

赣江南昌段水化学特征及城区影响¹

李燕^{1, 2}, 王鹏^{1, 2}, 陈波^{1, 2}, 李传琼^{1, 2}, 刘君政^{1, 2}, 肖汉玉^{1, 2}

(1. 江西师范大学地理与环境学院, 江西 南昌 330022;

2. 江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330022)

【摘要】: 为探究赣江南昌段水化学时空变化特征及南昌城区对赣江的影响, 于2015年4月~2016年3月在赣江南昌段(赣江进入南昌城区前、城区中心及流经城区后的北支、中支和南支)进行月周期采样, 分析水体中的化学离子(HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+)、重金属元素(Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb)以及溶解性有机碳(DOC)、总磷(TP)的分布特征及影响因素。结果表明: 1) 赣江南昌段总体水质在地表水源地标准限值内, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水, HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、Mn和DOC含量在不同月份间的变化主要受流量影响, Cr、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb和TP受流量影响较小。(2) 赣江南昌段污染程度为: 南支污染最重, 北支次之, 中支、城区中心和入城区前的污染程度相近。TP、Cr、Ni、Cu、Sb、Pb在南支显著偏高, Mn在北支显著偏高。(3) TP、Ni、Cu、Pb受南昌城区影响显著, 经城区后含量增加; DOC、Cd经城区后含量减小, 但流经城郊农业区后增加; HCO_3^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、Cr、Fe、Mn、Sb受南昌城区影响不显著。

【关键词】: 赣江; 南昌城区; 水化学; 时空变化

【中图分类号】: X143

【文献标识码】: A

【文章编号】: 1004-8227(2018)02-0386-09

【DOI】: 10.11870/cjlyzyyhj201802018

城市河流易受到工业废水、生活污水及地表径流的污染。进入河流的污水中含有重金属、微污染物及病原体等多种有害物质, 直接或间接破坏河流生态系统、危害人类健康^[1, 2]。赣江南昌段是南昌市主要的饮用水水源, 同时承接了南昌市大部分的工业废水和生活污水^[3]。随着南昌城市化水平的逐步提高, 城市需水量与污水排放量逐年增加^[4, 5], 河流水质问题日益受到重视。目前关于赣江南昌段水环境的研究较少, 主要基于野外采样^[6, 7], 统计年鉴^[8]或水质模型^[3, 9]分析水体污染程度, 以上研究表明赣江南昌段水质总体较好, 南支污染相对较重。已有研究大多基于在丰水期或枯水期的单次野外采样, 缺乏基于月时间尺度的完整水文年度采样, 难以真实反映水体中各指标的变化情况, 而且不同水质指标的影响因素尚不清楚。赣江经南昌后分成3支注入鄱阳湖, 是鄱阳湖水化学成分的主要来源^[10, 11]。阐明赣江南昌段水化学时空变化特征和南昌城区对赣江的影响, 对南昌市

¹[收稿日期]: 2017-04-01; [修回日期]: 2017-06-11

[基金项目]: 国家自然科学基金(41661017, 41201033); 江西省自然科学基金(20151BAB213035); 江西省重大生态安全问题监控协同创新中心资助项目(JX-EW-00)

[作者简介]: 李燕(1992~), 女, 硕士研究生, 研究方向为水环境生态. E-mail: liyanstarrysky@163.com

饮用水安全及鄱阳湖水环境保护具有重要意义。

本次研究通过对赣江南昌段 5 个样点进行了为期一年的月周期采样，测试河水中离子 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ ，重金属元素 Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb、溶解性有机碳 (DOC) 和总磷 (TP)，分析以上水化学指标的时空变化特征和影响因素，探讨南昌城区对赣江水质的影响。

1、材料与方法

1.1 研究区概况

南昌为江西省会，位于赣江下游，地貌以平原、水域、岗地为主，境内水系发达，湖泊众多，全市水域总面积达 2204km²，占全市土地面积的 29%。气候为亚热带湿润季风气候，降水丰沛但不均，有明显的汛期和枯水期之分。赣江流经赣抚平原灌区后从南昌市穿城而过，把南昌市划分为“一江两岸”的格局，流经南昌城区后分北支、中支、南支注入鄱阳湖，北支流经部分新城区和城郊农业区，南支环绕老城区及高新技术开发区，中支主要流进城郊农业区。

1.2 样品采集

采样点具体位置为：G1：赣江人南昌城区前，G2：南昌市区中心，G3：赣江南支，G4：赣江中支，G5：赣江北支（图 1）。2015 年 4 月至 2016 年 3 月每月中下旬在各采样点河道中心 50cm 深度取河水样，共采集 60 个水样（样品编号设定：G_i_j，G_i为采样点位置（i=1, 2, 3, 4, 5），j 为采样月份（j=1, 2, 3...12））。利用有机玻璃采样器采集水样，装入聚乙烯瓶，置于 0~4° 环境下密封遮光保存，其中用于测定 TP、DOC 的水样加硫酸至 pH≤2。

采样时记录当日赣江外洲站早 8 时流量（表 1）。由于赣江流经南昌后的 3 条分支缺少流量监测资料，并且南昌城区距离较短，各采样点处流量动态变化相近，本次研究中仅以外洲站流量监测数据代表赣江南昌段流量。受 2015~2016 年强厄尔尼诺过程影响^[12]，赣江流域枯水期降水明显增多，5 月、11 月和 12 月的采样在暴雨之后进行，赣江流量明显偏高（表 1）。

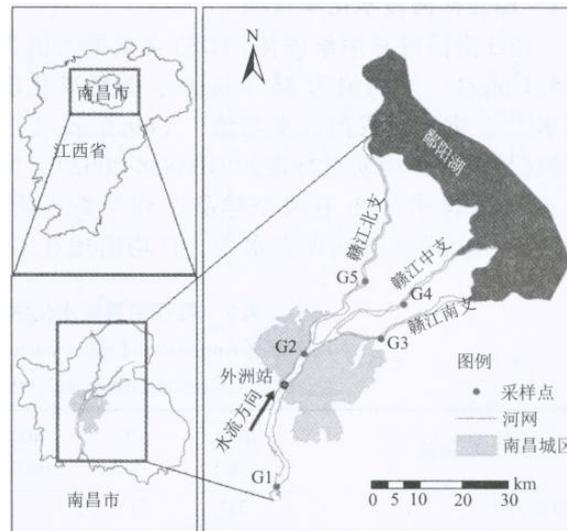


图 1 赣江南昌段地理位置及采样示意图

表 1 2015 年 4 月~2016 年 3 月采样日赣江外洲站流量、月降水量及多年平均月降水量

日期	4-25	5-23	6-27	7-15	8-14	9-13	10-17	11-21	12- 12	1-16	2-17	3-13
流量 (m ³ /s)	1060	8260	3110	2150	1360	1310	1230	7990	4790	3480	2460	3200
月份	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月
月降水量 (mm)	182.2	232	493.3	237.8	95.6	95.4	92.4	293.3	117.9	113.1	47.3	90.2
多年月平均降水量 (mm)	215	250	263.5	131.7	114.3	65.6	57.6	62.7	43.6	70.1	99.7	162.9

注:外洲站流量数据自南昌水文信息网 <http://7www.jxncsw.com/list.jsp? classid=19>, 月降水量数据来自中国气象局气象数据中心 <http:// www.cma.gov.cn/2011qxw/2011qsjgx/>.

1.3 分析方法

TP 米用全自动间断化学分析仪 (SmartChem200) 测定, DOC 采用 TOC 测试分析仪 (TOC-LCPH, Shimadzu, Japan) 测定, HCO_3^- 采用酸碱指示剂滴定法测定。剩余水样用 0.45 μm 滤膜抽滤后分为两部分, 一部分水样加 HNO_3 至 $\text{PH}<2$, 用于测定重金属元素 (Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb); 未加酸部分用于测定阴阳离子 (K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-}); 其中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 采用等离子体发射仪 (Optima 8000, PerkinElmer, USA) 测定, NH_4^+ 采用纳氏试剂比色法 (GB/T7479-1987) 测定, Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 采用 ICS-2100 离子色谱系统测定; 重金属元素 Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb 米用电感耦合等离子体质谱 (X series II, Thermo, USA) 检测。所有元素均进行 2 次平行测样, 相对标准偏差 (RSD) 均少于 10%。总溶解固体 (TDS) 含量通过所测离子质量总和计算。

1.4 数据处理

通过描述性统计和单因素方差分析, 初步分析了赣江南昌段水化学指标的时空分布特征, 用 Pearson 相关性分析 (双侧检验) 分析各水化学指标与流量之间的相关性, 对时间、样点进行聚类 (Ward 法、平方 Euclidean 距离, Z 得分), 分析赣江南昌段水化学时间、地点变化特征, 并用主成分分析探讨南昌城区对赣江水化学指标的影响。所有数据均取对数 $\log_{10}(x)$ 处理, 数据统计采用 SPSS19.0, 图形输出采用 Origin Pro2016。

2、结果与讨论

2.1 赣江南昌段水化学指标

赣江南昌段总溶解固体 (TDS) 含量最大值为 145.1mg/L, 平均值为 86.1mg/L, 为低矿化度河水^[13], 大于世界河流平均值^[14] (69.0mg/L)。参照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 所采 60 个水样中, Pb 有两个样品达到 V 类水质, 氨氮有一个样品达到 IV 类水质, 且均出现在 G3 样点; NO_3^- 、Mn、Fe 分别有 1、2、1 个样品超出集中式生活饮用水地表水源地补充项目标准限值, NO_3^- 超标样点为 G3, Mn、Fe 超标样点为 G5, 主要超标月份为 4、10 月。综上所述, 赣江南昌段总体水质较好, 个别水样无机氮和重金属超标。

与其他河流或城市河段水化学指标对比 (表 2), 赣江南昌段水体中离子含量均低于温榆河北京段、珠江广州段、京杭大运河杭州段已测指标, Cl^- 高于长江, Cl^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 高于鄱阳湖湖区。重金属元素 (除 Ni 外) 均高于珠江广州段、湘江株洲段, 低于长江口上海段 (除 Cu 外)。

表 2 赣江南昌段水化学指标与其他河流或城市河段对比

河流	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)
温榆河 ^[15]	331	71.3	-	71.9	68.8	10	28.7	66.9	-
珠江流域 ^[16]	118	2.4	-	10.1	6.7	-	5.9	29.2	-
赣江流域 ^[17]	15.4	17.3	1.26	13.3	10.1	2.3	3.1	16.8	-
鄱阳湖区 ^[18]	44.4	6.71	0.92	15.9	11.1	4.35	2.94	11.3	-
长江 ^[14]	134	2.9	-	11.7	8.3	-	7.6	34.1	-
温榆河（北京段） ^[19]	399	69.2	-	30.4	90.3	13.5	27	68.1	-
珠江（广州段） ^[20]	61.2	14.9	5.5	18.8	12.1	2.9	3.6	23	77.9
京杭大运河（杭州段） ^[21]	148	59.9	-	44.8	34.7	6.7	8.9	42.3	-
赣江（南昌段，本次研究）	37	7.77	4.56	11.3	5.61	2.81	2.3	14.3	0.51

河流	Cr (ug/L)	Mn (ug/L)	Fe (ug/L)	Ni (ug/L)	Cu (ug/L)	Cd (ug/L)	Sb (ug/L)	Pb (ug/L)
珠江（广州段） ^[20]	1.7	1.06	-	1.89	1.09	0.04	-	0.08
湘江（株洲段） ^[22]	-	-	-	-	2.41	0.43	-	1.33
闽江（福州段） ^[23]	-	5.7	60.3	-	236	21.5	-	7
长江口（上海段） ^[24]	-	73.1	264	-	9	3.6	-	7
赣江（南昌段，本次研究）	2.9	15.5	119	1.65	29.8	0.07	0.21	3.59

注：“-”表示未测定

2.2 赣江南昌段水化学时间变化特征:

如图 2 所示，赣江南昌段水体中阴、阳离子浓度按大小排序为：阳离子： $Ca^{2+} > Na^{+} > K^{+} > Mg^{2+} > NH_4^{+}$ ，阴离子： $HCO_3^{-} > SO_4^{2-} > Cl^{-} > NO_3^{-}$ ；水化学类型为 HCO_3-Ca 型水，与胡春华对鄱阳湖水系水化学类型研究的结果相一致^[17]。

根据时间聚类（图 3），将采样月份分为两组：GroupA（1、2、3、5、6、7、11、12 月），GroupB（4、8、9、10 月）。5 月、11 月的采样当日流量在全年中为高值，4、10 月份为低值（表 1），Group B 平均流量（4429m³/s）显著高于 Group A（1240m³/s）（ $p < 0.001$ ）。 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 K^{+} 、 Na^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^{+} 、Mn 含量在 4、10 月份达到高值，在 5、6、7、11 月份为低值，Cr、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb、DOC、TP 无明显变化规律（图 2）。DOC、Cr 在 Group A 高于 Group B，Cd 在两组间相等，其余水化学指标均低于 Group B；水体中离子（除 Ca^{2+} 、 NH_4^{+} ）、TDS、DOC 在两组间存在显著差异，重金属元素、TP 在两组间差异不显著（表 3）。结合 Pearson 相关系数（表 4）， HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^{+} 、Mn 与流量呈显著负相关，DOC 与流量呈显著正相关，Cr、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb、TP 与流量无显著相关。以上分析表明流量增大对赣江南昌段水体中 HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 、 NO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^{+} 、Mn 含量有明显稀释作用；DOC 随流量增大而增大可能是由于径流汇流过程中将更多有机质带入河流；Cr、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb、TP 与流量无显著相关，表明这些化学指标受其它因素的影响。

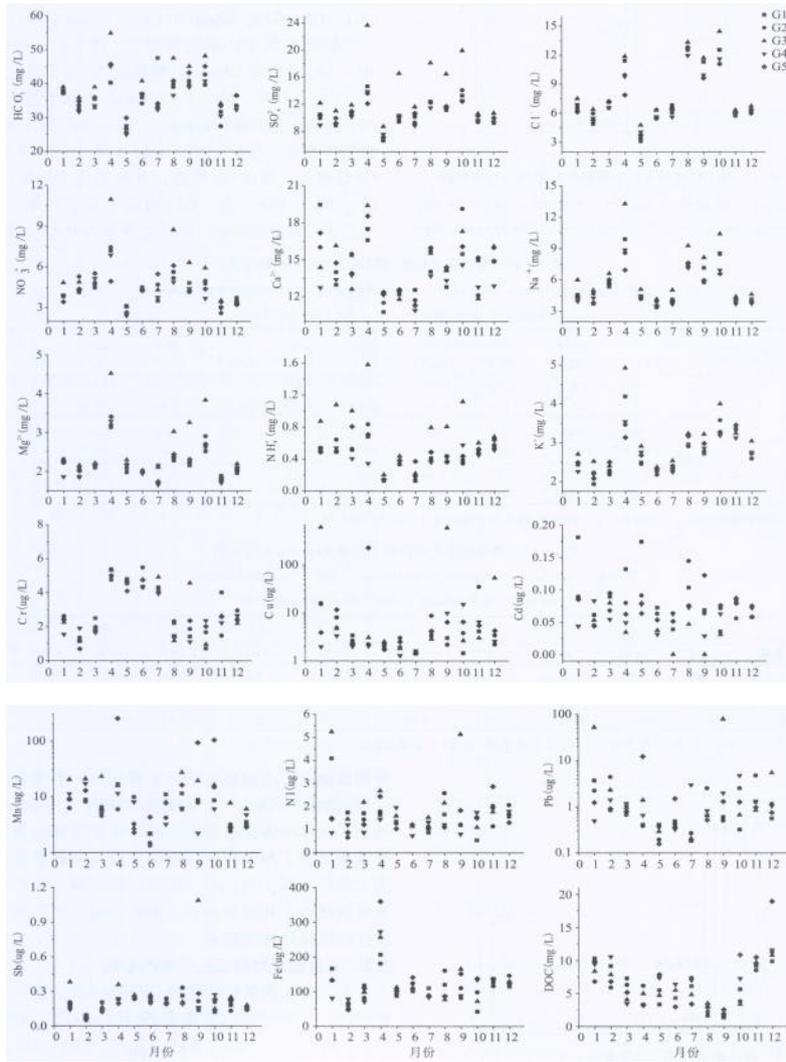


图 2 赣江南昌段水化学指标时间变化趋势

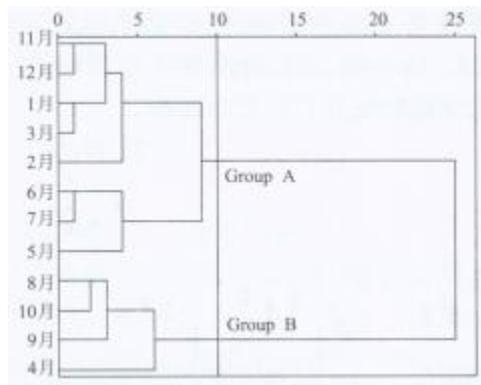


图 3 赣江南昌段水化学指标时间聚类分析树形图

表 3 赣江南昌段水化学指标基于时间聚类均值表

水化学指标	TDS (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)
Group A	56b	34.1 ^b	5.93 ^b	3.95 ^b	9.92 ^b	4.41 ^b	2.55 ^b	2.02 ^b	13.6	0.47
Group B	122.6 ^a	42.7 ^a	11.4 ^a	5.78 ^a	14.0 ^a	8.03 ^a	3.33 ^a	2.84 ^a	15.8	0.5

水化学指标	TP (mg/L)	DOC (mg/L)	Cr (ug/L)	Mn (ug/L)	Fe (ug/L)	Ni (ug/L)	Cu (ug/L)	Cd (ug/L)	Sb (ug/L)	Pb (ug/L)
Group A	0.05	7.52 ^a	3.02	6.99	106	1.59	21.6	0.07	0.19	2.54
Group B	0.07	3.73 ^b	2.65	32.4	144	1.77	46.2	0.07	0.27	5.68

注：不同字母上标表示显著性水平 $p < 0.05$ 时，通过LSD 检验统计集群之间的差异。

表 4 赣江南昌段水化学指标与流量 Pearson 相关系数

	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	NH ₄ ⁺	DOC
流量	-0.80**	-0.83**	-0.78**	-0.71**	-0.72**	-0.31 *	-0.64**	-0.45**	-0.30*	0.57**

	TP	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Cd	Sb	Pb
流量	0.15	0.19	-0.53**	-0.11	0.05	-0.08	0.2	-0.1	-0.14

注：**在 0.01 水平（双侧）上显著相关。* . 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。

2.3 赣江南昌段水化学的空间变化特征：

根据赣江南昌段采样点间水化学指标的空间差异，可以将采样地点分为三组（图 4）：Group A（G1、G2、G4），Group B（G5），Group C（G3）。

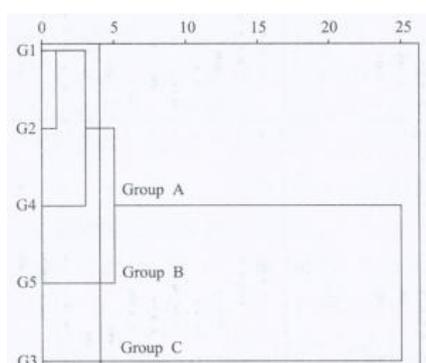


图 4 赣江南昌段水化学指标地点聚类分析树形图

如表 5 所示：水化学指标（除 Ca²⁺、DOC、Mn、Fe、Cd）在 Group C（赣江南支）高于其它样点；Ca²⁺、DOC、Mn、Fe 在 Group B 高于其它各组，其余水化学指标（除 Cl⁻、Na⁺、Cr、Cd）在三组中居于中间值；Cd 在 Group A 高于其它各组，Cd 最高值出现在 G1 样点，其余水化学指标（除 Cl⁻、Na⁺、DOC、Cr、Cd）均低于其它各组，在三组中污染程度最轻。赣江南支周边分布众多工业污染源与青山闸等生活污水排污口，为南昌市主要的纳污水体^[3, 25]，表明赣江南支受到污染，增加了水体中各化学指标含量。由此可知地点聚类结果体现了污染程度，污染程度由高到低排序为 G3>G5>G4, G2, G1。即赣江经南昌城区后南支污染最重，其次为北支，中支、城区中心和入城区前的污染程度相近。

表 5 赣江南昌段水化学指标基于地点聚类均值表

水化学指标	EC (uS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)
Group A	60.9 ^b	35.6 ^a	7.63	4.34	10.5 ^b	5.38 ^b	2.72	2.19 ^b	14.1	0.42 ^b
Group B	63.4 ^b	37.8a ^b	7.35	4.34	10.6 ^b	5.09 ^b	2.77	2.26 ^b	14.8	0.49 ^b
Group C	76.4 ^a	40.2 ^a	8.62	5.43	14.3 ^a	6.85 ^a	3.09	2.65 ^a	14.4	0.78 ^a

水化学指标	TP (mg/L)	DOC (mg/L)	Cr (ug/L)	Mn (ug/L)	Fe (ug/L)	Ni (ug/L)	Cu (ug/L)	Cd (ug/L)	Sb (ug/L)	Pb (ug/L)
Group A	0.05 ^b	6.13	2.88	6.85b	114	1.48 ^b	5.22 ^b	0.08 ^a	0.19 ^b	1.33 ^b
Group B	0.06 ^b	7.09	2.81	42.6a	135	1.50 ^b	23.6 ^b	0.07 ^{ab}	0.19 ^b	1.83 ^b
Group C	0.10 ^a	5.8	3.04	14.1b	120	2.31 ^a	110 ^a	0.05 ^b	0.30 ^a	12.1 ^a

注：不同字母上标表示显著性水平 $p < 0.05$ 时，通过 LSD 检验统计集群之间的差异。

2.4 南昌城区对赣江水化学的影响

表 6 为水化学指标主成分分析结果。第一主轴解释了 34.86% 的方差变异，HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、NH₄⁺、Mn 在第一主轴上具有大的载荷。以上指标与流量呈显著相关（表 4），并且仅 SO₄²⁻、NH₄⁺ 在样点间存在显著差异（ $P < 0.05$ ），表明 HCO₃⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、NH₄⁺、Mn 主要受上游来水的影响，SO₄²⁻、NH₄⁺ 在一定程度上受南昌城区影响。第二主轴解释了 16.49% 的方差变异，TP、Ni、Cu、Pb 在第二主轴上具有大的载荷。赣江南支是流经城区长度最长的分支，TP、Ni、Cu、Pb 在赣江南支高于其它样点，其中 Cu、Pb 分别为 G1 的 29 倍和 13 倍，为 G2 的 14.7 倍和 7.2 倍。根据《2015 年江西省水资源公报》对全省 307 个监测断面进行监测及对鄱阳湖水系河长 5453 公里进行评价，发现赣江南支青山闸段为主要污染河段之一，主要污染物为氨氮和总磷，且赣江南支周边建有金属冶炼厂、电子厂等企业，说明 TP、Ni、Cu、Pb 元素含量主要受到城区影响，流经城区后含量增加。第三主轴解释了 14.54% 的方差变异，Cr、Fe、Sb 在第三主轴上具有大的载荷。Cr、Fe、Sb 含量在各样点间无显著差异（ $p < 0.05$ ）；表明 Cr、Fe、Sb 受到城区的影响小。第四主轴解释了 8.60% 的方差变异，DOC、Cd 在第四主轴上具有大的载荷。Cd 在 G1 处高于其他各样点，过城区后在赣江北支高于其它两条支流。DOC 在赣江北支大于其它样点，赣江在进行入南昌前流经赣抚平原灌区，赣江北支流经城区部分为大学城、居民区及商业用地，流经城区外部分为城郊农业区。研究表明化肥的施用是河水 Cd 的重要来源^[26~28]，生活污水、农业用地尤其是水稻种植土壤中 DOC 含量大于其他土地利用方式^[29~31]，以上分析表明赣江南昌段 Cd、DOC 经城区后含量减小，但在城郊农业区有所增加。

表 6 赣江南昌段水化学指标主成分分析

元素	PC1	PC2	PC3	PC4
HCO ₃ ⁻	0.854	0.098	0.041	-0.132
Cl ⁻	0.897	0.041	-0.064	-0.172
NO ₃ ⁻	0.832	-0.075	-0.041	-0.207
SO ₄ ²⁻	0.902	0.083	0.09	-0.172
Na ⁺	0.918	0.013	0.097	-0.1
K ⁺	0.669	0.083	0.393	0.177
Mg ²⁺	0.859	0.106	0.276	-0.009
Ca ²⁺	0.714	0.306	0.044	0.431
NH ₄ ⁺	0.59	0.492	-0.2	0.207
DOC	-0.43	0.252	-0.059	0.592

TP	-0.066	0.638	0.002	0.266
Cr	-0.234	-0.189	0.866	-0.089
Mn	0.536	0.367	-0.055	-0.031
Fe	0.265	0.234	0.833	0.202
Ni	0.154	0.622	0.569	0.025
Cu	0.103	0.896	0.12	-0.189
Cd	-0.067	-0.163	-0.068	0.762
Sb	0.182	0.105	0.819	-0.373
Pb	0.154	0.913	0.037	-0.134
方差贡献率 (%)	34.86	16.49	14.54	8.6

注：KMO 检验为 0.728，bartlett 球形度检验 $P=0.000$ 。旋转法：具有 Kaiser 标准化的正交旋转。

3、结论

(1) 赣江南昌段总体水质较好，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水， HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、DOC、Mn 含量在不同月份间的变化主要受流量影响，Cr、Fe、Ni、Cu、Cd、Sb、Pb、TP 受流量影响较小。

(2) 赣江南昌段污染程度为：南支污染最重，其次为北支，中支、城区中心和入城区前污染程度相近。TP、Cr、Ni、Cu、Sb、Pb 在南支显著偏高，Mn 在北支显著偏高。

(3) TP、Ni、Cu、Pb 受南昌城区影响显著，经城区后含量增加；DOC、Cd 经城区后含量减小，但流经城郊农业区后增加； HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、Cr、Fe、Mn、Sb 受南昌城区影响不显著。

[参考文献]:

[1] BONDARCZUK K, MARKOWICZ A, PIOTROWSKA-SEGET Z. The urgent need for risk assessment on the antibiotic resistance spread via sewage sludge land application[J]. Environment International, 2016, 87: 49-55.

[2] SINGH R P, AGRAWAL M. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge[J]. Waste Management, 2008, 28 (2): 347-358.

[3] 胡锋平, 侯娟, 罗健文, 等. 赣江南昌段污染负荷及水环境容量分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (12): 192-195.

[4] 涂正革. 环境、资源与工业增长的协调性[J]. 经济研究, 2008 (02): 93-105.

[5] 孙才志, 王雪妮, 邹玮. 基于 WPI-LSE 模型的中国水贫困测度及空间驱动类型分析[J]. 经济地理, 2012, 32 (03): 9-15.

[6] 王毛兰, 周文斌, 胡春华. 枯水期赣江流域氮磷的分布特征[J]. 地球与环境, 2007, 35 (02): 166-170.

[7] 张宝军, 朱蒙曼, 王鹏, 等. 赣江流域水体中可溶态镉的时空分布特征及水质评价[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30 (04): 495-499.

[8] LIU X Z, LI R F, QING D Y. Analysis the hydrological situation of the influx runoff series for Poyang Lake[J].

- [9]周刚, 黑鹏飞, 雷坤, 等. 赣江下游污染负荷与水质响应关系模型[J]. 水科学进展, 2013, 24(06): 883-893.
- [10]刘健, 张奇, 许崇育, 等. 近50年鄱阳湖流域径流变化特征研究[J]. 热带地理, 2009, 29(03): 213-218.
- [11]王毛兰, 胡春华. 丰水期鄱阳湖氮磷含量变化及来源分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 137-142.
- [12]翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等. 2015/2016年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 2016, 74(3): 309-321.
- [13]周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2014, 35(09): 3315-3324.
- [14]陈静生, 王飞越, 夏星辉. 长江水质地球化学[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 74-85.
- [15]于淼, 魏源送, 郑祥, 等. 温榆河水化学特征演变及其影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2012, 32(01): 1-8.
- [16]张利田. 珠江水系河水离子总量空间自相关特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(01): 102-105.
- [17]胡春华, 周文斌, 夏思奇. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J]. 环境化学, 2011, 30(09): 1620-1626. HU
- [18]胡春华, 周文斌. 鄱阳湖流域水化学环境参数的变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(03): 427-433.
- [19]王贺, 谷洪彪, 迟宝明, 等. 温榆河北京段水体和沉积物中主要水化学离子及重金属特征[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(04): 667-673.
- [20]王益平. 珠江流域广东段河水水质和重金属污染特征研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [21]吴敦敖, 翁焕新. 京杭大运河(杭州段)水体中铁锰的分布特征及含量异常的成因研究[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1988, 22(02): 23-30.
- [22]陈小威. 湘江株洲段表层水及沉积物重金属污染研究[D]. 湖南科技大学, 2011.
- [23]江硕. 福建主要河流及福州城市内河水污染特征研究[D]. 福建农林大学, 2012.
- [24]马红梅. 微污染饮用水源中砷及几种重金属离子的吸附分离过程研究[D]. 同济大学, 2007.
- [25]虞慧, 吴敦银, 王法磊. 赣江南支水环境现状及其治理研究[J]. 江西水利科技, 2010, 36(01): 6-10.
- [26]张青梅, 向仁军, 刘湛, 等. 湖南省磷肥中重金属含量及形态特征[J]. 有色金属科学与工程, 2016, 7(05): 125-130.
- [27]王闯, 单保庆, 唐文忠, 等. 官厅水库主要入库河流(洋河)表层沉积物重金属污染特征及风险水平[J]. 环境科学学

报, 2016, 96 (03) : 1-13.

[28]SINGH S G N S. Variations in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality inputs in a tropical dryland agroecosystem[J].Forest and Native Grassland Soils, 2007, Plant Soil 233: 251-259.

[29]CARDELLI R, MARCHINI F, SAVIOZZI A. Soil organic matter characteristics , biochemical activity and antioxidant capacity in Mediterranean land use systems[J].Soil and Tillage Research, 2012, 120: 8-14.

[30]FAN H Z, CHEN Q R, QIN Y S , et al. Soil carbon sequestration under long-term rice-based cropping systems of purple soil in Southwest China[J].Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14 (12) : 2417-2425.

[31]王中良, 李 军, 刘从强, 等.天津地表水中有机碳来源的同位素示踪研究[J].地球与环境, 2011 (01) : 1-8.