

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂茂, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王飞龙, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事 (522)	
《环境科学》征稿简则 (722)	
信息 (748, 899, 924)	

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析

何明霞^{1,2}, 张兵^{1*}, 夏文雪¹, 崔旭^{1,2}, 王中良^{1,2}

(1. 天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; 2. 天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387)

摘要: 水化学是湿地水环境评价的重要参数。为研究天津七里海湿地的水化学组成和主要离子来源, 采集了湿地内的沼泽水、周边的河水和地下水。结果表明: ①河水、沼泽水的水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na}$ 型, 地下水水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型, 沼泽水主要依靠河水补给, 浅层地下水与河水交换作用明显; ②水体离子组分受大气降水影响小, Na^+ 和 K^+ 来源为盐岩溶解或蒸发浓缩作用, 河水、沼泽水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要受蒸发岩溶解作用, 地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩溶解; ③河水和地下水的水化学组分受阳离子交换作用明显, 而沼泽水阳离子交换作用不明显; 各水体的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 受一定人类活动的输入; 沼泽水和枯水期河水受蒸发盐岩溶解、蒸发作用及人为输入, 丰水期河水主要受碳酸盐溶解及人为活动影响。湿地的水化学组成受到自然因素和人类活动的共同作用。

关键词: 七里海湿地; 水化学; 离子来源; 控制因素

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0776-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005228

Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin

HE Ming-xia^{1,2}, ZHANG Bing^{1*}, XIA Wen-xue¹, CUI Xu^{1,2}, WANG Zhong-liang^{1,2}

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Hydrochemistry is an important parameter for wetland water environmental assessment. To study the hydrochemistry and main ion sources in the Qilihai wetland in Tianjin, river water, groundwater, and water in the marsh were collected and analyzed. The results show that: ① The river and marsh waters are $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl-Na}$ in type and groundwater water is $\text{HCO}_3\text{-Na}$ and $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ in type. The water in the marshes is mainly recharged by river water and the exchange of shallow groundwater with river water is notable; ② Precipitation has little effect on the chemical composition of the water. Na^+ and K^+ were derived from the dissolution of salt rock and evaporative concentration. Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- in the river and marsh water are mainly derived from the dissolution of evaporite salt rock. Ca^{2+} , Mg^{2+} , and HCO_3^- in the groundwater are mainly derived from carbonate mineral dissolution; ③ The hydrochemical composition of the river water and groundwater is notably affected by ion exchange, but this was not observed in the marsh water. Furthermore, SO_4^{2-} and NO_3^- are affected by human activity. During the dry season, the river and marsh water are affected by evaporite salt rock dissolution, evaporation, and human effects, while in wet season, river water is mainly affected by carbonate dissolution and human activities. These observations demonstrate how that hydrochemical composition of this wetland is controlled by a combination of natural factors and human activities.

Key words: Qilihai wetland; hydrochemistry; ion sources; controlling factors

水化学是水体在循环过程中与周围环境长期相互作用的结果, 对其所流经的环境具有指示意义, 如可以反映岩石风化和人为活动的影响^[1-3]。水体中的主要离子组成是水化学性质的重要方面, 可识别控制该水体化学组成的因素。地下水和地表水中水化学组分的形成与其补给、径流、周边环境等多种因素有关, 充分利用水化学分析可以揭示地下水和地表水的形成、演化特征, 以及地表水和地下水的转化关系^[4,5]。

近年来, 国内外各学者结合地质背景、气候条件和人类活动等, 对流域水体的水化学特征进行了大量研究, 并探讨了流域水化学的主要控制机制^[6,7]。现有研究大多针对地下水, 如对沿海地区的地下水水化学特征的分析表明, 大部分地下水不适合灌溉, 且水化学性质受海水与人类活动影响大^[8,9]; 对岩溶地下水的大量研究表明, 水化学特征主要受水-岩作用、阳离子交替吸附作用及气候影响^[10,11]。也有

学者对湿地地表水与地下水的水化学特征及离子来源进行了相关研究, 发现不同地区、不同类型的湿地水体水化学特征不同, 其离子来源与人类活动与自然因素有关^[12-14]。

七里海湿地是天津古海岸与湿地国家级自然保护区核心区的一部分, 对促进当地的水分循环、调节当地气候以及繁衍各种水生生物起着重要的作用^[15]。近年来七里海湿地水环境形势严峻, 沉积物测定分析表明七里海湿地已经受到重金属轻度污染^[16]; 七里海沼泽水的水质为Ⅳ类, 水质较差^[17]。而且, 强烈的人工干扰导致湿地水生植物群落多样

收稿日期: 2020-05-22; 修订日期: 2020-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971037); 天津市应用基础与前沿技术研究项目(15JCQNJC44200)

作者简介: 何明霞(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水循环与水环境, E-mail: 2597483236@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangbing@tjnu.edu.cn

性处于较低水平^[18],进而影响湿地的湿地系统。由于受人类活动及自然因素(蒸发作用)的影响^[19],七里海面临着湿地面积日益萎缩,湿地水质变差,生态服务功能下降的问题。因此系统有效地分析七里海湿地的水化学特征并甄别其影响因素,是湿地水环境改善和管理的基础。

本研究于 2016 ~ 2018 年采集潮白新河、蓟运河及永定新河河水、七里海湿地沼泽水以及周边的地下水,测定水化学中的主要阴阳离子组成,采用描述性统计分析、Piper 三线图、Gibbs 图和主成分分析方法对各水体的水化学进行分析,研究水化学特征的动态变化,分析主要离子来源及影响因素,探讨地质岩性、人为活动等对水化学的影响,成果可深化认识湿地水化学时空特征,可对七里海湿地或滨海地区湿地的水环境评价等提供依据。

1 研究区概况

七里海湿地(39°16'N ~ 39°19'N, 117°27'E ~

117°38'E)地处天津市宁河区西南部,位于国家自然保护区内,是一个半封闭式潟湖,湿地水靠外来水补充。七里海湿地地表径流有潮白新河、蓟运河和永定新,总面积约为 200 km²,距离渤海湾约 60 km。七里海湿地气候属于暖温带半干旱湿润季风气候,全年的蒸发量高达 1 800 mm,年降水量约为 500 ~ 600 mm,集中在 6 ~ 8 月,年平均气温为 11.2℃。七里海是天津非常重要的水产品养殖基地之一,受人类活动影响,七里海湿地面积不断减少,水体受到严重污染^[15,19]。

研究区河水流向为从山区向海洋,即由西北向东南(图 1),途经七里海湿地,汇入渤海湾。研究区水文地质剖面如图 2 所示,该地区第四系含水岩组属于松散岩类,孔隙含水层分布较广,且在水平和垂向上岩相变化大。根据埋藏条件、水质和开发状况等,将孔隙水划分为 4 个含水层,第 I 含水层属于浅层地下水系统,第 II ~ IV 含水层属深层地下水系统,地下水总体流向为由西向东。

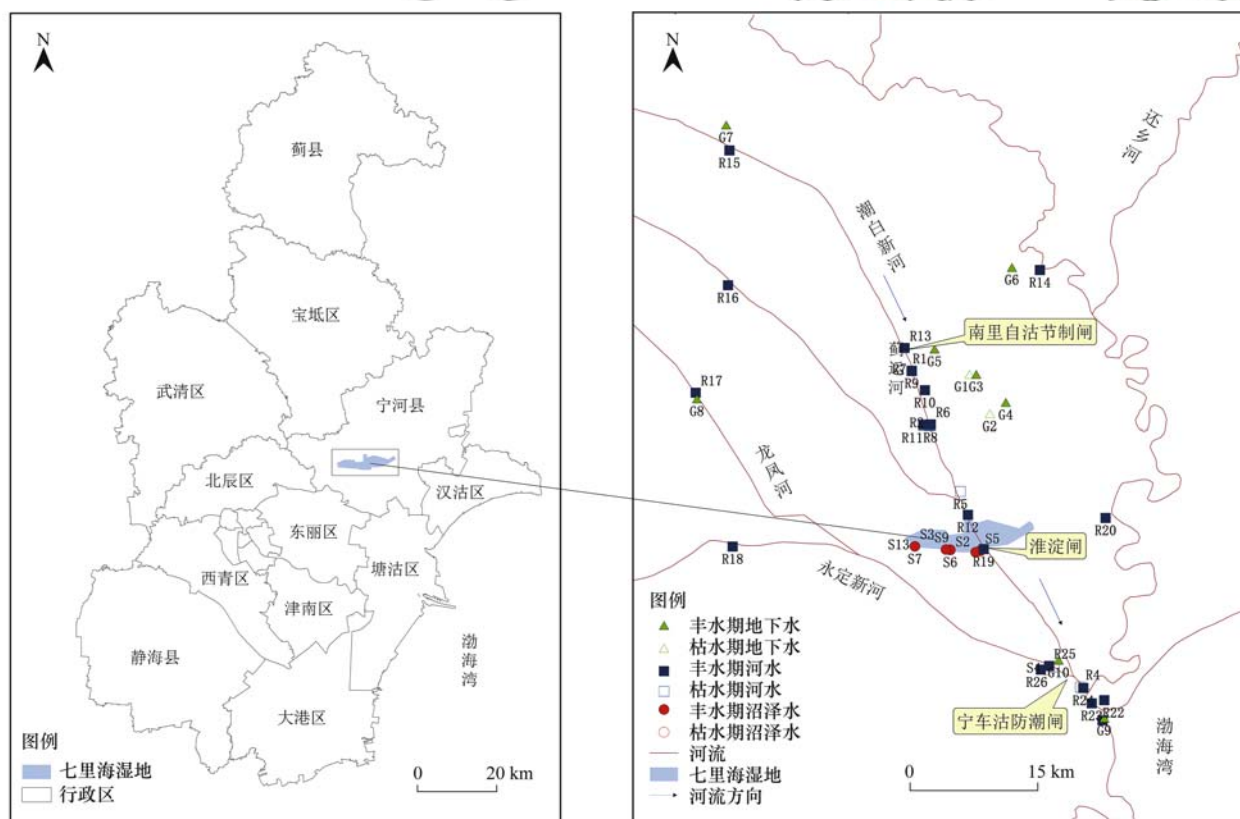


图 1 七里海湿地位置及采样点分布

Fig. 1 Location of the Qilihai wetland and distribution of sampling sites

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

本次采样时间为 2016 ~ 2018 年的枯水期(4 月)和丰水期(10 月),分别采集河水样品 26 个(R1 ~ R26)、沼泽水样 13 个(S1 ~ S13)以及地下水样

10 个(G1 ~ G10, 见图 1)。其中河水采样点布设于潮白新河上游和下游、永定新河及蓟运河,沼泽水采集于七里海湿地,地下水采集于七里海湿地周边的农业灌溉区和农村生活水井,除采样点 G7 和 G8(第 II 含水层)外,其余地下水采样点位于第 IV 含水层,属于深层地下水系统。在丰水期与枯水期,丰水

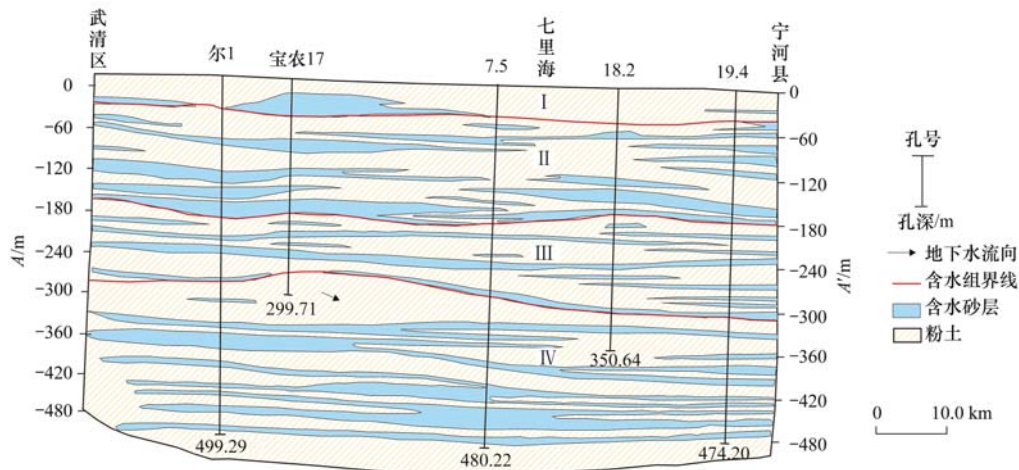
图2 研究区水文地质剖面^[20]

Fig. 2 Hydrogeological cross-section profile of the study area

期河水的采样点位置与枯水期相近,沼泽水采样点位置与枯水期几乎相同.地下水采样点位于河水采样点附近,其中枯水期地下水采样点位于潮白新河上游附近.

用GPS(Garmin Oregon 550)测定采样点的经纬度;通过多参数水质分析仪(YSI)对电导率(EC)、总溶解性固体含量(TDS)和pH值进行现场测定;用于测定阴阳离子的水样采集后进行密封,装入聚乙烯瓶中,在天津市水资源与水环境重点实验室进行测定.用稀硫酸-甲基橙滴定法测定 HCO_3^- 离子的含量,测定精度为1%.在测定阴阳离子之前,先用 $0.2\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤水样,然后稀释.水样中的主要阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+),用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Perkin-Elmer Optima 8300DV)测定,采用离子色谱仪(ICS-600, Dionex)测定主要阴离子(SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 NO_3^-),绝大多数水样的阴阳离子测试误差在5%以内.

2.2 数据分析方法

对各水体参数进行描述性统计分析,讨论研究区水化学特征和年际变化特征.运用ArcGis制作采样点分布图,利用AquaChem软件制作Piper图阐明水化学类型,通过Origin软件绘制Gibbs模型图、离子比值分析以及主成分分析法定性探讨各水体离子主要来源及控制因素.

3 结果与讨论

3.1 水化学组成特征

七里海湿地不同类型水体在不同水期的化学参数统计见表1.研究区各水体pH值介于7.7~8.9之间,平均值为8.4%,87.7%的水样为碱性水.河水、沼泽水和地下水的电导率取值范围分别为:

562~4220、1115~2910和373~1387 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 水体阳离子以 Na^+ 为主,占阳离子总质量浓度的80.7%,阴离子以 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,分别占阴离子总质量浓度的44.5%、31.1%和20.8%.不同类型水体阳离子的质量浓度大小依次为 $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$,阴离子的质量浓度大小顺序为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$.沼泽水的 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的质量浓度明显高于河水与地下水,这可能与水面蒸发浓缩作用和水体的滞留效应有关^[21].

丰水期水库水的电导率最高,枯水期河水的电导率最高,可能是因为丰水期雨量大,河水流动性大,沼泽水受蒸发的影响导致电导率较高^[22].地下水各离子的质量浓度受水期影响小,丰水期河水、沼泽水各离子质量浓度标准偏差较枯水期大.枯水期河水的阴离子质量浓度高低顺序为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$,丰水期河水阴离子质量浓度的高低顺序为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$.大部分河水的 Na^+ 、 HCO_3^- 和 Cl^- 的质量浓度比在枯水期低,除 HCO_3^- 外,沼泽水其他离子的质量浓度丰水期明显低于枯水期,这可能是由丰水期降雨量增加产生的稀释作用所致^[23].

3.2 水化学类型

Piper三线图直观反映了水体离子的组成情况,用来分析研究水化学组成特征(图3).研究区水样中阳离子主要为 Na^+ .河水阴离子以 Cl^- 和 HCO_3^- 为主,分别占阴离子总质量浓度的47.8%、25.3%.永定新河与潮白新河汇合后(宁车沽防潮闸后),河水的水化学类型为Cl-Na型,枯水期河水水化学类型为Cl- SO_4 -Na型,丰水期河水水化学类型复杂,以 HCO_3^- ·Cl-Na·Mg型和Cl- SO_4 -Na型为主.汇合后的河水采样点靠近渤海湾,各离子组分与沼泽水相近,

表 1 不同水体的描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of the different water bodies

时期	类型	指标	pH	EC / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	TDS / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Ca^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mg^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Na^{+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	K^{+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	HCO_3^{-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SO_4^{2-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cl^{-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^{-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
枯水期	河水 ($n=6$)	最大值	9.0	4 220	1 474	35.4	21.8	563.7	16.3	360.3	196.5	659.4	24.2
		最小值	8.3	1 121	417.7	11.7	5.5	124.5	6.8	0.6	93.2	150.7	13.6
		均值	8.6	2 316	890.2	27.9	14.1	294.3	10.5	98.8	152.2	371.5	19.7
		标准差	0.2	1 203	425.1	8.9	6.3	175.2	3.7	130.7	32.7	210.8	3.6
	沼泽水 ($n=6$)	最大值	9.2	2 910	1 226.2	32.4	20.9	402.0	13.7	53.7	234.9	511.9	24.8
		最小值	8.5	1 355	532.0	14.3	7.1	167.8	8.7	7.9	114.3	193.2	20.46
		均值	8.9	2 156	910.6	20.8	13.8	291.1	10.8	32.6	181.9	370.1	22.01
		标准差	0.2	576	253.5	5.6	5.8	85.7	1.9	19.8	44.9	114.7	1.4
	地下水 ($n=2$)	最大值	8.3	455	135.5	9.1	1.1	78.5	0.8	205.6	14.9	23.0	4.34
		最小值	8.1	435	125.2	8.3	0.7	78.2	0.2	175.1	5.3	14.2	4.32
		均值	8.2	445	130.4	8.7	0.9	78.4	0.5	190.4	10.1	18.6	4.33
		标准差	0.1	10	5.2	0.4	0.2	0.2	0.3	15.3	4.8	4.4	0.01
丰水期	河水 ($n=20$)	最大值	10.0	2120	1266.0	64.7	61.2	317.9	19.7	327.1	179.6	469.6	59.7
		最小值	6.5	562	289.9	17.8	2.6	72.6	5.3	0	68.7	84.9	14.3
		均值	8.5	1136	613.5	43.6	30.0	138.6	10.5	192.2	109.1	179.5	28.5
		标准差	1.0	385	288.1	15.7	19.9	73.8	4.7	147.8	33.3	110.5	11.9
	沼泽水 ($n=7$)	最大值	8.6	2370	1354.7	47.8	69.5	374.5	26.0	426.9	160.9	505.4	27.9
		最小值	6.2	1115	400.4	14.3	3.4	129.1	6.2	27.5	82.6	149.6	10.5
		均值	7.7	1663	728.2	21.4	15.3	230.9	11.2	100.5	121.8	290.7	16.5
		标准差	0.9	471	319.8	11.1	22.3	88.8	6.2	134.3	29.9	128.0	5.4
	地下水 ($n=8$)	最大值	10.3	1387	598.4	43.5	23.4	246.3	2.0	468.2	64.8	183.5	27.6
		最小值	6.9	373	129.5	5.8	0.6	19.2	0.2	171.6	3.2	11.1	6.2
		均值	8.5	628	252.3	21.1	9.4	102.4	1.1	272.9	20.2	42.2	13.7
		标准差	0.9	314	143.8	13.4	8.2	64.3	0.6	92.7	17.9	54.0	6.3

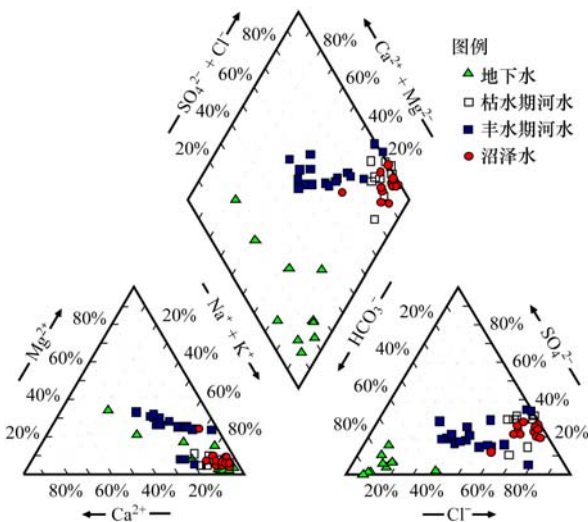


图 3 七里海湿地不同类型水体的水化学 Piper 图
Fig. 3 Piper diagram for the chemical composition of the Qilihai wetland

河水从汇合前到汇合后, Cl^{-} 在阴离子中的比例从 38.8% 升高到 40%, HCO_3^{-} 的比例从 45.0% 下降到 7.5%。沼泽水的水化学组分较为集中, 阴离子以 Cl^{-} 和 SO_4^{2-} 为主, 分别占阴离子总质量浓度的 58.2%、26.7%, 其水化学类型都为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型。地下水阴离子以 HCO_3^{-} 为主, 占阴离子总质量浓度的 80.9%, 水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型和

$\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型。

3.3 河水、沼泽水与周边地下水的转化关系

通过对河水、沼泽水和周边地下水的水化学组成进行分析, 发现七里海湿地各水体之间有明显的差异性, 表明水体之间存在转化关系。基于收集的数据资料, 本次以研究区水文地质条件为基础, 结合采样点的位置分布、水化学数据, 对河水、沼泽水和地下水间的转化关系进行定性分析。电导率反映了水体离子强度的大小, 在流域水循环过程中可以指示水体滞留时间和径流途径, 是一种定性确定地表水与地下水转化关系的一种快速方法^[24]。

七里海湿地为半封闭式潟湖, 靠外来水进行补充, 地表径流以潮白新河为主。湿地附近采集的河水(R12 和 R19) 的电导率与各离子浓度值处于沼泽水与潮白新河上游河水之间, 表明河水与沼泽水体进行了交换, 潮白新河河水对沼泽水进行了补充。沼泽水电导率高于潮白新河上游河水与地下水, 这可能与水面蒸发浓缩作用和水体滞留效应有关^[22]。G7 和 G8 为丰水期浅层地下水, 采样点所处地质环境为粉砂土, 其电导率值与同时期附近河水大致相同, 表明浅层地下水与河水存在密切的水力联系^[25]。

河水与周边地下水之间的转化关系也可以通过

电导率空间变化特征来定性指示. 南里自洁节制闸将潮白新河上游来水蓄存, 使节制闸下游水量减少. 关闭的防潮闸阻断了潮白新河向永定新河的汇入, 使下游河水的电导率比上游大. 研究河段内河水的电导率为 $797 \sim 2\,120 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 河流附近地下水电导率变化范围在 $393 \sim 736 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间, 分析其沿程变化可以看出 (图 4), 河水与周围地下水的变化趋势保持一致, 从南里自洁节制闸到湿地间的河段内, 河水周围地下水电导率值缓慢升高, 湿地到宁车沽防潮闸内地下水电导率迅速升高, 可能是由于受到其两侧高电导率值的河水的混合, 河水向地下水发生了大量的转化才导致了地下水电导率的迅速升高.

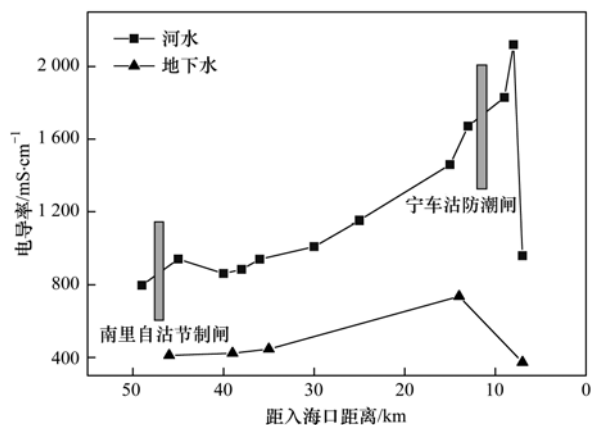


图 4 河水和地下水的电导率与距入海口距离的关系

Fig. 4 Relationship between the electrical conductivity of river water and groundwater

3.4 水体离子来源及控制因素分析

3.4.1 Gibbs 分析

Gibbs 图将影响天然水化学成分的因素分为岩石风化控制型、大气降水控制型、蒸发结晶控制型这 3 种, 通过 TDS 与 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 和 $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 的关系可以定性判断水化学组成来源^[26]. 以岩石风化作用为主导因素的样点分布在 Gibbs 图中部偏左侧, 受大气降水作用控制的样点分布在右

下角, 受蒸发结晶作用控制的样点分布在右上角^[27].

由研究区各水体的水化学 Gibbs 图可知 (图 5), 研究区各样点大多落在蒸发结晶作用带, 少数处于岩石风化作用带, 且都远离大气降水控制区域, 说明各水体化学组成主要受岩石风化作用与蒸发结晶作用控制, 且蒸发结晶作用对水化学离子组成起主导作用, 而受大气降水作用影响不大. 七里海研究区年降水量少, 降水对本地区地表水离子的影响不大, 这与 Gibbs 图中各样点均远离大气降水控制区相一致.

地下水的 TDS 均值为 $227 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 离子来源与岩石风化相关. 沼泽水 TDS 值较高, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值在 $0.7 \sim 1$ 之间, $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 $0.8 \sim 1$ 之间, 除靠近潮白新河的 S13 位于岩石风化与蒸发结晶区中间外, 沼泽水各样点分布集中, 主要落在 Gibbs 模型上端, 表明离子主要受蒸发作用明显. 河水的 $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 比值在 $0.2 \sim 1$ 之间, $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 比值在 $0.5 \sim 1$ 之间, 各样点散布于 Gibbs 图中上方, 主要处于岩石风化区与蒸发结晶区. 其中, 枯水期河水 TDS 均值为 $890 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 均值为 0.86 , $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值为 0.89 , 样点主要分布在蒸发结晶区; 丰水期河水 TDS 均值为 $613 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{Cl}^-/(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ 均值为 0.54 , $\text{Na}^+/(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ 均值为 0.75 , 样点落在岩石风化区与蒸发结晶区之间, 说明丰水期河水主要受岩石风化作用和蒸发作用共同影响, 枯水期河水较丰水期河水受到的蒸发作用更强.

3.4.2 岩石化学风化过程

不同岩石的风化会产生不同的离子, 利用 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 的关系可以揭示各离子是来源于何种矿物的溶解^[28]. 来自硅酸盐岩风化产生的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值分别为

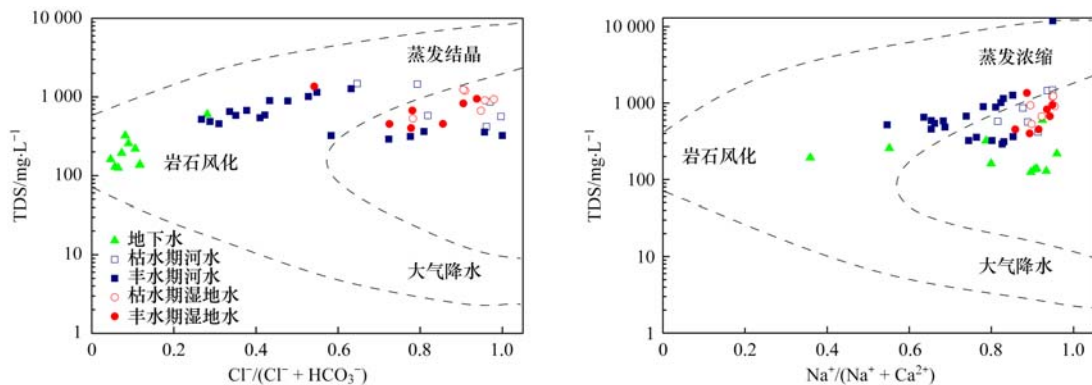


图 5 七里海湿地不同类型水体的 Gibbs 图

Fig. 5 Gibbs diagram of in the Qilihai wetland waters

0.35 ± 0.15 和 0.24 ± 0.12 , 碳酸盐岩风化产生的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 摩尔浓度比值分别为 50 ± 20 和 20 ± 8 , 来自蒸发盐岩风化产生的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 摩尔浓度比值分别为 0.17 ± 0.09 和 0.02 ± 0.01 [29]。七里海湿地河水、沼泽水、地下水水样点落在蒸发盐岩和碳酸盐岩区的中间(图 6), 表明河水、沼泽水、地下水受碳酸盐岩风化和蒸发盐岩风化等水岩相互作用的影响, 其中以蒸发盐岩风化作用为主。下面运用离子比值具体分析主要离子来源。

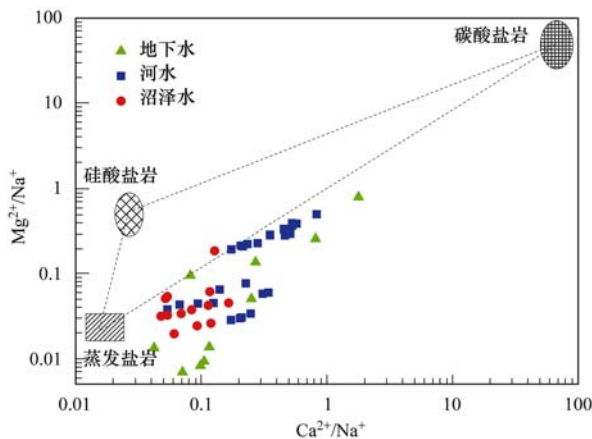


图 6 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 与 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$ 的关系

Fig. 6 Relationship between $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^{+}$ and $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^{+}$

利用 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 与 Cl^{-} 的比值关系可判断水体中的 Na^{+} 与 K^{+} 的主要来源 [30]。蒸发盐岩溶解产生 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ 与 Cl^{-} 的比值为 1, 而硅酸盐岩风化产生的 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\text{Cl}^{-} > 1$ 。图 7(a) 中, 研究区各水体样点主要分布于 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\text{Cl}^{-} = 1$ 比值线附近偏右侧, 且各样点 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\text{Cl}^{-}$ 的平均值都大于大气降水和海水比值 [$(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})/\text{Cl}^{-} = 0.86$], 说明七里海湿地水体受大气降水的影响小, Na^{+} 、 K^{+} 主要来源为蒸发盐岩溶解或蒸发浓缩的影响。

图 7(b) 显示了 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})$ 与 HCO_3^{-} 的关系, 据此可以判断蒸发盐岩和碳酸盐岩风化对离子的贡献程度, 当 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})/\text{HCO}_3^{-} > 1$ 时, 水体中化学成分主要来自蒸发盐岩的溶解, 反之来自碳酸盐的溶解 [31]。由图 4(b) 可见, 河水与沼泽水采样点落在 $(\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-})/\text{HCO}_3^{-} = 1$ 的上方, 说明蒸发盐岩(石膏和 NaCl 等)的溶解对七里海河水、沼泽水的水化学形成起主要作用; 地下水采样点位于 1:1 直线下侧, 说明地下水以碳酸盐岩的溶解为主。

碳酸与硫酸均广泛参与了自然界岩石的风化过程, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^{-} 的当量浓度比值可以反映碳酸盐岩溶解的特征 [32]。若 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^{-} 的当量比为 1, 说明仅碳酸盐岩参与溶解。图

7(c) 中, 地下水、河水的大部分样点落在 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^{-} = 1$ 比值线左侧, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 当量浓度大于 HCO_3^{-} 的当量浓度, 表明地下水、河水除了碳酸盐岩(方解石、白云石等)的风化溶解, 还有其他含 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 的矿物参与溶解。少部分沼泽水样点分布于比值线右侧, 可知沼泽水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的来源部分为碳酸盐岩的风化溶解。图 7(d) 显示了 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 $(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-})$ 的关系, 其中各水样点分布于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-}) = 1$ 下方, 即主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 的毫克当量浓度与主要阴离子 $\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-}$ 的毫克当量浓度不平衡, SO_4^{2-} 与部分 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 是同源的, 但 SO_4^{2-} 存在过剩情况, 可能有其它来源的 SO_4^{2-} 存在。说明蒸发盐岩(石膏)的溶解参与了水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的形成, 但除了蒸发岩盐溶解作用还有其他作用在影响水中主要离子成分。

3.4.3 阳离子交替吸附作用

图 7(e) 在图 7(d) 的基础上加入了 Na^{+} 与 Cl^{-} , 各水体主要阳离子 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+}$ 与主要阴离子 $\text{HCO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^{-}$ 的毫克当量浓度基本平衡, 线性关系式为 $y = 0.984x + 0.019$, 线性相关系数为 0.984, 表明研究区水体存在阳离子交换作用。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与 Na^{+} 、 K^{+} 之间的交换是最为常见的阳离子交换过程, 通常用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^{-})$ 与 $(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+} - \text{Cl}^{-})$ 的比值表明由阳离子交换吸附作用导致的各阳离子 (Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 和 K^{+}) 的含量变化 [33]。当水体中的阳离子发生过交换吸附作用, 则 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^{-})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+} - \text{Cl}^{-}) \approx -1$, 图 7(f) 中的河水分布于 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^{-})/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+} - \text{Cl}^{-}) = -1$ 比值线附近, 关系式为 $y = -0.965x + 0.754$, 比值线性相关系数为 -0.965 , 相关性为 $R^2 = 0.985$, 有较强的负相关关系; 地下水关系式为 $y = -1.024x - 0.482$, 相关性为 0.876, 说明河水和地下水水化学形成存在阳离子交换作用; 沼泽水各样点稍偏离 -1 比值线, 阳离子交换作用不明显。

3.4.4 人为输入

人为活动的产物会对水体水化学性质产生影响, 其中以农业活动和工业活动影响最为显著。水体中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^{-} 浓度能够在一定程度上反映人为活动对水体质量的影响 [34, 35]。由表 1 可以看出, NO_3^{-} 平均值的高低顺序为: 河水 > 沼泽水 > 地下水, 依据国家饮用水标准, NO_3^{-} 质量浓度限值为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 3 种水体的 NO_3^{-} 均超标。 SO_4^{2-} 平均值从高到低依次是: 沼泽水 > 河水 > 地下水, 分析发现

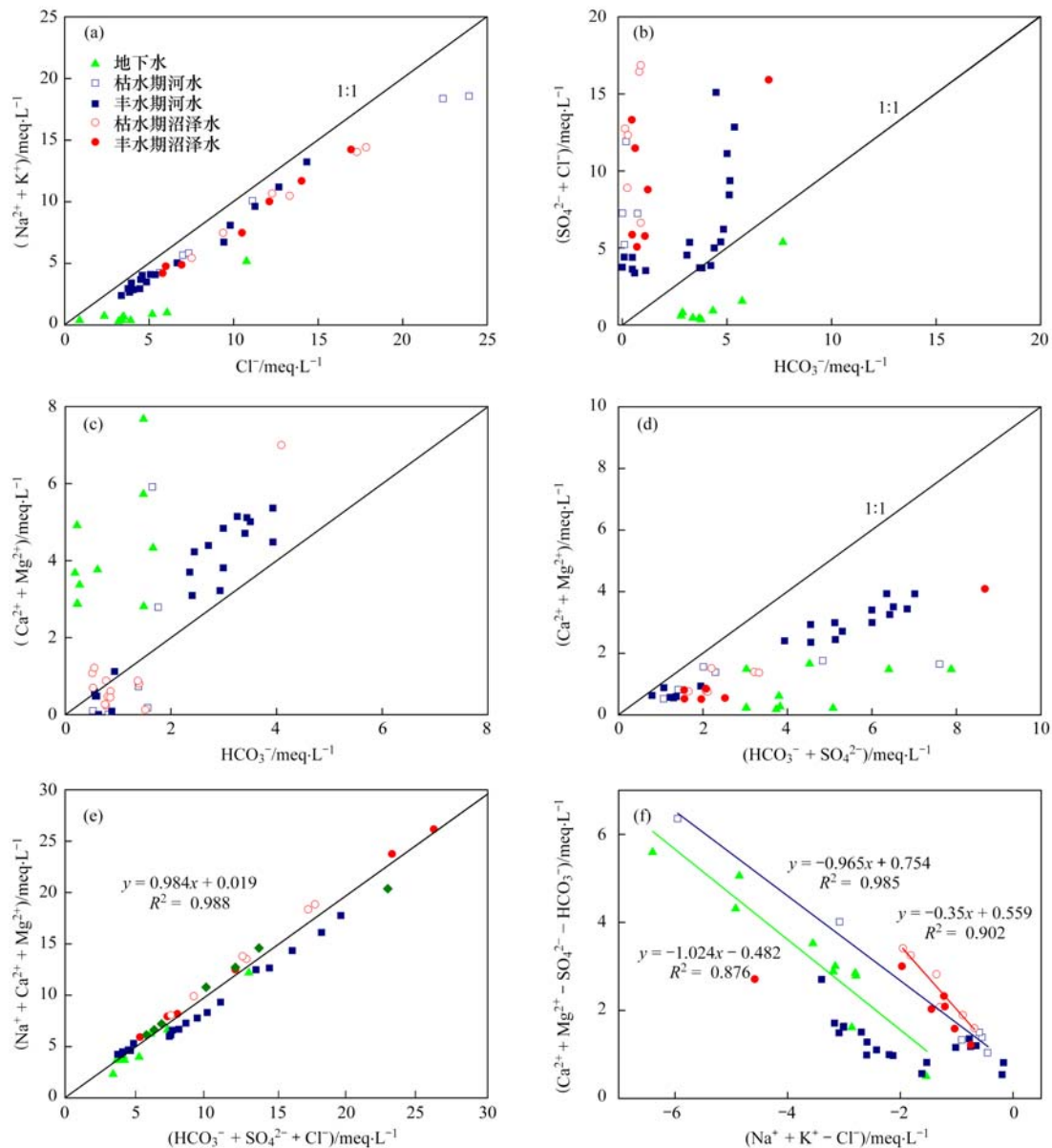
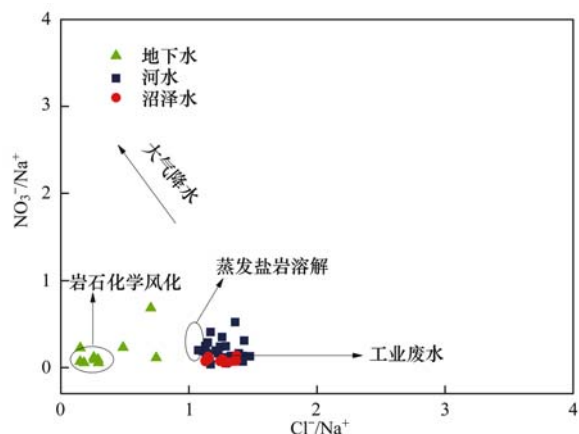


图7 各离子比值关系

Fig. 7 Ion ratio relationships

沼泽水体 SO_4^{2-} 含量较高. 通过现场调查,发现湿地周围有大量的养殖基地,如七里海双扶水产养殖场、腾龙畜禽养殖有限公司、宏旺畜禽养殖合作社等,且水产个体养殖户较多,养殖品种主要为基围虾、河蟹、螃蟹等,排放的污染物加剧了水质污染程度. 研究区水样部分落在 Gibbs 分布模型外(图5),也说明七里海水体的水化学组分受到一定人类活动等的影响.

硝酸盐一定程度上可以说明人为输入对水化学的影响过程,其中利用 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 的关系来指示人为活动输入对水体硝酸盐组成的影响^[36](图8). 研究区地下水分布于 Cl^-/Na^+ 摩尔浓度比值 0 ~ 1 和 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 摩尔浓度比值 0 ~ 0.5 的范围内,可知地下水受岩石化学风化作用影响较

图8 $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ 与 Cl^-/Na^+ 摩尔浓度比值关系Fig. 8 Plots of $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ and Cl^-/Na^+ (molar) ratios

大. 河水与沼泽水 Cl^-/Na^+ 摩尔浓度比值超过 1,

与蒸发盐岩溶解和工业废水输入有关。经实际调查发现,研究区有许多工业园区,如九原工业园区、大海北工业园区等,排放大量工业废水,且开口渔港有近千艘渔船停泊,排放的含油污水加剧湿地水质污染。除此之外,七里海周边的芦苇沼泽湿地近年来逐步被改造成水稻田,水稻田作业过程中化肥和农药的施用增多,这些化肥和农药在降雨和排水时注入七里海,对水体造成污染。研究区水体硝酸盐的具体来源还需进一步借助稳定氮和氧同位素来识别,从而明确人为输入对研究区内水体离子的影响过程^[37]。

3.4.5 主成分分析

为进一步探讨七里海水体主要离子组成在不同时期的控制因素,利用主要离子进行主成分分析(PCA),得到两个主成分,方差累积贡献率为

84.3% [图 9(a)]。第一主成分方差贡献率为 60.2%,与 Cl^- 、 Na^+ 、TDS、 K^+ 和 SO_4^{2-} 相关性最大,结合 Gibbs 图,推测第一主成分与蒸发盐岩溶解、蒸发浓缩作用以及人为输入有关;第二主成分方差贡献率为 24.1%,与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和 NO_3^- 相关性最大,说明碳酸盐岩的溶解与人为活动贡献较大。

不同类型水体在 PC1 和 PC2 上的得分情况如图 9(b) 所示,沼泽水与枯水期河水受 PC1 的影响大,即蒸发盐岩溶解、蒸发作用以及人为输入;部分丰水期河水和地下水受 PC2 影响较大,即碳酸盐岩溶解与人为活动;部分丰水期河水分布在 PC1 与 PC2 上,说明了受蒸发盐岩、碳酸盐岩溶解、蒸发作用和人为活动对水体的共同影响,这与上述 Gibbs 模型分析结果与离子比值分析结果具有一致性。

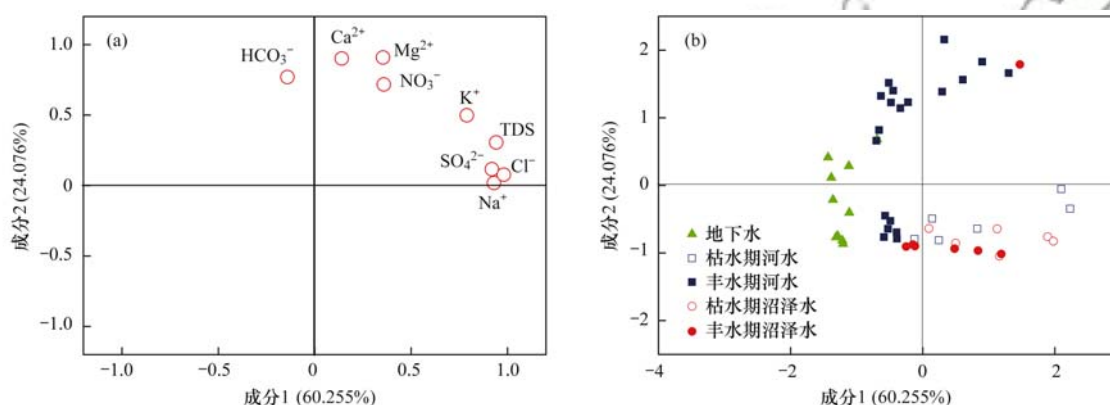


图 9 各水体主要离子的主成分分析

Fig. 9 Principal component analysis of major water ions

4 结论

(1) 七里海各水体中阳离子以 Na^+ 为主,阴离子以 Cl^- 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 为主,丰水期水库水的电导率最高,枯水期河水的电导率最高。枯水期河水水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型,丰水期河水水化学类型复杂,以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$ 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 为主。沼泽水水化学类型为 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型。地下水阴离子以 HCO_3^- 为主,水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型。从 2016~2018 年,流域阴离子浓度的变化幅度大于阳离子, HCO_3^- 浓度明显增加,其余离子变化不明显。

(2) 研究区各水体远离 Gibbs 图大气降水控制区,地下水主要离子来源于岩石风化,沼泽水与枯水期河水受蒸发作用强烈,丰水期河水受岩石风化作用与蒸发结晶作用的共同影响。

(3) 各水体离子组分受大气降水影响小, Na^+ 和 K^+ 来源为蒸发盐岩溶解;河水、沼泽水各离子组分主要受蒸发盐岩溶解作用;除蒸发盐岩溶解作用

外,河水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 部分来源于碳酸盐溶解和其它含 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 的矿物溶解,沼泽水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 部分来源于碳酸盐岩的溶解;地下水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩溶解,少部分来源于蒸发盐岩溶解;河水和地下水的水化学组分受阳离子交换作用明显,而沼泽水阳离子交换作用不明显;各水体的 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 受一定人类活动的输入。

(4) 枯水期河水和沼泽水受蒸发岩岩溶解、蒸发作用及人为输入影响大,丰水期河水大部分受碳酸盐溶解及人为活动影响,少部分受蒸发盐岩、碳酸盐岩溶解及蒸发作用的共同影响。研究区各水体水质较差,需减少人类活动的离子输入,增加补水量,降低水体的离子浓度,改善七里海湿地的水环境。

参考文献:

- [1] 寇永朝, 华琨, 李洲, 等. 泾河支流地表地下水的水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3142-3149.
- Kou Y C, Hua K, Li Z, et al. Major ionic features and their

- possible controls in the surface water and groundwater of the Jinghe River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3142-3149.
- [2] Slukovskii Z, Dauvalter V, Guzeva A, *et al.* The hydrochemistry and recent sediment geochemistry of small lakes of Murmansk, Arctic Zone of Russia[J]. *Water*, 2020, **12**(4), doi: 10.3390/w12041130.
- [3] 张清华, 孙平安, 何师意, 等. 西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
Zhang Q H, Sun P A, He S Y, *et al.* Fate and origin of major ions in river water in the Lhasa River Basin, Tibet [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1065-1075.
- [4] 吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 等. 贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1565-1572.
Lü J M, An Y L, Wu Q X, *et al.* Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang river basin at wet season in Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(5): 1565-1572.
- [5] 高业新, 王贵玲, 刘花台, 等. 石羊河流域的水化学特征及其地表水与地下水的相互转化[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, **20**(6): 84-88.
Gao Y X, Wang G L, Liu H T, *et al.* Analysis the interaction between the unconfined groundwater and surface water based on the chemical information along the Shiyang River, Northwestern China[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, **20**(6): 84-88.
- [6] 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力(阿不都外力), 等. 巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 173-182.
Shen B B, Wu J L, Jilili A, *et al.* Hydrochemical and isotopic characteristics of the lake Balkhash catchment, Kazakhstan[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 173-182.
- [7] 周嘉欣, 丁永建, 曾国雄, 等. 疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
Zhou J X, Ding Y J, Zeng G X, *et al.* Major ion chemistry of surface water in the upper reach of Shule River Basin and the possible controls [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3315-3324.
- [8] Bahar M M, Reza M S. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater in a coastal area of Southwest Bangladesh[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **61**(5): 1065-1073.
- [9] Zhang Y H, Xu M, Li X, *et al.* Hydrochemical characteristics and multivariate statistical analysis of natural water system: a case study in Kangding County, southwestern China[J]. *Water*, 2018, **10**(1), doi: 10.3390/w10010080.
- [10] 唐金平, 张强, 胡漾, 等. 巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4543-4552.
Tang J P, Zhang Q, Hu Y, *et al.* Hydrochemical characteristics of karst groundwater in the mountains of northern Bazhong City, China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4543-4552.
- [11] 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.
- [12] Zhao G, Li W, Li F, *et al.* Hydrochemistry of waters in snowpacks, lakes and streams of Mt. Dagu, eastern of Tibet Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **610-611**: 641-650.
- [13] Prasanna M V, Chidambaram S, Gireesh T V, *et al.* A study on hydrochemical characteristics of surface and sub-surface water in and around Perumal Lake, Cuddalore district, Tamil Nadu, South India[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **63**(1): 31-47.
- [14] 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
Fang N, Liu L L, You Q H, *et al.* Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang lake wetland [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5348-5357.
- [15] 蔡为民, 杨世媛, 汪苏燕, 等. 不同土地利用方式下的七里海湿地临界评价研究[J]. *地理科学*, 2012, **32**(4): 499-505.
Cai W M, Yang S Y, Wang S Y, *et al.* Assessment on critical criteria of Qilihai wetland for different exploitation [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, **32**(4): 499-505.
- [16] 乔吉果, 龙江平, 詹华明, 等. 天津市七里海滨海湿地沉积物重金属元素的空间分布特征[J]. *湿地科学与管理*, 2013, **9**(4): 46-50.
Qiao J G, Long J P, Zhan H M, *et al.* Patterns of spatial distribution of heavy metals in the sediments of Qilihai-wetland in Tianjin[J]. *Wetland Science & Management*, 2013, **9**(4): 46-50.
- [17] 刘双爽, 陈诗越, 姚敏, 等. 天津地区团泊洼水库和七里海沼泽水质研究[J]. *湿地科学*, 2014, **12**(2): 257-262.
Liu S S, Chen S Y, Yao M, *et al.* Water quality of Tuanpowa reservoir and Qilihai marshes in Tianjin area [J]. *Wetland Science*, 2014, **12**(2): 257-262.
- [18] 贺梦璇, 李洪远, 祁永, 等. 七里海古泻湖湿地植被群落分类与排序及多样性研究[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2015, **48**(3): 104-111.
He M X, Li H Y, Qi Y, *et al.* Classification and ordination of plant communities and its species diversity in Qilihai wetland [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis (Natural Science Edition)*, 2015, **48**(3): 104-111.
- [19] 张兵, 陈清, 王中良, 等. 天津七里海湿地水体的同位素和水化学特征[J]. *湿地科学*, 2016, **14**(6): 847-853.
Zhang B, Chen Q, Wang Z L, *et al.* Isotopics and hydrochemical characteristics of water in Qilihai wetlands, Tianjin[J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(6): 847-853.
- [20] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [21] 何姜毅, 张东, 赵志琦. 黄河流域河水水化学组成的时间和空间变化特征[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(5): 1390-1401.
He J Y, Zhang D, Zhao Z Q. Spatial and temporal variations in hydrochemical composition of river water in Yellow River Basin, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(5): 1390-1401.
- [22] 胡春华, 周文斌, 夏思奇. 鄱阳湖流域水化学主离子特征及其来源分析[J]. *环境化学*, 2011, **30**(9): 1620-1626.
Hu C H, Zhou W B, Xia S Q. Characteristics of major ions and the influence factors in Poyang lake catchment [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(9): 1620-1626.
- [23] Zhang J, Tsujimura M, Song X F, *et al.* Using stable isotopes and major ions to investigate the interaction between shallow and deep groundwater in Baiyangdian Lake Watershed, North China Plain[J]. *Hydrological Research Letters*, 2016, **10**(2): 67-73.

- [24] 文广超, 王文科, 段磊, 等. 基于水化学和稳定同位素定量评价巴音河流域地表水与地下水转化关系[J]. 干旱区地理, 2018, **41**(4): 734-743.
Wen G C, Wang W K, Duan L, *et al.* Quantitatively evaluating exchanging relationship between river water and groundwater in Bayin River Basin of northwest China using hydrochemistry and stable isotope[J]. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(4): 734-743.
- [25] 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 等. 基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2018, **39**(6): 2624-2631.
Kong X L, Wang S Q, Ding F, *et al.* Source of nitrate in surface water and shallow groundwater around Baiyangdian Lake area based on hydrochemical and stable isotopes[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2624-2631.
- [26] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. *Science*, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [27] Gibbs R J. Water chemistry of the Amazon River [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1972, **36**(9): 1061-1066.
- [28] Jiang L G, Yao Z J, Liu Z F, *et al.* Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **155**: 76-83.
- [29] 任孝宗, 李建刚, 刘敏, 等. 浑善达克沙地东部地区天然水体的水化学组成及其控制因素[J]. 干旱区研究, 2019, **36**(4): 791-800.
Ren X Z, Li J G, Liu M, *et al.* Hydrochemical composition of natural waters and its affecting factors in the east Hunshandak Sandy Land[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(4): 791-800.
- [30] 张旺, 王殿武, 雷坤, 等. 黄河中下游丰水期水化学特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(1): 380-386, 393.
Zhang W, Wang D W, Lei K, *et al.* Hydrochemical characteristics and impact factors in the middle and lower reaches of the Yellow River in the wet season[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, **27**(1): 380-386, 393.
- [31] 王君波, 朱立平, 鞠建廷, 等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水化学特征初步研究[J]. 地理科学, 2009, **29**(2): 288-293.
Wang J B, Zhu L P, Ju J T, *et al.* Water chemistry of eastern Nam lake area and inflowing rivers in Tibet [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, **29**(2): 288-293.
- [32] 陈晨, 高宗军, 李伟, 等. 泰莱盆地地下水化学特征及其控制因素[J]. 环境化学, 2019, **38**(6): 1339-1347.
Chen C, Gao Z J, Li W, *et al.* Characteristics and possible factors of hydrochemistry in the groundwater in Tailai basin[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(6): 1339-1347.
- [33] 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 等. 沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5428-5439.
Liu J T, Cai W T, Cao Y T, *et al.* Hydrochemical characteristics of groundwater and the origin in alluvial-proluvial fan of Qinhe River[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5428-5439.
- [34] 刘松韬, 张东, 李玉红, 等. 伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1184-1196.
Liu S T, Zhang D, Li Y H, *et al.* Water sources and factors controlling hydro-chemical compositions in the Yiluo River basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1184-1196.
- [35] 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什三角洲地下水 SO_4^{2-} 化学特征及来源[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3550-3558.
Wei X, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Chemical characteristics and sources of groundwater sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3550-3558.
- [36] 李甜甜, 李宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源[J]. 地理学报, 2007, **62**(7): 764-775.
Li T T, Ji H B, Jiang Y B, *et al.* Hydro-geochemistry and the sources of DIC in the upriver tributaries of the Ganjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62**(7): 764-775.
- [37] El Goutzi F Z J, Sebilo M, Ribstein P, *et al.* Using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values to identify sources of nitrate in karstic springs in the Paris basin (France) [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, **35**: 230-243.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)