2007—2019 年东江流域赣粤出境水质评价与成因分析

曾金凤[1,2]，刘祖文[1]，刘友存[3,4]，刘旗福[2]，许燕颖[3]，徐晓娟[2]

(1. 江西理工大学 建筑与测绘工程学院，江西 赣州 341000；2. 江西省赣州市水文局，江西 赣州 341000；
3. 江西理工大学 资源与环境工程学院，江西 赣州 341000；4. 江西省矿冶环境污染控制重点实验室，江西 赣州 341000)

摘　要：[目的] 分析东江源区赣粤出境水质时空分布特征，为该流域的水环境治理和水生态改善提供理论依据和数据支撑。[方法] 基于东江源区 2007—2019 年赣粤出境监测断面的 11 项水质指标，运用描述性统计分析、水污染指数法、相关性分析和 Mann-Kendall 检验等方法，分析了流域出境水质变化与成因。[结果] ①不同水文时期的水质状况均存在差异，以氯化物、硫酸盐和氨氮的时空差异性最为明显。②年内变化为汛期水质好于非汛期，劣Ⅴ水仅存在于非汛期；年际变化为，2008 年出境水质最差，2009 年开始好转，2017—2019 年全部满足Ⅱ—Ⅲ类水。③氨氮是出境水质最主要的污染物但浓度显著下降，稀土开采，果业开发和大型养殖等是影响水质的主要因素。[结论] 过去十几年，东江源区赣粤出境水不同水文时期水质略有不同但总体呈下降趋势，主要污染物氨氮浓度显著下降，源区近年采取的保护修复措施成效显著。

关键词：出境水质；污染评价；成因分析；东江源

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2020)04-0140-08　　**中图分类号**：X824

文献参数：曾金凤，刘祖文，刘友存，等. 2007—2019 年东江流域赣粤出境水质评价与成因分析[J]. 水土保持通报，2020，40(4)：140-147. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 04. 019；Zeng Jinfeng，Liu Zuwen，Liu Youcun，et al. Water quality evaluation and cause analysis of Dongjiang River basin in Jiangxi-Guangdong outbound during 2007—2019 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(4)：140-147.

Water Quality Evaluation and Cause Analysis of Dongjiang River Basin in Jiangxi-Guangdong Outbound During 2007—2019

Zeng Jinfeng[1,2], Liu Zuwen[1], Liu Youcun[3,4], Liu Qifu[2], Xu Yanying[3], Xu Xiaojuan[2]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi* 341000, *China*; 2. *Ganzhou Hydrology Bureau of Jiangxi Province, Gauzhou, Jiangxi* 341000, *China*; 3. *School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi* 341000, *China*; 4. *Jiangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control of Mining and Metallurgy, Ganzhou, Jiangxi* 341000, *China*)

Abstract: [Objective] The temporal and spatial distributions of outbound water quality of the Jiangxi-Guangdong boundary in the source region of Dongjiang River were analyzed in order to provide a theoretical basis and data support for the water environment management and water ecology improvement in this watershed. [Method] Based on the 11 water quality indicators of the monitoring section during 2007—2019, the methods of descriptive statistical analysis, water pollution index method, correlation analysis and Mann-Kendall test and other methods were used to to analyze the changes and causes of outbound water quality. [Results] ① Water quality was different in different hydrological periods, especially in the spatial and temporal variation of chloride, sulfate and ammonia nitrogen. ② The water quality in the flood season was better than that in the non-flood season, and the inferior V water only existed in the non-flood season. During the inter-annual period, the outbound water quality was the worst in 2008, and it started to be improved in 2009, and

收稿日期：2020-04-24　　**修回日期**：2020-05-19

资助项目：江西省自然科学基金项目“赣南稀土矿区典型流域侵蚀沉积过程与重金属元素迁移转化机理研究”(20181BAB203026)；国家自然科学基金项目(41861002)；赣州市科技研发项目(赣市科发字 2019[60])

第一作者：曾金凤(1979—)，女(汉族)，江西省于都县人，博士研究生，研究方向为水资源与环境分析评价。Email：45415116@qq. com。

通讯作者：刘祖文(1969—)，男(汉族)，江西省吉安县人，博士，教授，博士研究生导师，主要从事水环境及土壤污染修复技术方面的教学研究工作。Email：liuzw@jxust. edu. cn。

during 2017—2019, they tall met the requirements of class Ⅱ—Ⅲ. ③ Ammonia nitrogen was the most important pollutant of outbound water quality, but its concentration had decreased dramatically. Additionally, rare earth mining, fruit industry development and large-scale breeding were the main factors affecting water quality. [Conclusion] During 2007—2019, the water quality of the outbound water in the source area of the Dongjiang River was slightly different in different hydrological periods, but the overall trend was downward. The concentration of the main pollutant ammonia nitrogen dropped significantly. The protection and restoration measures adopted in the source area in recent years have achieved remarkable effects.

Keywords: outbound water quality; pollution assessment; cause analysis; Dongjiang River basin

东江源区是香港特区、粤港澳大湾区以及广东省东部地区的重要水源,同时也是江西省富藏稀土矿、果业种植和规模化养殖区域,在中国南方生态安全格局中有着非常重要的地位。源区的水质不仅事关区域的社会尤其是生态环境的可持续发展,而且事关粤东和粤港澳大湾区的建设和饮用水安全。因此,对于东江赣粤出境水质时空分布特征和污染成因进行分析研究,不仅有助于评估和改善流域生态环境[1-2],更是东江源区流域水污染防治和水生态修复的首要任务[3-4]。

东江源区流域水环境问题关系到区域的水安全和水生态的健康,也事关整个东江流域约 4 000 万居民的饮用水安全,以及流域内工农业生产和生活用水质量。近年来,随着流域内废弃矿区尤其是离子型稀土废弃矿区中氨氮和其他污染物的逐步释放,出境水质出现了一些一定程度的波动[5-6]。为掌握源区水质的时空演化特征,尤其是赣粤出境水质状况和影响因素,本文通过对区域 2007—2019 年 2 个出境监测断面的 11 个主要水质指标进行了统计分析,运用水污染指数法[7]、相关性分析和 Mann-Kendall 检验[8-9]等方法,分析了东江源区赣粤出境水质时空分布特征,以期为东江流域的水环境治理和水生态改善提供理论依据和数据支撑。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

东江源区位于江西省南部,介于 114°47′36″—115°52′36″E,24°33′44″—25°12′18″N 之间,包括江西省赣州市的寻乌县、安远县、定南县、龙南县的汶龙镇和南亨乡以及会昌县清溪乡。该流域近似扇形,东西宽 110.0 km,南北长 95.5 km,流域面积约 3 524.0 km^2,约占东江流域面积的 13.0%;海拔高度介于200～500 m 之间,以丘陵为主。流域气候属于典型的亚热带丘陵区湿润季风气候,年均降水量 1 581.0 mm,年际变化较大,丰—枯年交替出现;且降水年内差异显著,在汛期(4—9 月)部分地区洪涝灾害频发。东江流域主要包括寻乌水和定南水 2 个流域,含 2 个国家级重要江河湖泊水功能区[10],代表监测断面分别为寻乌斗晏和定南长滩。两个水功能区的基本情况详见表 1。

表 1　东江赣粤省界缓冲区基本情况

缓冲区位置	超始断面	终止断面	代表断面	长度/km	水质目标	监测时间
寻乌水赣粤缓冲区	江西省寻乌县与广东省龙川县交界处上游 10.0 km	江西省寻乌县与广东省龙川县交界处下游 10.0 km	寻乌斗晏	20.0	Ⅲ	2007—2018 年
定南水赣粤缓冲区	江西省定南县与广东省龙川县交界处界上游 10.0 km	江西省定南县与广东省龙川县交界处界下游 10.0 km	定南长滩	20.0	Ⅲ	2008—2018 年

1.2　数据来源

主要资料包括 pH 值、砷、溶解氧、高锰酸盐指数、5 d生化需氧量(BOD_5)、氨氮、总磷、氟化物、硫酸盐、氯化物和硝酸盐氮等 11 项水质指标,来源于江西省赣州市水文局 2007—2019 年对东江源区赣粤出境水域 2 个代表性水质监测断面(寻乌斗晏和定南长滩)的逐月实测资料。水质采样与分析评价按照水环境监测规范[11],水和废水监测分析方法(第 4 版)[12],(GB3838-2002)地表水环境质量标准[13],(SL395-2007)地表水资源质量评价技术规程[14]相关的操作规程执行。

1.3　研究方法

1.3.1　*水污染指数法*　以 GB3838-2002 水质标准与 WPI 值[15-16](water pollution index,见表 2)判断各断面的水质类别,选取污染最严重的水质指标作为判定水质类别的一种水质综合性分析方法,不仅可将水资源污染情况量化,而且能准确反映水质的时空变化特征进而了解水质的总体变化和发展趋势,该方法

广泛用于中国湿润半湿润地区的河流和湖泊水质评价。该研究基于 11 项水质指标分别计算 WPI 在定南水与寻乌水不同流域各指标的 WPI 进行空间分析，以及同一流域寻乌水(2007—2019 年)、定南水(2008—2019 年)不同时间的 WPI 值来分析其时间变化。

表 2 (GB3838-2002)水质标准及对应的 WPI 值

GB3838-2002 水质标准	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类	劣Ⅴ类
WPI	20	20＜WPI≤40	40＜WPI≤60	60＜WPI≤80	80＜WPI≤100	WPI＞100

当溶解氧(DO)浓度大于 7.5 mg/L 时，WPI＝20；当 2 mg/L≤DO≤7.5 mg/L 时，WPI 值计算公式为：

$$WPI(i)=WPI_i(i)+\frac{[WPI_h(i)-WPI_i(i)]\times[C_i(i)-C(i)]}{C_i(i)-C_h(i)} \quad (1)$$

当水质参数浓度未超过Ⅴ类标准时，WPI 值计算公式为：

$$WPI(i)=WPI_l(i)+\frac{[WPI_h(i)-WPI_l(i)]\times[C(i)-C_i(i)]}{C_h(i)-C_l(i)} \quad (2)$$

而当水质参数浓度超过Ⅴ类标准时，WPI 值计算公式为：

$$WPI(i)=100+\frac{C(i)-C_5(i)}{C_5(i)}\times 40 \quad (3)$$

根据各单项指标的 WPI(i)，取其最高值为该断面的水质污染指数，即

$$WPI=MAX[WPI(i)] \quad (4)$$

式中：$C(i)$为第 i 个水质指标的实测值；$C_l(i)$，$C_h(i)$，$C_5(i)$分别为第 i 个水质指标在 GB3838-2002 中所在类别标准的下限值、上限值和Ⅴ类标准限值；$WPI_l(i)$，$WPI_h(i)$分别为第 i 个水质指标所在类别标准下限值和上限值所对应的污染指数；WPI(i)为第 i 个水质指标所在类别对应的污染指数。

1.3.2 *其他方法* 出境断面的水质趋势分析采用 Mann-Kendall 检验法[17-19]，水质指标间的相关性采用 Pearson 相关性分析。此外，还运用了描述性统计分析等方法[20-22]。

2 分析与评价

2.1 水质评价

2.1.1 *水质特征* 从水质参数特征统计数据中(见表 3)各指标平均值可以发现，pH 值、氨氮、氟化物 3 个指标汛期低于非汛期；高锰酸盐指数、硝酸盐氮 2 个指标汛期高于非汛期；砷、5 d 生化需氧量、总磷、氯化物 4 个指标汛期和非汛期基本持平；pH 值在不同水期均接近 7.0；由于溶解氧与温度呈显著的负相关[23-24]，故非汛期的溶解氧高于汛期。运用水质评价指标进行计算，可以发现，①从指标极值看，高锰酸盐指数、5 d 生化需氧量 2 个指标最差出现过Ⅳ类；pH 值、氨氮、总磷 3 个指标则出现过劣Ⅴ类水；其余 6 个指标均一直在目标值范围，其中砷、氟化物 2 个指标均为Ⅰ类，但变化辐度大。②从指标值的平均值对应的水质类别看，氨氮为Ⅲ类水标准；总磷为Ⅱ类水标准；砷、溶解氧、高锰酸盐指数和 5 d 生化需氧量、氟化物及 pH 值 6 个指标均满足Ⅰ类水质标准；硫酸盐、硝酸盐和氯化物 3 个补充项目均在标准限值内。变异系数是标准差与其平均值的比值[25]，它反映不同水质参数空间分布的离散程度，C_v＜0.1 为弱变异，0.1≤C_v＜1 为中度变异，C_v≥1 为强变异。各项水质参数在不同水文时期均出现了不同程度的变异。从检测参数看，砷、总磷、氟化物 3 个指标为弱变异；pH 值、溶解氧、高锰酸盐指数、5 d 生化需氧量 4 个指标为中度变异；而氨氮、硫酸盐、硝酸盐氮、硝酸盐氨 4 个指标含量为强变异。从空间分布上，寻乌水的砷、总磷、氟化物 3 个指标为弱变异。pH 值、溶解氧、高锰酸盐指数、5 d 生化需氧量、氨氮 5 个指标呈中度变异。硫酸盐、氯化物、硝酸盐氮 3 个指标呈现强变异，且硫酸盐离、硝酸盐氮 2 个指标的离散程度明显大于定南水，而氨氮、氯化物明显小于定南水；定南水的砷、总磷、氟化物 3 个指标为弱变异。pH 值、溶解氧、高锰酸盐指数、5 d 生化需氧量、硝酸盐氨 5 个指标呈中度变异。氨氮、硫酸盐、氯化物 3 个指标呈现强变异。从不同水期分析，寻乌水的 pH 值、高锰酸盐指数、硝酸盐氮 3 个指标的 C_v 汛期略大于非汛期，其他 8 项指标 C_v 均是汛期小于非汛期而定南水 11 项指标的 C_v 汛期略小于非汛期，说明降水减弱了各指标的离散程度，对定南水尤其显著。综上所述，出境水质指标在不同水文时期其含量均存在一定差异。空间变化上，寻乌水的硫酸盐、氯化物、硝酸盐氮呈现强变异，定南水的氨氮、硫酸盐、氯化物呈现强变异。时间变化上，汛期离散程度小于非汛期，降水对定南水离散程度的影响尤为明显。

表 3　研究区水质参数统计特征　　mg/L

水文时期	检测值	pH 值	砷	溶解氧	高锰酸盐指数	5 d 生化需氧量	氨氮	总磷	氟化物	硫酸盐	氯化物	硝酸盐氮
寻乌水全年	最小值	4.80	0	5.00	1.00	0.20	0	0	0.02	0	0	0
	最大值	8.30	0.035 00	9.70	3.60	4.70	3.94	0.42	0.99	41.40	32.79	4.98
	平均数	6.80	0.001 3	6.70	1.80	2.70	0.89	0.05	0.32	10.12	7.41	2.02
	标准偏差	0.48	0.00	0.88	0.47	0.72	0.86	0.05	0.13	7.65	6.38	1.44
	变异系数	0.23	0.00	0.77	0.22	0.52	0.75	0.00	0.02	58.60	40.69	2.08
寻乌水汛期	最小值	4.80	0	5.00	1.20	1.00	0.03	0	0.02	0	0	0
	最大值	8.30	0.035 0	8.10	3.60	4.70	3.94	0.34	0.61	24.70	22.20	4.98
	平均数	6.60	0.001 4	6.50	2.00	2.80	0.77	0.05	0.30	11.49	7.27	2.49
	标准偏差	0.51	0.00	0.63	0.50	0.62	0.77	0.05	0.09	6.67	5.06	1.41
	变异系数	0.26	0.00	0.39	0.25	0.39	0.60	0.00	0.01	44.45	25.62	1.99
寻乌水非汛期	最小值	6.00	0	5.20	1.00	0.20	0	0	0.08	0	0	0
	最大值	8.20	0.010 0	9.70	2.50	4.40	3.32	0.42	0.99	41.40	32.79	3.99
	平均数	6.90	0.001 2	7.00	1.70	2.60	1.02	0.05	0.34	8.76	7.56	1.50
	标准偏差	0.39	0.00	1.00	0.35	0.82	0.94	0.05	0.16	8.49	7.62	1.32
	变异系数	0.15	0.00	1.00	0.12	0.67	0.88	0.00	0.03	72.10	58.12	1.73
定南水全年	最小值	6.20	0	4.50	0.80	0.60	0.05	0	0.02	0.03	0.29	0.26
	最大值	9.70	0.010 7	9.80	7.20	5.50	18.50	1.24	0.49	41.45	99.61	2.56
	平均数	7.20	0.001 0	6.80	2.20	2.60	1.03	0.07	0.22	5.42	14.68	0.85
	标准偏差	0.44	0.00	0.94	0.79	0.70	1.92	0.11	0.08	5.07	17.38	0.39
	变异系数	0.19	0.00	0.87	0.63	0.49	3.70	0.01	0.01	25.74	301.90	0.15
定南水汛期	最小值	6.20	0	5.00	1.10	1.00	0.05	0	0.02	0.85	1.26	0.35
	最大值	8.00	0.010 7	8.20	4.90	3.60	6.52	0.19	0.35	18.63	66.70	2.09
	平均数	7.10	0.001 1	6.50	2.30	2.50	0.81	0.05	0.21	5.24	14.26	0.89
	标准偏差	0.41	0.00	0.60	0.64	0.59	1.13	0.03	0.08	3.18	14.91	0.32
	变异系数	0.17	0.00	0.36	0.41	0.35	1.29	0.00	0.01	10.14	222.26	0.11
定南水非汛期	最小值	6.50	0	4.50	0.80	0.60	0.05	0	0.06	0.03	0.29	0.26
	最大值	9.70	0.006 2	9.80	7.20	5.50	18.50	1.24	0.49	41.45	99.61	2.56
	平均数	7.20	0.000 9	7.20	2.10	2.60	1.26	0.08	0.23	5.65	15.19	0.80
	标准偏差	0.46	0.00	1.07	0.91	0.80	2.48	0.15	0.08	6.69	20.07	0.45
	变异系数	0.21	0.00	1.13	0.84	0.63	6.13	0.02	0.01	44.78	402.74	0.20

2.1.2　时空分布　从综合污染指数分析可知:①年际变化上,2008 年出境水Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类水比例最高,达标率最低,2009 年开始呈现好转趋势,2017—2019 年,出境断面水质均满足Ⅱ—Ⅲ类水质标准;②年内变化上,汛期寻乌出境断面Ⅱ—Ⅲ类、Ⅳ类、和Ⅴ类的比例分别为 75.0%,16.7%,8.33%;定南水分别为 63.6%,27.2%,9.09%。非汛期寻乌水出境断面Ⅱ—Ⅲ,Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类的比例分别 41.6%,33.3%,16.7%,8.33%,定南水分别为 54.5%,27.2%,0,18.1%。汛期达标率高于非汛期,且劣Ⅴ类水均在非汛期,说明出境水汛期好于非汛期(见表 3,图 1)。

空间变化上,2008 年寻乌水出境断面全年不达标,定南水出境水达标率仅为 18.2%。寻乌水出境断面 2014 年起未出现劣Ⅴ类水,2016 年未出现Ⅴ类。定南水出境断面 2015 年起未出现Ⅴ类和劣Ⅴ类水,2016 年达标率为 100%(见表 3,图 1)。

2.1.3　主要污染因子　从东江源区水质污染指数 WPI 与各项水质指标相关性分析结果可见(表 4),通过显著性检验的指标有砷、高锰酸盐指数、总磷、氨氮 4 个指标。不同水文期 WPI 与氨氮指标浓度在 0.01 相关性分别为 0.978,0.974 和 0.980,氨氮是最主要污染因子。其次是砷,相关性分别是 0.756,0.803 和0.602,且非汛期大于汛期;总磷全年和非汛期在0.01相关性分别为 0.761 和 0.796,高锰酸盐指数则在0.05上相关性分别为 0.623 和 0.628。由此可见,在汛期,出境水主要污染物有砷和氨氮 2 个,而非汛期则为砷、氨氮、

总磷、高锰酸盐指数 4 个。结合源区的社会经济、优势产业及污染源分布，稀土矿业为东江源区工业主导产业，稀土采选矿业为东江源区及相应水系的主要污染源，符合稀土采选矿业工艺污染物排放特征[26-27]。

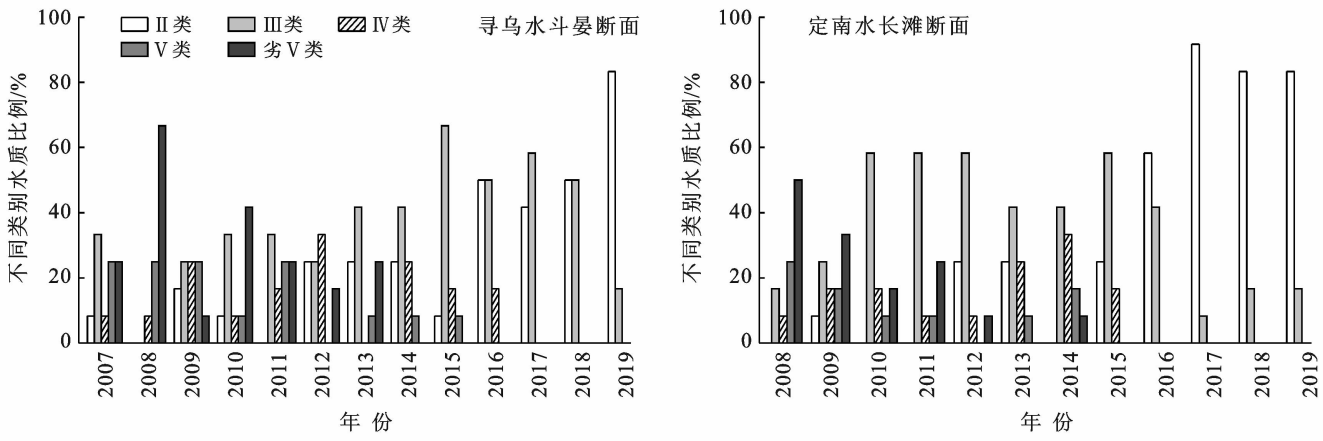


图 1 研究区 2007—2019 年水质不同时期类别比

表 4 水质污染指数 WPI 与各项水质指标相关性分析

水文时期	砷	pH 值	溶解氧	高锰酸盐指数	5 d 生化需氧量	氨氮	总磷	氟化物	硫酸盐	氯化物	硝酸盐
全年	0.765**	−0.678	0.103	0.623*	−0.362	0.978**	0.761**	−0.177	−0.311	−0.470	0.590
汛期	0.803**	−0.447	−0.261	0.179	−0.085	0.974**	0.539	−0.358	0.098	−0.531	0.640
非汛期	0.622*	0.113	0.428	0.683*	−0.593	0.980**	0.796**	0.026	−0.676	−0.438	0.114

注：* 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)，* * 相关性在 0.01 水平上显著(双尾)。

基于 GB3838-2002 水质标准，绘制 2007—2019 年东江源出境水主要污染指标氨氮、砷、高锰酸盐指数、总磷含量折线图(见图 2)，这 4 种指标均呈下降趋势。其中最主要污染物氨氮寻乌水出境断面 13 a 平均浓度值为 1.04 mg/L，最大 3.94 mg/L。超标频次为 43.9%，最大超标倍数 2.94 倍。定南水出境断面 12 a 平均浓度值为 1.17 mg/L，最大 18.5 mg/L，超标频次为 32.6%，最大超标倍数为 17.5 倍。寻乌水和定南水两个出境断面的氨氮浓度呈高度显著下降趋势，每年以 0.16 和 0.24 mg/L 的浓度递减。两个出境断面的砷浓度均呈下降趋势且一直在Ⅰ类水浓度标准内。定南水出境断面的高锰酸盐指数在 2019 年 10 月和 12 月出现 2 次超标，寻乌水和定南水的总磷分别在 2018 年 11 月至 2019 年 12 月间出现过 2 次和 4 次超标，但总体呈下降趋势。

2.2 成因分析

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验 运用 Mann-Kendall 检验分析 11 个指标变化趋势。寻乌斗晏和定南长滩出境断面的总磷、5 d 生化需氧量、氨氮、高锰酸盐指数、氟化物和氯化物 6 个指标，前者呈现显著或高度显著的下降趋势(见表 5)；pH 值呈上升趋势，由弱酸性向逐步向中性过渡；溶解氧、砷 2 项指标浓度无明显升降趋势；硫酸盐和硝酸盐氮 2 项指标浓度呈上升趋势。东江源下降趋势综合指数 $WQTI_{DN}$ 为 0.54，无明显变化趋势指数为 NN_{Om} 为 0.18，上升趋势综合指数 $WQTI_{UP}$ 为 0.18，$WQTI_{UP}<WQTI_{DN}$，表明东江源水质总体趋于好转。这与 2003 年以来开展的一系列东江源保护修复理措施相吻合[28]，江西省政府先后在源区实施了以“青山绿水”为重点 9 项生态工程和加强稀土资源管理有关政策，同时实施了以生态补偿[29]、河长制实施[30]和山水林田湖草综合试点等生态环保和治理工程项目。

2.2.2 同源分析 一般而言，若两元素间相关性显著或者极显著，则说明两元素间具有同源性。各项水质指标相关性分析结果(见表 6)显示，出境水的最主要污染物氨氮与硝酸盐氮无显著相关性，说明出境水体自然曝气效果或复氧能力较好，水中大量的氨氮在好氧条件下转为硝酸盐氮。氨氮、总磷、硫酸盐、氯化物、砷具有显著的相关性，说明其彼此存在较强的物质运移与转化关联，尤其是在非汛期，这主要是因为非汛期处于秋冬季节，平均气温比较低，因而溶解氧比较高；加之非汛期降水较少，导致农业面源和稀土矿区尾矿的释放氨氮、总磷、高锰酸盐指数、硝酸盐氮等污染物进入水体但未能得到及时稀释。东江源区寻乌水流

域内不仅有农业面源污染,还有大型稀土企业和众多的稀土矿山废弃地造成的点源污染;而定南水则主要集中分布源区内主要的农业面源污染和居民生活污水点源污染。同时,自 2000 年东江源区果业迅速发展以来,果业农药化肥施用量增多后导致果业的粗放式管理成为东江源区另一个面源污染的主要来源。

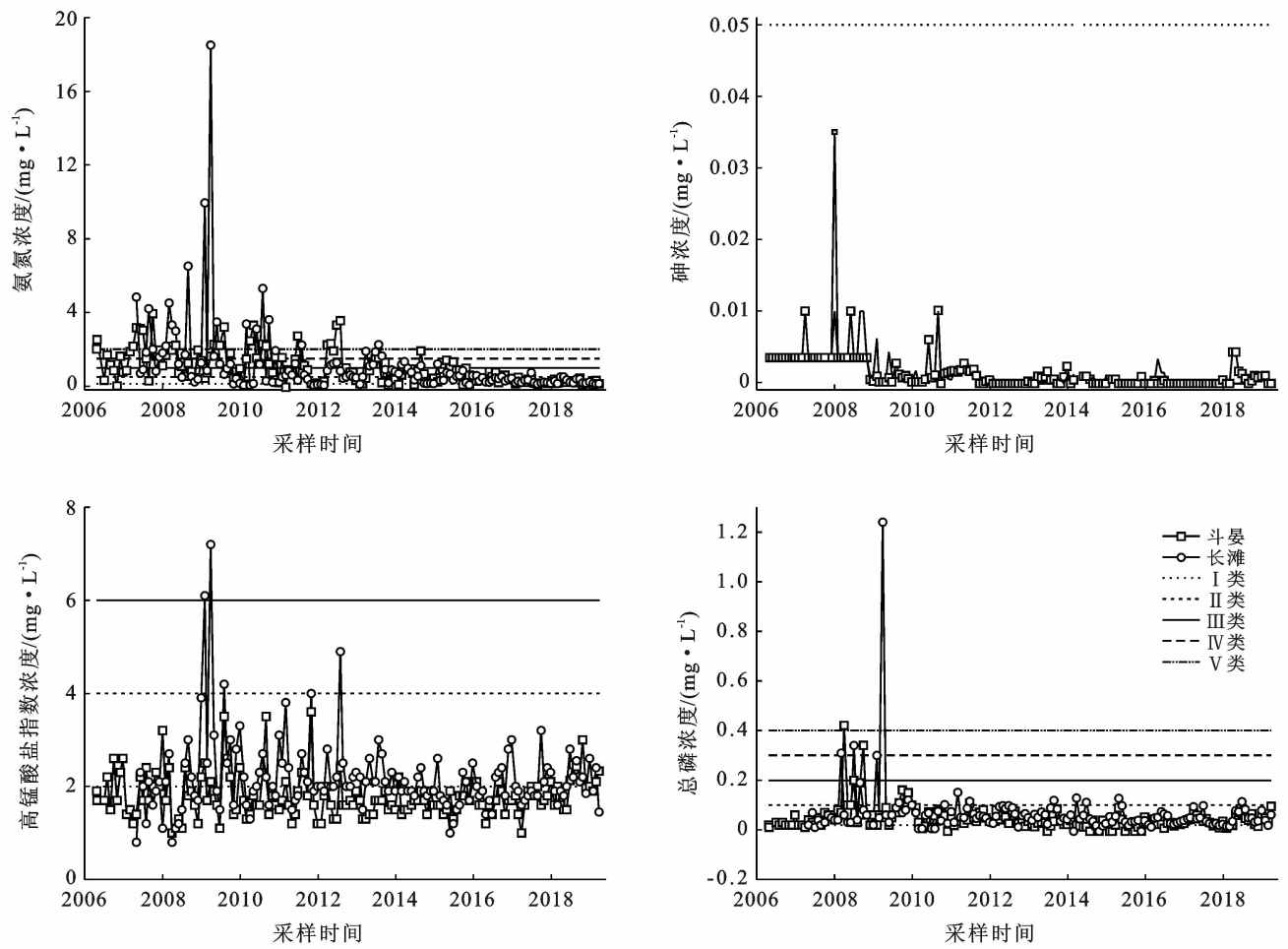


图 2　2007－2019 年研究区主要污染指标浓度变化趋势

表 5　2007－2019 年研究区 Mann-Kendall 检验成果

序号	指 标	寻乌水斗晏断面				定南水长滩断面			
		n	*S*	*Z*	变化趋势	*n*	*S*	*Z*	变化趋势
1	总磷	144	－2 164	－3.801	高度显著下降	132	－1 448	－2.901	高度显著下降
2	5 d 生化需氧量	144	1 667	2.928	高度显著上升	132	－965	－1.933	显著下降
3	氨氮	144	－3 832	－6.733	高度显著下降	132	－3 014	－6.04	高度显著下降
4	高锰酸盐指数	144	－652	－1.144	显著下降	132	－647	－1.295	显著下降
5	pH 值	144	3 322	5.776	高度显著上升	132	2411	4.831	高度显著上升
6	溶解氧	144	－1 200	－2.107	显著下降	132	－343	－0.686	无明显升降趋势
7	砷	144	－5 265	－9.251	高度显著下降	132	203	0.883	无明显升降趋势
8	氟化物	96	－1 833	－5.952	高度显著下降	96	－1 809	－5.874	高度显著下降
9	硫酸盐	76	1 352	6.262	高度显著上升	84	623	2.475	高度显著上升
10	氯化物	76	－1 258	－5.826	高度显著下降	84	－786	－3.124	高度显著下降
11	硝酸盐氮	84	515	2.046	高度显著上升	84	593	2.444	高度显著上升

注:*n* 为样本数;*S* 为统计量;*Z* 为标准化统计值。

表 6 2007—2019 年研究区各项水质指标相关性分析

水系	指标	pH 值	砷	溶解氧	高锰酸盐指数	5 d 生化需氧量	氨氮	总磷	氟化物	硫酸盐	氯化物	硝酸盐氮
寻乌水流域	砷		1									
	pH 值	1	−0.227**									
	溶解氧	0.154*	0.104	1								
	高锰酸盐指数	−0.012	0.206**	−0.109	1							
	5 d 生化需氧量	0.074	−0.182*	0.092	−0.067	1						
	氨氮	−0.138	0.221**	0.372**	−0.032	−0.097	1					
	总磷	−0.157*	0.111	0.033	0.038	0.000	0.122	1				
	氟化物	0.096	−0.080	0.071	−0.131	−0.029	−0.055	−0.103	1			
	硫酸盐	0.003	−0.023	0.006	0.070	0.186	0.035	−0.118	0.416*	1		
	氯化物	−0.029	0.259*	0.020	−0.079	−0.069	0.107	0.008	0.167	−0.090	1	
	硝酸盐氮	−0.263*	0.060	−0.277*	−0.141	0.302**	−0.291**	−0.061	0.365*	0.467**	0.143	1
定南水流域	砷		1									
	pH 值	1	−0.157									
	溶解氧	0.183*	0.044	1								
	高锰酸盐指数	0.143	−0.021	−0.035	1							
	5 d 生化需氧量	−0.026	0.051	0.255**	−0.162*	1						
	氨氮	0.231**	0.292**	0.214**	0.525**	−0.109	1					
	总磷	0.370**	0.091	0.190*	0.592**	−0.079	0.762**	1				
	氟化物	−0.124	−0.079	−0.103	0.016	−0.060	0.158	−0.013	1			
	硫酸盐	−0.046	−0.106	−0.096	0.146	−0.020	−0.050	0.034	0.329**	1		
	氯化物	−0.097	0.075	−0.049	0.013	−0.074	0.433**	0.039	0.193	0.501**	1	
	硝酸盐氮	−0.066	−0.066	−0.098	0.110	−0.101	0.016	0.088	0.201	0.563**	0.364**	1
	化学需氧量	−0.024	−0.137	0.012	0.203*	−0.198*	0.319**	0.333**	0.195*	0.298**	0.256*	0.332**

3 结 论

(1) 研究区域内出境断面的水质指标存在较大的时空差异，硫酸盐、氯化物在时空两个维度均呈强度变异。氨氮在寻乌水为中度异，在定南水为强变异，硝酸盐氮在寻乌水强变异，在定南水为中度变异。时间变化上，汛期离散程度小于非汛期，降水对离散程度有一定的影响，对定南水尤为明显，定南水的 11 项指标的 C_v 汛期均小于非汛期。

(2) 时间上，年际变化方面，2008 年出境水Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类水比例最高，2009 年开始呈现好转趋势，2017—2019 年，出境断面水质满足Ⅱ—Ⅲ类，达标率为 100%；年内变化方面，汛期寻乌水出境断面Ⅱ—Ⅲ类、Ⅳ类、和Ⅴ类的比例分别为 75.0%，16.7%，8.33%，定南水分别为 63.6%，27.2%，9.09%；非汛期寻乌水出境断面Ⅱ—Ⅲ，Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类的比例分别41.6%，33.3%，16.7%，8.33%，定南水分别为54.5%，27.2%，0，18.1%。汛期达标率高于非汛期，且劣Ⅴ水期均在非汛期，汛期好于非汛期。

(3) 空间上，2008 年寻乌水出境断面水质全年不达标，2014 年起未出现劣Ⅴ类水，2016 年未出现Ⅴ类，2017 年起达标率为 100%。定南水出境断面 2015 年起未出现Ⅴ类和劣Ⅴ类水，2016 年起水质达标率为 100%。

(4) 综合污染因子相关分析表明，出境水主要污染物汛期主要有砷和氨氮 2 项，非汛期则为砷、氨氮、总磷、高锰酸盐指数 4 项，而氨氮在不同水期与综合污染指数的相关性分别为 0.974 和 0.980，是东江源出境水体最主要污染因子。稀土矿业为东江源区工业主导产业，稀土采选矿业为东江源区及相应水系的主要污染源，符合稀土采选矿业工艺污染物排放特征。

(5) 相关性分析，Mann-Kendall 检验分析表明东江源出境水质趋于好转。可见对东江源区采取的稀土矿区整治、河长制、生态补偿和山水林田湖草等治理措施起到了显著的作用。污染物同源相关性分析得出，氨氮、总磷、硫酸盐、氯化物、砷具有显著的相关性，表明其彼此存在较强的物质运移与转化关联。最主要污染物氨氮与硝酸盐氮无显著相关性，说明出境水体自然曝气效果或复氧能力较好，水中大量的氨氮在好氧条件下转为硝酸盐氮。

(6) 下一步将收集调查源区社经指标如流域内主要入河污水排放量、GDP、人口变化等数据，以及水土保持治理、生态补偿、河长制实施、山水林田湖草等保护修复的量化指标如年度资金投入、废弃矿山存量的

动态面积等,深度研究出境水质变化的驱动机制与影响因素,以更进一步指导源区保护修复治理措施的精准实施和生态补偿的合理分配。

[参 考 文 献]

[1] Wu Zhaoshi, Wang Xiaolong, Chen Yuwei, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu Basin, China [J]. Science of the Total Environment, 2018,612(1):914-922.

[2] Liu Siwen, Huang Yuanying, Zhu Xiaohua, et al. Environmental effects of ion-absorbed type rare earth extraction on the water and soil in mining area and its peripheral areas [J]. Environmental Science & Technology, 2015,38(6):25-32.

[3] 郭晶,王丑明,黄代中,等.洞庭湖水污染特征及水质评价[J].环境化学,2019,38(1):152-160.

[4] Li Ranran, Zou Zhihong, An Yan. Water quality assessment in Qu River based on fuzzy water pollution index method [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, 50(12):87-92.

[5] 曾金凤.东江源区氨氮时空变化及影响因素分析[J].人民珠江,2015,36(4):79-84.

[6] 曾金凤.珠江流域江西片省界水体水质特征变化分析及对策[J].人民珠江,2016,37(8):72-76.

[7] Sener S, Sener E, Davraz A. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey) [J]. Science of the Total Environment, 2017,584:131-144.

[8] Singh K P, Malik A, Sinha S. Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti River (India) using multivariate statistical techniques: A case study [J]. Analytica Chimica Acta, 2005,538(1/2): 355-374.

[9] Gholizadeh M H, Melesse A M, Reddi L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques [J]. Sensors, 2016,16(8): 1298.

[10] 江西南昌江西省水利厅,江西水利规划设计院.江西省地表水环境水功能区划[R].江西 南昌:江西南昌江西省水利厅,江西水利规划设计院,2007.

[11] 中国人民共和国水利部. SL219-2013 水环境监测规划[S].北京:中国水利水电出版社,2016.

[12] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法 [M].4 版.北京:中国环境出版集团,2002.

[13] 中国人民共和国水利部. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国水利水电出版社,2002.

[14] 中国人民共和国水利部. SL395-2007 地表水资源质量评价技术规程[S].北京:中国水利水电出版社,2008.

[15] Solangi G S, Siyal A A, Babar M M, et al. Application of water quality index, synthetic pollution index, and geospatial tools for the assessment of drinking water quality in the Indus Delta, Pakistan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019,191(12):731.

[16] Jing Zhaoxia, Xia Jun, Zhang Xiang, et al. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River [J]. Research of Environmental Sciences, 2019,32(1):104-115.

[17] 朱建春.清水河径流量插补方法探讨[J].河南水利与南水北调,2012(21):44-45.

[18] 丁倩倩,刘友存,焦克勤,等.赣江上游典型流域水沙过程及驱动因素[J].水土保持通报,2018,38(4):19-33.

[19] 赵秋娜.基于 Mann-Kendall 模型的洋河水库水质变化趋势分析[J],吉林水利,2018(3):51-53.

[20] 周丰,郭怀成,刘永, 等. 基于多元统计分析和 RBFNNs 的水质评价方法[J]. 环境科学学报,2007,27(5): 846-853.

[21] Pejman A H, Bidhendi G R N, Karbassi A R, et al. Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques [J]. International Journal of Environmental Science & Technology, 2009,6(3):467-476.

[22] Chen Ming, Li Fengguo, Tao Meixia et al. Distribution and ecological risks of heavy metals in river sediments and overlying water in typical mining areas of China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 146(9): 893-899.

[23] Lü Jianshu, Zhang Zulu, Li Shuang, et al. Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China [J]. Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry, 2014,299(3):1671-1681.

[24] Alloway B J. Sources of heavy metals and metalloids in soils [M] // Heavy Metals in Soils. Springer, Dordrecht, 2013.

[25] Liu Youcun, Liu Yan, Chen Ming, et al. Characteristics and drivers of reference evapotranspiration in hilly regions in Southern China[J]. Water, 2019, 11(9):1914.

[26] 刘友存,刘正芳,刘基,等.赣江上游龙迳河水体氨氮与重金属污染分布特征及风险评价[J].有色金属科学与工程,2019,33(4):85-93.

[27] 肖子捷,刘祖文,张念.离子型稀土采选工艺环境影响分析与控制技术[J].稀土,2014,35(6):56-61.

[28] 刘旗福,曾金凤.东江源水功能区水质变化特征与保护政策关联分析[J].人民珠江,2014,36(2):109-111.

[29] 杨中茂,许健,谢国华.东江流域上下游横向生态补偿的必要性与实施进展[J].环境保护,2017,45(7):35-37.

[30] 曾金凤.江西省河长制推行成效评价研究:以东江源区赣粤出境水质变化为例[J].水利发展研究, 2018,18(6):6-11.