内分布不均是导致沱江流域河流氮、磷浓度年内波动的主要原因。沱江流域年内降水量分布极不均匀^[20]。区域降水量差异也可能影响沱江河流氮、磷浓度的空间分布,上游山区年均降水量为 $1\,200 \sim 1\,700 \text{ mm}$,中下游年均降水量为 $870 \sim 1\,100 \text{ mm}$ ^[21]。另外,产业结构、城镇化水平差异也会影响沱江流域河流氮、磷的空间分布。沱江上游以农业为主,受工业和城市生活污水的影响较少,河流氮、磷浓度较低^[22]。沱江中游是沱江流域较发达的地区,区域内河流的氮、磷主要来源于城市污水和工业废水^[23];沱江下游不仅农业发达,而且近年来工业和城镇化水平发展迅速,河流氮、磷浓度不仅受农业面源污染的影响,而且受城市生活污水和工业废水的影响^[24]。



注:图上标注字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

图 6 不同聚类分组总氮、总磷的比较

Fig.6 Comparison of TN and TP between different groups

4 结 论

(1) 沱江流域主要河流总氮浓度差异显著, 85.51%的水样总氮浓度高于 GB 3838—2002 V 类标准, 53.90%的水样总磷浓度超过Ⅲ类标准。

(2) 沱江流域河流总氮浓度年际间变化较小, 但年内月节变化较大; 总磷浓度年际间逐渐变小, 年内月节变化较大。

(3) 沱江流域上游河流总氮和总磷浓度普遍低于中下游地区。球溪河、九曲河、釜溪河和威远河是沱江流域总氮、总磷浓度较高的河流。

(4) 沱江流域主要河流氮、磷内梅罗综合污染指数处于重度污染水平。

参考文献:

- [1] SIGUA G C, STEWARD J S, TWEEDALE W A. Water-quality monitoring and biological integrity assessment in the Indian River Lagoon, Florida: status, trends, and loadings (1988-1994)[J]. Environmental Management, 2000, 25(2): 199-209.
- [2] HOODA P S, EDWARDS A C, ANDERSON H A, et al. A review of water quality concerns in livestock farming areas[J]. Science of the Total Environment, 2000, 250(1/2/3): 143-167.
- [3] RODRIGUES V, ESTRANY J, RANZINI M, et al. Effects of land use and seasonality on stream water quality in a small tropical catchment; the headwater of Córrego Água Limpa, São Paulo (Brazil)[J]. Science of the Total Environment, 2018, 622/623: 1553-1561.
- [4] RIBAUDO M O, HEIMLICH R, CLAASSEN R, et al. Least-cost management of nonpoint source pollution: source reduction versus interception strategies for controlling nitrogen loss in the Mississippi Basin[J]. Ecological Economics, 2001, 37(2): 183-197.
- [5] 符东, 吴雪菲, 易珍言, 等. 沱江水质模糊综合评价及主要污染物的预测研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2844-2852.
- [6] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 1937-1947.
- [7] 杜明, 柳强, 罗彬, 等. 岷、沱江流域水环境质量现状评价及分析[J]. 四川环境, 2016, 35(5): 20-25.
- [8] 范力, 段慧, 张丹, 等. 沱江干流水质自动监测断面水质状况分析[J]. 环境影响评价, 2019, 41(4): 70-73.
- [9] 肖玖金, 谭周亮, 李旭东, 等. 基于物元分析法的沱江地表水水质评价[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(1): 104-108.
- [10] 杨耿. 岷江及沱江水系磷形态分布特征研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2018.
- [11] 冯懋洁, 张松柏. 沱江三皇庙水文站洪水过程中水质变化分析[J]. 四川水利, 2019, 40(3): 96-98.
- [12] 王波, 李伟, 尹元畅, 等. 沱江流域成都段水环境污染特征及治理对策[J]. 绿色科技, 2016(4): 57-59.
- [13] 四川统计局. 四川统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [14] 胡芸芸, 王永东, 李廷轩, 等. 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.
- [15] 汪涛, 龙虹竹, 赵原, 等. 川中丘陵区自然沟渠水体氮磷污染状况评价[J]. 山地学报, 2016, 34(2): 150-156.
- [16] 聂超, 倪福全, 邓玉, 等. 岷沱江流域径流对气候和土地利用变

- 化的响应[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(3): 110-118.
- [17] 余昊翔, 杨东翰, 谢梦飞, 等. 北运河流域沙河水库水质时空变化特征[J]. 环境化学, 2020, 39(10): 2849-2857.
- [18] 四川省大气、水、土壤污染防治“三大战役”领导小组办公室. 关于印发《沱江流域水污染防治规划(2017—2020年)》的通知[A]. 成都: 四川省大气、水、土壤污染防治“三大战役”领导小组办公室, 2017.
- [19] 汤显强. 长江流域水体富营养化驱动机制及防控对策[J]. 人民长江, 2020, 51(1): 80-87.
- [20] 曹阳. 变化环境对沱江流域径流影响的量化分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2016.
- [21] 曹文亚. 城镇化水平与资源环境压力空间耦合关系研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2020.
- [22] 王芳. 简阳市水资源合理配置研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [23] 何敏, 周波. 成都市青白江工业集中发展区可持续发展研究[J]. 生态经济, 2011(4): 139-143.
- [24] 邓琮. 基于 RS 和 GIS 的旭水河流域非点源污染研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.

编辑: 胡翠娟 (收稿日期: 2020-12-09)

(上接第 983 页)

- [11] LI D C, XU W F, MU Y, et al. Remediation of petroleum-contaminated soil and simultaneous recovery of oil by fast pyrolysis[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(9): 5330-5338.
- [12] 周浩, 汪根宝, 李蒙, 等. 含油钻屑的热解特性[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6421-6428.
- [13] VIDONISH J E, ZYGOURAKIS K, MASIELLO C A, et al. Pyrolytic treatment and fertility enhancement of soils contaminated with heavy hydrocarbons [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(5): 2498-2506.
- [14] 牛明芬, 殷智慧, 王琦, 等. 石油污染土壤清洗药剂筛选及效果评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2302-2308.
- [15] 杨振, 柳林杉, 刘明杰, 等. 油浸泥土热脱附修复小试实验条件的探索[J]. 环境工程学报, 2019, 13(10): 2320-2327.
- [16] 刘宇程, 王茂仁, 李永刚, 等. 油基岩屑热脱附处理工艺参数优化[J]. 环境工程学报, 2020, 14(6): 1639-1648.
- [17] LAM S S, RUSSELL A D, LEE C L, et al. Microwave-heated pyrolysis of waste automotive engine oil: influence of operation parameters on the yield, composition, and fuel properties of pyrolysis oil[J]. Fuel, 2012, 92(1): 327-339.
- [18] ARESTA M, DIBENEDETTO A, FRAGALE C, et al. Thermal desorption of polychlorobiphenyls from contaminated soils and their hydrodechlorination using Pd- and Rh-supported catalysts[J]. Chemosphere, 2008, 70(6): 1052-1058.
- [19] PUNNARUTTANAKUN P, MEEYOO V, KALAMBAHE-TI C, et al. Pyrolysis of API separator sludge[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2003, 68: 547-560.
- [20] 贺晓珍, 周友亚, 汪莉, 等. 土壤气相抽提法去除土壤中挥发性有机污染物的影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2008, 2(5): 679-683.
- [21] MA J, SUN S S, CHEN K Z. Facile and scalable synthesis of magnetite/carbon adsorbents by recycling discarded fruit peels and their potential usage in water treatment[J]. Bioresource Technology, 2017, 233: 110-115.
- [22] 莫学芳, 陈思伟, 华磊. 0# 柴油在不同温度下的氧化规律探索[J]. 中国储运, 2013(1): 103-104.

编辑: 黄 苇 (收稿日期: 2020-08-26)