

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

PM<sub>2.5</sub>污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM<sub>2.5</sub>

• 中风

PM<sub>2.5</sub>控制目标  
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期

Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析 ..... 唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)

珠江三角洲大气光化学氧化剂(O<sub>3</sub>)与PM<sub>2.5</sub>复合超标污染特征及气象影响因素 ..... 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)

广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析 ..... 裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)

运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析 ..... 赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘水桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)

降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律 ..... 范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)

道路扬尘中PM<sub>2.5</sub>粒度乘数的测定方法及特征 ..... 李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)

铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 ..... 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 淡默, 屈加豹, 雷团团 (1649)

燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险 ..... 倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)

兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性 ..... 赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)

大气污染排放格局优化方法及案例 ..... 李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)

PM<sub>2.5</sub>污染对我国健康负担和经济损失的影响 ..... 李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)

基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析 ..... 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)

新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素 ..... 张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)

漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)

近20年来鄱阳湖流域泛濫平原沉积物微量元素含量与污染变化 ..... 李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)

汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)

会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析 ..... 李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)

贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算 ..... 曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)

辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险 ..... 杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)

辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源 ..... 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)

津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析 ..... 吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)

环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价 ..... 张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)

太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价 ..... 丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石浚哲, 邹华, 史红星 (1811)

淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价 ..... 程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)

三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价 ..... 詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)

三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析 ..... 李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)

反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估 ..... 辛慧敏, 林建伟, 詹艳慧 (1847)

锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体 ..... 李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)

太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解 ..... 张巧颖, 孙伟, 杜瑛琦, 巩小丽 (1870)

青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析 ..... 魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)

基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源 ..... 何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)

老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为 ..... 范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)

磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮 ..... 王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)

城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响 ..... 于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)

基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析 ..... 王晓瞳, 杨宏 (1930)

ClO<sub>2</sub>消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响 ..... 程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)

微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响 ..... 林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)

城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价 ..... 李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)

气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响 ..... 王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)

沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响 ..... 王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)

地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例 ..... 周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)

雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析 ..... 周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)

地质高背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素 ..... 代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)

不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响 ..... 刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)

影响不同农作物镉富集系数的土壤因素 ..... 陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)

Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响 ..... 张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)

不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响 ..... 李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)

铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性 ..... 陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)

微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力 ..... 张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)

动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播 ..... 张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)

区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用 ..... 万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)

《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)

# 贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算

曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪

(贵州大学资源与环境工程学院, 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 贵州威宁县草海是我国最大的岩溶湿地, 岩溶地下水是其重要的补给水源和物质来源。本研究在丰水期、枯水期和平水期对草海流域内 12 处地下水进行了采集并测定, 揭示了该流域地下水水化学特征和主要离子来源, 并基于水化学径流模数法初步估算了草海流域岩溶碳汇通量。结果表明, 草海流域地下水水化学类型以  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型为主, 东南部个别泉点在平水期为  $\text{SO}_4^-$ -Ca 型。地下水中优势离子均以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  为主, 季节上  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  平均质量浓度呈现出平水期 > 枯水期 > 丰水期,  $\text{NO}_3^-$  平均质量浓度则表现为丰水期 > 枯水期 > 平水期, 其他离子季节变化特征不明显。空间上草海北部地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度相对较高,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  在西南部地下水中质量浓度较高, 东南部地下水中  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度较高。地下水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  主要受到碳酸盐岩溶蚀的控制, 碳酸、硫酸和硝酸均参与了流域内碳酸盐岩的风化, 三期大部分地下水中  $\text{NO}_3^-$  主要受土壤氮和生活污水的影响, 东南部地下水  $\text{NO}_3^-$  则主要受农业活动影响,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的来源则无明显时空差异, 前 3 种离子主要受人类活动影响, 而  $\text{SO}_4^{2-}$  则主要来源于地层中含硫化化合物的溶解。研究区外源酸参与流域碳酸盐岩风化具有较高比例, 季节上表现为平水期外源酸参与流域碳酸盐岩比例最高, 丰水期最低的特征, 在扣除外源酸参与流域碳酸盐岩风化的比例后, 初步估算草海流域无机碳通量平均约为  $181.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 岩溶地下水向草海输送  $\text{HCO}_3^-$  量平均约为  $1144.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

**关键词:** 水化学; 地下水; 岩溶碳汇; 外源酸; 草海湿地

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1761-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007163

## Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province

CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, LIU Shan, LIAO Jia-hao

(Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The Caohai Lake wetland in Weining County, Guizhou Province, is the largest karst wetland in China, and karst groundwater is an essential source of recharge and material. This study collected groundwater from the Caohai Lake catchment during the wet season, dry season, and flat season, and the main ion components of the groundwater were analyzed. The hydrochemistry characteristics and main ion sources of the groundwater were revealed, and the preliminary estimates of the karst carbon sink flux in the Caohai Lake catchment were calculated based on the solute load method. The results indicated that the water chemistry of the groundwater in the Caohai Lake catchment is primarily the  $\text{HCO}_3^-$ -Ca type, and individual groundwater points in the southeast are the  $\text{SO}_4^-$ -Ca type during the flat season. The dominant ions in the groundwater are  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{HCO}_3^-$ . Seasonally, the average concentrations of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  decreased in the order of flat season > dry season > wet season, while the average concentration of  $\text{NO}_3^-$  decreased in the order of wet season > dry season > flat season, and the seasonal variation of the other ions were not significant. Spatially, the concentrations of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{HCO}_3^-$  in the groundwater in the northern part of Caohai Lake, of  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{Cl}^-$  in the southwest, and of  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$  in the southeast were relatively high.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , and  $\text{HCO}_3^-$  in the groundwater were primarily controlled by the dissolution of carbonate rocks, and carbonic acid, sulfuric acid and nitric acid were all involved in the weathering of carbonate rocks in the catchment. Most of the  $\text{NO}_3^-$  in the groundwater was affected mostly by the soil nitrogen and domestic sewage, while  $\text{NO}_3^-$  in the southeast groundwater was primarily affected by agricultural activities. The sources of  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$  exhibited no obvious temporal and spatial differences, and the  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{Cl}^-$  were mainly affected by human activities, while  $\text{SO}_4^{2-}$  was mostly derived from the dissolution of sulfur compounds in the formation. The studied area has a high proportion of allogenic acids (sulfuric acid and nitric acid) participating in the weathering of carbonate rocks, which is the highest in the flat season and the lowest in wet season. After deducting the proportion of allogenic acids participating in the weathering of carbonate rocks, the average inorganic carbon flux in the Caohai Lake catchment is preliminarily estimated to be approximately  $181.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , and the average karst groundwater transport of  $\text{HCO}_3^-$  to Caohai Lake is approximately  $1144.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ .

**Key words:** hydrochemistry; groundwater; karst carbon sink; allogenic acids (sulfuric acid and nitric acid); Caohai Lake wetland

收稿日期: 2020-07-17; 修订日期: 2020-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807376); 贵州大学人才引进项目(贵大人基合字(2019)24号); 贵州省人才基地项目(RCJD2018-21); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2018]5781号); 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室开放课题项目(KST2017K06)

作者简介: 曹星星(1989~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为岩溶关键带地球化学过程, E-mail: xxcao@gzu.edu.cn

湿地生态系统是典型的地下水依赖型生态系统,地下水可通过补给及排泄将物质与能量输入和输出湿地,从而支撑湿地水文系统和生态系统的运行<sup>[1]</sup>.岩溶湿地是广泛分布在岩溶地区的一种特殊的湿地类型,其水文特征受岩溶水系统动态变化的影响明显<sup>[2]</sup>.由于受到岩溶作用影响,高浓度  $\text{HCO}_3^-$  的岩溶水可提供丰富的无机碳源,刺激湿地内水生植物和藻类的生长,使流域无机碳向有机碳转化,形成稳定的岩溶碳汇<sup>[3]</sup>,同时该过程还可引起碳酸钙与磷酸根共沉淀,进而降低岩溶水体中磷的浓度<sup>[4]</sup>,这表明湿地在保持岩溶生态系统运转中扮演着重要的角色.但由于岩溶地区特殊的地质背景,岩溶地下水易受到污染,使得污染物可随岩溶水进入湿地生态系统中,进而导致湿地生态系统环境恶化<sup>[5]</sup>.因此,地下水对于维持岩溶湿地生态系统健康具有十分重要的作用.

岩溶地下水水化学组成受岩石风化、土地类型和人类活动等因素的影响<sup>[6,7]</sup>,通过水化学统计和图解法等可以揭示岩溶地下水水化学类型、辨识控制因素和解析离子来源等<sup>[8-10]</sup>,因而,掌握岩溶湿地流域地下水水化学特征及离子来源,可区分自然和人为因素对流域地下水的影响,也可为流域地下水的开发与保护提供参考.此外,在岩溶地区人类活动和硫化物氧化带来的硝酸和硫酸广泛参与了碳酸盐岩的化学风化,这些外源酸不仅活化了碳酸盐岩碳库,同时也削弱了碳酸参与碳酸盐岩风化的比例,这将影响岩溶湿地内水生植被固定来自碳酸风化碳酸盐岩的无机碳量,进而对区域碳循环及其通量产生影响,而这些外源酸参与流域碳酸盐岩风化的份额则可通过不同离子间的比例进行估算.

贵州威宁草海是我国面积最大的岩溶湿地,自1985年建立草海自然保护区以来,至今已有30多

年,这期间前人对该湿地内水体和沉积物中无机元素及有机物质迁移转化过程开展了大量的研究工作<sup>[11-14]</sup>.目前,对于草海流域范围内地下水水化学组成及其离子来源、流域岩溶碳汇通量却缺乏系统认识.由于岩溶地下水不仅是草海湿地重要补给水源之一,而且还是流域内农村居民生活用水的主要来源,因此,本文拟通过对草海流域内丰水期、枯水期和平水期地下水主要离子的测定,分析流域内地下水水化学组成的时空变化特征,揭示地下水中主要离子来源,计算外源酸参与流域碳酸盐岩风化的比例,并初步估算流域岩溶作用产生的碳汇量,以期能为岩溶湿地流域物质循环相关研究提供参考,亦可为草海流域地下水环境管理提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

草海国家级自然保护区位于贵州省威宁县县城西南侧( $104^{\circ}12' \sim 104^{\circ}18'E$ ,  $26^{\circ}49' \sim 26^{\circ}53'N$ ,海拔2171 m).其流域面积约为96 km<sup>2</sup>,水面面积约为25 km<sup>2</sup>,蓄水量  $3.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,平均水深仅2.4 m.草海属山地温暖带湿润季风气候,年平均降水量950.9 mm,雨水主要集中在5月下旬到7月上旬.湿地在地质构造上位于北东向北西向断裂、褶皱的交接复合部位,流域范围内出露地层主要为石炭系下统旧司组( $C_1d^1$ )、上司组( $C_1d^2$ )和摆佐组( $C_1b$ ),如表1所示,其中旧司组在流域盆地广泛分布,出露面积约占整个流域面积的85.2%,上司组和摆佐组碳酸盐岩为主的地层则主要分布在流域西南角和东北角,二者出露面积占整个流域面积约为14.5%(图1).区域地下水总体流向自南而北,南部为地下水的主要补给区,特别是东南部及西南部喀斯特大泉较多,表明这两个方向地下水的补给比较丰富<sup>[15]</sup>.

表1 草海流域范围内地层岩性及水文地质特征

Table 1 Formation lithology and hydrogeological characteristics within the Caohai Lake catchment

地层名称	地层岩性	水文地质特征
上司组( $C_1d^2$ )和摆佐组( $C_1b$ )	浅灰色厚层状灰岩,夹有白云岩、白云质灰岩、燧石灰岩及页岩和砂岩	洼地和落水洞发育,泉一般流量 $5 \sim 30 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地下径流模数 $6.5 \sim 7 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{km}^2)^{-1}$ ,富水性强
旧司组( $C_1d^1$ )	上部深灰色中厚层泥质灰岩、泥灰岩与黑色页岩互层;下部黑色页岩夹浅灰色中厚层细粒石英砂岩和泥灰岩,夹1~7层无烟煤	溶洞不发育,泉一般流量 $1 \sim 5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ,地下径流模数 $1 \sim 2 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{km}^2)^{-1}$ ,富水性中等

### 1.2 样品采集与分析

本研究分别于2019年7月(丰水期)、2019年12月(枯水期)和2020年4月(平水期)对草海湿地周边出露的12处地下水点(地下水点多以泉的形式出露)进行了采集,采样点具体位置见图1.采样现场使用便携式多参数水质分析仪(Multi 3630,德国WTW)测定水温( $T$ )、pH、溶解

氧(DO)和电导率(EC),并用已标定稀盐酸(优级纯,  $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )现场滴定水样碱度(ALK).取原水经  $0.45 \mu\text{m}$  水性滤膜过滤后储存于50 mL离心管中,其中用于测定阳离子( $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ )的水样需加入浓硝酸(优级纯)酸化至  $\text{pH} < 2$ ,再使用Parafilm膜密封管口,测定阴离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ )的水样过滤后直接进

行封装。

水样中阴、阳离子分别采用离子色谱仪(ICS-1100,美国赛默飞)和原子吸收光谱仪(TAS-990,北京普析)进行分析,各离子的检测限均为 0.01

mg·L<sup>-1</sup>。以上测试在贵州大学资源与环境工程学院完成,数据质量通过空白样、平行样和内标等进行控制,31 件水样离子平衡计算显示,95% 的样品的非有机质电离平衡(NICB)在 10% 以内(表 2)。

表 2 研究区地下水主要离子化学组成<sup>1)</sup>

Table 2 Major ionic concentrations in the groundwater

水文期	样品编号	T /°C	pH	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	质量浓度/mg·L <sup>-1</sup>									NICB /%	
					DO	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
丰水期	Q1	15.4	7.14	783	5.38	4.18	124.38	6.34	5.73	8.28	14.95	57.99	271.33	7	
	Q2	15.7	7.16	701	5.33	3.68	119.64	6.49	5.58	7.62	11.96	47.57	261.26	9	
	Q3	15.6	7.25	653	1.36	2.52	106.80	6.50	10.50	4.77	13.55	19.90	328.79	3	
	Q4	15.1	7.24	706	0.77	1.45	109.83	4.47	18.87	3.36	7.54	28.40	351.73	5	
	Q5														
	Q6	15.4	7.34	678	0.51	1.71	105.60	4.76	9.75	12.64	12.51	30.39	273.09	5	
	Q7	14.9	7.13	759	0.62	7.29	124.65	15.22	8.28	32.80	42.82	23.78	288.96	6	
	Q8														
	Q9	15.8	7.47	420	4.45	1.08	77.55	1.86	4.71	3.06	32.01	2.96	204.47	4	
	Q10	15.3	7.35	664	6.28	2.02	105.69	2.81	8.58	6.02	73.24	28.68	229.78	4	
	Q11	15.9	7.35	710	6.46	1.74	114.84	3.36	3.84	6.76	81.57	43.64	186.11	7	
	Q12	14.0	7.52	619	7.43	0.97	100.86	2.00	5.16	2.34	26.41	39.21	221.67	6	
枯水期	Q1														
	Q2														
	Q3	12.7	7.44	671	4.86	2.55	121.06	6.84	15.99	7.13	10.87	41.16	315.79	9	
	Q4	13.6	7.38	750	3.88	1.16	120.43	4.52	22.86	5.41	7.01	70.45	326.29	7	
	Q5	13.1	7.09	948	4.01	2.50	162.40	6.44	21.13	10.95	11.78	125.67	315.00	10	
	Q6	12.1	7.45	555	3.47	1.25	105.60	4.00	12.67	9.25	1.60	41.82	247.78	11	
	Q7	12.4	7.32	623	1.83	4.95	132.64	10.22	10.08	32.71	22.09	50.47	254.31	10	
	Q8	13.7	7.76	264	5.04	1.51	49.79	3.05	5.64	4.24	8.32	10.81	126.76	10	
	Q9	14.1	7.44	430	4.86	7.23	66.56	17.63	9.03	5.30	30.50	11.63	211.91	7	
	Q10	13.8	7.36	695	6.11	1.34	112.66	3.39	16.69	5.45	39.30	64.48	243.15	8	
	Q11	14.8	7.22	815	6.08	1.39	128.55	4.62	9.97	7.44	50.45	103.86	228.14	4	
	Q12	13.0	7.68	759	7.37	1.57	105.04	6.36	19.28	4.15	15.73	106.80	233.20	5	
平水期	Q1	16.9	7.18	824	2.92	4.74	132.43	8.97	17.98	13.08	8.90	167.32	306.37	-2	
	Q2	14.3	7.22	570	4.65	3.57	92.62	7.24	15.60	9.22	3.81	108.67	226.81	0	
	Q3	15.3	7.35	661	2.89	3.51	119.69	6.82	21.54	5.79	9.01	73.68	331.05	6	
	Q4	15.2	7.38	769	3.05	1.65	121.04	4.83	39.44	3.55	2.15	161.01	321.10	4	
	Q5														
	Q6	15.1	7.51	567	1.66	1.61	100.79	4.09	18.85	8.72	1.38	82.14	258.07	5	
	Q7	15.1	7.46	603	1.92	5.22	108.89	9.62	12.75	22.84	13.25	62.77	263.39	4	
	Q8	16.6	7.85	267	3.08	2.09	52.12	3.31	9.08	1.89	6.64	25.46	134.41	10	
	Q9	15.6	7.55	426	4.55	1.19	91.41	1.81	10.94	3.61	39.89	23.76	212.94	8	
	Q10	15.8	7.53	622	5.51	1.64	104.61	3.22	24.93	3.61	43.12	103.48	247.32	3	
	Q11	16.1	7.40	807	4.60	1.76	127.43	5.13	13.64	6.51	49.95	191.08	238.04	-7	
	Q12	16.3	7.84	781	7.37	2.14	93.56	9.89	35.09	1.72	11.14	229.30	217.65	-3	

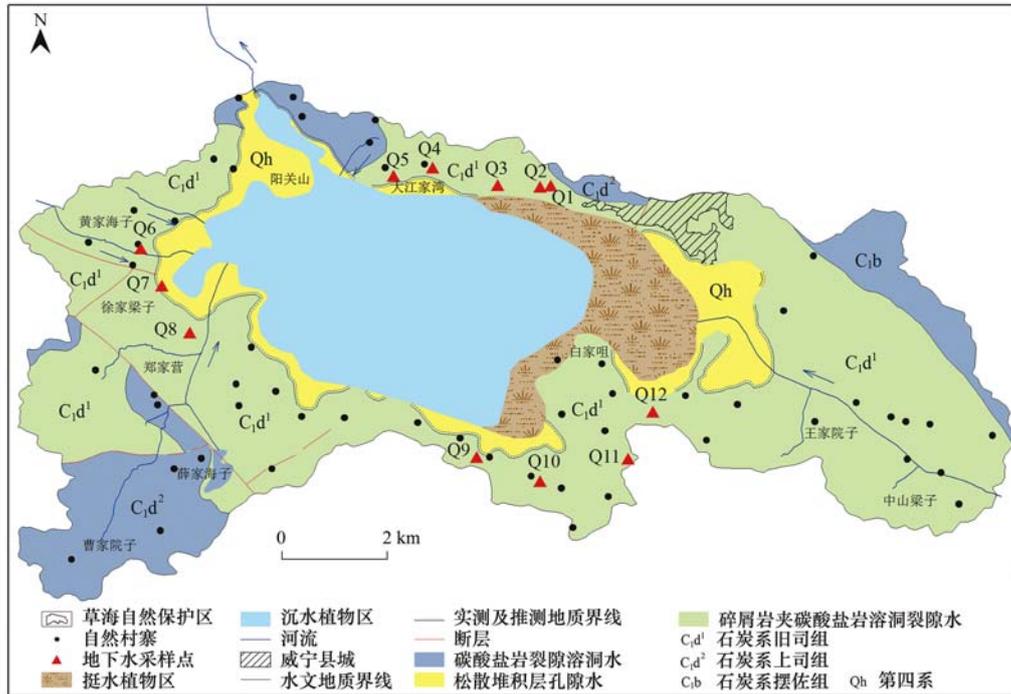
1) 空白数据表示无样品,非有机质电离平衡(NICB) =  $(\text{TZ}^+ - \text{TZ}^-) \times 100 / (\text{TZ}^+ + \text{TZ}^-)$ ,总阳离子当量浓度( $\text{TZ}^+$ ) =  $\text{K}^+ + \text{Na}^+ + 2\text{Mg}^{2+} + 2\text{Ca}^{2+}$ 、总阴离子当量浓度( $\text{TZ}^-$ ) =  $\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$

## 2 结果与分析

### 2.1 地下水基本理化参数

草海流域地下水样品理化参数如表 2 所示。三期地下水样品 pH 为 7.09 ~ 7.85,平均值为 7.39,呈弱碱性。丰水期地下水温度为 14.0 ~ 15.9°C,枯水期为 12.1 ~ 14.8°C,平水期为 14.3 ~ 16.9°C,枯水

期水温整体低于平、丰水期。三期地下水整体电导率 EC 为 264 ~ 948  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,平均值分别为 669、651 和 627  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ,其中 Q8 和 Q9 三期水样 EC 值相对较低,由于水体的 EC 值主要由离子强度决定,这间接表明草海周边地下水中离子组成具有明显时空变化特征。而溶解氧 DO 质量浓度则表现在枯水期地下水较高,丰水期和平水期较低分布特征,由于



改自 1:20 万威宁幅水文地质图

图 1 草海流域地下水采样点分布示意

Fig. 1 Groundwater sampling sites of the Caohai Lake catchment

草海流域岩石风化较为强烈,残坡积物覆盖较厚,这两时期雨水在经过包气带进入地下过程中,溶解氧可被包气带中的有机物和还原性无机物所消耗。

## 2.2 主要离子组成时空变化特征

各地下水样品中主要阳离子平均质量浓度高低顺序均为  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  (表 2),  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  占全部阳离子 75%~97%,其中  $\text{Mg}^{2+}$  平均质量浓度具有明显的平水期 > 枯水期 > 丰水期,除 Q7 和 Q9 丰水期和枯水期具有较高质量浓度  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  离子外,整体上三期地下水中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  离子无明显季节变化。主要阴离子平均质量浓度高低顺序均为  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  占全部阳离子 9%~52%, $\text{HCO}_3^-$  占全部阴离子的 47%~90%,阴离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  呈现出平水期 > 枯水期 > 丰水期,与  $\text{Mg}^{2+}$  变化趋势一致,而地下水中  $\text{NO}_3^-$  却表现为丰水期 > 枯水期 > 平水期,其他阴离子季节性变化特征不明显。

丰水期、枯水期和平水期草海各采样点不同季节水体中主要离子分布如图 2 所示。空间上草海北部地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  具有相对较高质量浓度,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  在 Q7 地下水质量浓度最高,东南部区域 Q9、Q10 和 Q11 这 3 期水体中  $\text{NO}_3^-$  质量浓度最高,平均质量浓度均在  $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上,而  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  离子则在东南部地下水中具有较高质量浓度。

## 2.3 水化学类型

Piper 三线图可反映水体水化学特征和类型<sup>[16,17]</sup>,从图 3 中可以看出,草海丰水期、枯水期和平水期地下水中主要阴、阳离子均位于 Piper 图的左下角,分布比较集中,表明三期大部分水地下水的离子组成具有较高的一致性。丰水期、枯水期和平水期研究区绝大部分水点水化学类型为  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型,仅在平水期东南部 Q11 和 Q12 为  $\text{SO}_4$ -Ca 型,表明碳酸盐岩风化为草海流域地下水主要化学风化类型,且水化学类型时空变化特征不明显。

## 3 讨论

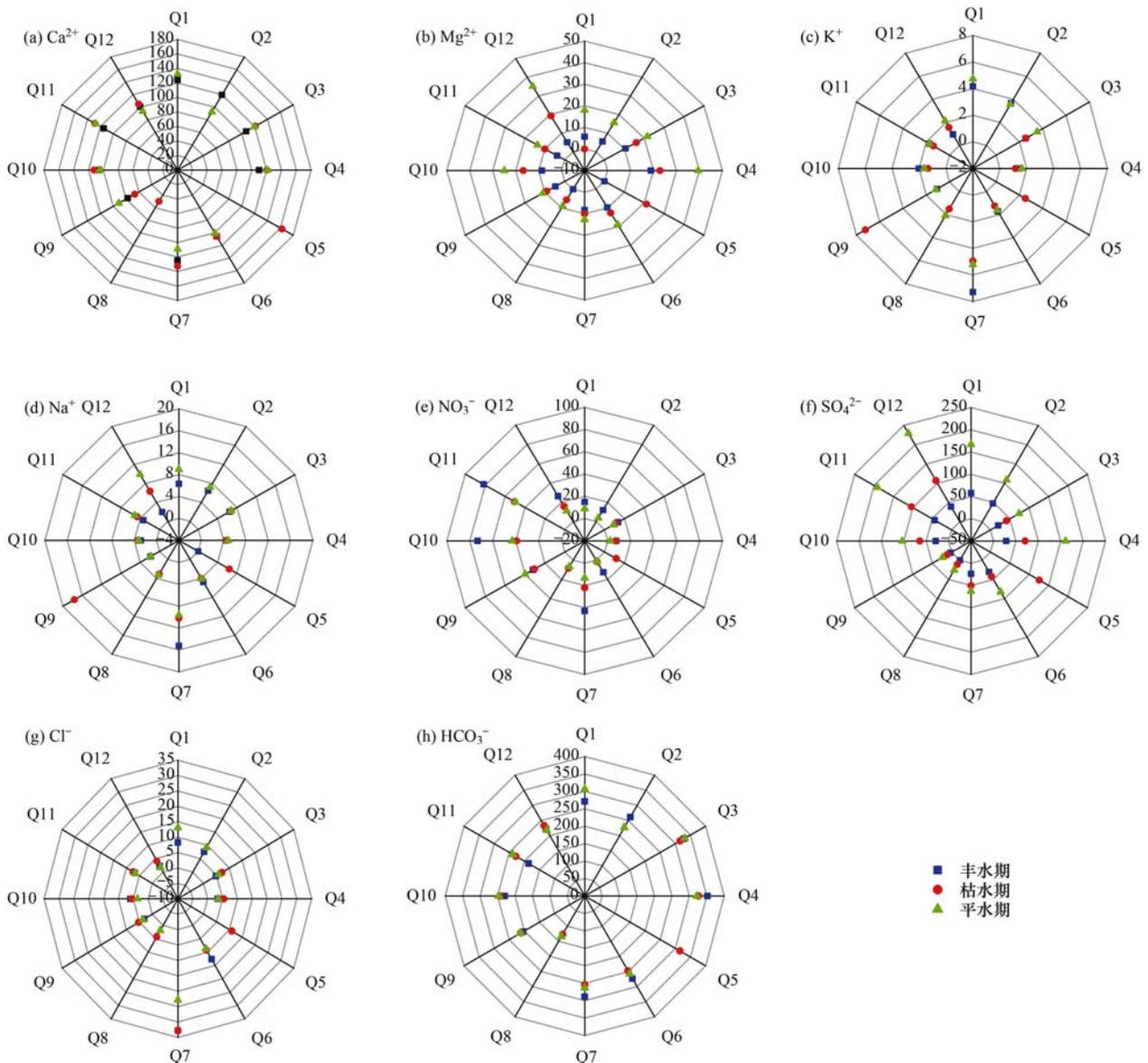
### 3.1 地下水中主要离子来源分析

Gibbs 图可直观地指示地下水在运移过程中所产生的如蒸发作用、岩石风化及大气降水对地下水水化学组成的影响<sup>[18]</sup>。从图 4 中可以看出,研究区三期地下水水化学组成均为位于 Gibbs 图的中间位置,这表明不同时期草海周边地下水水化学组成及来源一致,均表现为受岩石风化控制起主导作用。

#### 3.1.1 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 的来源

##### 3.1.1.1 碳酸盐岩溶解

$\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  是草海流域地下水中主要的阴、阳离子,主要受水-岩作用影响。由于不同类型岩石中矿物溶解产物的离子摩尔比(量比)是不同的,因而可以利用相关离子比值关系加以区分<sup>[19]</sup>。尽管草海流域范围有旧司组地层中的碎屑岩



图中各离子单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

图2 地下水中各离子质量浓度时空变化

Fig. 2 Spatio-temporal variation of major ions concentrations in the groundwater

出露,但从图5(a)和5(b)中可以看出,草海周边地下水中不同离子摩尔浓度比值趋向于碳酸盐矿物溶解,表明研究区水-岩作用主要以碳酸盐矿物溶解为主,硅酸盐矿物和蒸发盐溶解对水体水化学组成的影响较小.不同类型碳酸盐岩可以用 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^{+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值进行区分<sup>[20]</sup>,图5(c)显示草海流域地下水 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^{+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔浓度比值位于方解石和白云石矿物溶解之间,说明方解石和白云石溶解均影响研究区地下水水化学组成.通常碳酸盐岩的溶蚀会受到碳酸和外源酸的影响,根据碳酸盐矿物的溶蚀方程式(1)~(3)可知,自然条件下水体中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 为1:2,外源酸硝酸和硫酸溶解碳酸盐岩时地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 为1:1,从图6(a)中可以看出,各样

品点位均在1:2线和1:1线之间,说明除了碳酸溶解碳酸盐岩的自然风化过程外,还有硝酸和硫酸溶解碳酸盐岩的过程存在.

而碳酸、硝酸和硫酸共同溶蚀碳酸盐岩可用方程式(4)表示,在该条件下地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 摩尔比值分别为4:5(0.80)和4:7(0.57),草海周边三期地下水中 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 摩尔比值范围分别为0.57~1.06(平均 $0.79 \pm 0.12$ )和0.50~0.74(平均 $0.62 \pm 0.05$ ),图6(b)也显示各样品点基本位于4:7线附近,进一步表明研究区碳酸盐岩溶蚀受碳酸、硝酸和硫酸共同影响,但各类酸参与碳酸盐岩风化的比例存在一定差异.

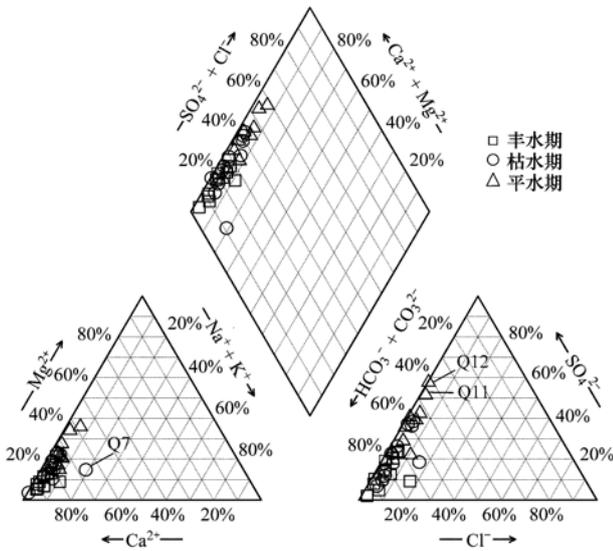
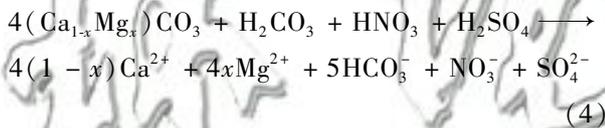
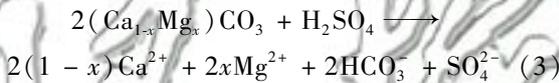
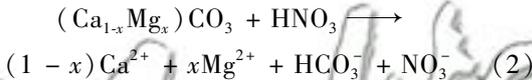
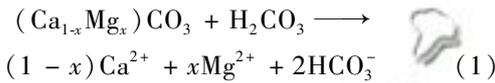


图3 地下水派珀(Piper)三线图

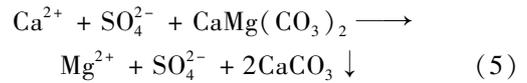
Fig. 3 Piper diagram of the groundwater



3.1.1.2 去白云岩化作用

从图6(c)中可以看出,研究区地下水中硫酸盐和Mg<sup>2+</sup>之间在枯水期和平水期具有较好的相关系,丰水期则无明显相关系,表明研究区枯水期和平水期地下水中Mg<sup>2+</sup>质量浓度随着SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>质量浓度的增加而呈现逐渐增加趋势,这与去白云岩化作用有关.

当水体中含有高浓度SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Ca<sup>2+</sup>时,在对白云岩溶解过程中,会产生方解石沉淀<sup>[21]</sup>.由方程式(5)可知,去白云岩化作用会造成岩溶地下水中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Mg<sup>2+</sup>质量浓度持续同步增加,并不断有方解石晶体沉积生成,同时也使溶液中的HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>质量浓度保持不变,这也解释了研究区地下水中SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Mg<sup>2+</sup>质量浓度具有相同季节变化特征,同时地下水中HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和Ca<sup>2+</sup>质量浓度季节差异较小的现象(图2).



3.1.2 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的来源

一般来说,岩石风化过程不产生NO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子<sup>[23]</sup>,地下水体中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来自大气降雨输入、农业施肥、粪便、污水和土壤有机氮等.由于不同来源的硝酸盐具有不同的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>摩尔比值,因此可以利用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>摩尔比来指示硝酸盐的来源<sup>[24]</sup>.高Cl<sup>-</sup>摩尔浓度,低NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>,水体的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>来源于粪便和生活污水;低Cl<sup>-</sup>摩尔浓度,高NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>受农业活动的影响;低Cl<sup>-</sup>摩尔浓度,低NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>,水体NO<sub>3</sub><sup>-</sup>则来源于土壤N<sup>[24,25]</sup>.草海流域范围内农业人口压力巨大,为提高农耕地产出水平,化肥、农药的使用量逐年增加<sup>[26]</sup>,大部分耕地分布在流域西南和东南部,尤其是东南部三期Q10和Q11地下水中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度最高[图2(e)].从图7(a)中可以看出,研究区三期地下水主要受土壤氮和生活污水的影响,而Q9~Q12点位中具有较高的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>比值,显示该区域三期地下水主要受农业活动影响.此外,草海周边地下水中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>表现为丰水期>枯水期>平水期,这是由于丰水期正值流域内农耕时期,这表明地下水中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>离子受降雨对地表土壤和化肥的

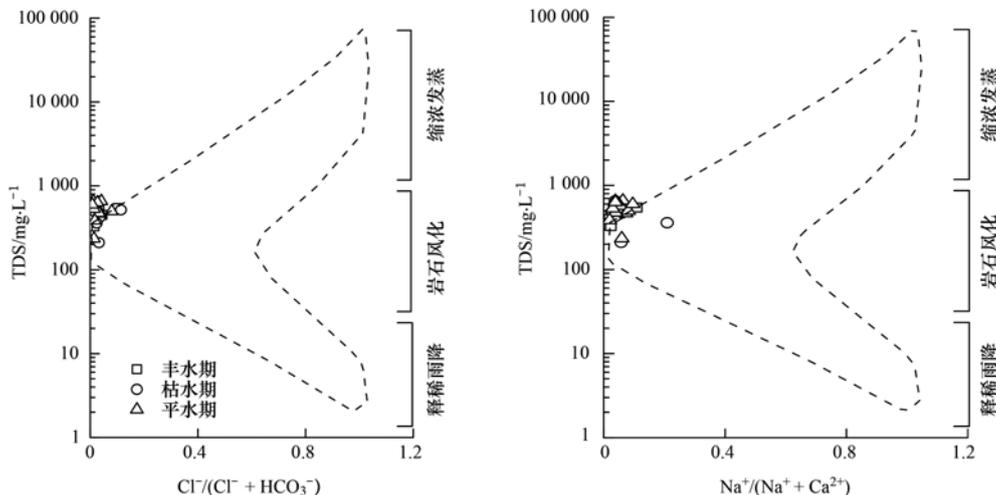
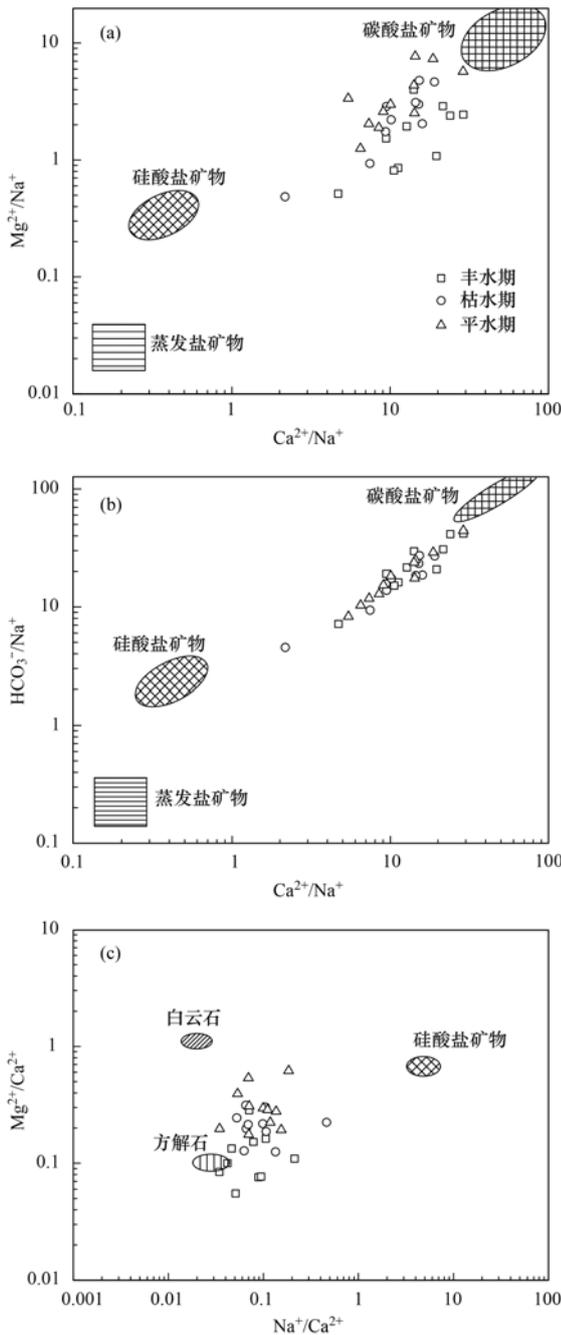


图4 地下水采样点的Gibbs图

Fig. 4 Gibbs figures of the groundwater samples



碳酸岩、硅酸岩和蒸发岩端元引自文献[20,22]

图5 地下水不同离子摩尔浓度比值关系

Fig. 5 Relationship of the molar concentration ratio between different ions in the groundwater

冲刷淋溶作用影响显著。

岩溶地区地下水中  $SO_4^{2-}$  主要有以下几种来源:大气降水、蒸发岩的溶解、硫化物的氧化及土壤带中有机硫的矿化及人为活动的输入<sup>[27,28]</sup>。根据前期对草海流域地下水硫酸盐硫氧同位素的研究结果,草海周边地下水中硫酸盐主要来自于硫化物的氧化<sup>[29]</sup>,这主要是因为广泛分布在湖盆周边的旧司组中夹有煤层(表1),煤中含硫化物(如  $FeS_2$ ) 经氧化溶解后形成  $SO_4^{2-}$ 。研究区地下水中  $SO_4^{2-}$  呈现出平水期 > 枯水期 > 丰水期,表明丰水期降雨量增加,

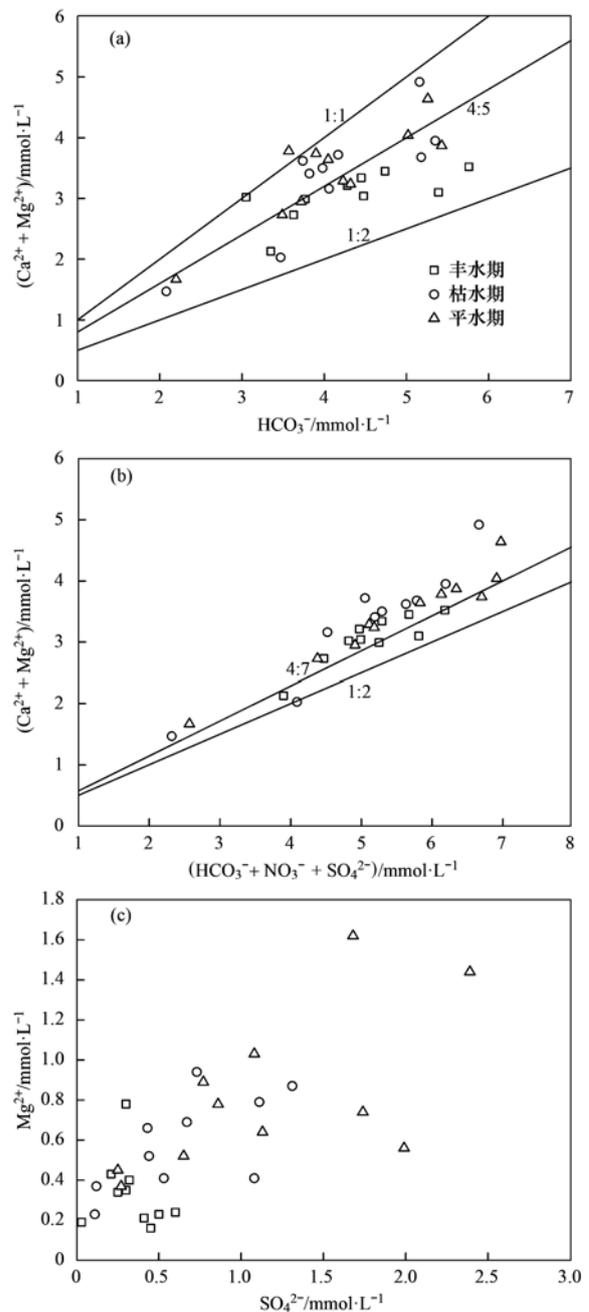


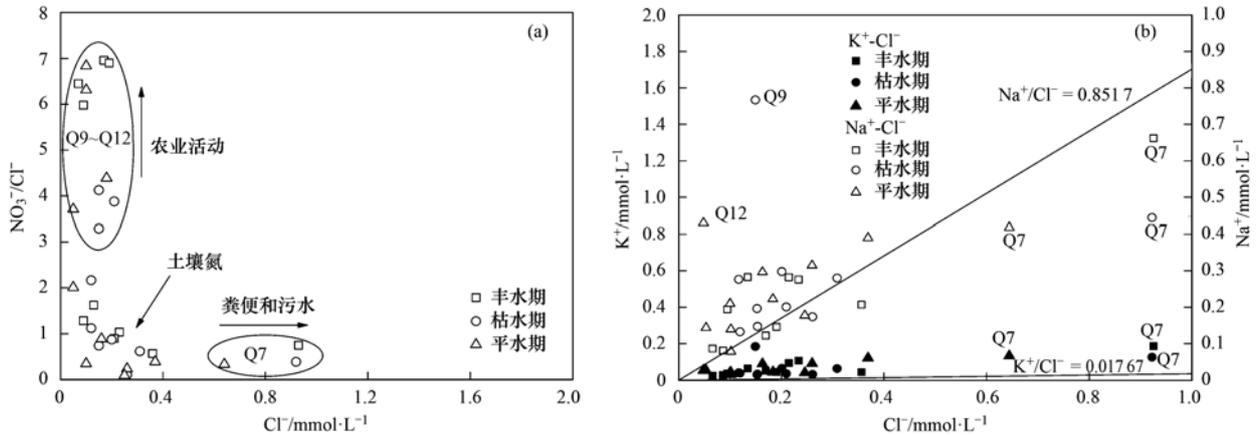
图6 地下水  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$  与  $HCO_3^-$  和  $(HCO_3^- + NO_3^- + SO_4^{2-})$  以及  $Mg^{2+}$  与  $SO_4^{2-}$  相关性

Fig. 6 Plots of  $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$  vs.  $HCO_3^-$  and  $(HCO_3^- + NO_3^- + SO_4^{2-})$ ,  $Mg^{2+}$  vs.  $SO_4^{2-}$  in the groundwater

雨水的稀释作用使得地下水中  $SO_4^{2-}$  质量浓度降低。

### 3.1.3 $K^+$ 、 $Na^+$ 和 $Cl^-$ 的主要来源

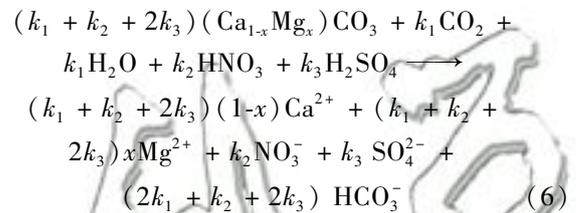
通常碳酸盐岩(石灰岩和白云岩)及其上覆第四纪沉积物出露地下水中的  $Cl^-$  几乎没有明显的岩性起源<sup>[30]</sup>,因此,研究区地下水中的  $Cl^-$  只能来自降雨补给和人类活动。一般来说,大气溶胶中的  $Na^+/Cl^-$  和  $K^+/Cl^-$  摩尔比值通常在 0.8517 和 0.0176<sup>[31]</sup>,但从图 7(b) 中可以看出,地下水中的  $Na^+/Cl^-$  和  $K^+/Cl^-$  比值明显高于海洋气溶胶,表

图7 地下水  $\text{Cl}^-$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  比值之间变化关系Fig. 7 Relationship among  $\text{Cl}^-$  and  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  in the groundwater

明大气降水对水体离子组成的影响较小. 此外, 岩溶地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度较高, 较容易发生  $\text{Ca}^{2+}$  交换吸附在固体颗粒表面的  $\text{Na}^+$  的反应, 造成水中的  $\text{Na}^+$  浓度升高<sup>[32]</sup>, 而该过程可以用氯-碱指数 (CIA1 和 CIA2) 进行表示, 根据张宏鑫等<sup>[33]</sup> 的氯-碱指数计算方程式及表 2 的数据, 本研究三期所有水样 CIA1 和 CIA2 平均值分别为  $-0.45 \pm 1.32$  和  $-0.001 \pm 0.02$ , 表明研究区不存在明显碱交换反应. 因此, 人为因素对草海地下水的影响很大, 尤其是地下水点 Q7、Q9 和 Q12, 水体中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  离子的主要来源为人类活动, 如家庭中 NaCl 和农用肥料的大量使用.

### 3.2 外源酸参与流域碳酸盐岩风化的比例

研究区丰水期、枯水期和平水期中  $\text{NO}_3^-$  平均质量浓度分别为  $(31.65 \pm 26.49)$ 、 $(19.76 \pm 15.73)$  和  $(17.20 \pm 17.93) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  平均质量浓度分别为  $(32.25 \pm 15.59)$ 、 $(62.71 \pm 39.47)$  和  $(111.69 \pm 67.54) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 地下水中外源酸质量浓度 (硝酸和硫酸离子) 较高, 不能忽略外源酸对流域碳酸盐岩溶蚀的影响. 根据方程式 (4), 假定分别有假设  $k_1$  mmol 碳酸、 $k_2$  mmol 硝酸和  $k_3$  mmol 硫酸共同参与了碳酸盐岩的溶蚀作用可以得到方程式 (6), 基于此, 可计算出碳酸溶蚀碳酸盐岩的  $k_1$  (碳酸溶蚀产生的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ ) =  $[\text{HCO}_3^-] - [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$ , 由碳酸溶蚀过程产生的  $\text{HCO}_3^- = 2k_1$ <sup>[34]</sup>. 但根据方程式 (2) 和 (3), 硝酸和硫酸溶蚀碳酸盐岩后, 水体中  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$  均为 1:1, 因而无法区分硝酸和硫酸各自参与碳酸盐岩风化的比例, 本文将二者合并进行考虑为外源酸, 则外源酸溶蚀碳酸盐岩产生的  $\text{HCO}_3^-$  占水体中总的  $\text{HCO}_3^-$  比例为  $1 - (2k_1/[\text{HCO}_3^-]_{\text{总}})$ , 产生的  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  占水体中总的  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  比例为  $1 - (k_1/[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]_{\text{总}})$ .



计算结果见图 8 所示, 研究区丰水期、枯水期和平水期所有地下水点受外源酸溶蚀产生的  $\text{HCO}_3^-$  占总的  $[\text{HCO}_3^-]_{\text{总}}$  平均比例分别为  $(45.3 \pm 23.4)\%$ 、 $(62.1 \pm 24.9)\%$  和  $(66.93 \pm 20.7)\%$ , 产生的  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  占总的  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]_{\text{总}}$  平均比例分别为  $(59.4 \pm 20.9)\%$ 、 $(73.7 \pm 21.2)\%$  和  $(78.6 \pm 13.8)\%$ . 这表明外源酸参与草海流域碳酸盐岩风化比例较高, 且二者均表现为平水期外源酸参与流域碳酸盐岩比例最高, 丰水期最低的特征, 这一方面是由于丰水期大气降水的稀释作用, 降低了丰水期地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度; 另一方面丰水期大气降水渗入地下过程中, 将大量土壤和大气中  $\text{CO}_2$  带入地下, 使碳酸参与碳酸盐岩风化比例增加, 从图 6 (a) 也可看出丰水期样品点更靠近碳酸溶蚀碳酸盐岩 1:2 线. 此外位于流域南侧的 Q11 和 Q12 地下水中枯、平水期中外源酸参与碳酸盐岩风化比例最高, 该泉点中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  几乎全部来自于外源酸溶蚀, 图 3 (f) 中也显示该两处泉点在枯水期和平水期具有相对较高的  $\text{SO}_4^{2-}$  质量浓度, 表明该区域碳酸盐岩受外源酸溶蚀影响大, 可能主要以硫酸溶蚀碳酸盐岩为主.

### 3.3 草海流域岩溶碳汇通量初步估算

根据上述研究结果, 本文拟选用水化学径流模数法对流域岩溶作用产生的大气/土壤  $\text{CO}_2$  汇进行初步估算. 由于草海流域外源酸参与碳酸盐岩风化比例较大, 因而估算流域岩溶碳汇通量需要扣除外源酸的比例. 计算方程式为:

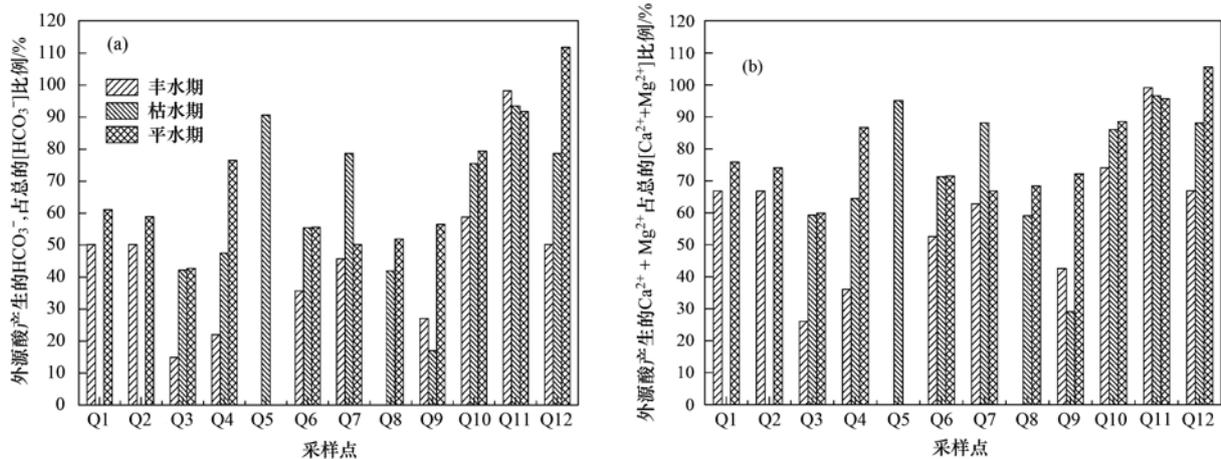


图8 外源酸溶蚀碳酸盐岩产生  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  占总的  $[\text{HCO}_3^-]$  和  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$  的比例

Fig. 8 Contribution of carbonate dissolution by allogenic acids to total  $[\text{HCO}_3^-]$  and  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$  in the groundwater

$$F = \frac{1}{2} \times S \times M \times [\text{HCO}_3^-] \times L \times (M_{\text{CO}_2} / M_{\text{HCO}_3^-}) \times 0.001 \quad (7)$$

式中,  $F$  为岩溶作用形成的  $\text{CO}_2$  汇 ( $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $S$  为流域面积 ( $\text{km}^2$ );  $M$  为区域地下水径流模数 [ $\text{L} \cdot (\text{s} \cdot \text{km}^2)^{-1}$ ];  $[\text{HCO}_3^-]$  为地下水中  $\text{HCO}_3^-$  的平均质量浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ );  $M_{\text{CO}_2}$  和  $M_{\text{HCO}_3^-}$  分别为  $\text{CO}_2$  和  $\text{HCO}_3^-$  的摩尔质量;  $L$  为  $\text{HCO}_3^-$  中碳酸参与碳酸盐岩风化的比例 (%)。

根据3.2节外源酸参与碳酸盐岩风化的数据,在扣除这些外源酸参与流域碳酸盐岩风化比例后,丰水期、枯水期和平水期草海流域碳酸参与碳酸盐岩风化平均分别为  $(54.7 \pm 23.4)\%$ 、 $(37.9 \pm 24.9)\%$  和  $(33.1 \pm 20.7)\%$ , 根据方程式(7)计算得

出,丰水期、枯水期和平水期这3个时期草海流域岩溶碳汇通量平均约为  $9.9$ 、 $3.3$  和  $4.3 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$  (表3),按每个水文期4个月计算,则全年草海流域岩溶碳汇通量平均约为  $181.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。如不考虑  $\text{HCO}_3^-$  来源情况下,可将方程式(7)写为  $S \times M \times [\text{HCO}_3^-] \times 0.001$  用于估算草海流域地下水向湿地输送  $\text{HCO}_3^-$  总量,基于此丰水期、枯水期和平水期这3个时期岩溶地下水向草海输送  $\text{HCO}_3^-$  量平均分别约为  $50.2$ 、 $24.0$  和  $36.1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同样按每个水文期4个月计算,折合全年平均约为  $1144.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。但上述结果是基于表3中碳酸风化比例和  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度平均值计算得出,同时也未考虑流域范围内外源溶蚀碳酸盐岩的空间差异,使估算结果存在一定误差。

表3 草海流域岩溶碳汇通量估算结果<sup>1)</sup>

Table 3 Estimation results of the karst carbon sink flux in the Caohai Lake catchment

水文期	流域面积 $S$ / $\text{km}^2$	径流模数 $M$ / $\text{L} \cdot (\text{s} \cdot \text{km}^2)^{-1}$	$\text{HCO}_3^-$ 中碳酸参与碳酸盐 岩风化的比例 $L/\%$	$\text{HCO}_3^-$ 平均质量浓度 / $[\text{HCO}_3^-] / \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$F$ / $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$
丰水期	96	2	$54.7 \pm 23.4$	$261.7 \pm 52.8$	9.9
枯水期	96	1	$37.9 \pm 24.9$	$250.2 \pm 50.5$	3.3
平水期	96	1.5	$33.1 \pm 20.7$	$250.6 \pm 56.1$	4.3

1) 根据威宁幅水文地质图(G-48-[9], 1:20万),草海湖盆广泛分布的旧司组地下水径流模数为  $1 \sim 2 \text{ L} \cdot (\text{s} \cdot \text{km}^2)^{-1}$ ,基于此赋予不同水文期旧司组地下水径流模数值

## 4 结论

(1) 草海湿地流域地下水中优势离子以  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  为主。季节上阴离子中  $\text{SO}_4^{2-}$  平均质量浓度呈现出平水期 > 枯水期 > 丰水期,  $\text{NO}_3^-$  平均质量浓度则表现为丰水期 > 枯水期 > 平水期,阳离子中  $\text{Mg}^{2+}$  平均质量浓度具有明显的平水期 > 枯水期 > 丰水期,其他离子则无明显时间变化规律。空间上草海北部地下水中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  质量浓度相对

较高,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Cl}^-$  在西南部地下水中质量浓度较高,而  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  则在东南部地下水中具有较高质量浓度。

(2) 地下水水化学类型以  $\text{HCO}_3^-$ -Ca 型为主,平水期东南部个别泉点为  $\text{SO}_4$ -Ca 型。地下水化学组成主要受水岩相互作用的控制,  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  主要受到碳酸盐岩溶蚀的影响,碳酸、硫酸和硝酸均参与了流域内碳酸盐岩的风化;  $\text{NO}_3^-$  主要来自土壤氮和生活污水,东南部地下水则主要受农业活动

影响,丰水期降雨对地表土壤和化肥的冲刷淋溶作用使得该期地下水中  $\text{NO}_3^-$  质量浓度较高.  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的来源则无明显时空差异,前3种离子主要受人类活动影响;而  $\text{SO}_4^{2-}$  则主要来源于地层中含硫化化合物的溶解,且受降雨稀释作用的影响,丰水期地下水中  $\text{SO}_4^{2-}$  含量相对较低.由此可见,人类活动对流域内地下水水化学组成影响明显,应加强流域内农田化肥的科学使用和生活污水的治理.

(3)外源酸参与流域碳酸盐岩风化具有较高比例,季节上表现为平水期外源酸溶蚀流域碳酸盐岩比例最高,丰水期最低的特征.在扣除外源酸参与流域碳酸盐岩风化的比例后,基于化学径流模数法初步估算草海流域无机碳通量平均约为  $181.5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,岩溶地下水向草海输送  $\text{HCO}_3^-$  量平均约为  $1144.1 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ .

#### 参考文献:

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2007.
- [2] 马祖陆,蔡德所,蒋忠诚.岩溶湿地分类系统研究[J].广西师范大学学报(自然科学版),2009,27(2):101-106.  
Ma Z L, Cai D S, Jiang Z C. About karst wetland classification system [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2009, 27(2): 101-106.
- [3] 曹建华,蒋忠诚,袁道先,等.岩溶动力系统与全球变化研究进展[J].中国地质,2017,44(5):874-900.  
Cao J H, Jiang Z C, Yuan D X, et al. The progress in the study of the karst dynamic system and global changes in the past 30 years [J]. Geology in China, 2017, 44(5): 874-900.
- [4] 陈崇瑛,刘再华.喀斯特地表水生生态系统生物碳泵的碳汇和水环境改善效应[J].科学通报,2017,62(30):3440-3450.  
Chen C Y, Liu Z H. The role of biological carbon pump in the carbon sink and water environment improvement in karst surface aquatic ecosystems [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(30): 3440-3450.
- [5] 陈静,罗明明,廖春来,等.中国岩溶湿地生态水文过程研究进展[J].地质科技情报,2019,38(6):221-230.  
Chen J, Luo M M, Liao C L, et al. Review of eco-hydrological process in karst wetlands of China [J]. Geological Science and Technology Information, 2019, 38(6): 221-230.
- [6] 詹兆君,陈峰,杨平恒,等.西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例[J].环境科学,2016,37(9):3365-3374.  
Zhan Z J, Chen F, Yang P H, et al. Comparison on the hydrogeochemical characteristics of typical karst groundwater system in southwest China, a case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing [J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3365-3374.
- [7] Smith D N I, Ortega-Camacho D, Acosta-González G, et al. A multi-approach assessment of land use effects on groundwater quality in a karstic aquifer [J]. Heliyon, 2020, 6(5), doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03970.
- [8] Lu S S, Chen J F, Zheng X Q, et al. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Jinci spring area, north China [J]. Carbonates and Evaporites, 2020, 35(3), doi: 10.1007/s13146-020-00602-8.
- [9] 霍俊伊,于爽,张清华,等.湘西峒河流域水化学特征及无机碳通量计算[J].水文地质工程地质,2019,46(4):64-72.  
Huo J Y, Yu S, Zhang Q H, et al. Hydrochemical characteristics and estimation of the dissolved inorganic carbon flux in the Donghe river basin of western Hunan [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(4): 64-72.
- [10] Ming X X, Groves C, Wu X Y, et al. Nitrate migration and transformations in groundwater quantified by dual nitrate isotopes and hydrochemistry in a karst world heritage site [J]. Science of The Total Environment, 2020, 735: doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138907.
- [11] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, et al. Heavy metals in an impacted wetland system: a typical case from southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2007, 387(1-3): 257-268.
- [12] Zhu Z J, Chen J A, Zeng Y. Abnormal positive  $\delta^{13}\text{C}$  values of carbonate in lake Caohai, southwest China, and their possible relation to lower temperature [J]. Quaternary International, 2013, 286: 85-93.
- [13] 杨羽,夏品华,林陶,等.贵州草海湿地不同水位梯度土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量比分布特征[J].湖泊科学,2020,32(1):164-172.  
Yang Y, Xia P H, Lin T, et al. Spatial distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and their ecological stoichiometry along a water gradient in Caohai wetland, Guizhou Province [J]. Journal of Lake Science, 2020, 32(1): 164-172.
- [14] 王娅南,黄合田,彭洁,等.贵州草海喀斯特高原湿地水环境中典型抗生素的分布特征[J].环境化学,2020,39(4):975-986.  
Wang Y N, Huang H T, Peng J, et al. Occurrence and distribution of typical antibiotics in the aquatic environment of the wetland karst plateau in Guizhou [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(4): 975-986.
- [15] 贵州省地质矿产勘查开发局.草海流域水文地质环境及水资源初步研究 [EB/OL]. [http://www.gzdzjhj.cn/hdjl/xzfw/201712/t20171226\\_28040885.html](http://www.gzdzjhj.cn/hdjl/xzfw/201712/t20171226_28040885.html), 2004-11-11.
- [16] Piper A M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses [J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 1944, 25(6): 914-928.
- [17] 李笑,于爽,李亮,等.石期河流域地下水化学特征及物质来源分析[J].环境科学,2020,41(9):4021-4029.  
Li X, Yu S, Li L, et al. Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in Shiqi river basin [J]. Environmental Science, 2020, 41(9): 4021-4029.
- [18] 吴丁丁,姚震,贾凤超,等.新疆哈密盆地地下水水化学特征及成因分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(7):133-141.  
Wu D D, Yao Z, Jia F C, et al. Hydro-geochemical characteristics and genetic analysis of groundwater in Hami basin, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(7): 133-141.
- [19] 张东,刘丛强,汪福顺,等.农业活动干扰下地下水无机碳循环过程研究[J].中国环境科学,2015,35(11):3359-3370.  
Zhang D, Liu C Q, Wang F S, et al. Inorganic carbon cycling in subsurface environment influenced by agricultural activities [J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3359-3370.

- [20] Han G L, Liu C Q. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution; a study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. *Chemical Geology*, 2004, **204**(1-2): 1-21.
- [21] 闫志为, 张志卫, 王佳佳. 硫酸水对方解石和白云石矿物的溶蚀作用[J]. *水资源保护*, 2009, **25**(2): 79-82.  
Yang Z W, Zhang Z W, Wang J J. Corrosion of calcite and dolomite in sulfuric acid water[J]. *Water Resources Protection*, 2009, **25**(2): 79-82.
- [22] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, *et al.* Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, **159**(1-4): 3-30.
- [23] Jiang Y J, Wu Y X, Groves C, *et al.* Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunnan, China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2009, **109**(1-4): 49-61.
- [24] 吴锡松, 张强, 姜光辉, 等. 桂林甑皮岩岩溶地下水硝酸盐来源与转化[J]. *中国岩溶*, 2020, **39**(2): 164-172.  
Wu X S, Zhang Q, Jiang G H, *et al.* Sources and transformation of nitrate in karst groundwater of Zengpiyan site, Guilin [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, **39**(2): 164-172.
- [25] 田永著, 韩志伟, 赵然, 等. 岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3157-3164.  
Tian Y Z, Han Z W, Zhao R, *et al.* Analysis of nitrate sources in different waters of karst basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3157-3164.
- [26] 丁玉娟, 林昌虎, 何腾兵, 等. 贵州草海耕地土壤重金属污染特征及安全评价[J]. *贵州科学*, 2013, **31**(2): 47-51, 88.  
Ding Y J, Lin C H, He T B, *et al.* Characteristics and safety evaluation of farmland soil polluted by heavy metals in Caohai of Guizhou[J]. *Guizhou Science*, 2013, **31**(2): 47-51, 88.
- [27] 郎赞超, 刘丛强, Satake H, 等. 贵阳地表水—地下水的硫和氯同位素组成特征及其污染物示踪意义[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(2): 151-159.  
Lang Y C, Liu C Q, Satake H, *et al.* δ<sup>37</sup>Cl and δ<sup>34</sup>S variations of Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in groundwater and surface water of Guiyang area, China [J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(2): 151-159.
- [28] 李瑞, 肖琼, 刘文, 等. 运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2877-2886.  
Li R, Xiao Q, Liu W, *et al.* Using δ<sup>34</sup>S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and δ<sup>15</sup>N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, δ<sup>18</sup>O-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> to trace the sources of sulfur and nitrate in Lihu lake underground water, Guangxi, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2877-2886.
- [29] Cao X X, Wu P, Zhou S Q, *et al.* Tracing the origin and geochemical processes of dissolved sulphate in a karst-dominated wetland catchment using stable isotope indicators [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **562**: 210-222.
- [30] Jiang Y J, Yan J. Effects of land use on hydrochemistry and contamination of karst groundwater from Nandong underground river system, China [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2010, **210**(1): 123-141.
- [31] Zhang J, Huang W W, Létolle R, *et al.* Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China-weathering processes and chemical fluxes [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, **168**(1-4): 173-203.
- [32] 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 等. 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 Q B, Qin X Q, Liu P Y, *et al.* Regional evolution and control factors of karst groundwater in Liulin spring catchment [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2132-2142.
- [33] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水文地球化学特征 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4924-4935.  
Zhang H X, Wu Y, Luo W Y, *et al.* Hydrogeochemical investigations of groundwater in Lingbei area, Leizhou Peninsula [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [34] Jiang Y J. The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: evidence from major elements and δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> in Nandong, Southwest China [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2013, **152**: 1-11.

## CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant ( $O_x$ ) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China .....	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model .....	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter .....	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall .....	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust .....	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries .....	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants .....	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China .....	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern .....	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China .....	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes .....	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang .....	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin .....	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years .....	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China .....	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province .....	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas .....	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin .....	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area .....	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake .....	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake .....	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin .....	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River .....	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area .....	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk .....	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria .....	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu .....	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau .....	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis .....	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging .....	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water .....	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System .....	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant .....	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge .....	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants .....	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period .....	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas .....	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District .....	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District .....	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds .....	DAI Zi-wei, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil .....	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops .....	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress .....	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice .....	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas .....	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community .....	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables .....	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction .....	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)