

苗迎, 章程, Mitja Prelovsek, 等. 斯洛文尼亚经典岩溶区水文地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2025, 44(3): 510-518.

DOI: 10.11932/karst20250305

斯洛文尼亚经典岩溶区水文地球化学特征

苗迎^{1,2}, 章程^{1,2}, Mitja Prelovsek³, 肖琼^{1,2}

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 广西 桂林 541004;

2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;

3. 斯洛文尼亚科学与艺术院研究中心岩溶研究所, 斯洛文尼亚)

摘要: 斯洛文尼亚是“一带一路”沿线上的重要国家, 也是岩溶研究的发源地, 岩溶地下水是斯洛文尼亚岩溶区居民生活和农业生产的重要水源, 面对用水安全、时空分布不平衡、洪涝等诸多问题, 查明斯洛文尼亚岩溶地下水情况具有重要意义。通过在斯洛文尼亚波斯托尼亚(Postojna)岩溶流域开展岩溶地质调查与取样, 结合水化学和同位素分析方法进行初步分析研究。结果表明: ①斯洛文尼亚岩溶地下水水质良好, 地下水基本处于天然状态, 水温、pH、电导率以及阴阳离子等指标均常年稳定在固定值范围内, 偶有波动也多受自然环境变化的影响, 较少受到人类活动的影响。②分析地下水中氢氧同位素特征可知大气降水是研究区岩溶地下水的主要补给来源, 受到碳酸盐岩含水层等岩石的风化与溶滤作用影响, 地下水为典型的 HCO_3^- - Ca^{2+} 型岩溶水。③硝酸盐等常见污染物含量也远低于世界卫生组织规定的饮用水水质安全限值, 来源以自然过程形成的土壤氮为主, 旱季时部分采样点处地下水有生活污水及畜禽粪便污染。

关键词: 斯洛文尼亚; 岩溶; 地下水; 水化学; 同位素

创新点: 在“一带一路”倡议的带动作用, 依托中国—斯洛文尼亚岩溶地质“一带一路”联合实验室项目, 与斯洛文尼亚岩溶研究所联合开展野外调查与取样工作, 获得斯洛文尼亚岩溶地下水水化学和同位素数据, 初步分析斯洛文尼亚经典岩溶区水文地球化学特征。

中图分类号: P641.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)03-0510-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地下水在所有国家和地区的饮用水、工业和农业用水中均发挥着重要的作用^[1], 尤其是岩溶区地下水, 由于岩溶区“土在楼上, 水在楼下”的水土资源空间分布格局^[2], 导致岩溶区地下水更容易出现水质恶化、洪涝灾害等环境问题。国内外学者在岩溶地下水的水文地球化学特征方面进行了大量研究, 研究发现岩溶地下水的化学组成主要受水岩相互作用、

大气降水、土壤 CO_2 浓度及人类活动等多重因素控制^[3-5]; 随着城市化和农业发展, 人类活动对岩溶地下水系统的影响日益显著, 主要表现在污染物输入和水资源过度开采^[6-8]。斯洛文尼亚地广人稀, 岩溶区覆盖了一半以上的国土面积, 岩溶地下水成为国民经济发展的重要自然资源之一。斯洛文尼亚主要环境问题有用水安全、时空分布不平衡、洪涝灾害等, 查明斯洛文尼亚岩溶地下水水文地球化学特征具有重要意义。

资助项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0204700); 中国地质调查项目(DD20230547)

第一作者简介: 苗迎(1987—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为岩溶地下水污染、岩溶水文地质。E-mail: miaoying@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2024-07-26

在“一带一路”倡议的带动作用 下,本文依托中国—斯洛文尼亚岩溶地质“一带一路”联合实验室项目,与斯洛文尼亚岩溶研究所联合开展野外调查与取样工作,目的是揭示第纳尔岩溶区碳水钙循环过程和规律,分析其形成、分布背景,并与中国亚热带岩溶作对比,进而辐射到“一带一路”其他岩溶地区。本文将对 Postojna 岩溶流域获取的地下水水化学和同位素数据进行初步分析研究。

1 研究区概况

斯洛文尼亚位于欧洲中南部,地处欧洲四大地理地区的交界处:阿尔卑斯山脉、迪纳拉山脉、多瑙河中游平原以及地中海沿岸,国土面积 20273 km²,属于较典型的地中海气候,夏季炎热干燥,冬季温和多雨,多年平均气温 10.9 ℃,平均降雨量 1363 mm^[9]。

兼具高山、海滨、湖泊等各种地形,其中森林和草地覆盖率分别为 49.7% 和 27.6%,被誉为中欧的绿宝石。斯洛文尼亚的岩溶面积达 8800 km²,占总面积的 43.4%,大部分岩溶地区由中生代的厚碳酸盐岩层序组成,地貌类型主要有阿尔卑斯岩溶、第纳尔岩溶和孤立状岩溶,其中发育于侏罗系—白垩系石灰岩和白云岩的第纳尔岩溶是欧洲最主要的岩溶类型^[10-12]。研究区位于第纳尔岩溶中部的 Postojna 岩溶流域,主要地貌类型为坡立谷^[13-15]。

由图 1 可知,整个流域近南北向展布,由 3 个坡立谷组成,南端为补给区,北端为排泄区。调查可知,波斯托尼亚岩溶流域地下水分为两部分:一是流域东侧沿 Losko 和 Cerknisko 坡立谷由南向北径流,二是流域西侧 Pivka 河由南向北径流,由落水洞进入 Planina 洞穴后和流域东侧地下水汇合,最终经地下河管道径流在地下河出口 W15 处流入地表河。

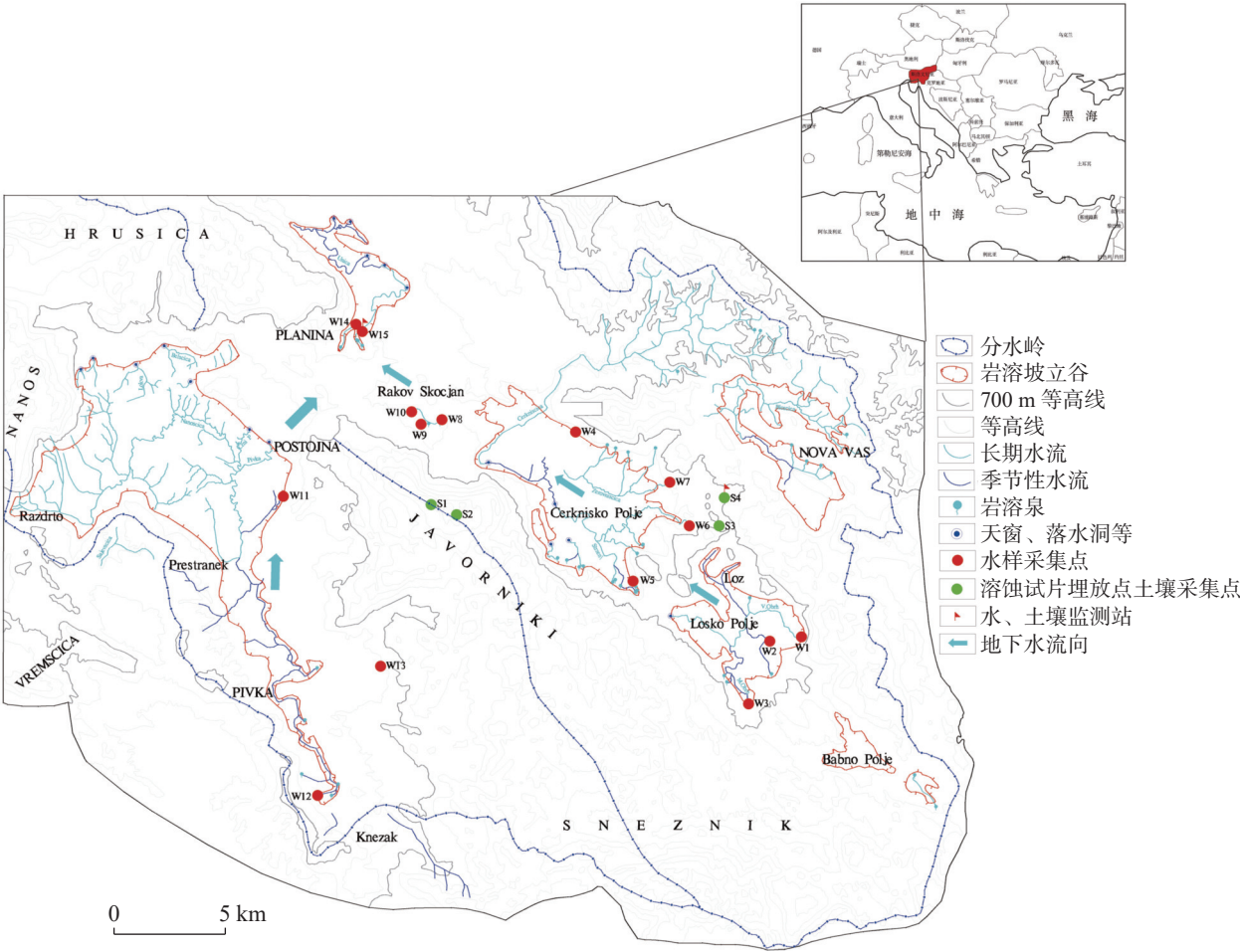


图 1 研究区概况及采样点分布图 (改编自斯洛文尼亚卢布尔雅那岩溶河流域图)

Fig. 1 Overview of the study area and distribution of sampling sites (modified from the map of the karst river basin in Ljubljana of Slovenia)

2 研究方法

雨季和旱季样品采集分别于 2019 年 11 月和 2023 年 6 月分别完成。在 Postojna 岩溶流域按地下水径流方向采集 15 个水点的样品(图 1)。水化学样品的取样器具采用 500 mL 白色聚乙烯塑料瓶,取样前将聚乙烯塑料瓶用所取地下水涮洗 3~5 次,取样后尽量排出气泡,拧紧瓶盖,然后保存在 4 °C 保温箱中并尽快送至实验室检测。同位素样品的取样器具采用 30 mL 的棕色聚乙烯塑料瓶,取样过程同水化学样品。采样现场测试水温、pH、电导率、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、溶解氧。现场测试使用多参数水质分析仪(法国 Ponsel 8330)和德国 Merck 公司产的碱度计和钙离子测试盒,水温、pH 测试精度分别为 0.1 °C、0.01, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 滴定精度分别为 0.01 mmol·L⁻¹、2 mg·L⁻¹。样品由 Mitja Prelovsek 博士在斯洛文尼亚岩溶研究所的水化学实验室进行测试,主要测试阴阳离子等无机成分。同位素样品保存在 4 °C 保温箱,中带回国由自然资源部第三海洋研究所和中国地质科学院岩溶地质研究所共同完成。

3 结果与讨论

3.1 测试数据

研究区地下水雨季和旱季主要水化学指标分别列于表 1,通过描述性统计分析可以大致了解地下水中各化学成分的富集、变化规律^[16]:

由表 1 可知,研究区地下水水温变化范围雨季为 7.3~10.0 °C,平均温度为 8.7 °C;旱季为 8.6~20.8 °C,平均温度为 11.6 °C。电导率变化范围雨季为 348~509 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均值为 419 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$;旱季为 336~541 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,平均值为 426 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。pH 变化范围雨季为 7.20~7.92,平均值为 7.58;旱季为 7.47~8.24,平均值为 7.89,整体上呈弱碱性。

研究区地下水中阴阳离子以 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 为主,远高于其他阴阳离子, HCO_3^- 和 Ca^{2+} 质量浓度范围雨季分别为 298.9~372.1 mg·L⁻¹, 75.2~92.4 mg·L⁻¹, 平均值分别为 289.0 和 73.4 mg·L⁻¹;旱季分别为 210.5~335.5 mg·L⁻¹, 75.3~92.4 mg·L⁻¹, 平均值分别为 273.1 和 84.2 mg·L⁻¹。

3.2 主要化学指标分布特征

由表 1 可知,无论是雨季还是旱季研究区地下水水温基本保持在 7~11 °C,与斯洛文尼亚全年平均气温保持一致。而旱季期间 W8 和 W10 水温分别为 16 °C 和 20.8 °C,远高于其他水点,这是由于地下水出露地表后以地表河流的形式径流,与大气地表环境交换频繁,导致水温与气温十分接近,而其他水点水温波动幅度取决于水点地下空间与大气地表环境交换程度。由水温的变异系数低也可以看出研究区地下水与大气地表环境交换程度低。

研究区地下水 pH 变异系数雨季和旱季均为 3%,数值较小,这表明 pH 在地下水中常年保持在一个稳定水平,基本不存在空间变异性,即 pH 的变化不大并且不受环境因素的影响而变化,表明地下水未曾受到高强度的人类活动的影响,结合斯洛文尼亚地广人稀的特点,采样点周边只有少量人类活动,证明这一结论是正确的。

电导率变异系数雨季和旱季分别为 12% 和 17%,电导率主要在补给径流区呈现上下小幅度波动,进入地下河管道和洞穴之后变得稳定。推测地下水与地层接触时间有关,流经补给径流区的岩溶裂隙时地下水与岩石的接触时间较长,与岩石进行物质交换,导致电导率频繁变动且变幅较小,进入管道后空间变大流速加快,地下水与岩石的接触时间短,导致电导率保持平稳。雨季电导率小于旱季,且雨季波动范围也小于旱季,可能主要是雨水稀释作用的影响。

由表 1 可知,阴阳离子 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 含量远高于其它阴阳离子,表明地下水流经大规模分布的碳酸盐岩地区后受到岩溶作用的影响,主要水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型,研究区为典型岩溶流域,与 Mitja 博士等人研究结果一致。研究区地下水中阴阳离子的变异系数较小,表明离子波动较小,含量较为稳定,这说明研究区岩溶地下水水化学受到碳酸盐岩含水层等岩石的风化与溶滤作用影响^[17]。张陶等^[18] 和王修华等^[19] 对漓江流域进行研究,结果均表明漓江流域水化学类型为 HCO_3^- - Ca^{2+} 型,其他阴阳离子含量远小于 HCO_3^- 和 Ca^{2+} ,表明漓江流域是一个碳酸盐岩化学风化溶解作用对河流水化学起着主要控制作用的典型流域。一般来说,岩溶地区水化学类型主要受水岩作用的控制。

表 1 斯洛文尼亚 Postojna 岩溶流域地下水水化学数据
Table 1 Hydrochemical data of groundwater in Postojna karst basin, Slovenia

样品 编号	采样时间	采样位置	水点类型	温度	电导率	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻
				℃	μs·cm ⁻¹		mg·L ⁻¹					
W1	2019年11月 (雨季)	Losko 坡立谷	泉点	8.5	437	7.42	75.2	13.4	298.9	2.69	2.31	1.1
W2			泉点	8.7	475	7.20	73.2	18.5	323.3	2.07	1.93	1.8
W3			泉点	7.3	348	7.42	92.4	13.0	231.8	2.78	1.03	0.7
W4		Cerknisko 坡立谷	泉点	9.4	507	7.56	87.2	10.1	353.8	2.98	1.93	1.0
W5			泉点	8.0	398	7.63	68.0	5.0	268.4	2.64	2.18	1.1
W6			泉点	9.4	451	7.60	72.4	26.2	311.1	2.16	3.21	2.1
W7		地下河	泉点	9.5	509	7.47	72.4	8.9	372.1	3.68	5.27	0.7
W8			地下河入口	8.3	395	7.92	60.4	24.2	268.4	2.15	2.70	1.2
W9			泉点	8.3	392	7.92	66.8	29.0	268.4	2.21	2.57	1.2
W10		Pivka河流域	地下河入口	8.4	382	7.78	69.2	10.8	274.5	2.30	2.18	1.0
W11			泉点	9.2	421	7.38	70.0	9.6	305.0	3.14	2.44	3.2
W12			泉点	10.0	426	7.28	71.2	7.0	286.7	2.51	2.31	2.9
W13		Planina洞	湖水	8.3	366	7.52	68.8	10.1	250.1	2.88	1.67	1.0
W14			地下河支流	8.6	389	7.76	83.6	3.1	256.2	2.22	2.06	1.2
W15			地下河出口	8.8	388	7.80	88.8	1.2	262.3	—	—	—
AVE	2023年6月 (旱季)	Losko 坡立谷		8.7	419	7.58	73.4	11.2	289.0	2.60	2.41	1.4
SD				0.69	48.7	0.22	7.67	8.54	38.47	0.46	0.96	0.79
CV				0.08	0.12	0.03	0.10	0.76	0.13	0.18	0.40	0.55
W1		Cerknisko 坡立谷	泉点	8.6	439	8.14	85.9	19.1	250.1	3.60	7.25	3.8
W4			泉点	9.5	461	7.59	75.8	31.4	311.1	3.20	4.84	1.4
W5			泉点	11.5	450	8.05	89.9	18.5	286.7	3.23	5.97	5.8
W6		地下河系统	泉点	10.8	506	8.24	83.9	32.4	335.5	4.31	3.23	6.5
W7			泉点	10.3	541	7.76	85.0	37.9	329.4	4.74	30.20	3.9
W8			地下河入口	16.0	499	8.00	75.3	35.1	317.2	3.18	9.25	10.3
W10		Pivka河流域	地下河入口	20.8	363	7.47	78.7	13.1	231.8	1.53	2.68	3.2
W12			泉点	11.7	377	7.98	84.3	7.56	250.1	4.32	6.24	9.5
W13			湖水	8.6	345	7.65	84.9	5.62	210.5	4.75	2.59	1.6
W14		Planina洞	地下河支流	9.5	373	8.22	92.4	6.63	244.0	4.25	3.18	3.4
W15			地下河出口	10.0	336	7.67	78.0	6.88	237.9	4.25	3.74	4.7
AVE				11.6	426	7.89	84.2	19.5	273.1	3.67	7.20	4.9
SD				3.68	71.25	0.27	5.68	12.62	44.05	0.95	7.92	2.9
CV				0.32	0.17	0.03	0.07	0.65	0.16	0.25	1.1	0.59

注：“—”表示未测出。

3.3 研究区氢氧同位素特征

氢氧同位素(D和¹⁸O同位素)在自然界水体中普遍存在,其在水循环过程中会发生反复的蒸发分馏作用,导致其比率随之发生变化^[20]。地下水中氢氧同位素特征记录了各种环境因素影响的信息,性质稳定且易被检测出,可以用于指示地下水的补给来源,也是判断水循环转化过程及形成演化的重要

参数^[21-24]。由表2可知,研究区地下水中δD和δ¹⁸O变化范围较小,分布较集中。其中,δD分布范围为-8.29‰~-7‰,平均值为-7.97‰,δ¹⁸O分布范围为-53.54‰~-41.95‰,平均值为50.48‰。

Graig通过研究全球各地降雨与湖泊、河水的氢氧同位素资料,提出了全球大气降水线(Global Meteoric Water Line, GMWL): δD=8δ¹⁸O+10^[25-26]。由

表 2 斯洛文尼亚 Postojna 岩溶流域地下水同位素数据/‰
Table 2 Groundwater isotope data of Postojna karst basin, Slovenia

编号	$\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$	$\delta\text{D}\text{-H}_2\text{O}$	d 盈余	$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3$	$\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3$
W1	-8.29	-53.54	12.78	-4.72	7.06
W2	-8.18	-53.52	13.33	-1.90	6.35
W3	-7.91	-50.08	12.92	-3.97	5.10
W4	-7.80	-49.83	11.92	-3.91	6.02
W5	-8.08	-51.34	13.30	-4.16	8.08
W6	-8.60	-55.47	13.02	-3.06	7.75
W7	-8.50	-55.08	13.40	-5.26	7.01
W8	-8.07	-51.54	13.37	-5.07	8.40
W9	-8.07	-51.16	13.63	-4.37	9.19
W10	-8.06	-51.11	13.20	-0.95	4.78
W11	-7.56	-47.01	12.57	0.34	3.86
W12	-7.00	-41.95	13.78	1.06	4.33
W13	-7.69	-46.91	14.61	-1.65	4.19
W14	-8.02	-50.53	13.47	-1.49	4.64
W15	-7.74	-48.14	14.05	-1.15	4.86
AVE	-7.97	-50.48	13.29	-2.68	6.11
SD	0.39	3.49	0.63	2.01	1.72
CV	0.05	0.07	0.05	0.75	0.28

于气候与环境条件的影响,不同地区的降水存在区域差异性,因此一般采用当地大气降水线进行研究,Polona 等利用当地气象监测站 6 年来的降水同位素实测监测数据,建立了斯洛文尼亚东部大气降水线(Local Meteoric Water Line, LMWL): $\delta\text{D}=7.6\delta^{18}\text{O}+6.6$ [27]。将本研究测得的 15 个大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 带入 LMWL 方程,计算得到 δD ,与实测值进行比较,发现绝对误差为 2.05‰~4.93‰,说明 LMWL 作为研究区当地降水线可靠性较好。由图 2 可知,GMWL 和 LMWL 斜率和截距差距不大,表明当地大气降水氢氧同位素动力分馏作用较小。

研究区地下水样点分布于 GMWL 和 LMWL 附近,向上方稍有偏移,且呈线性分布(图 2),表明大气降水是研究区岩溶地下水的主要补给来源。水点拟合线方程式为: $\delta\text{D}=8.8\delta^{18}\text{O}+19.9$ 。 $R^2=0.98$ 表明研究区降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值有显著的相关性。拟合线的斜率和截距略大于 GMWL 和 LMWL,表明地下水受到 D 稳定同位素动力分馏作用较小,导致 δD 略偏正,证明地下水受蒸发作用的影响较小 [28]。此外,氘盈余参数 $d(d=\delta\text{D}-8\delta^{18}\text{O})$ 也可以指示补给到地下水的水体受蒸发作用的大小, d 值越小,蒸发作用越强烈 [29-30]。研究区地下水氢氧同位素 d 值均为正值,介

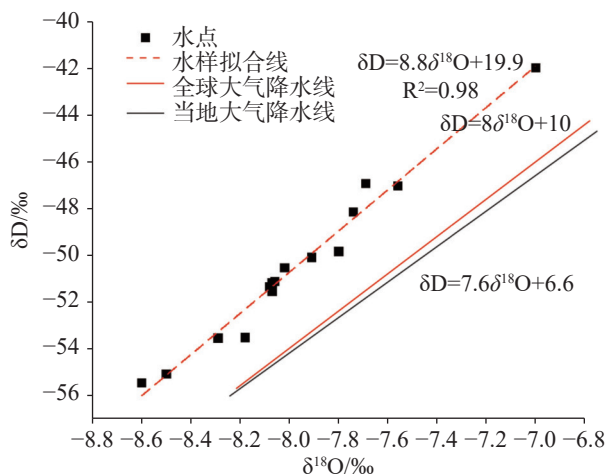


图 2 研究区地下水氢氧同位素关系

Fig. 2 $\delta\text{D}\text{-}\delta^{18}\text{O}$ relationship in groundwater of the study area

于 11.92‰~14.61‰ 之间,平均值为 13.29‰,大于当地大气降水平均值(10.20‰),这进一步说明岩溶地下水在径流过程中受到蒸发作用的影响较小。

3.4 研究区硝酸盐污染特征及来源解析

研究区地下水中 NO_3^- 质量浓度范围雨季为 2.07~3.68 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 2.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;旱季为 1.53~4.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 3.76 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。参考世界卫生组织规

定的饮用水水质安全限值($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 研究区地下水 NO_3^- 污染程度处于较低水平, 斯洛文尼亚地广人稀, 采样点附近人类活动简单, 土地利用以草地为主, 地下水受到的污染较少, 因此硝酸盐浓度季节性变化主要受降雨和气温影响, 雨季降雨会稀释硝酸盐浓度, 并且雨季气温低, 人类活动更简单, 而旱季降雨量小、气温高, 人类和牛羊活动频繁。文献^[31]表明自然条件下, 根据浅层地下水的 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 是否大于+5‰也可以用来判定地下水是否受到 NO_3^- 污染。结果显示, 研究区地下水 $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ 均小于+5‰, 也可说明研究区地下水 NO_3^- 污染程度处于较低水平。

采用 Cl^- 浓度和 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值的关系来确定水体 NO_3^- 的来源^[32]。 Cl^- 的化学性质保守, 不容易受到物理、化学和生物过程的影响, 其浓度会通过混合过程变化。一般来说, Cl^- 浓度相对较高, $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值相对较低, 则说明生活污水及畜禽粪便可能是 NO_3^- 的主要来源。 Cl^- 浓度相对较低, $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值相对较高, 则说明化肥可能是 NO_3^- 的主要来源。 Cl^- 浓度相对较低, $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比值也相对较低, 则说明土壤氮是 NO_3^- 最有可能的来源^[33]。本研究 Cl^- 浓度与 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值的关系见图3, 空白区域 Cl^- 浓度较高, $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值较低, 阴影区域 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 比值较低, Cl^- 浓度也较低。采样点分布在阴影区域, 表明 NO_3^- 来源主要为土壤氮; 采样点分布在空白区域, 表明 NO_3^- 来源为生活污水及畜禽粪便。研究区地下水中 NO_3^- 来源以自然过程形成的土壤氮为主, 旱季时候部分采样点处地下水有生活污水及畜禽

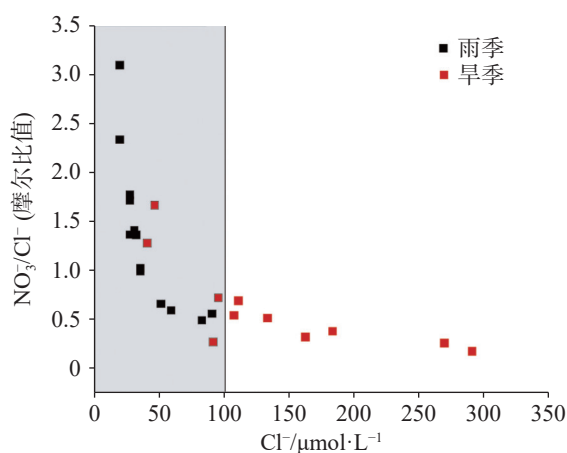


图3 Cl^- 摩尔浓度和 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值的关系

Fig. 3 Relationship between Cl^- molar concentration and $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ molar ratio

粪便。

4 结 论

(1) 斯洛文尼 Postojna 研究区地下水水温、pH、电导率以及阴阳离子等指标在空间和时间变化上均稳定, 基本接近背景值, 表明地下水较少受到人类活动影响。

(2) 通过分析地下水中氢氧同位素特征判断地下水的主要补给来源为大气降水。

(3) 研究区地下水中硝酸盐质量浓度在 $1.53 \sim 4.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 远低于世界卫生组织规定的饮用水水质安全限值($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 采用 Cl^- 浓度和 $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ 摩尔比值的关系确定了硝酸盐来源以自然过程形成的土壤氮为主, 旱季时候部分采样点处的地下水有生活污水及畜禽粪便。

参考文献

- [1] D Karunanidhi, P Aravinthasamy, M Deepali, T Subramani, Barbara C Bellows, Peiyue Li. Groundwater quality evolution based on geochemical modeling and aptness testing for ingestion using entropy water quality and total hazard indexes in an urban-industrial area(Tiruppur) of Southern India[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 18523-18538.
- [2] 蓝家程. 岩溶地下河系统中多环芳烃的迁移、分配及生态风险研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014: 1.
LAN Jiacheng. Dissertation Submitted to Southwest University for Doctoral Degree in Physical Geography[D]. Chongqing: Southwest University, 2014:1.
- [3] Zhang X, Liu Y, Wang H. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(6): 1-12.
- [4] Li J, Zhao P, Chen Y. Influence of deep gorge landforms on karst groundwater chemistry in Guizhou, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 613: 128315.
- [5] White W. B. Karst hydrogeochemistry: A review of recent research in Europe[J]. *Applied Geochemistry*, 2021, 123: 104813.
- [6] Zhou X, Han L, Wu J. Heavy metal contamination in karst groundwater from coal mining areas[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 321: 121040.
- [7] Nguyen P, Tran H, Le T. Nitrate contamination in karst aquifers of Southeast Asia[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 807: 150900.
- [8] Smith D, Cooper C, Hall J. Urbanization impacts on karst groundwater recharge[J]. *Water*, 2021, 13(7): 985.
- [9] Slovenian Enionmernt Agency ARSO. Meteorology of Slovenia-

- Natioal Meteological Service of Slovenia-Interactive Weather [202-01-2] [EB/OL].<http://meteo.arso.gov.si/me/en/app/webmet/>.
- [10] Kogovsek B, Jemcov I, Petric M. Advanced application of time series analysis in complex karst aquifers: A case study of the Unica springs (SW Slovenia)[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 626: 130147.
- [11] 章程, 汪进良, 肖琼, 苗迎, Mitja Prelovsek. 斯洛文尼亚典型岩溶区土壤剖面 CO₂ 冬季动态变化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3288-3299.
- ZHANG Cheng, WANG Jinliang, XIAO Qiong, MIAO Ying, Mitja Prelovsek. Wintertime CO₂ changes in a typical karst soil profile in Slovenia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3288-3299.
- [12] 章程, 肖琼, 汪进良, 苗迎, Mitja PRELOVSEK, 孙平安, 郭永丽, Martin KNEZ. 斯洛文尼亚岩溶区草地昼夜尺度土壤 CO₂ 含量与土温滞后效应[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 381-389.
- ZHANG Cheng, XIAO Qiong, WANG Jinliang, MIAO Ying, Mitja PRELOVSEK, SUN Pingan, GUO Yongli, Martin KNEZ. Diurnal hysteresis between soil CO₂ and soil temperature in karst grassland in Slovenia[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 381-389.
- [13] Blatnik M, Frantar P, Kosec D, Gabrovšek F. Measurements of the outflow along the eastern border of planinsko polje, Slovenia[J]. *Acta Carsologica*, 2017, 46(1): 83-93.
- [14] Blatnik M, Mayaud C, Gabrovsek F. Groundwater dynamics between Planinsko Polje and springs of the Ljubljana River, Slovenia[J]. *Acta Carsologica*, 2019, 48(2): 199-226.
- [15] Ravbar N, Petrič M, Kogovšek B, Blatnik M, Mayaud - Proc M. High waters study of a classical Karst polje-an example of the Planinsko Polje, SWSlovenia//Proceedings of the International Symposium KARST 2018[J]. Belgrade: Centre for Karst Hydrogeology, 2018: 417-424.
- [16] 赵幸悦子, 肖攀, 宋文龙, 黎义勇, 刘前进. 赣南红层地区地下水水化学特征及成因分析[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(33): 14112-14122.
- ZHAO Xingyuezi, XIAO Pan, SONG Wenlong, LI Yiyong, LIU Qianjin. Hydrochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in red-bed area of south Jiangxi Province[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(33): 14112-14122.
- [17] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 刘朋雨, 程瑞瑞, 李腾芳. 柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素[J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2132-2142.
- HUANG Qibo, QIN Xiaoqun, LIU Pengyu, LIU Pengyu, CHENG Ruirui, LI Tengfang. Regional evolution law and control factors of karst groundwater in Liulin spring area[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2132-2142.
- [18] 张陶, 蒲俊兵, 李建鸿, 吴飞红, 袁道先. 漓江干流水体主要离子化学变化特征及影响因素[J]. *广西科学*, 2018, 25(5): 532-543.
- ZHANG Tao, PU Junbing, LI Jianhong, WU Feihong, YUAN Daoxian. Chemical characteristics changes of major ion and its influence factors in the main stream of Lijiang River[J]. *Guangxi Sciences*, 2018, 25(5): 532-543.
- [19] 王修华, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 苏悦, 胡晓农. 漓江流域河流水体离子组成特征及来源[J]. *水文*, 2019, 39(3): 68-74.
- WANG Xiuhua, CAO Jianhua, WU Xia, HUANG Fen, SU Yue, HU Xiaonong. Characteristics and Origin of Major Ions in River Water in the Lijiang River Basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(3): 68-74.
- [20] 高建飞, 丁梯平, 罗续荣, 田世洪, 王怀柏, 李明. 黄河水氢、氧同位素组成的空间变化特征及其环境意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 596-602.
- GAO Jianfei, DING Diping, LUO Xurong, TIAN Shihong, WANG Huaibo, LI Ming. δD and $\delta^{18}O$ Variations of Water in the Yellow River and Its Environmental Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 596-602.
- [21] Batlle-aguilera J, Banks E W, Batelaan O, Kipfer R, Brennwald M S, Cook P G. Groundwater residence time and aquifer recharge in multilayered, semi-confined and faulted aquifer systems using environmental tracers[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 150-165.
- [22] QIAN Hui, LI Peiyue, WU Jianhua, ZHOU Yahong. Isotopic characteristics of precipitation, surface and ground waters in the Yinchuan plain, Northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(1): 57-70.
- [23] 廖驾, 朱振华, 彭毅, 韦珊瑚, 罗朝晖, 刘状, 徐强强, 谢亘. 湘西北地区岩溶地下水水化学与氦氧同位素特征分析[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(3): 425-435, 481.
- LIAO Jia, ZHU Zhenhua, PENG Yi, WEI Shanhu, LUO Chao-hui, LIU Zhuang, XU Qiangqiang, XIE Gen. Analysis of hydrochemistry and deuterium and oxygen isotope characteristics of karst groundwater in northwestern Hunan[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 425-435, 481.
- [24] Sreedevi P D, Sreekanth P D, Reddy D V. Recharge environment and hydrogeochemical processes of groundwater in a crystalline aquifer in South India[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(6): 4839-4856.
- [25] 李霞, 陈文芳, 万利勤, 夏飞雪, 张一博, 袁梦丽. 河南嵩县北部基岩山区地下水水化学特征和环境同位素特征分析[J]. *地球学报*, 2017, 38(3): 403-412.
- LI Xiao, CHEN Wen Fang, WAN Li Qin, XIA Feixue, ZHANG Yibo, YUAN Mengli. Analysis of hydrochemical characteristics and environmental isotopic characteristics of groundwater in bedrock mountains area in northern Songxian county, Henan Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38(3): 403-412.
- [26] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [27] Polona Vreča, Tjaša Kanduč, Marko Štok, Klara Žagar, Matteo Nigro, Michele Barsanti. An Assessment of Six Years of Precipitation Stable Isotope and Tritium Activity Concentration Records at Station Sv. Urban, Eastern Slovenia[J]. *Water*, 2024, 16: 469.
- [28] 柳富田. 基于同位素技术的鄂尔多斯白垩系盆地北区地下水循环及水化学演化规律研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 46-47.
- LIU Futian. Research on Groundwater Circulation and Hydrochemical Transport in the Northern Part of Ordos Cretaceous Basin Based on Isotope Technology[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 46-47.

- versity, 2008: 46-47.
- [29] 马健, 黄勇, 冀东, 潘广山, 吴振, 许春萌, 刘明明. 胶州湾北岸不同水体水化学及氢氧同位素特征研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(32): 14116-14123.
- MA Jian, HUANG Yong, JI Dong, PAN Guangshan, WU Zhen, XU Chunmeng, LIU Mingming. Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics of Different Water Bodies in the North Coast of Jiaozhou Bay[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(32): 14116-1412.
- [30] 孟令华. 基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程[J]. 环境科学, 2024, 45(4): 2096-2106.
- MENG Linghua. Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes[J]. Environmental Science, 2024, 45(4): 2096-2106.
- [31] 夏冰, 徐良才, 高红远. 利用氮氧同位素示踪吉水县地下水中硝酸盐污染源[J]. 资源信息与工程, 2023, 38(4): 99-103, 109.
- XIA Bing, XU Liangcai, GAO Hongyuan. Tracing nitrate pollution sources in groundwater in Jishui County using nitrogen and oxygen isotopes[J]. Resource Information and Engineering, 2023, 38(4): 99-103, 109.
- [32] Juan Antonio Torres-Martínez, Abraham Mora, Jürgen Mahlknecht, Luis W, Daesslé, Pabel A. Cervantes-Avilés, Rogelio Ledesma-Ruiz. Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model[J]. Environmental Pollution, 2021, 269.
- [33] WU Peiyan, XIAO Qiong, GUO Yongli, Mitja Prelovšek, YU Qiong, WANG Qigang. Migration, transformation and nitrate source in the Lihu Underground River based on dual stable isotopes of $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29: 48661-48674.

Hydrogeochemical characteristics of classical karst regions in Slovenia

MIAO Ying^{1,2}, ZHANG Cheng^{1,2}, Mitja Prelovsek³, XIAO Qiong^{1,2}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR/ International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO/National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China;

3. Karst Research Institute, Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Slovenia)

Abstract Groundwater plays an important role in supplying drinking water, as well as supporting industrial and agricultural activities worldwide, especially in karst regions. Due to the unique spatial distribution of soil and water resources in these areas—where soil lies above and water below—groundwater is particularly vulnerable to water quality degradation and flood-related environmental issues. Slovenia is an important country along the Belt and Road route and is also recognized as the birthplace of karst research. Karst groundwater serves as a vital resource for both the livelihoods and agricultural production in the karst regions of Slovenia. Covering more than half of the country's territory, these karst regions are characterized by vast land and sparse population, making karst groundwater one of the most critical natural resources for its national economic development. The main environmental problems in Slovenia include water security, imbalanced spatial and temporal distribution of water resources, and flooding. Hence, it is of great significance to investigate the situation of karst groundwater in Slovenia.

Under the exemplary role of the Belt and Road Initiative, this study is supported by the China-Slovenia Belt and Road Joint Laboratory Project on Karst Geology (currently in preparation) within BRI framework. It involves field investigations and sampling conducted in collaboration with the Karst Institute of Slovenia. The objectives are to elucidate the processes and patterns of the Dinaric karstification and its cycles of carbon, water and calcium, analyze the formation and distribution background of this karst system, and compare it with the subtropical karst system in China. The findings are expected to be applicable to other karst regions along the Belt and Road route, enhancing China's understanding to key resource and environmental challenges in these areas. This study will provide background information on geology, geomorphology, resources, and environment to national authorities for formulating subsequent development strategies, thereby contributing to national diplomacy concerning the environment and resources.

In this study, karst geological investigations and sampling were carried out in the Postojna karst basin in Slovenia, obtaining hydrochemical and isotopic data of karst groundwater in this country. Preliminarily analysis and research are

currently underway. The results show as follows.

(1) The quality of karst groundwater in Slovenia is excellent, with groundwater remaining in its natural state. Parameters such as water temperature, pH, conductivity, and concentrations of anion and cation remain stable within fixed ranges throughout the year. Fluctuations, when they occur, are mostly affected by natural environment variations rather than human activities.

(2) Comparative analysis with hydrochemical data from the Lijiang Basin in the karst areas of southwest China reveals that the hydrochemical types in karst areas are predominately controlled by water-rock interactions, with negligible influence from other factors.

(3) Analysis of hydrogen and oxygen isotopic characteristics of groundwater shows that atmospheric precipitation serves as the primary recharge source for karst groundwater in the study area. Influenced by weathering and leaching processes in carbonate aquifers and other types of rock, groundwater exhibits typical HCO_3^- - Ca^{2+} type.

(4) The concentrations of common pollutants, such as nitrate, are far below the safety limit for drinking water quality set by the World Health Organization. The primary sources of these contaminants are soil nitrogen derived from natural processes. During the dry season, groundwater at some sampling sites exhibits contamination from domestic sewage and livestock manure.

Key words Slovenia, karst, groundwater, hydrochemistry, isotope

(编辑 张玲)

(上接第 487 页)

underground river discharge, dominated by carbonate rock dissolution, reflecting a mixture of karst water and sandstone water. Karst water vertically infiltrating from the Huanglong Formation and the Chuanshan Formation limestone accounts for 70% to 79% of tunnel water inrush, with 21% to 30% contributed by lateral sandstone water.

(3) During the runoff process, the recharge of groundwater from atmospheric precipitation amounts to $19,324.89 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, of which 48.29% is discharged through the tunnel. Under non-extreme rainfall conditions, the predicted water influx into the Huxitai Tunnel is $10,684.89 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$; however, during extreme rainfall events, the maximum predicted water influx can reach up to $79,364.13 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

To sum up, these results provide a quantitative decision-making basis for the prevention and control of water inrush in the Huxitai Tunnel, and also serve as valuable references for similar studies on water inrush of karst tunnel.

Key words the Huxitai Tunnel, groundwater hydrochemistry, hydrogen and oxygen isotopes, karst groundwater system, source of water gushing

(编辑 黄晨晖)