

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

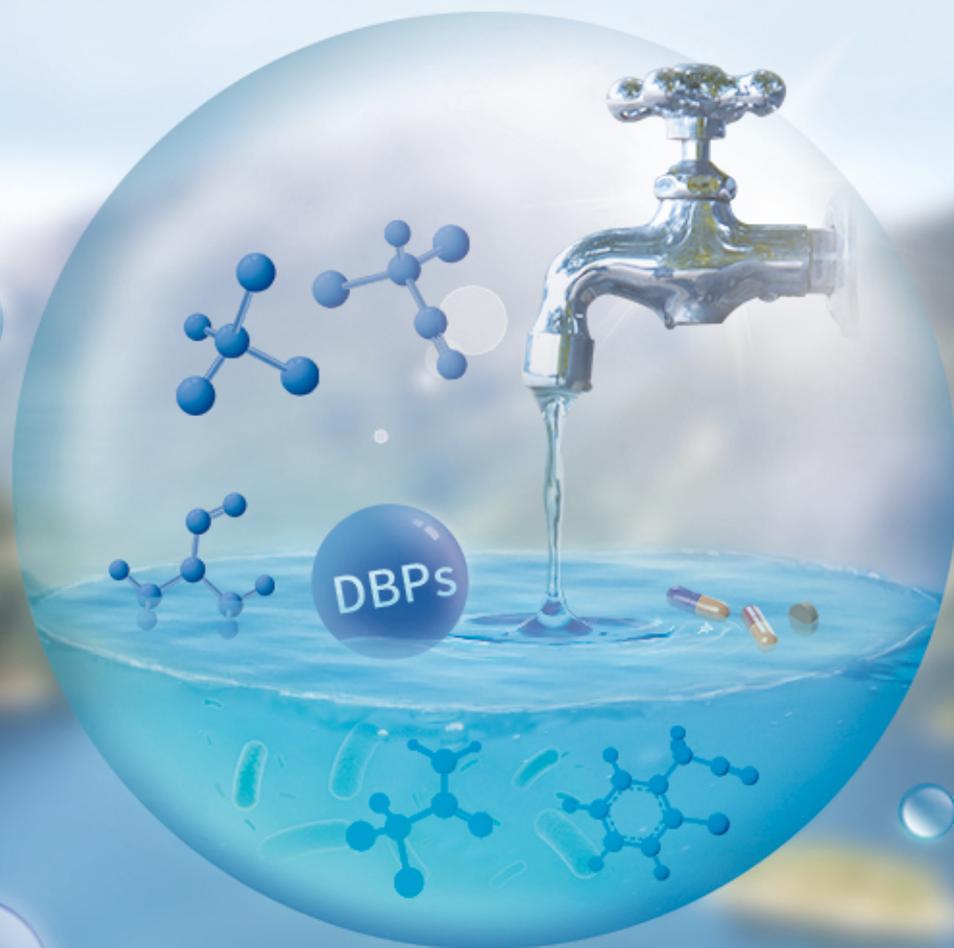
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期

Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)
生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)
COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铖, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颖, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性桉木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组分含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析

彭红霞¹, 侯清芹¹, 曾敏², 黄长生², 师环环¹, 皮鹏程¹, 潘羽杰^{1*}

(1. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074; 2. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205)

摘要: 雷州半岛地下水资源为雷州半岛经济社会发展提供有力的资源支撑,厘清该区地下水化学特征及形成机制对水资源的合理开采及可持续利用具有重要意义. 本研究采集 43 组雷州半岛地下水样品,运用描述性统计分析、Piper 三线图、ArcGIS 空间插值、Gibbs 图以及离子比值等方法分析地下水水化学特征及其控制因素. 结果表明: ① 研究区地下水阴阳离子以 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型为主. 研究区地下水中的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 在雷州市西部含量较高,在其他区域均较低, HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 这 5 种离子含量较高的区域主要集中在西南和东部沿海. ② 地下水化学演化过程主要受水岩作用、阳离子交替吸附和人类活动的影响. Na^+ 和 K^+ 来源主要是蒸发盐岩和硅酸盐岩, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩溶解, NO_3^- 主要来源于人类活动.

关键词: 地下水; 水化学特征; 控制因素; 形成机制; 雷州半岛

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5375-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202104073

Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula

PENG Hong-xia¹, HOU Qing-qin¹, ZENG Min², HUANG Chang-sheng², SHI Huan-huan¹, PI Peng-cheng¹, PAN Yu-jie^{1*}

(1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China)

Abstract: Groundwater resources in the Leizhou Peninsula provide a strong support for the economic and social development. Therefore, understanding the chemical characteristics and formation mechanism of groundwater in this area is necessary for the rational exploitation and sustainable utilization of water resources. In this study, 43 groundwater samples were collected, and the hydrochemical characteristics and controlling factors were analyzed by descriptive statistical analysis, Piper triangular diagrams, ArcGIS spatial interpolation, Gibbs diagram, and ion ratios. The results showed that: ① The anions and cations of the groundwater in the study area were mainly HCO_3^- , Ca^{2+} , and Na^+ , and the hydrochemical types were mainly $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$, $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca-Mg}$, $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$, and $\text{HCO}_3\text{-Na}$. The contents of Cl^- , SO_4^{2-} , and Na^+ were higher in the west of Leizhou City compared to other areas. The sites with higher contents of HCO_3^- , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , and K^+ were mainly concentrated in the southwest and eastern coastal areas. ② The chemical evolution of groundwater was mainly affected by water-rock interaction, cation alternating adsorption, and anthropogenic activities. The sources of Na^+ and K^+ were mainly from evaporative and silicate rocks, Ca^{2+} and Mg^{2+} were mainly from carbonate karstification, while NO_3^- originated from anthropogenic activities.

Key words: groundwater; hydrochemical characteristics; controlling factors; formation mechanism; Leizhou Peninsula

地下水不仅是饮用水、农业灌溉和工业用水的重要来源^[1],同时也是社会经济可持续发展的重要保障.但受到气候变化^[2]、海水混合^[3]以及人类活动^[4]等一系列自然及人为因素的影响,地下水环境正遭受严峻挑战^[5-7].地下水通过与岩石发生地球化学作用,进而导致水化学成分发生巨大变化,表现出不同特征^[8].对地下水水化学特征及其控制因素进行研究,不仅能反映各种因素对地下水的影响,而且对水资源开发和利用、生态环境保护 and 人与自然和谐共处具有重要意义^[9].

雷州半岛地处粤港澳大湾区、海南自贸区以及北部湾城市群的交汇处,具有优越的地理位置,并对接“一带一路”和“两圈一廊”国家重要战略.随着工业化和城市化进程迅速发展,水资源的需求量日益增加,致使居民对地下水开采不断加快,同时带来了一系列生态环境问题,如局部地下水开采过量^[10],地面沉降^[11]和海水入侵^[12]等.目前关于雷州半岛

的研究主要集中在局部区域的水化学特征^[13]、水资源承载力^[14]、水位变化和地下水补给^[15]等方面,张宏鑫等^[16]在雷州半岛岭北地区通过水化学和氢氧稳定同位素等方法,揭示了区域地下水水化学特征主要受大气降水补给等自然作用和人类活动的双重影响.罗炜宇^[17]对雷州半岛东北部铁质地下水的危害、成因和分布特征进行研究,并对该区域地下水中铁含量较高的地区提出适宜的除铁措施和动态监测手段.前人研究为雷州半岛地区地下水进一步地研究提供了借鉴,但缺乏关于雷州半岛地下水水化学特征及控制因素的系统研究.

基于此,本文运用数理统计、空间插值、图解

收稿日期: 2021-04-08; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877297); 中国地质调查局项目(12120114029601)

作者简介: 彭红霞(1973~),女,博士,教授,主要研究方向为自然地理与资源环境, E-mail: penghx@cug.edu.cn

* 通信作者, E-mail: panyujie@cug.edu.cn

法和离子比值等方法,结合水文地球化学理论对雷州半岛地下水进行系统分析,探究其地下水水化学特征和形成机制,以期为雷州半岛地下水资源合理开发利用及改善水生态环境提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雷州半岛是我国三大半岛之一,位于 $109^{\circ}55'E \sim 110^{\circ}44'E$ 、 $20^{\circ}14'N \sim 21^{\circ}44'N$ 之间,地处中国大陆最南端,广东省西南部,三面环海,东濒南海,西临北部湾,南隔琼州海峡与海南岛相望,地势缓和平坦,海拔多在 1 000 m 以下。现雷州半岛所辖区域主要包括三市(雷州市、廉江市和吴川市),两县(遂溪县和徐闻县),五区(赤坎区、霞山区、开发区、麻章区和坡头区),如图 1 所示。半岛属于热带气候,年平均气温 $23.5^{\circ}C$,年平均降水量 $1\,417 \sim 1\,804$ mm,但降雨时空分布不均,季节间降雨量差异大,同时受副热带高压影响,日照强、气温高和蒸发量大,使该岛成为旱害严重地区。雷州半岛在大地构造上属华南褶皱系,涉及范围横跨云开大山隆起及粤中凹陷两个构造单元;地层发育较齐全,由老至新有元古界、志留系、泥盆系、石炭系、侏罗系和第四系,其中以第四系分布最广;岩性由北向南变细,厚度变薄,富水性变弱,且由于地壳的不均匀运动,北部地面沉降幅度比南方大,沉积了较厚的粗碎屑,而南方沉积以黏土为主。中、晚更新世,研究区多次间歇性火山喷发,地表覆盖的火山岩使该

地区形成了中南部以火山岩孔洞裂隙水和松散岩类孔隙水为主,北部以条状或零星状分布着基岩裂隙水和碳酸盐岩类裂隙溶洞水的地下水类型。根据含水层埋藏深度、水力特征及开采条件,主要分为浅层水-微承压水(埋深小于 30 m)、中层承压水(埋深 30 ~ 200 m)和深层承压水(埋深 200 ~ 500 m)。

1.2 样品采集和测试

2014 年 12 月在雷州半岛对地下水进行采集,共计 43 个水样点,其中泉水 2 组,民井 14 组,井深范围为 7 ~ 30 m,机井 27 组,井深范围为 7 ~ 380 m。水体温度、pH、电导率、溶解氧、溶解性固体总量和氧化还原电位等参数现场使用 HACH-40d 便携式水质分析仪进行测定。将聚乙烯塑料样瓶用去离子水冲洗至少 3 遍,然后将采集的水样使用 $0.45 \mu m$ 的微孔过滤膜过滤后装于 500 mL 聚乙烯塑料样瓶中。将需要测定的阳离子水样加入约 3 mL 的 65% 的 HNO_3 进行酸化,使其 $pH < 2$,然后放置于 $4^{\circ}C$ 冰箱中密封保存,阴离子的水样直接放于 $4^{\circ}C$ 冰箱中密封保存。将所处理的样品送往国土资源部长沙矿产资源监督检测中心进行测试,运用等离子体发射光谱仪(ICAP-6300)测定阳离子,采用离子色谱仪(ICS-1100)测定阴离子,各离子的检测限均为 $0.01 mg \cdot L^{-1}$,阴阳离子的测定误差一般低于 0.1%。

1.3 数据处理

本文运用 Origin 2019 软件^[18]对研究区地下水主要离子进行描述性统计分析,主要包括均值、中值、标准差、最小值、最大值、变异系数,运用 ArcGIS 10.2 软件(<http://www.esri.com/software/arcgis>, ESRI, Redlands, California, CA, USA)进行反距离空间插值探究雷州半岛地下水主要离子含量的空间特征,并绘制 Piper 三线图、Gibbs 图、端元图和离子比值图分析研究区地下水水化学特征和控制因素。

2 结果与讨论

2.1 地下水化学特征

地下水化学分析结果见表 1,并绘制地下水化学参数的箱线图(图 2)。研究区地下水 pH 值介于 5.69 ~ 9.15 之间,均值为 7.18, TDS 介于 $30.18 \sim 680.35 mg \cdot L^{-1}$,属于淡水范畴。阴离子质量浓度关系为: $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$,以 HCO_3^- 为主,占阴离子总浓度的 48.54%;阳离子质量浓度关系为: $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$,以 Ca^{2+} 和 Na^+ 为主,分别占阳离子总浓度的 38.17% 和 34.85%。地下水

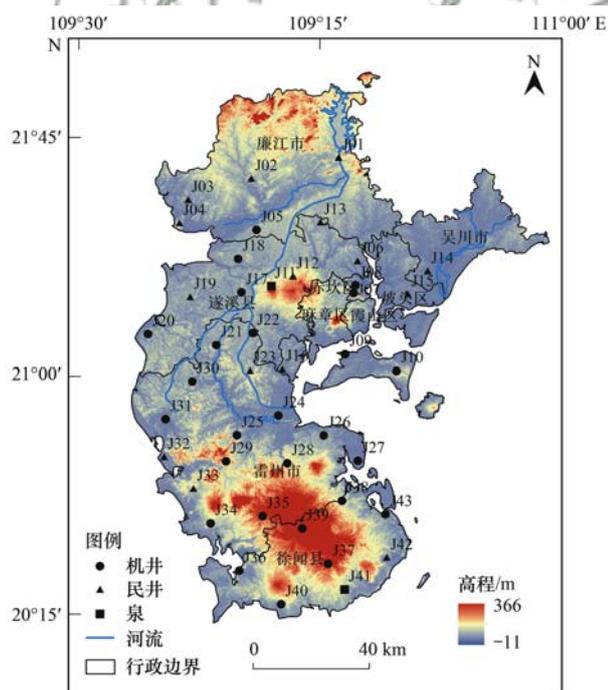


图 1 雷州半岛地下水采样点示意

Fig. 1 Groundwater sampling sites in the Leiqzhou Peninsula

主要离子的变异系数介于 0.89 ~ 1.52 之间, 空间变异特性较大. Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 K^+ 这 4 种离子变

异系数均超过 1, 表明其空间分布差异性明显, 局部离子富集程度高, 可能受人类活动的影响.

表 1 主要水化学指标质量浓度统计¹⁾/mg·L⁻¹

Table 1 Mass concentration statistics of the main hydrochemical indexes/mg·L⁻¹

数值	TDS	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
均值	212.24	7.18	23.06	8.29	8.02	21.06	29.83	17.23	79.61	37.36
标准差	136.70	0.92	20.52	7.51	8.93	18.95	30.53	26.23	78.05	39.30
最小值	30.18	5.69	1.85	0.25	0.23	2.90	1.72	0.11	8.50	0.07
最大值	680.35	9.15	77.41	30.61	33.22	107.80	167.55	113.26	295.51	145.63
中位数	171.28	7.21	16.22	5.58	3.78	15.38	20.50	4.57	53.15	24.15
变异系数	0.64	0.13	0.89	0.91	1.11	0.90	1.02	1.52	0.98	1.05

1) pH 和变异系数无量纲

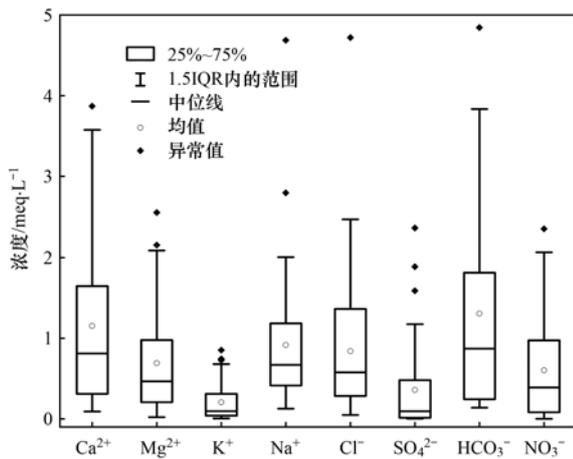


图 2 地下水化学参数箱线图

Fig. 2 Box-plot of groundwater chemical parameters

通过 Piper 三线图可以了解地下水化学成分的含量和演化特征, 该方法的优点是不受人为因素的影响^[19]. 由图 3 可知研究区地下水水化学类型较为多样, 阳离子主要分布在 Ca^{2+} 和 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 端元, 阴离子主要以 HCO_3^- 为主, 表明碳酸盐岩的溶解对地下水水化学特征起主要控制作用. 结合苏卡列夫地下水水化学类型分类, 水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca-Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Mg}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型为主.

2.2 主要离子空间分布特征

基于地统计法分析研究区地下水主要离子的空间分布特征, 本文采用 Arcgis 10.2 制图软件中的反距离权重法绘制空间分布特征(图 4). 总体来看, 雷州半岛地下水主要离子空间分布呈现比较明显的差异. 所有离子含量在雷州市西部均比较高, 表明雷州市的人类活动对地下水的影响程度明显. Cl^- 和 Na^+ 具有相似的空间分布格局, 在地下水含量高值区集中在雷州市西部, Mg^{2+} 主要分布在遂溪县的东部以及徐闻县的西南和东北部, 三者在海陆接触区域含量也略高, 表明海水对地下水有一定程度的入侵, 对离子含量产生了影响. NO_3^- 在地下水中含

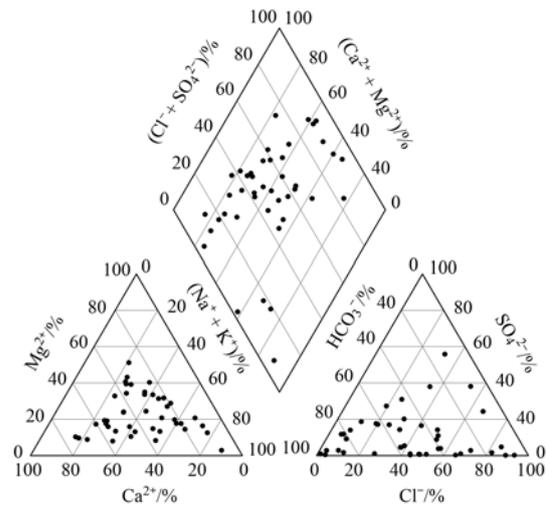


图 3 地下水化学 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram of groundwater chemistry

量高值区主要分布遂溪县和西南沿海地区, K^+ 在地下水含量高值区主要分布在雷州市的西部、徐闻县南部以及东部沿海地区, 这两种离子的分布可能和种植农作物施用钾肥和氮肥有关. 雷州半岛火山岩分布广泛, 火山岩孔洞裂隙水是其主要的地下水类型之一, 此水文地质是造成 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 在研究区含量较高的原因之一. SO_4^{2-} 高值主要分布区集中在雷州半岛东北地区 and 雷州市西部, 可能和近年发展工业有关.

2.3 控制因素分析

Gibbs 图以 TDS 浓度值为对数纵坐标, 阳离子质量浓度的比值 $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 和阴离子质量浓度的比值 $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 为横坐标, 根据它们之间的关系可以判断地下水主要离子的控制影响因素, 分析地下水化学类型的形成作用^[20]. 根据地下水化学成因, 将控制因素划分为 3 类: 蒸发结晶、岩石风化和大气降水^[21].

将雷州半岛地下水化学数据绘制于 Gibbs 图中(图 5), 水样点主要落在岩石风化区域内, 部分有向大气降雨偏移的趋势, 表明研究区地下水水化学成

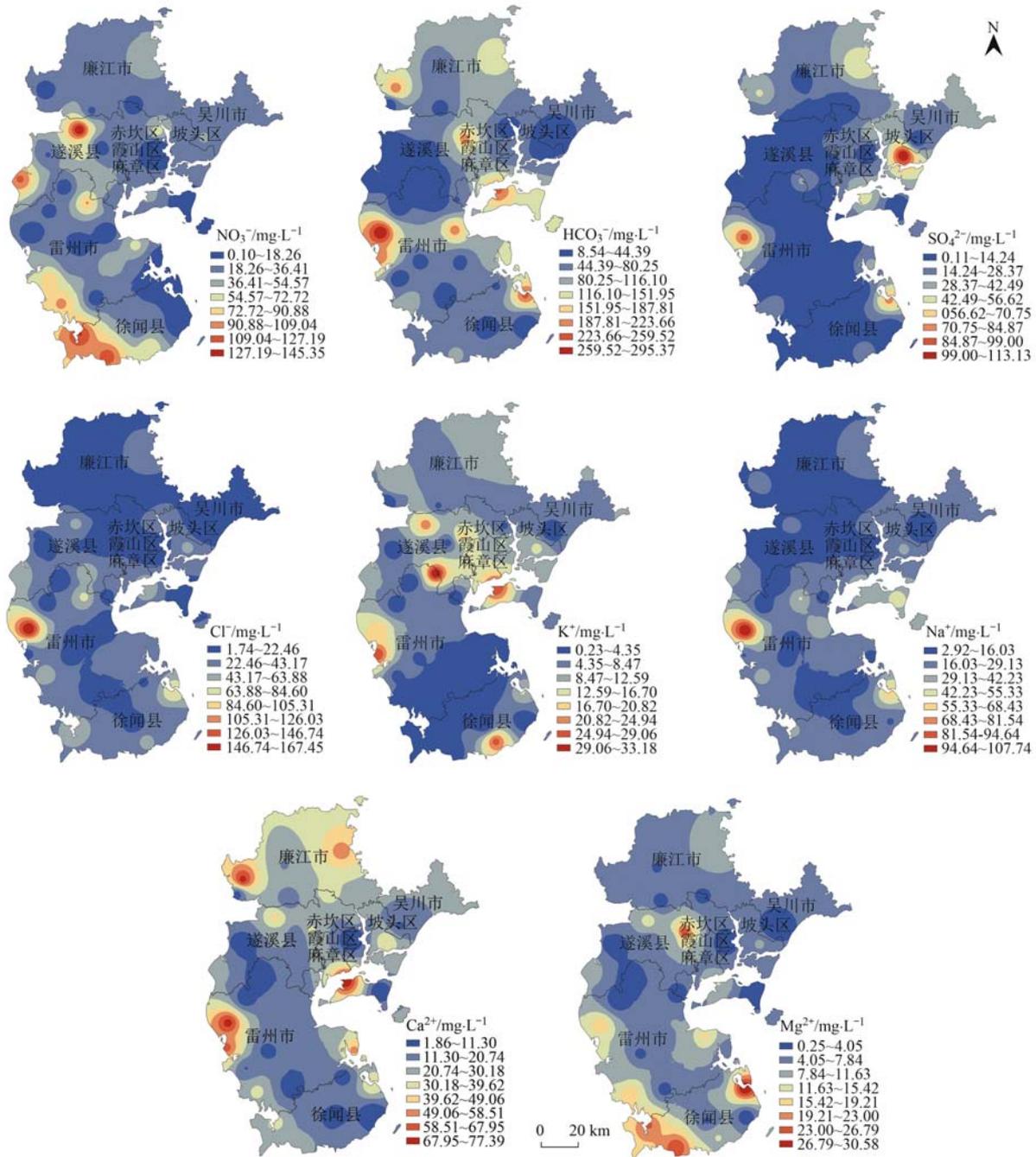


图 4 地下水主要离子空间分布特征

Fig. 4 Characteristics of the spatial distributions of main ions in the groundwater

因主要受岩石风化作用的影响,大气降雨有一定程度的影响,蒸发结晶的影响不明显.部分水样点落于模型框图之外,可能是受人类活动影响. Wei 等^[22]对德惠地区和 Mu 等^[23]对洪建淖湖盆地通过 Gibbs 对研究区进行分析,结果表明水样主要受岩石风化作用影响.

利用端元法可以进一步探究地下水水化学演化过程受岩石风化的影响,根据 Mg^{2+}/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 和 HCO_3^-/Na^+ 浓度比值将地下水离子主要风化来源分为碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩这 3 种^[24]. 如图 6 所示,研究区地下水样点主要位于硅

酸盐岩和碳酸盐岩风化端元之间,只有少部分样点位于硅酸盐岩和蒸发岩之间,表明硅酸盐和碳酸盐矿物在岩石风化过程中起主要影响作用,蒸发岩对其贡献不明显. Wu 等^[25]在贵州省安顺地区、Li 等^[26]在渭河径流区域和 Qian 等^[27]在鄂尔多斯盆地农牧区的研究发现,地下水样品主要受硅酸盐和碳酸盐的共同作用.

在岩石和地下水长期相互作用的过程中,岩石表面所携带的负电荷可以吸附地下水中的阳离子,从而将原先所携带的阳离子释放到地下水中,即发生阳离子交替吸附作用. 阳离子交替吸附作用通常

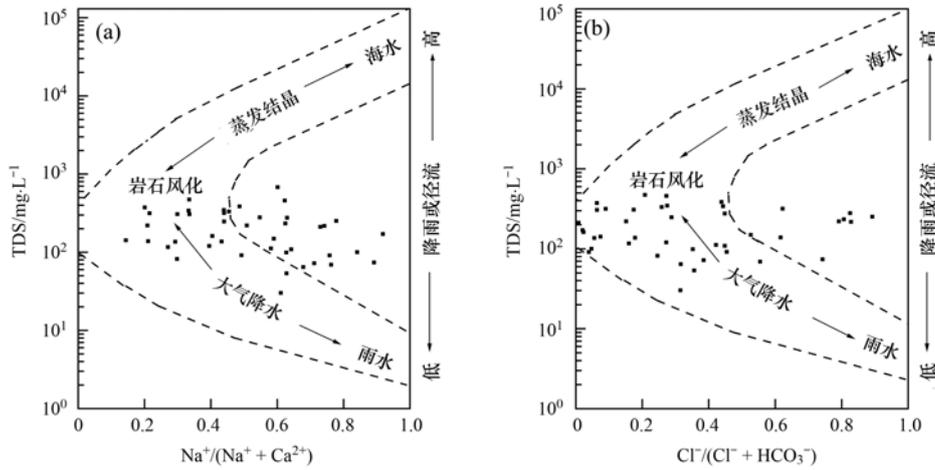


图 5 研究区地下水 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs plots for groundwater in the study area

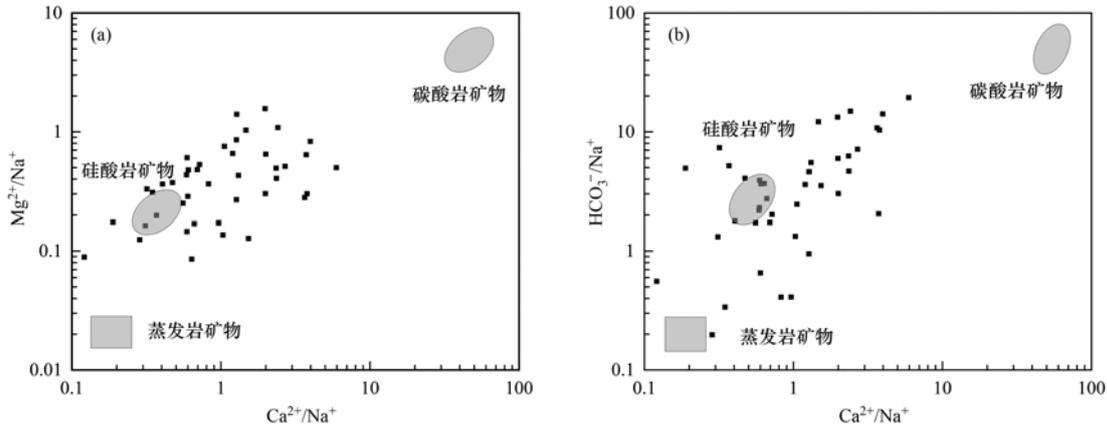


图 6 研究区岩石风化溶解相对贡献

Fig. 6 Relative contribution of weathering and dissolution of rocks

是用 $(Mg^{2+} + Ca^{2+} - SO_4^{2-} - HCO_3^-) / (Na^+ + K^+ - Cl^-)$ 浓度比值关系来反映,若发生阳离子交换作用,则两者的比值应在 -1 左右^[28].图 7 中大部分水样位于 -1 比值线周围,表明研究区地下水中存在阳离子交替吸附作用.

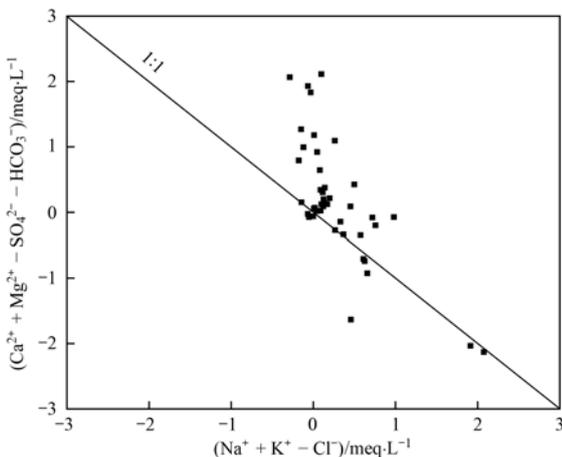


图 7 研究区地下水阳离子交替吸附作用

Fig. 7 Cation exchange and adsorption of groundwater

阳离子交替吸附的方向和强度可以进一步用氯碱指数来表示,通常情况下,当地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 与含水层颗粒表面吸附的 Na^+ 和 K^+ 进行阳离子交换作用时,CAI-I 和 CAI-II 均为负值,相应地,如果存在反离子交换作用,其 CAI-I 和 CAI-II 值将会为正值.在图 8 中,79% 样点的地下水氯碱指数为负值,21% 样点的地下水氯碱指数为正值,说明研究区地下水中主要发生正向交换作用,使地下水中 Na^+ 和 K^+ 浓度升高, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度降低. Li 等^[30] 在青藏高原北麓河盆地, Ren 等^[31] 在酒泉东盆地发现研究区水体中也发生了阳离子交换作用.

$$CAI-I = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-} \quad (1)$$

$$CAI-II = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{HCO_3^- + SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + NO_3^-} \quad (2)$$

2.4 主要离子来源

相关性分析所揭示的相互关系可推测地下水主要离子间的来源关系^[32],表 2 为雷州半岛地下水离

表 2 地下水各水化学参数间的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient matrix of the groundwater chemical parameters

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS
Ca ²⁺	1								
Mg ²⁺	0.48 **	1							
K ⁺	0.54 **	0.32 *	1						
Na ⁺	0.48 **	0.50 **	0.36 *	1					
Cl ⁻	0.51 **	0.54 **	0.41 **	0.86 **	1				
SO ₄ ²⁻	0.69 **	0.39 **	0.47 **	0.60 **	0.61 **	1			
HCO ₃ ⁻	0.74 **	0.54 **	0.46 **	0.58 **	0.34 *	0.51 **	1		
NO ₃ ⁻	0.18	0.46 **	0.17	0.11	0.34 *	-0.08	-0.22	1	
TDS	0.82 **	0.77 **	0.59 **	0.80 **	0.80 **	0.70 **	0.72 **	0.37 *	1

1) ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关, * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

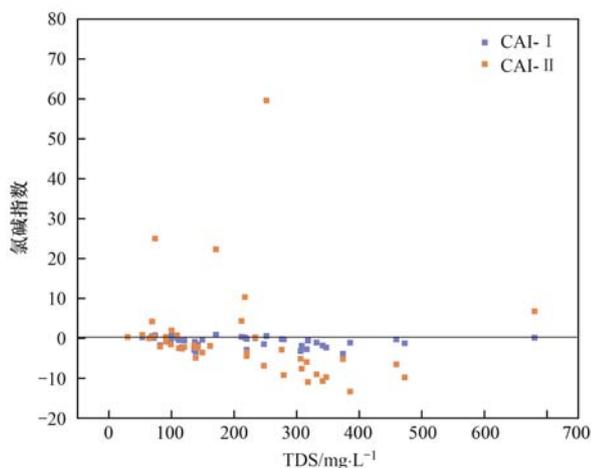


图 8 研究区地下水氯碱指数

Fig. 8 Chlor-alkali index of groundwater

子间的相关关系矩阵. 从中可看出, TDS 与所有离子均呈显著相关关系, 其中与 Ca²⁺、Na⁺ 和 Cl⁻ 相关系数达到 0.8 及以上, 表明这 3 种离子是 TDS 的主要来源. Ca²⁺ 与 HCO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 相关性最高, 反映这 3 种离子可能是来源于盐岩溶解. Na⁺ 和 Cl⁻ 之间相关系数为 0.86, 说明两者有共同的来源, 一般可能是来源于蒸发岩的风化溶解.

大气降雨、硅酸盐矿物和蒸发盐矿物溶解是地下水中 Na⁺ 和 K⁺ 的主要来源, Na⁺ 和 Cl⁻ 毫克当量浓度比值可反映水中 Na⁺ 和 K⁺ 的来源. 海水和大气降水的 Na⁺ 和 Cl⁻ 毫克当量浓度比值为 0.86. 在未受人类活动影响时, 岩盐溶解是地下水中 Na⁺ 和 Cl⁻ 的主要来源, 毫克当量浓度比值关系一般在 1 左右^[33]. 由图 9(a) 可知, 雷州半岛地下水样点基本都位于 1:1 当量线附近, 表明蒸发盐岩和硅酸盐岩对研究区地下水中 Na⁺ 和 K⁺ 的来源有主要贡献. 还有少量样点偏离 1:1 当量线, 可能是由于阳离子交替吸附作用导致 Na⁺ 和 K⁺ 含量高于 Cl⁻ 的含量. Chitsazan 等^[34] 对伊朗乌尔米亚市

城市地下水中 Na⁺ 和 Cl⁻ 的比值进行分析, 研究表明该地区 Na⁺ 来源于盐岩且普遍存在离子交换过程.

Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 来源可通过 (Ca²⁺ + Mg²⁺)/HCO₃⁻ 的毫克当量浓度比值来确定, 当其比值大于 1 时, 主要来源于碳酸盐岩溶解, 当其比值小于 1 时, 主要来源于硅酸盐和蒸发岩的溶解^[35]. 图 9(b) 显示雷州半岛地下水水样大部分位于比值线 1 的左上方, 只有少部分位于右下方, 表明地下水中的 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要来源于碳酸盐岩的溶解. (Ca²⁺ + Mg²⁺)/(HCO₃⁻) 与 (SO₄²⁻/HCO₃⁻) 的毫克当量浓度比值可进一步分析碳酸、硫酸参与地下水碳酸盐岩溶解情况, 当比值为 2 时, 硫酸参与碳酸盐矿物溶解过程, 当比值为 1 时, 碳酸参与碳酸盐矿物溶解过程^[36]. 从图 9(c) 中可以看出水样点主要位于比值线 2 的附近以及左上方, 说明地下水中硫酸和碳酸均参与了碳酸盐矿物的溶解, 但碳酸的贡献要明显多于硫酸. 文泽伟等^[37] 对龙江-柳江-西江流域和郑涛等^[38] 对涡河流域中部地区的研究均采用 (Ca²⁺ + Mg²⁺)/HCO₃⁻ 和 (Ca²⁺ + Mg²⁺)/(HCO₃⁻) 与 (SO₄²⁻/HCO₃⁻) 的比值关系, 发现 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 主要来源于碳酸多于硫酸的碳酸盐岩溶解.

人类活动产生的废水、废气、废物以及农业化肥等, 会随雨水或地表水进入浅层地下水甚至深层地下水, 进而影响地下水中水化学过程演化. 硝酸盐一定程度上可以反映地下水受人类活动的影响, Cl⁻/Na⁺ 和 NO₃⁻/Na⁺ 的比值越高, 地下水受人类活动影响越明显^[39]. 通过 Cl⁻/Na⁺ 和 NO₃⁻/Na⁺ 的比值[图 9(d)], 可以看出两者比值均比较高, 大部分水样点偏向农业活动, 只有少部分分布在碳酸盐岩和盐岩之间, 说明雷州半岛地下水已遭受一定程度农业污染.

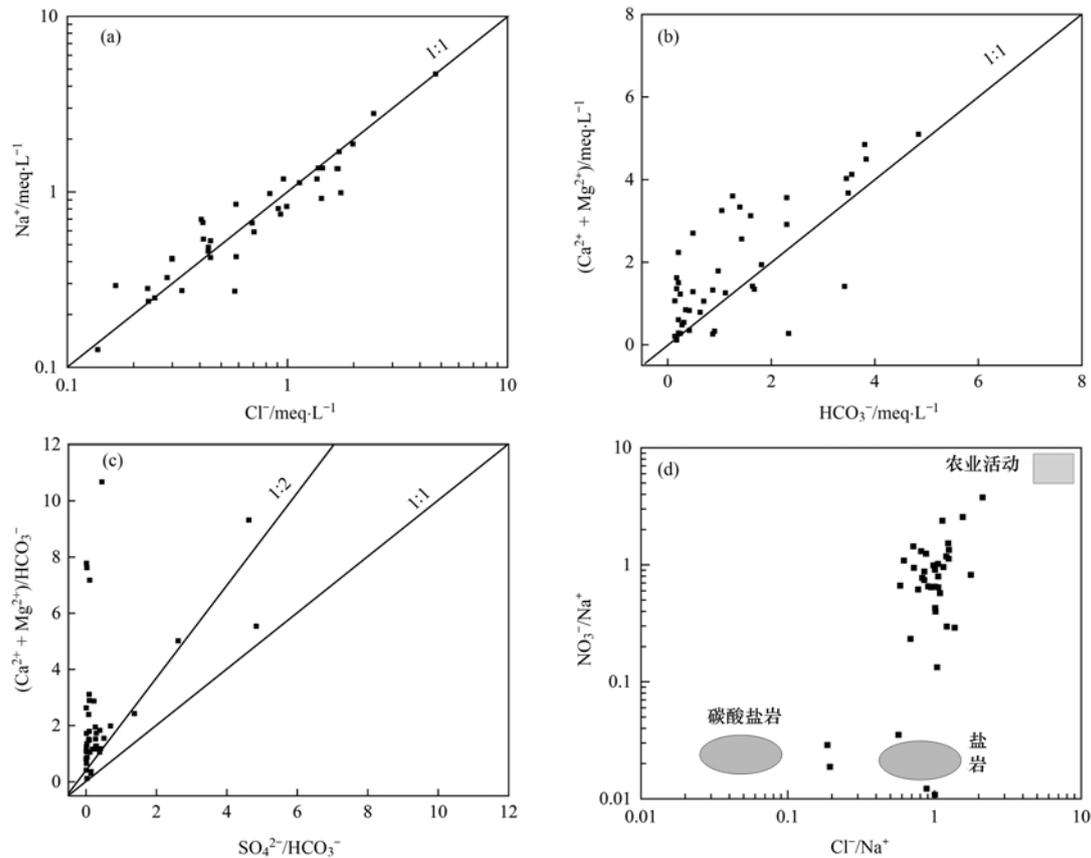


图9 主要离子比例关系

Fig. 9 Series plots of the proportion of key ions

3 结论

(1) 雷州半岛地下水主要为弱碱性淡水, 阴离子浓度顺序为: $\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, 阳离子浓度顺序为: $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, 阴阳优势离子分别为 HCO_3^- 和 Ca^{2+} , 水化学类型以 HCO_3^- -Cl-Ca-Na、 HCO_3^- -Cl-Ca-Mg-Na、 HCO_3^- -Cl-Mg-Na 和 HCO_3^- -Na 型为主. 研究区地下水中的主要离子呈现出不同的空间差异特征, Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 Na^+ 在雷州市西部含量较高, 在其他区域均较低, HCO_3^- 、 NO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 这 5 种离子含量较高的区域主要集中在西南和东部沿海.

(2) 地下水化学特征主要受水岩作用的影响, 水岩作用中以硅酸盐和碳酸盐矿物的溶解为主, 其次是阳离子交替吸附和人类活动的影响, 大气降雨和蒸发浓缩的影响不显著. 离子比值法的结果表明雷州半岛地下水中 Na^+ 和 K^+ 的来源主要是蒸发盐岩和硅酸盐岩, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸多于硫酸参与的碳酸盐岩溶解, NO_3^- 主要与人类生活污水排放和农业活动有关.

致谢: 感谢彭轲教授级高级工程师和赵信文高级工程师对本研究的指导和帮助!

参考文献:

- [1] Wang R, Bian J M, Gao Y. Research on hydrochemical spatio-temporal characteristics of groundwater quality of different aquifer systems in Songhua River Basin, eastern Songnen Plain, Northeast China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(12): 5081-5092.
- [2] Zhai Y Z, Lei Y, Zhou J, *et al.* The spatial and seasonal variability of the groundwater chemistry and quality in the exploited aquifer in the Daxing District, Beijing, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(2), doi: 10.1007/s10661-014-4249-9.
- [3] Ma F S, Wei A H, Deng Q H, *et al.* Hydrochemical characteristics and the suitability of groundwater in the coastal region of Tangshan, China[J]. *Journal of Earth Science*, 2014, 25(6): 1067-1075.
- [4] 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 等. 城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1197-1206.
Lü X L, Liu J T, Han Z T, *et al.* Chemical evolution of groundwater in the Tacheng basin of Xinjiang in the process of urbanization[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1197-1206.
- [5] Hussien B M. Modeling the impact of groundwater depletion on the hydrochemical characteristic of groundwater within Mullusi carbonate aquifer-west Iraq[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(1): 453-470.
- [6] Rao N S, Rao P S, Reddy G V, *et al.* Chemical characteristics of groundwater and assessment of groundwater quality in Varaha River Basin, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184

- (8): 5189-5214.
- [7] Wu J H, Li P Y, Qian H. Variations of hydrogeochemical characteristics of shallow groundwater caused by agricultural activities [J]. *Asian Journal of Chemistry*, 2013, **25** (13): 7441-7444.
- [8] Yuan J F, Xu F, Deng G S, *et al.* Using stable isotopes and major ions to identify hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Xide Country, Sichuan Province [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2018, **33**(2): 223-234.
- [9] 侯国华, 高茂生, 党显璋. 唐山曹妃甸浅层地下水水化学特征及咸化成因 [J]. *地学前缘*, 2019, **26**(6): 49-57.
Hou G H, Gao M S, Dang X Z. Hydrochemical characteristics and salinization causes of shallow groundwater in Caofeidian, Tangshan City [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 49-57.
- [10] Katusiime J, Schütt B. Integrated water resources management approaches to improve water resources governance [J]. *Water*, 2020, **12**(12), doi: 10.3390/w12123424.
- [11] 林琼珍. 基于 InSAR 技术的雷州半岛地面沉降监测研究 [J]. *地矿测绘*, 2018, **34**(2): 9-12.
Lin Q Z. Study on land settlement monitoring in Leizhou Peninsula area based on InSAR [J]. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 2018, **34**(2): 9-12.
- [12] 黄向青, 林进清, 张顺枝, 等. 应用混合理论分析雷州半岛东岸海水入侵 Ca^{2+} 的迁移 [J]. *勘察科学技术*, 2015, (1): 19-24, 35.
Huang X Q, Lin J Q, Zhang S Z, *et al.* Analysis on Ca^{2+} 's migration during seawater invasion by using mixing theory in East Coast of Leizhou Peninsula [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2015, (1): 19-24, 35.
- [13] 曾敏, 彭轲, 何军, 等. 雷州半岛东部地区地下水环境特征研究 [J]. *地下水*, 2018, **40**(6): 17-20, 116.
Zeng M, Peng K, He J, *et al.* Research on groundwater environmental characteristics in eastern Leizhou Peninsula [J]. *Underground Water*, 2018, **40**(6): 17-20, 116.
- [14] 刘建梅, 谢丽莉, 刘宇. 广东省雷州半岛水资源承载力分析 [J]. *广东水利水电*, 2019, (11): 47-51, 55.
Liu J M, Xie L L, Liu Y. Carrying capacity of water resources for Leizhou Peninsula [J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2019, (11): 47-51, 55.
- [15] 梁冬梅, 赵新锋, 陈建耀, 等. 雷州半岛土壤渗透性及其与地下水补给关系 [J]. *热带地理*, 2016, **36**(6): 960-968.
Liang D M, Zhao X F, Chen J Y, *et al.* Soil permeability in relation to groundwater recharge from rainfall infiltration in the Leizhou Peninsula [J]. *Tropical Geography*, 2016, **36**(6): 960-968.
- [16] 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 the Lingbei area, Leizhou Peninsula [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4924-4935.
- [17] 罗炜宇. 雷州半岛东北部铁质地下水成因及分布特征研究 [J]. *地下水*, 2021, **43**(1): 42-43, 103.
- [18] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 漓江冲洪积扇地下水水化学特征及控制因素分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(7): 3089-3098.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al.* Groundwater chemical characteristics and analysis of their controlling factors in an alluvial fan of Jianjiang River [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3089-3098.
- [19] 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, *et al.* Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4537-4545.
- [20] 彭磊, 比拉力·依明, 万彦博, 等. 沙漠腹地达理雅博依绿洲浅层地下水水化学特征分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, **35**(3): 88-95.
Peng L, Bi Lali·Yi Ming, Wan Y B, *et al.* Hydrochemical characteristics of shallow groundwater in Dali Yaboyi oasis in the hinterland of the desert [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(3): 88-95.
- [21] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry [J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [22] Wei H Y, Liang X J, Liu S H, *et al.* Hydrochemical evolution of groundwater in Dehui, China [J]. *Water*, 2020, **12**(12), doi: 10.3390/w12123378.
- [23] Mu W P, Wu X, Wu C, *et al.* Hydrochemical and environmental isotope characteristics of groundwater in the Hongjiannao Lake Basin, northwestern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, **80**(2), doi: 10.1007/s12665-020-09281-z.
- [24] Liu J T, Peng Y M, Li C S, *et al.* Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei Plain, Northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115947.
- [25] Wu Y, Luo Z H, Luo W, *et al.* Multiple isotope geochemistry and hydrochemical monitoring of karst water in a rapidly urbanized region [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2018, **218**: 44-58.
- [26] Li Z, Xiao J, Evaristo J, *et al.* Spatiotemporal variations in the hydrochemical characteristics and controlling factors of streamflow and groundwater in the Wei River of China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113006.
- [27] Qian C, Wu X, Mu W P, *et al.* Hydrogeochemical characterization and suitability assessment of groundwater in an agro-pastoral area, Ordos Basin, NW China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(20), doi: 10.1007/s12665-016-6123-2.
- [28] 崔佳琪, 李仙岳, 史海滨, 等. 河套灌区地下水化学演变特征及形成机制 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4011-4020.
Cui J Q, Li X Y, Shi H B, *et al.* Chemical evolution and formation mechanism of groundwater in Hetao Irrigation Area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4011-4020.
- [29] 王翔, 罗艳丽, 邓雯文. 新疆奎屯地区高氟地下水的水化学特征及成因分析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2021, **35**(2): 102-108.
Wang X, Luo Y L, Deng W W. Hydrochemical characteristics and the causes of high-fluoride groundwater in the Kuitun, Xinjiang [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(2): 102-108.
- [30] Li J L, Wang W, Wang D H, *et al.* Hydrochemical and stable isotope characteristics of lake water and groundwater in the Beiluhe Basin, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Water*, 2020, **12**(8), doi: 10.3390/w12082269.
- [31] Ren X H, Gao Z J, An Y H, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Jiuquan East Basin, China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, **13**(13), doi: 10.1007/s12517-020-05573-7.
- [32] Ren C B, Zhang Q Q. Groundwater chemical characteristics and controlling factors in a region of northern China with intensive human activity [J]. *International Journal of Environmental*

- Research and Public, 2020, **17** (23), doi: 10. 3390/ijerph17239126.
- [33] 余伟, 杨海全, 郭建阳, 等. 贵州草海水化学特征及离子来源分析[J]. 地球与环境, 2021, **49**(1): 32-41.
Yu W, Yang H Q, Guo J Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and major ion sources of Lake Caohai in Guizhou Province[J]. Earth and Environment, 2021, **49**(1): 32-41.
- [34] Chitsazan M, Aghazadeh N, Mirzaee Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and quality assessment of urban groundwater in Urmia City, NW Iran[J]. Water Supply, 2017, **17**(5): 1410-1425.
- [35] Liu J T, Wang M, Gao Z J, *et al.* Hydrochemical characteristics and water quality assessment of groundwater in the Yishu River basin[J]. Acta Geophysica, 2020, **68**(3): 877-889.
- [36] 王攀, 靳孟贵, 路东臣. 河南省永城市浅层地下水化学特征及形成机制[J]. 地球科学, 2020, **45**(6): 2232-2244.
Wang P, Jin M G, Lu D C. Hydrogeochemistry characteristics and formation mechanism of shallow groundwater in Yongcheng City, Henan Province[J]. Earth Science, 2020, **45**(6): 2232-2244.
- [37] 文泽伟, 汝旋, 谢彬彬, 等. 龙江-柳江-西江流域的水化学特征及其成因分析[J]. 环境化学, 2016, **35**(9): 1853-1864.
Wen Z W, Ru X, Xie B B, *et al.* Characteristics and sources analysis of hydrochemistry in the Longjiang-Liujiang-Xijiang watershed[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(9): 1853-1864.
- [38] 郑涛, 焦团理, 胡波, 等. 涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 766-775.
Zheng T, Jiao T L, Hu B, *et al.* Hydrochemical characteristics and origin of groundwater in the central Guohe River Basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 766-775.
- [39] Guo Y L, Zhang C, Xiao Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of a closed karst groundwater basin in North China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2020, **325**(2): 365-379.

环境科学

CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies; A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)