

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2020010304

王涛, 吴启美, 莫光员, 等. 涟江上游表层岩溶泉水污染源解析[J]. 环境化学, 2021, 40(3): 729-736.

WANG Tao, WU Qimei, MO Guangyuan, et al. Analysis on pollution sources of epikarst spring water in the upper reaches of Lianjiang River[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(3): 729-736.

涟江上游表层岩溶泉水污染源解析*

王涛¹ 吴启美¹ 莫光员² 张朝晖^{1**}

(1. 贵州师范大学, 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳, 550001;

2. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局核资源地质调查院, 贵阳, 550001)

摘要 为明确涟江上游表层岩溶泉水化学污染特征及其污染来源, 选取区域内 7 个地表饮用泉作为研究对象. 测定泉水水温 (T)、电导率 (EC)、溶解氧 (DO)、 pH 、总氮 (TN)、总磷 (TP)、氨氮 (NH_4-N)、硝氮 (NO_3-N)、高锰酸盐指数 (COD) 并研究其与泉眼半径 200、500、1000 m 范围内耕地、住宅用地及交通用地面积的相关性. 研究表明, 依据地表水环境质量标准 (GB3838-02) 等水质标准, 涟江上游 7 个表层岩溶泉水 TN 均超标, 耕地周围的泉水 TP 、 NH_4-N 、 NO_3-N 也超过标准值, 表明该区域表层岩溶泉水总体高 N 而局部高 P 的污染特征. 主成分分析表明农业活动对泉水 TN 、 TP 、 NH_4-N 、 NO_3-N 及 COD 含量产生了一定的影响. 泉眼半径 200 m 范围内耕地面积与 TP 、 NH_4-N 显著正相关, 表明小范围内农业活动是泉水 N 、 P 污染的主要源头; 500 m 范围内 EC 与住宅用地面积显著正相关, 表明较大规模人类聚居可能造成泉水离子成分偏复杂. 从保护地表饮用泉的角度出发, 建议泉眼半径 200 m 内减少农业活动强度及频率, 泉眼半径 500 m 内控制人口密度及日常生活排污量.

关键词 表层岩溶泉, 水化学特征, 污染源, 土地利用类型, 涟江.

Analysis on pollution sources of epikarst spring water in the upper reaches of Lianjiang River

WANG Tao¹ WU Qimei¹ MO Guangyuan² ZHANG Zhaohui^{1**}

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang, 550001, China; 2. Nuclear Institute of Geological Survey, Guizhou Nonferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau, Guiyang, 550001, China)

Abstract: In order to clarify the hydrochemical characteristics and pollution sources of epikarst spring water in the upper reaches of the Lianjiang River, seven epikarst springs in the area were selected as research objects. The water temperature (T), electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), pH , total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen (NH_4-N), nitrate nitrogen (NO_3-N), and permanganate index (COD) were measured. The correlation between hydrochemical parameters and area of cultivated land, residential land, and transportation land within the radius of 200, 500 and 1000 m was studied. The results showed that: (1) The water TN of 7 epikarst springs, the levels of TP , NH_4-N , and NO_3-N in water samples collected from epikarst

2020 年 1 月 3 日收稿 (Received: January 3, 2020).

* 贵州省科技厅项目黔科合平台人才 ([2017] 5726), 贵州省黔科合基础 ([2017] 1127), 贵州省黔科合 (LH 字 [2015] 7778) 和贵州师范大学资助博士科研项目 (吴启美) 资助.

Supported by Guizhou Science and Technology Department Project Guizhou Branch Platform Talents ([2017] 5726), Qiankehe Foundation, Guizhou Province ([2017] 1127), Qiankehe LH, Guizhou Province ([2015] 7778) and Doctoral Research Project of Guizhou Normal University (Wu Qimei).

** 通讯联系人 Corresponding author, Tel: 13984891571, E-mail: academicleife@126.com

spring in cultivated land exceeded the Surface Water Quality Standards of People's Republic of China(GB 3838-02), indicated that the epikarst spring water was mainly characterized by overall high N and locally high P in the upper reaches of the Lianjiang river. (2) Principal Component Analysis (PCA) indicated that agricultural activities had an impact on TN, TP, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ and COD of epikarst spring water. (3) The area of cultivated land within a radius of 200 m had a significant positive correlation with TP and $\text{NH}_4\text{-N}$, suggesting that agricultural activities were the main source of N and P of spring water. Within a radius of 500 m, the area of the residential land had a significantly positive correlation with EC, which showed that human settlement caused complex ion components in epikarst spring water. From the perspective of protecting drinking springs, it was recommended to reduce the intensity and frequency of agricultural activities within a radius of 200 m, and control population density and daily sewage discharge within 500 m.

Keywords: epikarst spring, hydrochemical characteristics, pollution source, land use type, Lianjiang River.

表层岩溶泉是岩溶地下水出露于地表的常见形式之一,其主要存储于表层岩溶带,是近地面表层地下水系统的重要组成部分^[1].表层岩溶泉不仅是岩溶环境的塑造者,同时也是岩溶环境系统的重要参与者,对缺水岩溶山区人民的经济发展及生产生活都具有重大意义^[2].但表层岩溶泉对外界环境的变化反应敏感^[3],如季节性的降雨变化^[4-5],地表植被的改变^[6-7]以及人类活动^[8-9]均能对岩溶泉水化学性质产生影响.

涟江位于贵州省西南部,隶属于珠江水系,主要发源于贵阳市花溪区党武乡白马洞及葫芦井.自北向南流经青岩镇,纵贯惠水县西部,最终汇入红水河^[10].上游沿岸稻田及村寨分布集中,人口密度大,水质多呈现高 N、P 污染情况^[11].因地下含水层深埋,开发难度大且成本高,当地居民多将一些表层岩溶泉作为饮用水源.近年来,随着上游沿岸居民的增多,农耕区域的增大,区域内部分地表饮用泉可能受到了不同程度的人类干扰.Zhang 等^[12]研究发现,若长期处于某一特定的人类活动干扰下,表层岩溶水将会表现出一定的污染特征.岩溶山区的地表饮用泉是当地居民生产生活的重要水源,因此,明确泉水主要污染特征及其污染来源将有助于保护这类地表的珍贵水资源.目前对表层岩溶泉的研究多集中于泉水水量的动态监测^[13-14],地球化学性质的变化^[15-16]以及生态环境对泉水的调蓄作用^[17-18]等.以涟江流域为背景,对表层岩溶泉水化学性质与人类活动关系的研究还鲜见相关报道.受岩溶地貌影响,岩溶山区地表地下水交替频繁,被污染的地表水易进入地下水进而影响地表饮用泉水水质^[19],因此探究地表饮用泉水化学污染特征并明确其污染源是十分必要的.

本文选取涟江上游 7 个地表饮用泉作为研究对象,测定电导率(EC)、溶解氧(DO)、水温(T)、pH、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD).统计泉眼半径 200、500、1000 m 范围内耕地、住宅区以及交通用地的面积.结合内梅罗指数法、相关性分析及主成分分析明确泉水主要污染特征及污染来源,为保护涟江上游的地表饮用泉水水质提供一定的参考.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区域概况

涟江是典型的喀斯特地区河流,全长约 235 km,汇流面积约 1181 km^2 ,其所在区域属于亚热带季风气候,四季分明,年平均降水量 1171.7 mm,其中,4—9 月为雨季,占全年降水量的 78.5%,10 月至次年 3 月为旱季,降雨量仅占 11.5%.从源头至甲绒乡段上游流域中农田及村寨主要分布于两岸,人类活动较频繁,从甲绒乡往下游,两岸地势险要,受人类干扰较小^[20].2019 年 5 月(丰水期)前往该区域调查取样,选取 7 个位于涟江上游主干及支流附近的地表饮用泉(图 1).7 个地表饮用泉均位于贵州高原典型的喀斯特山地河谷地貌区,出露地层为石炭系至三叠系地层,岩性以碳酸盐岩为主,部分区域出露碎屑岩.以泉眼半径 200 m 范围划分主要土地利用类型,其中:1 号及 7 号泉周边主要为耕地,农业活动强度较大;2 号和 3 号泉位于小面积住宅用地,周围人口密度小;4 号及 5 号泉周围均分布有较为集中的住宅用地,区域内人口密度大且流动性强;而 6 号泉旁仅有一条公路,周边无较大面积的农田或住宅用地等人类活

动迹象,可以看做为较为清洁的区域.

1.2 现场测试与采样

采用雷磁(DZB-718)便携式水质分析仪测定泉水水温(T)、电导率(EC)、溶解氧(DO)、pH,测试精度分别为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.1\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、0.001,每个样点的数据均重复测定3次.采集泉眼表层水样带回实验室进行其他指标的测定.

1.3 室内分析

TN、TP 分别通过碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法和钼酸铵分光光度法测定. $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分别通过水杨酸-次氯酸盐光度法和紫外分光光度法测定.COD 通过酸性高锰酸钾滴定法测定.每个指标的测定均额外设置两组平行样.

1.4 数据处理

通过内梅罗单因子指数法^[21],依据生活饮用水卫生标准(GB5749-06)、地表水环境质量标准(GB3838-02)中三类水标准及相关文献^[22]确定泉水主要污染物及其危害程度.以污染指数来表示(若污染指数 >1 则表明该项环境指标超过相应的标准数值).

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, P_i 为水化学指标污染指数, C_i 为水化学指标实测值, S_i 为水化学指标相关标准限值.

通过内梅罗综合指数法^[23]确定单个泉水水质综合污染情况,以综合污染指数来表示.

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\bar{P})^2 + P_{\text{imax}}}{2}}$$

式中, $P_{\text{综}}$ 为泉水综合污染指数, $\bar{P}$ 为泉水水质单因子污染指数平均值, P_{imax} 为泉水水质单因子污染指数中的最大值.

依据土地利用类型分类(GB/T21010—2017)使用 91 卫星地图对泉眼半径 200、500、1000 m 范围内耕地、住宅用地及交通用地的面积进行统计并结合 Origin8.0、ArcGis10.5 及 Excel2017 绘制相关图表,采用 SPSS21 对数据进行相关性分析和主成分分析^[24].

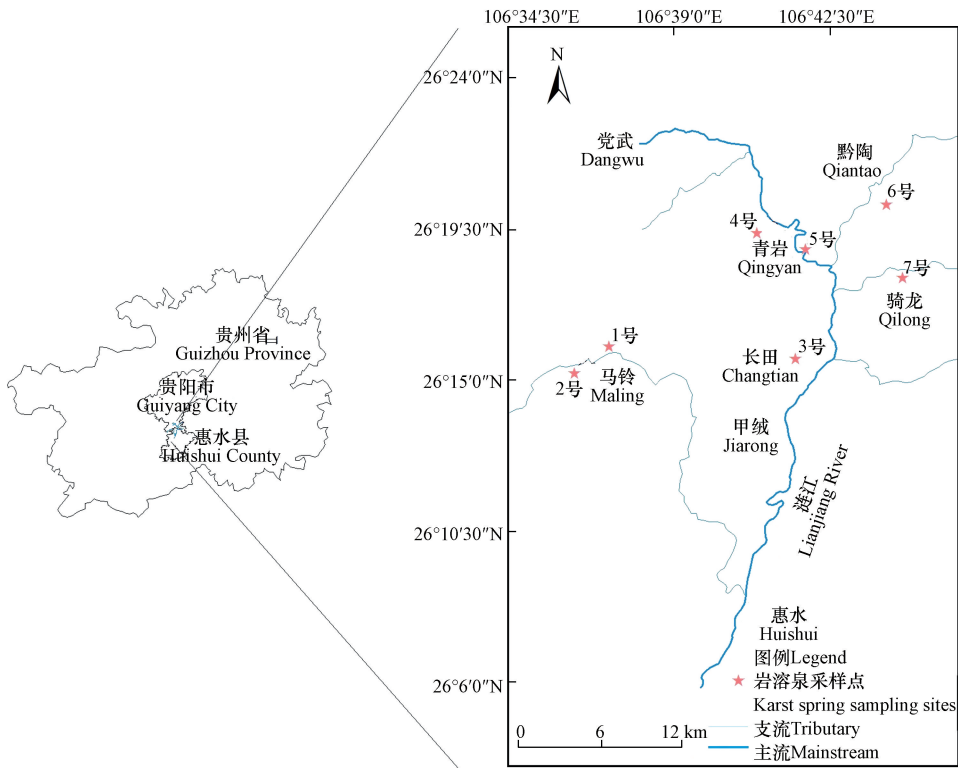


图 1 采样区域
Fig.1 Sampling area

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 泉水主要污染特征

测定发现 7 个岩溶泉水 EC 为 289.1—644.1 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、DO 为 4.71—8.41 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN 为 1.117—6.245 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP 为 0.0022—0.0764 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为 0.1484—0.7729 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 0.8822—4.7776 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、COD 为 0.238—0.679 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水化学指标差异性较大(表 1).泉水均表现为弱碱性,耕地周围的泉水 TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量高于非耕地区域.依据相关的水质标准(标准参考数值,EC:2000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$,DO:5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN:1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TP:0.05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4\text{-N}$:0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3\text{-N}$:3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD:6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),涟江上游 7 个岩溶泉水的 TN 含量均超标($P_i>1$),且耕地下的泉水还表现出 TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量超标($P_i>1$)(图 2),表明涟江上游岩溶泉水呈现出总体高 N 而局部高 P 的污染特征.计算内梅罗综合污染指数(图 3)发现 2 号和 6 号泉的综合污染指数相对较低,1 号及 7 号泉综合污染指数相对较高,而 1 号及 7 号泉周围均以耕地为主,表明以耕地为主的区域内岩溶泉水污染程度可能相对较高.

表 1 表层岩溶泉水化学特征
Table 1 Chemical characteristics of epikarst spring water

样地编号 Sample number	主要土地类型 Major land types	pH	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-2}$)	DO/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$T/^{\circ}\text{C}$	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
1	耕地 Arable land	7.715	572.3	6.34	15.5	6.245	0.0764	0.7729	4.7776	0.475
2	住宅用地 Residential land	8.313	289.1	8.41	15.4	1.587	0.0479	0.3278	1.1162	0.554
3	住宅用地 Residential land	7.776	454.7	4.71	17.9	2.907	0.0536	0.4191	2.0244	0.241
4	住宅用地 Residential land	7.836	523.2	7.18	16.2	3.736	0.0194	0.4811	2.8384	0.245
5	住宅用地 Residential land	7.963	644.1	6.28	16.3	5.013	0.0137	0.3734	2.9689	0.396
6	住宅用地 Residential land	8.139	357.2	6.11	15.8	1.117	0.0022	0.1484	0.8822	0.238
7	耕地 Arable land	8.825	332.9	6.68	16.4	6.040	0.0679	0.4876	3.2094	0.679

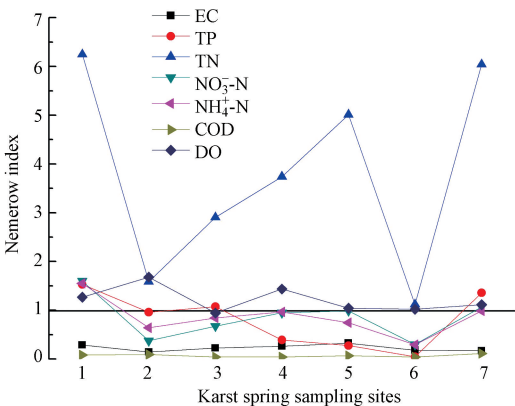


图 2 表层岩溶泉水内梅罗单因子污染指数
Fig.2 Nemerow single factor pollution index of epikarst spring water

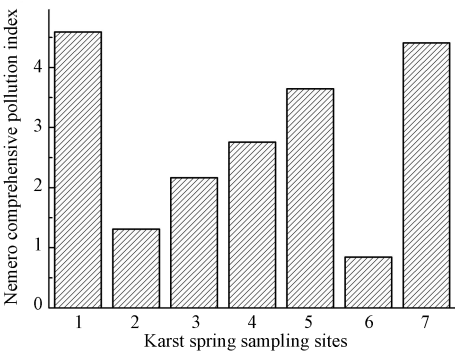


图 3 表层岩溶泉水内梅罗综合污染指数
Fig.3 Nemerow comprehensive Pollution Index of epikarst spring water

2.2 泉水化学成分的主成分分析

为了探究泉水化学成分中 N、P 污染的可能来源,提取了能涵盖大部分研究信息的两个主成分轴,发现前 2 个主成分轴的方差贡献率依次为 37.721%、29.704%,累积方差贡献率达 67.425%,接近 70%(表 2),涵盖了大部分的研究信息.与 PC1 呈较强正相关的指标是 TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、COD,其载荷分别为 0.920、0.739、0.965、0.963、0.717;PC2 与 pH、DO 呈较强正相关,与 EC、 T 呈较强负相关,其载荷分别为 0.785、0.768、-0.720、-0.541.为了更直观反映两个主成分轴与水化学指标间的关系,将各项指标

投影在两个主成分轴(图 4).可以看出 PC1 轴主要反映了泉水 TN、TP、NH₄-N、NO₃-N 及 COD 的变化情况,而 PC2 轴主要代表了 pH、DO、EC、T 对水质的影响.Pacheco 等^[25]研究发现耕地中肥料的施用可能会对区域地下水离子成分产生影响.因 TN、TP、NH₄-N、NO₃-N 等指标来源于农业活动的可能性大,据此推测耕地中的农业活动可能是造成泉水总体高 N 而局部高 P 污染特征的源头.

表 2 表层岩溶泉水化学指标的载荷
Table 2 Load of epikarst spring water chemical index

	PC1	PC2
pH	-0.145	0.785
EC	0.497	-0.720
DO	-0.085	0.768
T	-0.028	-0.541
TN	0.920	-0.031
TP	0.739	0.386
NH ₄ -N	0.965	-0.027
NO ₃ -N	0.963	-0.152
COD	0.717	0.425
特征根 Characteristic root	3.772	2.970
方差贡献率 Variance contribution rate	37.721%	29.704%
累积贡献率 Cumulative contribution rate	37.721%	67.425%

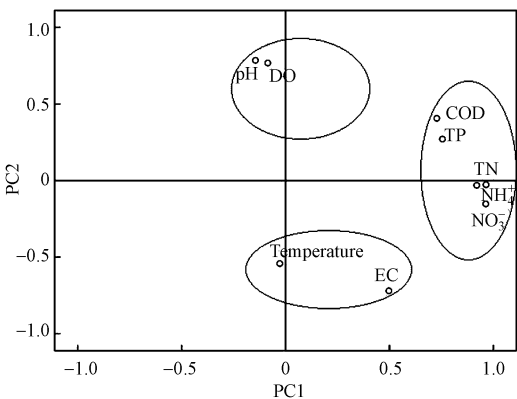


图 4 各水化学指标在主成分空间上的投影

Fig.4 The projection of each hydrochemical index on the principal component space

2.3 水化学成分相关性分析及其与泉眼周边土地利用类型面积的关系

为进一步明确泉水 N、P 污染源,对泉水化学指标与泉眼周边 200、500、1000 m 范围内的耕地面积做 Pearson 相关性分析(表 3),结果显示,泉眼半径 200 m 范围内 NH₄-N、TP 与农业面积呈显著正相关 ($P<0.05$),且耕地周围泉水中 N、P 含量均高于非耕地区域,表明泉眼半径 200 m 范围内农业活动是泉水 NH₄-N、TP 污染的主要来源.泉水水化学成分间的 Pearson 相关性分析(表 4)发现 TN 与 NH₄-N、TN 与 NO₃-N、NH₄-N 与 NO₃-N 的 Pearson 系数分别为 0.805、0.940、0.926,表明 TN、NH₄-N、NO₃-N 三者在污染源上可能具有同源性.上述分析结果表明在泉眼半径 200 m 这一范围内农业活动产生的 N 肥及 P 肥可能是泉水中 TN、TP、NH₄-N 及 NO₃-N 的主要来源.Liu^[26]等研究认为,浅层地下水硝酸盐含量与农业活动显著相关.本研究的发现与之类似.岩溶山区农业活动产生的过量氮、磷易溶,不易被土壤胶体吸附^[27],在雨水及灌溉水的淋洗作用下不断向土壤深层迁移,最终通过裂隙进入到地下水并随之出露于表层岩溶泉水中^[28].这表明岩溶山区地表农业污染也会同样反映到区域地下水中,进而污染地表饮用泉水水质.因此从保护地表饮用泉水水质的角度出发,位于耕地周围的饮用泉在泉眼 200 m 范围内应减少耕地面积,从而降低泉眼周边农业活动的强度及频率.此外,研究发现 EC 与泉眼半径 500 m 范围内住宅

用地面积存在显著正相关关系(表 3),表明人类聚居区域岩溶泉水离子成分可能相对复杂.泉眼半径 1000 m 范围内住宅用地面积与交通用地面积具有极显著相关性(表 3),表明人口分布越集中的区域,其交通一般也更加发达与便利,区域内的人口流动性也就越强.刘跃等^[29]研究金佛山表层岩溶泉水化学性质后认为,旅游等活动产生的大量人口流动会使得泉水各项离子含量呈上升趋势.因此与碳酸盐岩自然溶蚀的区域相比,住宅用地区域内岩溶泉水化学性质可能更多地受到日常生活及旅游活动的影响,特别是泉水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 等成分由地表人类活动输入控制的可能性较大^[30].相关研究^[31-33]表明人类粪便中主要包含 K、Na 和 $\text{C}_5\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_3$,生活污水主要包含 $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 、 $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ 、 NaClO 、 NaOH 和 ClO_2 ,厨房洗涤剂中的磺酸物断键后可以形成无机硫酸盐等物质.这些成分通过下渗水进入岩溶地下水后,出露于表层岩溶泉口,最终干扰了泉水的离子成分.本研究中 4 号及 5 号泉均处于相对集中的住宅用地区域,居民日常排污量大,与上述情况类似.为保护地表饮用水源,建议这类区域泉眼半径 500 m 范围内应控制住宅用地面积,从而限制泉眼周边区域的人口密度及日常生活排污量.

表 3 泉眼周边土地利用类型面积与水化学成分相关性分析

Table 3 Correlation analysis between hydrochemical characteristics and the area of land use type around the spring

	200 m 范围内耕地面积 Cultivated land area within 200 m	500 m 范围内住宅用地面积 Residential land area within 500 m	1000 m 范围内交通用地面积 Transportation land area within 1000 m
NH ₄ -N	0.809 *		
TP	0.780 *		
EC		0.774 *	
住宅用地面积 Residential land area			0.920 **

* 表示在 0.05(双侧)上显著相关. * indicates significant correlation at 0.05 (bilateral).
** 表示在 0.01(双侧)上显著相关. ** indicates significant correlation at 0.01 (bilateral).

表 4 Pearson 相关性系数矩阵

Table 4 Pearson correlation matrix

	pH	EC	DO	T	TN	TP	NH ₄ -N	NO ₃ -N	COD
pH	1								
EC	-0.712	1							
DO	0.389	-0.349	1						
T	-0.171	0.124	-0.759 *	1					
TN	0.045	0.528	-0.136	0.018	1				
TP	0.176	-0.139	-0.019	0.065	0.547	1			
NH ₄ -N	-0.277	0.464	-0.049	-0.061	0.805 *	0.744	1		
NO ₃ -N	-0.231	0.636	-0.142	-0.069	0.940 **	0.554	0.926 **	1	
COD	0.717	-0.332	0.489	-0.371	0.487	0.635	0.330	0.312	1

* 表示在 0.05(双侧)上显著相关. * indicates significant correlation at 0.05 (bilateral).
** 表示在 0.01(双侧)上显著相关. ** indicates significant correlation at 0.01 (bilateral).

3 结论(Conclusion)

- (1) 涟江上游 7 个泉表现为总体高 N 而局部高 P 的污染特征,受岩溶地貌影响,岩溶山区地表农业污染可能也会反映到区域地下水中.
- (2) 泉眼半径 500 m 范围内 EC 与住宅用地面积呈现显著正相关关系,表明较大规模的人类聚居易使泉水离子成分偏复杂.建议人口密度较大区域内泉眼半径 500 m 范围应控制人口密度及日常生活排污量.
- (3) 耕地周围的泉水 N、P 含量均高于非耕地区域,泉眼半径 200 m 范围内 TP、NH₄-N 与耕地面积存在显著正相关关系,且泉水 TN、NH₄-N、NO₃-N 三者具有同源性,表明小范围内农业活动是泉水 N、P

污染的主要来源,建议耕地下泉眼半径 200 m 范围内应减缓农业活动强度及频率。

参考文献 (References)

- [1] 汪炎林,周忠发,田衷珏,等. 池武溪流域岩溶水 SO_4^{2-} 的空间变化特征及其来源分析[J]. 环境化学,2017,36(12): 2690-2700.
WANG Y L,ZHOU Z F,TIAN Z H,et al. Analysis of the spatial variation and sources of SO_4^{2-} in karst water of Chiwu River[J]. Environmental Chemistry,2017,36(12): 2690-2700(in Chinese).
- [2] 曹敏. 城市化影响下岩溶地下水水文地球化学与同位素特征——以重庆南山老龙洞地下河流域为例[D]. 重庆: 西南大学,2012.
CAO M. Effects of urbanization on hydrogeochemical and stable isotopic characteristics of karst groundwater——A case from the Laolongdong watershed of Chongqing[D]. Chongqing: Southwest University,2012(in Chinese).
- [3] 祝安,祝进,张朝晖. 喀斯特流域水系分形、分维问题[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2000,18(4): 5-8.
ZHU A,ZHU J,ZHANG Z H. Fractal and fractal dimension of Karst water system[J]. Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences),2000,18(4): 5-8(in Chinese).
- [4] LIU Z H,LI Q,SUN H L,et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: Soil CO_2 and dilution effects[J]. Journal of Hydrology,2007,337(1/2): 207-223.
- [5] LONGENECKER J,BECHTEL T D,ZHAO C,et al. Correlating global precipitation measurement satellite data with karst spring hydrographs for rapid catchment delineation[J]. Geophysical Research Letters,2017,44(10): 4926-4932.
- [6] 赵红亮,郭芳,刘绍华. 灵水岩溶泉浮游植物群落结构及其对水环境的指示作用[J]. 中国岩溶,2017,36(4): 484-491.
ZHAO H L,GUO F,LIU S H. Structure of the phytoplankton community at the Lingshui karst spring and its implications for water environment[J]. Carsologica Sinica,2017,36(4): 484-491(in Chinese).
- [7] 吕保樱,刘再华,廖长君. 水生植物对岩溶水化学日变化的影响——以桂林岩溶水文地质试验场为例[J]. 中国岩溶,2006,25(4): 335-340.
LV B Y,LIU Z H,LIAO C J,et al. the influence of aquatic plants on diurnal variations of hydrochemistry in karst system——A case in the Guilin karst experimental site[J]. Carsologica Sinica,2006,25(4): 335-340(in Chinese).
- [8] 郝永红,王玮,王国卿. 气候变化及人类活动对中国北方岩溶泉的影响——以山西柳林泉为例[J]. 地质学报,2009,83(1): 138-144.
HAO Y H,WANG W,WANG G Q,et al. Effects of climate change and human activities on the karstic springs in northern China: A case study of the Liulin springs[J]. Acta Geologica Sinica,2009,83(1): 138-144(in Chinese).
- [9] 王焰新,高旭波. 人类活动影响下娘子关岩溶水系统地球化学演化[J]. 中国岩溶,2009,28(2): 103-112.
WANG Y X,GAO X B. Geochemical evolution of the Niangziguan karst water system under the impact of human activities[J]. Carsologica Sinica,2009,28(2): 103-112(in Chinese).
- [10] 胡昌元. 涟江水质现状及其对农渔业生产的影响[J]. 环保科技,1990(1): 28-31.
HU C Y. Status of Lianjiang water quality and its impact on agricultural and fishery production[J]. Environmental Protection and Technology,1990(1): 28-31(in Chinese).
- [11] 姚单君. 喀斯特典型流域河岸带土壤磷释放规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学,2017.
YAO D J. Releases of soil nitrogen on river banks along the Lian River in karst region of Guizhou Province, PRC[D]. Guiyang: Guizhou University,2017(in Chinese).
- [12] ZHANG L,QIN X Q,TANG J S,et al. Review of arsenic geochemical characteristics and its significance on arsenic pollution studies in karst groundwater, Southwest China[J]. Applied Geochemistry,2017,77(10): 80-88.
- [13] 吕玉香,胡伟,杨琰. 岩溶关键带水循环过程研究进展[J]. 水科学进展,2019,30(1): 123-138.
LU Y X,HU W,YANG Y. Research progress of hydrological cycle in karst critical zone[J]. Advances in Water Science,2019,30(1): 123-138(in Chinese).
- [14] 丁虎,郎赞超,刘文景,等. 桂西北峰丛洼地泉水和溪流在降雨过程中的水化学动态变化特征[J]. 地球与环境,2011,39(1): 48-55.
DIN H,LANG Y C,LIU W J,et al. Variations in chemical composition of spring and stream water during rain events in a karst peak cluster-depression catchment, northwest Guangxi, China[J]. Earth and Environment,2011,39(1): 48-55(in Chinese).
- [15] 苏春利,张雅,马燕华,等. 贵阳市岩溶地下水水化学演化机制: 水化学和锶同位素证据[J]. 地球科学,2019,44(9): 2829-2838.
SU C L,ZHANG Y,MA Y H,et al. Hydrochemical evolution processes of karst groundwater in Guiyang City: Evidences from hydrochemistry and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios[J]. Journal of Earth Science,2019,44(9): 2829-2838(in Chinese).
- [16] 李华,文章,谢先军,等. 贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律[J]. 地球科学,2017,42(5): 804-812.
LI H,WEN Z,XIE X J,et al. Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in sanqiao district of Guiyang City[J]. Earth Science,2017,42(5): 804-812(in Chinese).
- [17] 邹胜章,梁彬,朱志伟,等. 生态系统变化对岩溶水资源的影响——以湘西为例[J]. 长江流域资源与环境,2004,13(6): 599-603.
ZOU S Z,LIANG B,ZHU Z W,et al. Effect of ecosystem on water resource in karst area: Case study in west Hunan[J]. 2004,13(6):

599-603 (in Chinese).

- [18] SEKULOVA L. Alpine wetlands in the west Carpathians: Vegetation survey and vegetation-environment relationships[J]. *Preslia*, 2011, 83(1): 1-24.
- [19] 张连凯, 刘朋雨, 覃小群. 溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(5): 2104-2116.
ZHANG L K, LIU P Y, TAN X Q, et al. Migration and transformation of dissolved organic matter in karst water systems and an analysis of their influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(5): 2104-2116 (in Chinese).
- [20] 任维. 喀斯特典型流域河岸带土壤氮释放规律研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
REN W. Releases of soil nitrogen on river banks along the Lian River in karst region of Guizhou province, PRC[D]. Guiyang: Guizhou University, 2017 (in Chinese).
- [21] 汤玉强, 李清伟, 左婉璐, 等. 内梅罗指数法在北戴河国家湿地公园水质评价中的适用性分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 195-199.
TANG Y Q, LI Q W, ZUO W L, et al. Analysis of applicability of Nemerow index method in evaluation of water quality of Beidaihe national wetland park[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 195-199 (in Chinese).
- [22] 赵新峰, 陈法锦, 陈建耀, 等. 城市地下水硝酸盐污染及其成因分析: 以珠海香洲区为例[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(3): 87-92.
ZHAO X F, CHEN F J, CHEN J Y, et al. Using nitrogen isotope to identify the sources of Nitrate contamination in urban groundwater—A case study in Zhuhai City[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(3): 87-92 (in Chinese).
- [23] 徐彬, 林灿尧, 毛新伟. 内梅罗水污染指数法在太湖水质评价中的适用性分析[J]. *水资源保护*, 2014, 30(2): 38-40.
XU B, LIN C Y, MAO X W. Analysis of applicability of Nemerow pollution index to evaluation of water quality of Taihu Lake[J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(2): 38-40 (in Chinese).
- [24] 杨竞, 童祯恭, 刘玉哲. SPSS 软件对饮用水水质进行主成分分析评价的运用[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(7): 171-174.
YANG J, TONG Z G, LIU Y Z. Principal component analysis and evaluation by SPSS software in drinking water quality assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(7): 171-174 (in Chinese).
- [25] PACHECO F A L, WEIJDEN C H V. Mineral weathering rates calculated from spring water data: A case study in an area with intensive agriculture, the Morais Massif, northeast Portugal[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(5): 583-603.
- [26] LIU X L, WANG Y, LI Y, et al. Multi-scaled response of groundwater nitrate contamination to integrated anthropogenic activities in a rapidly urbanizing agricultural catchment[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(34): 34931-34942.
- [27] 林明珠, 谢世友, 衡涛. 喀斯特山地不同土地利用对表层岩溶泉水化学特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 212-216.
LIN M Z, XIE S Y, HENG T. Effects of land use patterns on hydrochemistry of epikarst springs in karst mountains area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 212-216 (in Chinese).
- [28] FUSS C B, LOVETT G M, GOODALE C L, et al. Retention of Nitrate-N in mineral soil organic matter in different forest age classes[J]. *Ecosystems*, 2019, 22(6): 1280-1294.
- [29] 刘跃, 贺秋芳, 于正良, 等. 降雪及旅游活动对金佛山表层岩溶泉水化学的影响[J]. *中国岩溶*, 2018, 37(6): 819-826.
LIU Y, HE Q F, YU Z L, et al. Effects of snowfall and tourism activities on water chemistry of surface karst springs in the Jinfo Mountain[J]. *Carsologica Sinica*, 2018, 37(6): 819-826 (in Chinese).
- [30] 谢国文, 杨平恒, 盛婷, 等. 人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3078-3088.
XIE G W, YANG P H, SHENG T, et al. Comparison of the geochemical characteristics of karst springs of a vertically zoned climate region under human activity: A case of Shuifang spring and Bitan spring in the Jinfo mountain area, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3078-3088 (in Chinese).
- [31] 任娟, 杨平恒, 王建力, 等. 旅游活动影响下的岩溶地下水理化特征演化及其概念模型——以世界自然遗产地金佛山水房泉为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(1): 97-106.
REN J, YANG P H, WANG J L, et al. Influences of tourism activities on evolution of physicochemical parameters in karst groundwater and its conceptual model: A case study of Jinfoshan Shuifang spring in the world natural heritage site[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(1): 97-106 (in Chinese).
- [32] ROSE S. The effects of urbanization on the hydrochemistry of base flow within the Chattahoochee River Basin (Georgia, USA) [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 341(1): 42-54.
- [33] 于正良, 袁道先, 杨平恒, 等. 基于 PCA 和在线监测技术研究旅游活动对岩溶地下水水化学的影响[J]. *地球学报*, 2016, 37(2): 232-240.
YU Z L, YUAN D X, YANG P H, et al. Influences of tourism activities on hydrochemistry of karst groundwater revealed by principal component analysis and online monitoring technique[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2016, 37(2): 232-240 (in Chinese).