



集中补给条件对岩溶地下河水文过程及污染响应的影响

周志浩, 罗明明*, 陈静, 彭翔宇, 赵泽浩, 赵文慧

中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078

第一作者, E-mail: theosweet@cug.edu.cn

* 通信作者, E-mail: luomingming@cug.edu.cn

2023-10-11 收稿; 2023-12-18 修回; 2023-12-21 接受

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42172276); 国家自然科学基金青年基金项目(41807199)

中图分类号: P641.2; X52

文章编号: 2096-8523(2025)03-0324-10

doi: [10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230566](https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230566)

摘要:集中补给条件往往对岩溶地下河的水量 and 水质有显著影响,因此明晰不同集中补给条件对其的影响具有重要意义。基于水文地球化学调查,对鄂西青龙口地下河系统的落水洞入口和地下河出口同步进行了水文和水化学动态监测,探讨了不同补给条件对地下河水量和水质的影响。结果表明:补给强度和土壤含水率直接控制着落水洞的产汇流过程及岩溶地下河的流量响应,未达到阈值的降雨事件不会引起地下河流量响应;降雨集中汇流至落水洞入口的过程中,各水化学离子浓度均有明显的提高,而青龙口地下河出口水化学响应受补给强度影响,强降雨下地下河受落水洞入口水化学离子浓度富集影响强烈;降雨后的水质波动主要源于降雨形成地表径流携带的面源污染,暴雨后的总无机氮和磷酸盐在落水洞口出现聚集,集中补给输入的污染物对地下河产生直接污染,浓度可达天然背景值的 2~3 倍;水化学响应中氨氮先于硝态氮进入岩溶水循环,地下河系统出口的硝态氮和总无机氮通量相较入口有所增加,氨氮通量随补给时间逐渐减少,推测管道内发生了硝化反应。本研究结果可为岩溶地下河的污染防控和水环境治理提供科学依据。

关键词:岩溶地下河; 水化学; 污染响应; 集中补给; 青龙口地下河系统; 鄂西

岩溶地下水是岩溶地区农业、工业和生活用水的重要水源^[1-2]。岩溶地区独有的地表-地下双层结构^[3]使地表水与地下水发生快速交换,污染物极易进入岩溶含水层导致持续性污染^[4-5]。近年来,城市生活垃圾和工业“三废”的不合理处置以及农药、化肥的大量使用,导致岩溶地下河水质逐渐恶化,直接影响岩溶地区的经济发展和环境安全。

大气降水是岩溶地区地下河系统的主要补给来源^[6]。在岩溶洼地,降雨沿坡面汇集到槽谷底部的落水洞,以集中补给的方式补给地下河^[7-8]。因此,降雨往往是非点源模型中驱动径流产生和污染运输的最重要输入途径^[9],直接控制地下河系统的污染过程。

先前的研究表明,后寨流域中总氮通量的 80% 都是在雨季进行迁移的^[10],但氮磷浓度较低的雨水并非地下水污染的主要来源^[11]。研究表明,岩溶地区的氮磷主要源自于农业活动^[12-14]。降雨加剧了岩溶地区的土壤淋失^[15],随着降雨强度的增加,雨水携带土壤中的氮素逐渐运移至裂隙和管道^[16-17]。此外,降雨引起的强水动力使管道内水岩作用增强以及河底沉积物再释放^[18-19]也使地下河水质发生波动。因此,地下河中污染物的迁移往往伴随着降雨事件引起的流量响应。

在我国西南部喀斯特地区,降雨产流过程的响应随降雨强度的变化而变化^[20],与此相似,地下河系

著录信息:周志浩,罗明明,陈静,等.集中补给条件对岩溶地下河水文过程及污染响应的影响[J].地质科技通报,2025,44(3):324-333.

ZHOU Zhihao, LUO Mingming, CHEN Jing, et al. Effects of concentrated recharge conditions on hydrological processes and pollution responses of karst underground rivers[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2025, 44(3): 324-333.

统中污染响应是否也随补给强度的变化而改变？不少学者在研究这一问题时多以输出点作为监测对象，缺乏对不同补给强度下污染源由土壤转向入口这一过程的研究。但岩溶地区降雨输入—管道径流—地下河出口排泄的过程往往存在着复杂的转换与调蓄^[21]，所以研究地下河系统入口对于不同补给强度下的污染响应具有重要意义。因此，本研究将基于青龙口地下河和落水洞的水文和水化学同步监测数据，分析不同降雨条件下地下河系统的水文地球化学指标的变化，为深化岩溶地下河系统水文地球化学过程的理解，促进岩溶地下河的污染防控和环境治理提供科学依据。

1 研究区概况

青龙口地下河位于湖北省宜昌市兴山县榛子乡，处于典型的亚热带季风气候区，四季分明，雨量充沛。年平均降水量为 900 ~ 1200 mm，主要集中在 4—9 月。研究区海拔为 1300 ~ 1700 m，农业发达，是宜昌市著名的高山反季节蔬菜种植基地。

研究区为典型的岩溶槽谷地貌区，出露地层为震旦系—志留系，倾向 WN，倾角相对平缓。寒武系娄山关组 and 覃家庙组组成广泛发育的碳酸盐岩单元，构成研究区的主要含水层（图 1）。下寒武统泥岩、页岩构成了含水系统的不透水基底，使青龙口地下河呈接触下降成因排泄（图 2）^[22]。与此相似，由于中

寒武统覃家庙组一段泥质白云岩具有相对隔水效果，形成接触下降成因的寨洞地下河。

研究区北部岩溶洼地是青龙口地下河的补给区，岩溶洼地在强降雨下易发生集中汇流。落水洞 1 和落水洞 2 是研究区内 2 个主要的落水洞：落水洞 1 在枯水期无径流，降雨后坡面汇流由落水洞补给下伏岩溶含水层，运移至青龙口地下河排泄；落水洞 2 上部有一条季节性寨洞地下河，流经地表后通过落水洞 2 再次补给进入下伏岩溶含水层。根据前期研究，落水洞 1 比落水洞 2 更易产流，降雨阈值分别约为 9, 10 mm。南部青龙口地下河为集中排泄出口，是香溪河流域高岚河的源头，流量从几十升每秒到几千升每秒波动。前人在此进行了多组示踪试验，探明了落水洞 1 和落水洞 2 与青龙口地下河的管道连通关系和岩溶发育特征^[23]。

2 调查方法

于 2022 年 6 月在落水洞 1 和落水洞 2 入口和青龙口地下河出口处布置水文监测站（水位、水温、电导率自动记录仪）连续监测落水洞入口和地下河出口的水文过程，数据采集频率为 15 min/次。利用水位—流量公式^[24]对落水洞 1、落水洞 2 和青龙口地下河进行流量拟合。青龙口地下河出口水样采用自动采样器（GRASP-FC-9624）采集，落水洞水样采用人工采集。时间间隔从降雨事件发生后流量“暴涨

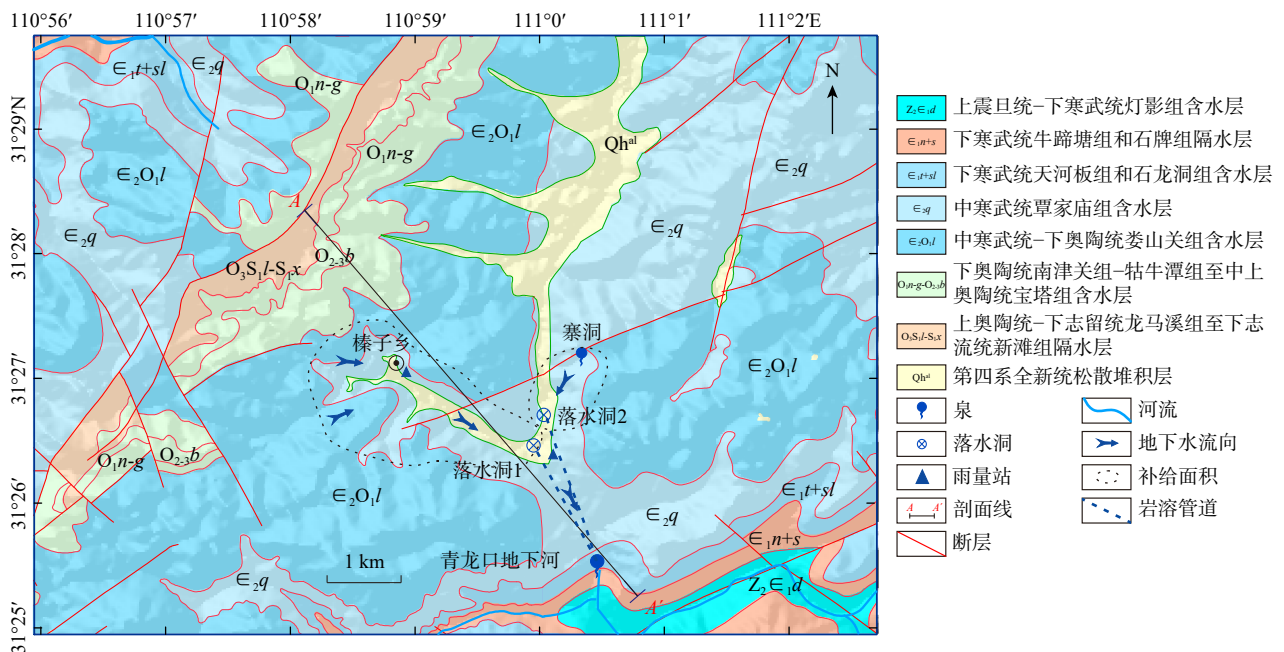


图 1 青龙口地下河系统水文地质图

Fig. 1 Hydrogeologic map of Qinglongkou underground river system

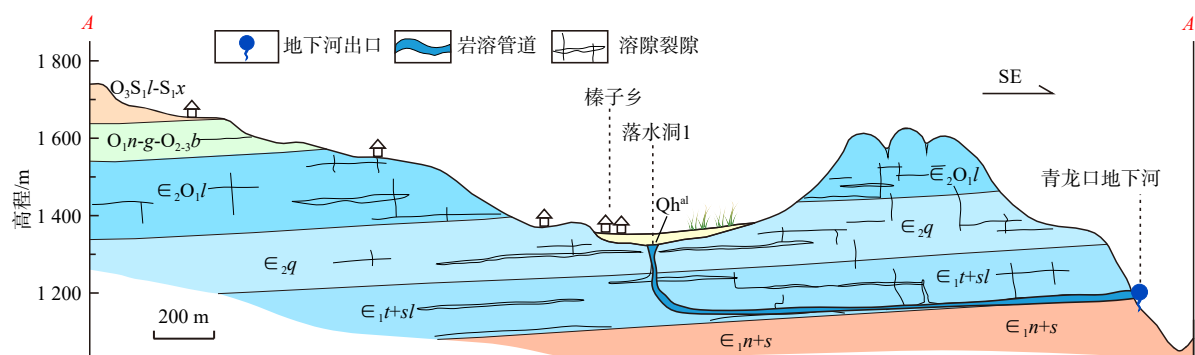


图2 青龙口地下河系统 A-A'水文地质剖面图(剖面 A-A'位置见图1, 代号同图1)

Fig. 2 A-A' hydrogeologic profile of Qinglongkou underground river system

暴落”的 0.5 h 到基流阶段的 2 h 不等。

每份水样取 1 L 用 HACH HQ40 d 仪器测试电导率、pH、氧化还原电位和溶解氧。现场采样后用盐酸滴定法测定 HCO_3^- 浓度。由 HACH DR3900 仪器在野外测定样品中 N-NO_2^- 、 N-NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 离子质量浓度, 精度分别为 0.001, 0.01, 0.01 mg/L。水化学测试样品经 0.22 μm 滤膜过滤后冷藏保存。水化学全分析样品在中国地质大学(武汉)地质调查实验中心测定完成。阴离子分析采用仪器 ICS 2100, 精度为 0.001 mg/L; 金属元素分析采用仪器 ICAP 6300, 精度为 0.001 mg/L。

3 结果与分析

3.1 落水洞-岩溶地下河的水文动态过程

岩溶地下河流量动态是表征地下水动力条件的重要标志^[25]。降雨量的大小及降雨强度直接控制着落水洞的产汇流过程以及岩溶含水层的补给。青龙口地下河系统内管道、裂隙高度发育, 水位流量动态对暴雨响应明显, 水文过程曲线呈现“暴涨暴落”。图3为研究区内落水洞与青龙口地下河流量响应变化曲线, 选取研究区内 2022 年 6 月 18 日-2023 年 6 月 18 日具有代表性的 8 次降雨事件(表1), 次降雨量介于 6~68.5 mm 之间。

当次降雨量较小时, 难以对岩溶地下河形成补给。例如降雨事件 3 和降雨事件 6, 次降雨量仅为 6 mm, 未在落水洞产生汇流, 地下河出口的水量无影响。主要因为在小强度降雨下, 降雨受到土壤或风化层截留, 以补给包气带为主, 未达到产流阈值^[26], 无法形成有效径流补给落水洞, 因而地下河以释放裂隙流为主。

当次降雨量达到产流阈值时, 降雨强度则会对落水洞产流具有调控作用。降雨事件 1 和降雨事件

4 中次降雨量分别为 9, 15.5 mm, 出现仅落水洞 1 产流和仅落水洞 2 产流的现象, 而降雨事件 2 中次降雨量与降雨事件 4 几乎一致(16 mm), 最大降雨强度达到 12.5 mm/h, 落水洞 1 和落水洞 2 均发生响应。分析其原因为短时强降雨的强度远超地下渗能力形成局部超渗产流^[27], 降雨以坡面流的形式汇入落水洞, 从而补给地下河。

当次降雨量远超产流阈值时, 落水洞更易产流, 地下河出口流量增幅大。例如降雨事件 5 和降雨事件 8 中落水洞出现明显产流, 地下河出口整体呈“暴涨暴落”的脉冲式响应特征。降雨事件 8 受前期降雨影响, 土壤较为饱和, 降雨更多转化为地表径流汇入落水洞, 尽管次降雨量与降雨事件 5 相同, 但地下河排泄量却明显提升。

3.2 水文地球化学过程对不同补给强度的响应

岩溶含水层对外界环境敏感, 其水化学变化特征往往是自然要素和人类活动共同作用的结果^[28]。研究区青龙口地下河发育于以灰岩和白云岩为主的石龙洞组和天河板组内, 属于典型的岩溶管道流。地下河水化学成分主要阳离子为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 主要阴离子为 HCO_3^- , 为 $\text{Ca}\cdot\text{Mg-HCO}_3$ 型水。对降雨过程中落水洞入口和地下河出口的水文和水化学进行同步监测(图4, 5), 结果表明不同降雨强度下监测指标存在不同响应特征。

(1) 落水洞的水化学变化过程

无雨季节或未达到产流阈值时, 落水洞无径流。当次降雨量引起落水洞产流时, 不同组分呈现出不同的特点(图4)。 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 在降雨初期均出现浓度峰值响应, 后随降雨事件的持续逐渐降低。这主要归因于落水洞入口毗邻农田, 土壤沉积物中的营养盐受降雨冲刷释放上浮汇聚至落水洞口聚集, 形成浓度峰值^[29]。当降雨持续时, 土壤较为饱和, 降雨冲刷效率逐渐降低, 落水洞口汇流离子浓度逐渐趋

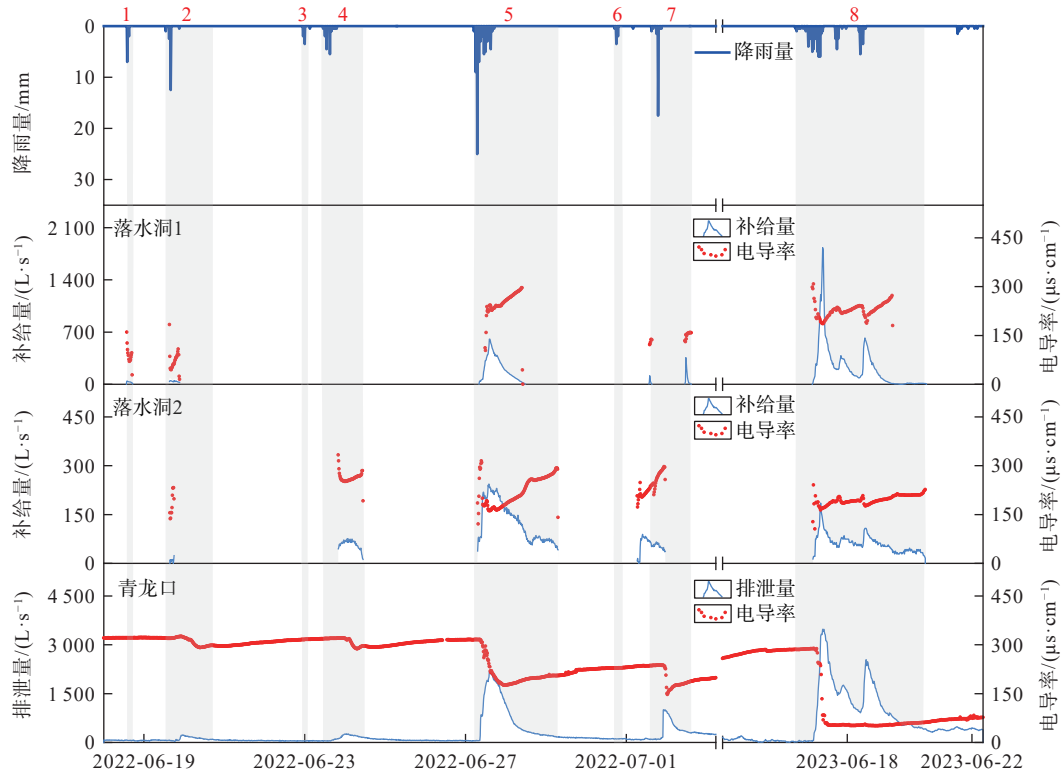


图3 青龙口地下河系统水文动态响应变化图(1~8为降雨事件编号)

Fig. 3 Changes in the hydrologic dynamic response of Qinglongkou underground river system

表1 青龙口地下河系统降雨流量响应情况

Table 1 Rainfall-discharge responses of Qinglongkou underground river system

降雨事件编号	降雨时间	次降雨量/mm	最大降雨强度/(mm·h ⁻¹)	落水洞1产流情况	落水洞2产流情况	青龙口流量响应情况
降雨事件1	2022-06-18 14: 00	9.0	7.0	产流	未产流	未响应
降雨事件2	2022-06-19 13: 00	16.0	12.5	产流	产流	响应
降雨事件3	2022-06-22 23: 00	6.0	3.5	未产流	未产流	未响应
降雨事件4	2022-06-23 11: 00	15.5	5.5	未产流	产流	响应
降雨事件5	2022-06-27 05: 00	67.0	25.0	产流	产流	响应
降雨事件6	2022-06-30 17: 00	6.0	3.5	未产流	未产流	未响应
降雨事件7	2022-07-01 15: 00	21.5	17.5	产流	产流	响应
降雨事件8	2023-06-16 08: 00	68.5	5.5	产流	产流	响应

近于降雨样品。落水洞2整体离子趋势相同,在汇流初期均表现为相对高值,后随稀释作用逐渐降低。而落水洞1处 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 和 HCO_3^- 离子浓度在流量峰值时均处于较低水准,随着降雨事件的持续,离子浓度稳步增加。这可能源于落水洞1具有更大的汇水面积,坡面汇流过程中溶滤作用更为充分。

相比于降雨事件发生前,落水洞在接收降雨集中汇流至落水洞口的过程中,各水化学离子浓度均有明显的提高。不同离子对降雨响应的过程中表现出明显的差异性,这可能与不同组分的来源和形成密切相关^[30]。

(2) 青龙口地下河的水化学变化过程

无雨季节,青龙口地下河主要由释放排泄裂隙

流为主,化学指标较为稳定。弱降雨下,例如降雨事件3和降雨事件6未达到产流阈值,青龙口地下河和落水洞水化学特征没有受到降雨影响。尽管降雨事件1在落水洞1形成汇流,但因对青龙口地下河未形成有效补给,导致出口水化学特征无响应。当降雨强度引起地下河流量改变时,地下河物理化学性质也相应地出现显著响应(图5)。例如降雨事件4和降雨事件5, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 浓度在降雨事件初期受到“新水”的稀释迅速下降,随着溶滤作用增强,矿物进一步溶解,离子浓度逐渐升高^[31],体现为显著的脉冲式响应的特点。而 Na^+ 、 K^+ 和 Cl^- 浓度则在流量增长初期表现出相对较高的浓度,达到流量峰值时被稀释降低到最低值,最后逐渐恢复

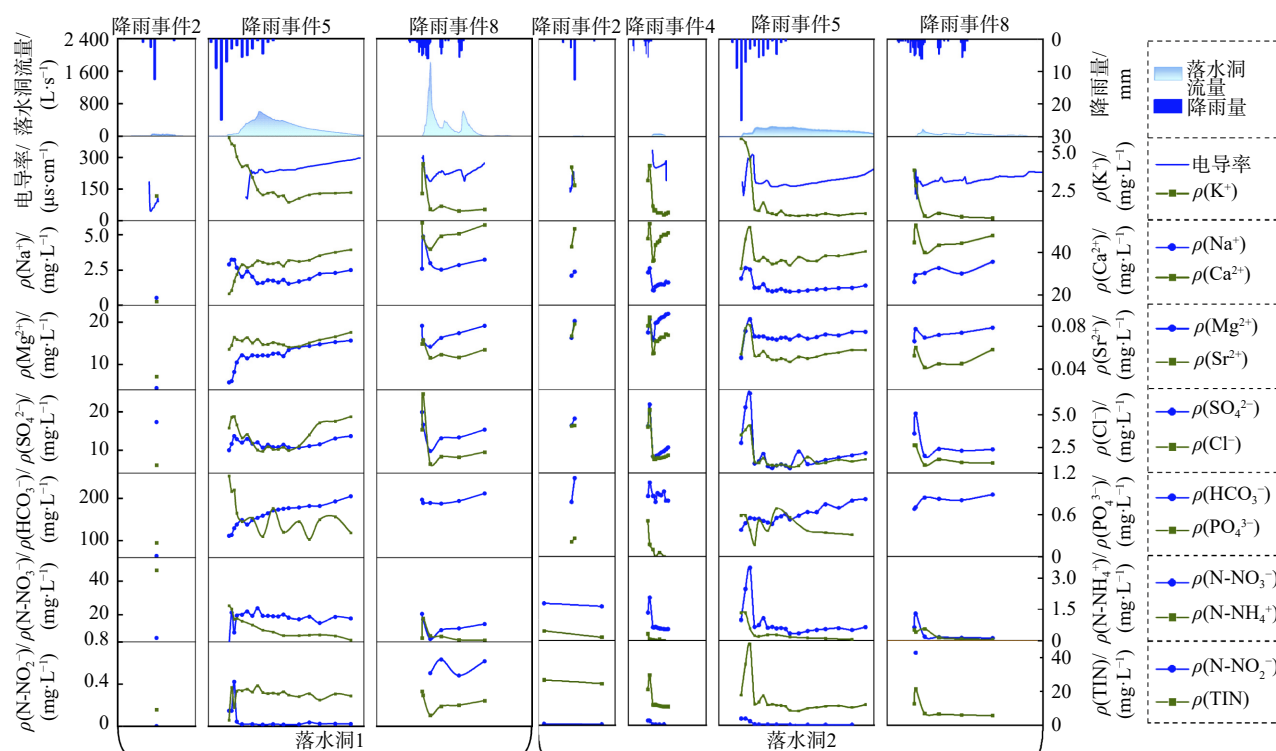


图 4 不同补给强度下落水洞 1 和落水洞 2 水化学组分对降雨的响应

Fig. 4 Response of hydrochemical components to rainfall at different recharge intensities in Falling Water Cave 1 and Falling Water Cave 2

至雨前水平。这是源于集中补给期间,青龙口地下河的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度在降雨初期主要表现为稀释作用,但随着降雨事件的持续,地下河系统溶滤作用逐渐强于稀释作用,使相应离子浓度持续升高。而 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 浓度的持续走低,代表其没有持续来源或在运移过程中发生了其他水文地球化学作用。

青龙口地下河出口水化学离子响应同样受补给强度的影响。强降雨事件下总溶解固体质量浓度 $\rho(\text{TDS})$ 最大值高于弱降雨事件,但平均值却仅为 198.93 mg/L,低于弱降雨事件中的 213.80 mg/L。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 均值浓度均表现为强降雨事件低于弱降雨事件,而强降雨事件的水化学离子浓度变异系数普遍较高。这说明在补给强度较大时,管道内运移时间更短、水岩反应较弱^[32],地下河水化学的改变受入口水化学浓度富集的影响更强。而在补给强度较小时,经长时间地下河管道运移,水岩反应相对较强,排泄处水化学响应受落水洞影响较小,地下河水质相对更为稳定。因此,强降雨是影响岩溶地下河水水质的重要驱动因素(表 2)。

3.3 污染组分响应过程及输入-输出通量对比

氮和磷作为限制性营养盐,水体含量过高会造成水体富营养化和其他生态损害,同时也是岩溶水系统

的主要污染物类型^[33-34]。总无机氮(tal inorganic nitrogen, 简称 TIN)是地下水中氮素的主要存在形式,包括离子态的氨氮(N-NH_4^+)、硝态氮(N-NO_3^-)和亚硝态氮(N-NO_2^-)^[35-36]。氮和磷的可能来源包括雨水、人类活动和其他因素^[37-38]。由于青龙口系统雨水中氮磷的浓度较低,雨水的污染几乎可以忽略不计。而研究区内多种植烟叶与蔬菜,农业施肥以含氮磷钾的复合肥为主。因此,人类生活和农业活动可能是研究区氮和磷的主要来源。

降雨事件发生后,坡面汇流携带土壤中累计的过量农业化肥造成面源污染,经强降雨的水力运移作用使无机氮和磷在落水洞口聚集,集中补给输入的污染物对地下水产生直接污染。弱降雨事件中,地下河出口难以受到污染响应。例如降雨事件 2 中尽管落水洞处汇流的 TIN、 PO_4^{3-} 峰值质量浓度分别达到 6.46、0.47 mg/L(图 4),并引起了青龙口地下河的流量响应,但在地下河出口无水质波动,说明较小的集中补给难以带入明显的污染组分进入地下水中,或者补给进入地下水的污染物较为有限,水体自净作用可以有效降低污染物浓度。

强降雨事件中,地下河水质受到明显污染响应。降雨事件 4 中地下河水质受入口补给,氮磷质量浓度明显上升(图 5)。降雨事件 5 中氮磷浓度在落水

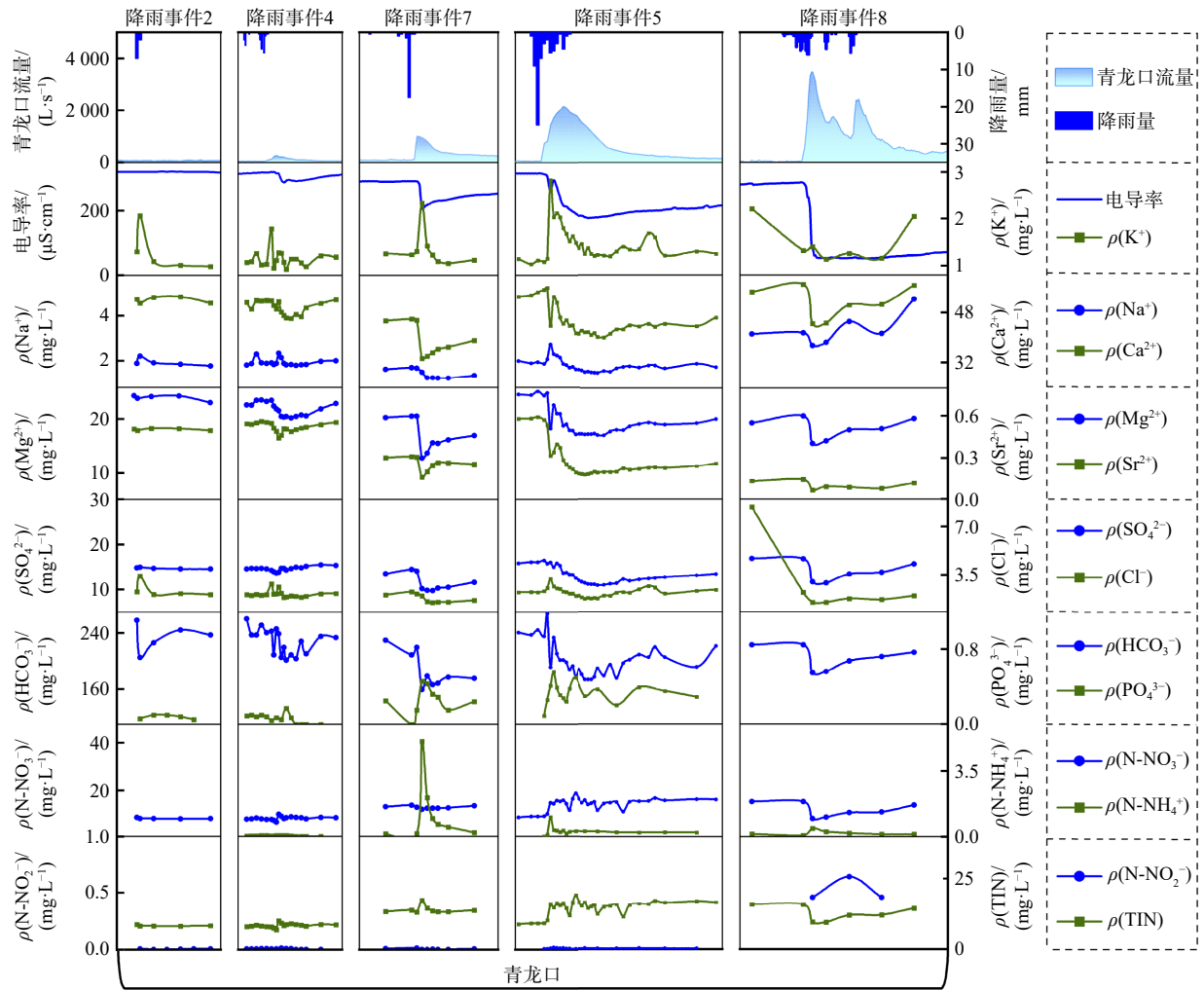


图5 不同补给强度下青龙口地下水化学组分对降雨的响应

Fig. 5 Response of hydrochemical components of Qinglongkou underground river water to rainfall under different recharge intensities

表2 青龙口地下河主要离子质量浓度特征统计

Table 2 Statistical characteristic of mass concentrations of major ions in the Qinglongkou underground river

项目		pH	TDS	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	TIN
$\rho_B/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$												
弱降雨 (降雨事件4)	最小值	7.85	195.30	0.93	1.80	46.14	20.19	13.67	1.84	201.67	0.00	7.00
	最大值	8.05	231.56	1.79	2.34	52.18	23.51	15.44	2.81	260.04	0.17	10.20
	平均值	7.96	213.80	1.15	1.94	49.66	21.81	14.59	2.08	228.20	0.06	8.50
	标准差	0.07	11.39	0.19	0.16	2.12	1.20	0.46	0.24	17.56	0.05	0.67
	变异系数/%	0.83	5.33	16.19	8.11	4.27	5.51	3.18	11.70	7.70	78.86	7.89
强降雨 (降雨事件5)	最小值	7.56	175.08	1.07	1.44	39.98	17.07	10.81	1.72	173.36	0.09	8.88
	最大值	7.96	246.03	3.16	2.72	55.91	25.15	16.40	3.17	267.12	0.56	19.08
	平均值	7.80	198.93	1.57	1.78	45.34	19.48	13.13	2.20	202.16	0.34	14.60
	标准差	0.10	19.18	0.43	0.28	4.80	2.56	1.83	0.32	23.78	0.10	2.66
	变异系数/%	1.32	9.64	27.64	15.67	10.58	13.14	13.97	14.44	11.76	30.05	18.23

洞入口处汇聚形成峰值,地下河出口 TIN、PO₄³⁻ 峰值质量浓度分别达到 19.08, 0.56 mg/L(表2), 是天然背景值的 2~3 倍。这表明强降雨是使落水洞口出现污染汇集和岩溶地下水污染的重要驱动因素。

当流量补给特别大时,污染物虽然有聚集过程,但同时可能受到稀释作用的影响使污染物浓度稍有下降,例如降雨事件 5 中青龙口泉出口的氮、磷浓度稍低于降雨事件 7(图 5)。补给时间同样也是岩溶地下

河污染运移的影响因素。尽管次降雨量相近,降雨事件 8 比降雨事件 5 补给持续时间更长,地下河出口污染物浓度始终保持较高水平,输出通量远高于降雨事件 5,说明补给时间可以影响岩溶地下河污染的持续性,较长时间补给不利于岩溶地下水的修复和自净。

对比降雨事件中入口和出口的溶质通量往往可以反映降雨事件中污染物的迁移情况^[24]。通过消除流量波动影响,使用溶质的浓度加权平均值计算 R :

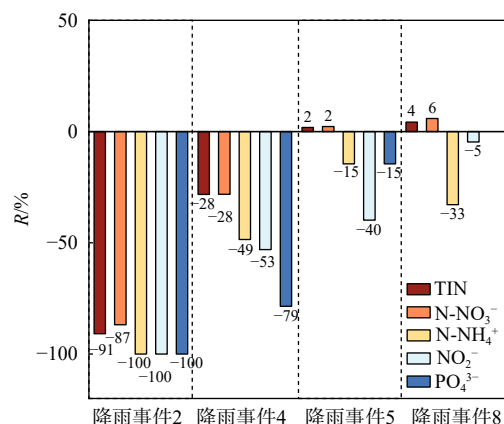
$$R = \left(\frac{C_{\text{出口}} - C_{\text{入口}}}{C_{\text{入口}}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中: R 表征落水洞输入通量与青龙口输出通量变化的比值, %; $C_{\text{出口}}$ 为青龙口地下河输出溶质总通量的加权平均质量浓度, mg/L; $C_{\text{入口}}$ 为落水洞输入溶质总通量的加权平均质量浓度, mg/L。

从通量对比来看,不同强度次降雨事件中污染物通量存在明显差别。弱降雨事件中,地下河污染主要受补给强度影响。降雨事件 2 对 2 个落水洞都形成了流量响应,并且在入口处出现污染物聚集,最终在排泄口只引起了硝态氮的改变,未受到磷酸盐及其他无机氮的影响。而降雨事件 5 尽管降雨强度一致,但由于其引起了落水洞 2 更大的流量响应,青龙口地下河排泄口出现了明显的污染响应,出口无机氮通量甚至达到了入口通量的 72%。这代表地下河污染效应主要受补给强度影响,强水动力条件是污染运移的基础和前提条件。

强降雨事件中,青龙口地下河均出现了明显的无机氮和磷酸污染响应现象(降雨事件 5 和降雨事件 8)。就通量而言,强降雨下氨氮、亚硝态氮和磷酸均低于输入通量,输出通量占输入通量的 67% ~ 95%,而总无机氮和硝态氮出口浓度均高于管道输入(图 6)。

氮元素是一种具有多种转化价态的元素,易受到环境的改变而发生氧化还原反应^[39-40]。青龙口地下河排泄通量相比入口通量的增多,表明径流过程中无机氮发生了内部转换,这是管道内水文地球化学反应的结果。降雨事件 5 初期,氨氮是落水洞口中无机氮的主要存在形态(图 4),落水洞 1 中氨氮浓度达到总无机氮浓度的 48.1%。随着产流过程的持续,落水洞中硝态氮浓度逐渐上升,占比达到 90% 以上。青龙口地下河出口无机氮始终以硝态氮形态为主,占比一直超过 70%。但青龙口地下河水化学对降雨的响应中(图 5),氨氮峰值始终早于硝态氮,说明地下河中氨氮比硝态氮更先进入岩溶水循环。



R 落水洞输入通量与青龙口输出通量变化的比值

图 6 不同补给强度下输入通量与输出通量对比

Fig. 6 Comparison of input fluxes versus output fluxes under different recharge intensities

此外,与降雨事件 5 相比,降雨事件 8 的持续时间更长,管道内岩溶水循环过程更为充分,出口处总无机氮和硝态氮相比入口处通量增加占比更多,亚硝态氮浓度相对增多,但氨氮浓度出现巨幅减少。这表明降雨事件中,青龙口地下河系统内发生了由氨氮转向亚硝态氮及硝态氮的氧化反应,即硝化作用。

4 结 论

(1) 青龙口地下河系统岩溶发育程度高,管道畅通性良好。落水洞汇流和青龙口地下河流量响应主要受补给强度和土壤饱和度影响。强补给强度下落水洞形成汇流以灌入式补给使地下河呈“暴涨暴落”响应,弱降雨事件中降雨以补给土壤为主,难以形成汇流补给地下河。

(2) 降雨期间,落水洞和青龙口地下河水化学组分表现出不同的规律。落水洞水化学离子浓度随流量灌入呈脉冲式升高后迅速降低。青龙口地下河在降雨初期主要受稀释作用影响,随补给事件的持续发生,溶滤作用使 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 HCO_3^- 离子浓度上升。

(3) 强水动力条件是地下河系统水质和水化学改变的重要驱动因素。较弱的集中补给难以带入污染组分进入地下水。暴雨过后,氮磷在落水洞口出现明显聚集,地下河受入口水化学和污染富集影响强烈,地下河氮磷浓度显著高于其天然背景值,表明强降雨是影响岩溶地下河水质的主要驱动因素。

(4) 强补给条件下,地下河系统中氨氮先于硝态氮进入岩溶水循环,地下河出口硝态氮和总无机氮通量相较于入口通量有所增加。补给持续使管道内氨

氮浓度减少, 亚硝态氮和硝态氮浓度增高, 推测管道内发生了硝化反应。

所有作者声明不存在利益冲突。

The authors declare that no competing interests exist.

参考文献:

- [1] 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 等. 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
YUAN D X, ZHU D H, WENG J T, et al. Chinese karstology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese)
- [2] 杨立铮. 中国南方地下河分布特征 [J]. 中国岩溶, 1985, 4(增刊 1): 98-106.
YANG L Z. Distribution characteristics of underground rivers in southern China[J]. Carsologica Sinica, 1985, 4(S1): 98-106. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘伟江, 袁祥美, 张雅, 等. 贵阳市岩溶地下水水化学特征及演化过程分析 [J]. 地质科技情报, 2018, 37(6): 245-251.
LIU W J, YUAN X M, ZHANG Y, et al. Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Guiyang City[J]. Geological Science and Technology Information, 2018, 37(6): 245-251. (in Chinese with English abstract)
- [4] LI S L, XU S, WANG T J, et al. Effects of agricultural activities coupled with karst structures on riverine biogeochemical cycles and environmental quality in the karst region[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 303: 107120.
- [5] 吴华英, 李腾芳, 程瑞瑞, 等. 我国岩溶地下水受污染的原因与污染特征 [J]. 中国矿业, 2021, 30(增刊 1): 101-104.
WU H Y, LI T F, CHENG R R, et al. Causes and characteristics of the pollution of karst groundwater in China[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(S1): 101-104. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王志恒, 梁永平, 史浙明, 等. 古堆-南梁泉域岩溶水环境问题现状与泉源区保护 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 228-240.
WANG Z H, LIANG Y P, SHI Z M, et al. Current situation of karst groundwater environmental problems and spring source protection in the Gudui-Nanliang spring basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5): 228-240. (in Chinese with English abstract)
- [7] 廖春来, 罗明明, 周宏. 鄂西岩溶槽谷区洼地的水位响应特征及产流阈值估算 [J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 802-809.
LIAO C L, LUO M M, ZHOU H. Water level response characteristics and runoff threshold estimation of karst depressions in a valley region, western Hubei Province[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(6): 802-809. (in Chinese with English abstract)
- [8] 甘凤玲. 喀斯特槽谷区水土流/漏失过程与水动力学机制研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
GAN F L. The process and characteristics of surface loss and underground leakage and hydrodynamic parameters in typical karst trough valley[D]. Chongqing: Southwest University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [9] KUCZERA G, KAVETSKI D, FRANKS S, et al. Towards a Bayesian total error analysis of conceptual rainfall-runoff models: Characterising model error using storm-dependent parameters[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(1/2): 161-177.
- [10] YUE F J, WALDRON S, LI S L, et al. Land use interacts with changes in catchment hydrology to generate chronic nitrate pollution in karst waters and strong seasonality in excess nitrate export[J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 134062.
- [11] ZENG J, YUE F J, LI S L, et al. Agriculture driven nitrogen wet deposition in a karst catchment in Southwest China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 294: 106883.
- [12] YANG P H, WANG Y Y, WU X Y, et al. Nitrate sources and biogeochemical processes in karst underground rivers impacted by different anthropogenic input characteristics[J]. Environmental Pollution, 2020, 265: 114835.
- [13] 贺秋芳, 邱述兰, 张兴波. 降雨过程中岩溶地下河微生物污染及其指示意义 [J]. 三峡环境与生态, 2012, 34(6): 9-13.
HE Q F, QIU S L, ZHANG X B. The microbial contamination and its source tracing during a storm event in a karst underground stream[J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2012, 34(6): 9-13. (in Chinese with English abstract)
- [14] LU M, YUE F J, WANG X D, et al. Identify nitrogen transport paths and sources contribution in karst valley depression area using isotopic approach[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 337: 117751.
- [15] 王凤康, 梁作兵, 于正良, 等. 岩溶地下河水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例 [J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3716-3721.
WANG F K, LIANG Z B, YU Z L, et al. Formation of geochemistry in underground river under rainfall conditions: An example for underground river at Xueyu cave, Chongqing[J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3716-3721. (in Chinese with English abstract)
- [16] WANG Z J, YUE F J, LU J, et al. New insight into the response and transport of nitrate in karst groundwater to rainfall events[J]. Science of the Total Environment, 2022, 818: 151727.
- [17] WANG Y, WANG F F, FANG Y, et al. Storm-induced nitrogen transport via surface runoff, interflow and groundwater in a pomelo agricultural watershed, Southeast China[J]. Environmental Pollution, 2024, 346: 123629.
- [18] 邹艳娥, 蒋萍萍, 张强, 等. 碧水岩地下河中微量元素对降雨的响应特征及来源分析 [J]. 环境科学, 2015, 36(12): 4464-4470.
ZOU Y E, JIANG P P, ZHANG Q, et al. Response mechanism of trace metals in the Bishuiyan subterranean river to the rainfall and their source analysis[J]. Environmental Science, 2015, 36(12): 4464-4470. (in Chinese with English abstract)
- [19] 文浩龙, 杨平恒, 华茂松, 等. 岩溶地下河硝酸盐转化与来源对比研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 172-184.
WEN H L, YANG P H, HUA M S, et al. Comparative study of nitrate transformation and sources in karst underground rivers[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2023, 45(5): 172-184. (in Chinese with English abstract)
- [20] PENG T, WANG S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in South-

- west China[J]. *Catena*, 2012, 90: 53-62.
- [21] 常威. 复杂岩溶水系统识别及其在隧道涌水量预测的应用研究: 以张吉怀高铁大青山隧道为例 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2022.
- CHANG W. Study on the identification of complex karst water system and its application in tunnel water disaster prediction: A case study of Zhangjiajie-Jishou-Huaihua High-speed Railway Daqing Mountain Tunnel[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2022. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈文俊, 黄显强, 宋怀则, 等. 中国南方岩溶地下水 [J]. 地质学报, 1981, 55(2): 149-160.
- CHEN W J, HUANG X Q, SONG H Z, et al. Karst ground water in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(2): 149-160. (in Chinese with English abstract)
- [23] LUO M M, CHEN Z H, ZHOU H, et al. Identifying structure and function of karst aquifer system using multiple field methods in karst trough valley area, South China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(9): 824.
- [24] CHEN J, LUO M M, WAN L, et al. Accumulation, conversion and storage of solute from sinkholes to karst spring under concentrated recharge conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129396.
- [25] GIL-MÁRQUEZ J M, ANDREO B, MUDARRA M. Combining hydrodynamics, hydrochemistry, and environmental isotopes to understand the hydrogeological functioning of evaporite-karst springs: An example from southern Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 576: 299-314.
- [26] WANG S, YAN Y, FU Z Y, et al. Rainfall-runoff characteristics and their threshold behaviors on a karst hillslope in a peak-cluster depression region[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127370.
- [27] 芮孝芳. 产流模式的发现与发展 [J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 1-6.
- RUI X F. The discovery and development of runoff formation models[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2013, 33(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [28] CAETANO BICALHO C, BATIOU-GUILHE C, SEIDEL J L, et al. Geochemical evidence of water source characterization and hydrodynamic responses in a karst aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 450: 206-218.
- [29] 黄荣, 王发, 陈洪松, 等. 不同类型表层岩溶泉水源划分及对降雨的响应 [J]. 水文, 2022, 42(3): 20-26.
- HUANG R, WANG F, CHEN H S, et al. The water source division of different types of epikarst springs and their response to rainfall[J]. *Journal of China Hydrology*, 2022, 42(3): 20-26. (in Chinese with English abstract)
- [30] 滕跃, 张文强, 王金晓. 淄河流域岩溶地下水化学特征及控制因素分析 [J]. *环境化学*, 2023, 42(6): 1945-1956.
- TENG Y, ZHANG W Q, WANG J X. Analysis on hydrochemical characteristics and controlling factors of karst groundwater in Zhihe River basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(6): 1945-1956. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李峰峰, 叶禹, 余义常, 等. 碳酸盐岩成岩作用研究进展 [J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 170-190.
- LI F F, YE Y, YU Y C, et al. Research progress of carbonate rock diagenesis[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2023, 42(1): 170-190. (in Chinese with English abstract)
- [32] GRANT S B, AZIZIAN M, COOK P, et al. Factoring stream turbulence into global assessments of nitrogen pollution[J]. *Science*, 2018, 359: 1266-1269.
- [33] ZHANG Z C, CHEN X, CHENG Q B, et al. Coupled hydrological and biogeochemical modelling of nitrogen transport in the karst critical zone[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 138902.
- [34] BAO J, WU X S, ZHANG Q, et al. Unveiling the nitrogen transport and transformation in different karst aquifers media[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 620: 129335.
- [35] 蒋萍萍, 邹艳娥, 张强, 等. 广西贺州松木寨地下水中氨氮的自然降解过程分析 [J]. 环境工程, 2018, 36(7): 62-66.
- JIANG P P, ZOU Y E, ZHANG Q, et al. Natural degradation of ammonia nitrogen in groundwater in Songmu Village of Hezhou, Guangxi[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(7): 62-66. (in Chinese with English abstract)
- [36] 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 等. 基于双同位素($\delta^{15}\text{N}$ - NO_3^- - $\delta^{18}\text{O}$ - NO_3^-)和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 [J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3637-3645.
- XU L, JIANG Y J, DUAN S H, et al. Quantification of nitrate sources to groundwater in karst trough-valley areas based on dual stable isotopes of $\delta^{15}\text{N}$ - NO_3^- and $\delta^{18}\text{O}$ - NO_3^- and the IsoSource model[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(8): 3637-3645. (in Chinese with English abstract)
- [37] RICH A, TOUIL S, FIZIR M. Recent advances in the source identification and remediation techniques of nitrate contaminated groundwater: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 316: 115265.
- [38] 赵然, 韩志伟, 申春华, 等. 典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析 [J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2664-2670.
- ZHAO R, HAN Z W, SHEN C H, et al. Identifying nitrate sources in a typical karst underground river basin[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2664-2670. (in Chinese with English abstract)
- [39] ZHANG Z C, CHEN X, LI S L, et al. Linking nitrate dynamics to water age in underground conduit flows in a karst catchment[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 596: 125699.
- [40] 王佳琪, 马瑞, 孙自永. 地表水与地下水相互作用带中氮素污染物的反应迁移机理及模型研究进展 [J]. 地质科技情报, 2019, 38(4): 270-280.
- WANG J Q, MA R, SUN Z Y. Reactive transport and model of nitrogen pollutants in the surface water-ground water interaction zones: A review[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 270-280. (in Chinese with English abstract)

Summary for “集中补给条件对岩溶地下河水文过程及污染响应的影响”

Effects of concentrated recharge conditions on hydrological processes and pollution responses of karst underground rivers

ZHOU Zhihao , LUO Mingming* , CHEN Jing , PENG Xiangyu , ZHAO Zehao , ZHAO Wenhui

School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

First author, E-mail: theosweet@cug.edu.cn

* Corresponding author, E-mail: luomingming@cug.edu.cn

Abstract: [Objective] Concentrated recharge conditions exert critical controls on both hydrological regimes and water quality in karst underground rivers. Quantifying the differential impacts of recharge scenarios on these interlinked parameters remains a pressing research priority. [Methods] Based on hydrogeochemical surveys, this study implemented synchronous measurements of hydrological fluxes and solute dynamics at sinkhole recharge zone and the downstream conduit outlet within the Qinglongkou underground river system in western Hubei. This was done to explore the impacts of varying recharge conditions on the water quantity and quality of the underground river. [Results] The results indicate that recharge intensity and soil moisture content directly control the flow generation and convergence processes within sinkhole , as well as the flow response of the karst underground river system. Rainfall events fail to activate conduit flow response that below a threshold. Concentrated recharge mobilization triggered notable solute enrichment, manifested as 2-3 fold increases in ionic concentrations (relative to background levels) at sinkholes. High-intensity rainfall would amplifield hydrochemical perturbations at the system outlet through the enhanced solute flusing. With TIN (total inorganic nitrogen) and phosphates accumulate at the sinkhole entrance following the heavy rainfall. Nitrogen speciation dynamics demonstrated stage-dependent behavior: ammonium (N-NH_4^+) preceded nitrate (N-NO_3^-) in the conduit flow sequence, while nitrate/TIN fluxes increased downstream whereas ammonium fluxes progressively attenuated-consistent with in-conduit nitrification processes. [Conclusion] These findings of this study provide a scientific basis for pollution prevention and control, as well as water environmental management of karst underground rivers.

Key words: karst underground river; hydrochemistry; pollution response; concentrated recharge; Qinglongkou underground river system; western Hubei

Received: 2023-10-11; Revised: 2023-12-18; Accepted: 2023-12-21

doi: [10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230566](https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20230566)