

目次

2013~2020年天津市PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub>污染变化趋势和影响因素分析 ..... 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)

2015~2020年济南市O<sub>3</sub>污染趋势及敏感性变化分析 ..... 孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)

南京市南部地区O<sub>3</sub>污染特征、生成敏感性及传输影响分析 ..... 郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)

天津市“十三五”期间O<sub>3</sub>污染特征和驱动因子 ..... 李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)

基于随机森林的南京市PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>对减排的响应 ..... 尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)

基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化 ..... 吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓桐, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)

污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响 ..... 钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)

2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析 ..... 郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)

滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源 ..... 孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)

重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价 ..... 谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 朱丹尼, 王志恒 (4304)

衡水市桃城区浅层地下水咸化成因 ..... 何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)

吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价 ..... 白凡, 周金龙, 周殿竹, 韩双宝, 孙英 (4325)

金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性 ..... 丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇斌, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)

白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征 ..... 程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)

基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制 ..... 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中的赋存特征和行为归趋 ..... 刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)

博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价 ..... 郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)

太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价 ..... 吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)

雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价 ..... 郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)

基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析 ..... 段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)

锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价 ..... 余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)

老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价 ..... 王莹, 董爱俊, 杨建锋, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)

畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估 ..... 丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)

地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究 ..... 简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)

微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响 ..... 马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)

施加Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/桑秸秆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响 ..... 阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)

生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制 ..... 张丽, 李如霞, 何玉玺, 姚彦坡, 林大松 (4479)

不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响 ..... 李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)

椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响 ..... 侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)

生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响 ..... 冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)

改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应 ..... 陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)

改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响 ..... 由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)

化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险 ..... 赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)

污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失 ..... 张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)

化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响 ..... 谢军, 王子芳, 王莹燕, 熊子怡, 高明 (4565)

黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测 ..... 刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)

微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响 ..... 刘月, 杨树青, 张万锋, 姜帅 (4585)

高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析 ..... 姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)

土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响 ..... 李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)

中国省域碳达峰路径与政策 ..... 苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)

基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制 ..... 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 郭娜, 封强, 傅泽强 (4637)

不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析 ..... 刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘铮, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)

中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估 ..... 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)

陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟 ..... 古圳威, 刘京, 陈怡, 户新冉, 王思轶 (4666)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响 ..... 李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)

降水改变下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸 ..... 王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)

水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响 ..... 秦纪法, 张佳彭, 桑奕, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)

中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策 ..... 石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)

壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议 ..... 洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)

微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展 ..... 张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圃, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)

生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展 ..... 周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)

铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展 ..... 魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)

畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术分析 ..... 安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)

《环境科学》征订启事(4230) 《环境科学》征稿简则(4303) 信息(4506, 4678, 4741)

# 衡水市桃城区浅层地下水咸化成因

何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 保定 071051)

**摘要:** 为了解衡水市桃城区浅层咸水特征及成因, 通过分析典型钻孔易溶盐以及浅层地下水(井深 $\leq 100$  m)的水化学及氢氧稳定同位素数据, 对浅层地下水补给来源和咸化过程进行了研究. 结果表明: 研究区浅层地下水为弱碱性咸水, TDS 变化范围 176.06 ~ 17 569.65  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 钻孔全盐量为 1.830 ~ 6.509  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 易溶盐化学与浅层水化学类型相似, 均为  $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$  型和  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$  型. 不同时期的大气降水是浅层地下水的主要补给来源. 地下水中盐分主要来源于岩盐及硫酸盐矿物的溶解; 同时蒸发作用和还原环境对于地下水盐分的积累也有一定贡献, 但地下水咸化过程受到人类活动及海水入侵的影响较小.

**关键词:** 浅层地下水; 水化学; 同位素; 咸化成因; 衡水市

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4314-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202208135

## Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City

HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, WANG Yu-shan

(Center for Hydrochemistry and Environmental Geology, China Geological Survey, Baoding 071051, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics and origin of groundwater salinization in Taocheng district of Hengshui City, the recharge and salinization procession of shallow groundwater were analyzed with isotopic and geochemical data of the shallow groundwater (buried depth $\leq 100$  m) and the soluble salt in boreholes. The results showed that the shallow groundwater was weak alkaline salt water, with the total dissolved solid (TDS) in the groundwater ranging from 176.06 to 17 569.65  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and the soil total salinity in unconsolidated sediments ranging from 1.830 to 6.509  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . The hydrochemical types were mainly  $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$  and  $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$  in the shallow groundwater and the soluble salt. The main recharge resource of shallow groundwater was precipitation with different geological periods. The hydrochemical compositions of shallow groundwater mainly came from the dissolution of halite and sulfate weathering and experienced intense evaporation and the reduction environment. Meanwhile, the groundwater salinization was barely affected by human activities and seawater intrusion.

**Key words:** shallow groundwater; hydrochemistry; isotope; salinization mechanism; Hengshui City

地下水咸化研究是水文地质学的重要研究方向之一. 开展此类研究不仅可以丰富地下水形成演化方面的理论基础, 同时对于保护有限的淡水资源和有效开发利用咸水资源都具有重要的现实意义. 前人认为地下水咸化成因主要分为大陆盐化或者海水入侵两类<sup>[1]</sup>. 内陆浅层咸水的形成受地质构造运动、古气候、古沉积环境、地下水动力条件、水文地球化学作用和等多种原因影响<sup>[2-4]</sup>. Mejrj 等<sup>[5]</sup>应用水文地球化学和同位素方法研究了突尼斯斯米尼亚平原内陆含水层的地下水盐渍化过程, 揭示了该水体的盐渍化受水岩相互作用和阳离子交换作用控制. 曾邯斌等<sup>[6]</sup>以河套灌区西部为研究区, 通过水化学特征和氢氧同位素分析, 识别了区域浅层地下水的咸化过程与蒸发作用及含水层中岩盐矿物溶解作用有关. Habtemichael 等<sup>[7]</sup>通过对佛罗里达南部沿海含水层 11 个地下水水样进行分析, 发现在远离海岸线的含水层中碳酸盐类的风化溶解是盐分增长的主要因素, 但受海水入侵的含水层中阳离子交换作用控制了地下水中盐分的升高. 目前, 国内外对于沿海地区地下水咸化成因研究较多, 而针对内陆地区的浅层地下水咸化过程研究相对较少<sup>[8-11]</sup>.

衡水市位于华北中部泛滥冲积湖积平原, 地表水资源极度匮乏, 人均水资源量不足全国五分之一. 自 20 世纪 70 年代以来, 随着当地深层地下水的过渡开采引发了诸如咸水入侵淡水, 地面沉降等一系列环境地质问题<sup>[12,13]</sup>. 随着国家有关部门对于华北地区地下水超采治理工作的逐步展开, 区内浅层咸水的开发利用需求十分迫切<sup>[14]</sup>. 然而对于衡水地区浅层地下水盐份来源目前仍存在争议, 浅层咸水成因和主控因素尚不明确. 因此, 本文以衡水市桃城区为研究区, 在采集区内浅层地下水和钻孔易溶盐样品的基础上, 利用统计学分析、同位素溯源和水化学图解等方法, 识别了浅层地下水的咸化机制, 分析了浅层咸水形成的沉积环境, 以期当地咸水的合理开发利用提供科学依据.

### 1 研究区概况

研究区隶属于衡水市桃城区, 位于海河上游滏

收稿日期: 2022-08-15; 修订日期: 2022-11-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3200504); 国家基础资源调查专项(2017FY100401)

作者简介: 何锦(1980~), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为水文地球化学, E-mail: hejing007105@126.com

阳河支流流域[图 1(a)]. 地处华北平原中部冲洪积、冲湖积平原,平均海拔 15.6 m. 衡水市属于典型半干旱温带大陆性季风气候,多年平均气温 13.2℃,多年平均降雨量 545 mm,年均蒸发量 1 850 mm,其中 6~9 月占全年降水量 85%. 区内仅有滏阳河、滏阳新河和滏东排河等人工开挖排水河渠,只有在雨季有短暂积水,其他时间处于干涸或半干涸状态.

研究区受区域构造影响,自燕山运动以来沉积了数百米的第四纪地层. 根据第四纪沉积物岩性和水文地质特征,自上而下可划分为 I、II、III 和 IV

这 4 个含水层组,第 I 含水层组包含全新统及上更新统上段;第 II 含水层组相当于上更新统中下段;第 III 和第 IV 含水层组分别相当于中更新统及下更新统<sup>[15,16]</sup>. 第 I 含水层组底界埋深 50~60 m,岩性是一套河流-沼泽沉积相中细砂,咸淡水交错分布,水化学类型及成因比较复杂,第 II 含水层组底界埋深 170~180 m,岩性是一套河流冲积相为主的泥沙质松散沉积物,多数地区为咸水含水层[图 1(a)和图 2]. 根据区内地下咸水实际开发利用深度,本文将第 I 含水层和第 II 含水层上部的咸水作为研究目标.

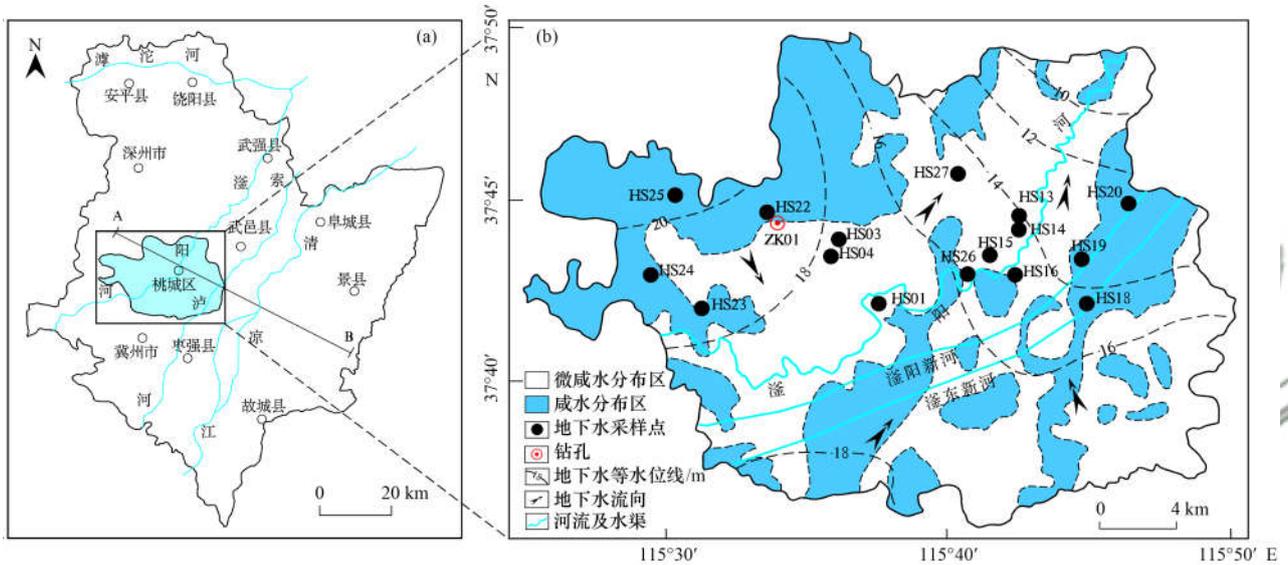
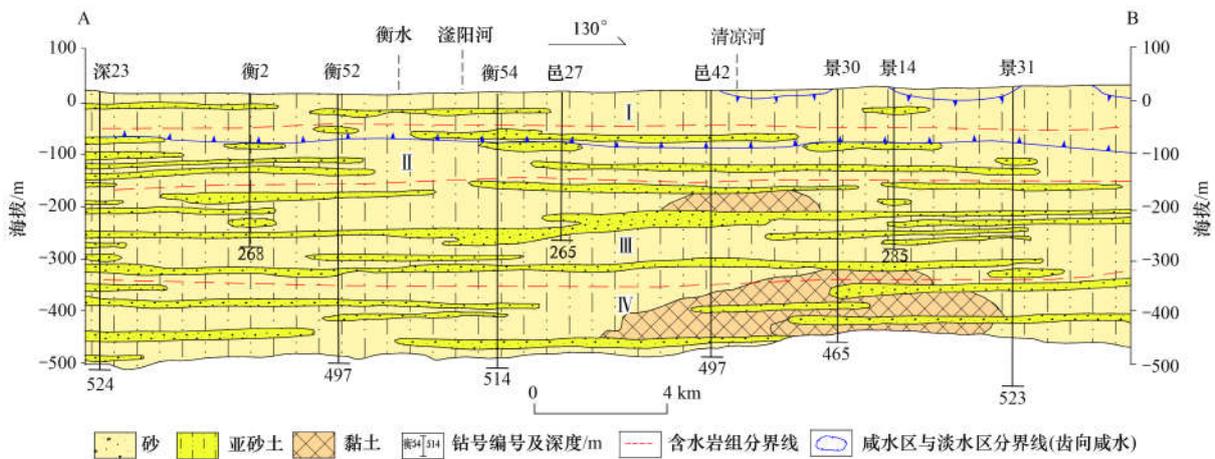


图 1 研究区地理位置及采样点分布示意

Fig. 1 Location and sampling sites in the study area



改自文献[17]

图 2 衡水市水文地质剖面

Fig. 2 Hydrogeological cross-section of transect A-B of Hengshui City

根据野外调查结果,区内浅层地下水总体上由西南向东北径流,水位埋深在 3.33~12.79 m(表 1). 因浅层地下水盐度较高,人工开采规模小,地下水动态属于降雨-入渗蒸发型(图 3),即每年 10 月

初至次年 5 月,有效降雨稀少,受蒸发作用影响地下水埋深逐渐增加,同年 6~9 月受雨季降雨影响地下水位逐渐上升,地下水埋深最小值出现在 8 月,与降雨量峰值并不同步,同时体现一定的滞后性.

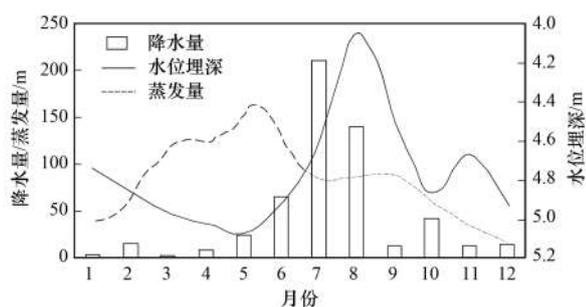


图3 研究区浅层地下水水位动态、降水量和蒸发量对比曲线

Fig. 3 Changes in groundwater regime, evaporation, and rainfall in the study area

## 2 材料与方法

2020年12月,在研究区内利用国家地下水工程监测井和民井,采集浅层地下水样品16组,采样点分布如图1(b)。地下水采样时,首先利用抽水设备排除井筒内储水,采用便携式水质测试仪(HACH sension-156, USA)现场测定水温、pH值、溶解氧、电导率、溶解性总固体等理化指标。待全部理化指标稳定后采取水样3瓶(250 mL 聚氯乙烯瓶),使用0.45 μm 滤膜过滤样品水,其中一瓶加入硝酸,酸化至pH < 2用于测试阳离子,其余2瓶不酸化原样保存,采样结束后立即用封口膜密封,带回实验室用于测试阴离子和氢氧稳定同位素。同时,在桃城区微咸水分布区施工钻孔1眼,坐标E115°22′16.35″、N37°47′23.25″,孔深100 m。每间隔5 m 采取松散沉积物样品,共采集样品21组,每组采集量为500 g,在野外自然风干、碾碎、过200目筛备用,取100 g 风干样品并以1:5的土水比制备浸提液,用于测定易溶盐常规八大离子及全盐量。

地下水的水化学样品及易溶盐浸出液测试由谱尼测试集团股份有限公司进行,其中K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>采用火焰原子吸收光谱法进行测定(contrAA300,德国耶拿),方法检测限为0.05、0.01、0.1和0.1 mg·L<sup>-1</sup>;HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>和CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>浓度采用现场滴定,方法检测限均为5.0 mg·L<sup>-1</sup>;SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和F<sup>-</sup>采用离子色谱仪分析(883,瑞士万通)进行测试分析,方法检测限分别为0.1、0.05、0.02和0.03 mg·L<sup>-1</sup>;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>采用紫外分光光度计(TU-1901,北京普析通用),方法检测限为0.002 mg·L<sup>-1</sup>;总Fe和总Mn采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(iCAP 6300,美国赛默飞世尔)分析测定,方法检测限均为0.001 mg·L<sup>-1</sup>;高锰酸盐指数采用碱性高锰酸钾氧化法测定,测定精度为0.05 mg·L<sup>-1</sup>;土壤全盐量采用计算法获得,溶解性总固体(TDS)采用烘干法测定。稳定同位素测试由中国

地质调查局水文地质环境地质中心实验室完成,D和<sup>18</sup>O采用波长扫描光强衰荡光谱技术测定,精度分别为±1.0‰和±0.1‰,数据结果采用VSMOW标准表示。

采用Excel 2007和SPSS 20进行数据整理与统计学分析。采用Phreeqc软件进行矿物饱和指数(saturation index, SI)和二氧化碳分压(pCO<sub>2</sub>)计算。采用Piper三线图、Gibbs图和离子相关指数进行水化学特征及咸水成因研究。

## 3 结果与讨论

### 3.1 地下水水化学统计特征

研究区浅层地下水水化学分析结果见表1。按照有关咸水的分类标准<sup>[18]</sup>,根据每个样品TDS值大小,将16组地下水样品分为3类:Ⅰ类为淡水及微咸水(TDS < 3 g·L<sup>-1</sup>)8个(HS03、HS04、HS13、HS14、HS15、HS16、HS26、HS27);Ⅱ类为咸水(TDS为3~10 g·L<sup>-1</sup>)7个(HS01、HS18、HS19、HS20、HS22、HS23、HS24);Ⅲ类为盐水(TDS > 10 g·L<sup>-1</sup>)1个(HS25)。总体上来看,区内各类浅层地下水pH值域为6.82~8.18,呈中性或弱碱性。阳离子方面,ρ(Na<sup>+</sup>)范围为32.85~3 520.34 mg·L<sup>-1</sup>,平均值为955.53 mg·L<sup>-1</sup>,ρ(Ca<sup>2+</sup>)和ρ(Mg<sup>2+</sup>)范围分别在3.8~807.6 mg·L<sup>-1</sup>和3.2~1 370.3 mg·L<sup>-1</sup>;阴离子方面,ρ(HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、ρ(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)和ρ(Cl<sup>-</sup>)浓度范围分别为95~1 130、35.5~5 150.0和445.43~6 480.25 mg·L<sup>-1</sup>,平均值分别为422.56、1 184.21和1 706.5 mg·L<sup>-1</sup>。同时,各类地下水的常量离子浓度随着TDS的升高逐步增加(图4),呈现明显咸化状态;除常规八大离子外,所采水样中高锰酸盐指数、F<sup>-</sup>和总Mn浓度超过地下水质量标准(GB/T 14848-2017)Ⅲ类限值的比例分别为50%、31.25%和50%,而NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>浓度均未超标;说明浅层地下水水质主要受沉积相地层中矿物溶解控制,受人类活动影响较小。

根据研究区浅层地下水Piper三线图分析(图5),各类地下水中阳离子分布相对比较集中,阴离子分布范围较广,其中Ⅰ类地下水中阳离子以Na<sup>+</sup>为主,占阳离子总量的55%~95%,阴离子方面优势离子不明显,水化学类型比较复杂,主要有HCO<sub>3</sub>·Cl-Na·Ca、SO<sub>4</sub>·Cl-Na·Mg和Cl·SO<sub>4</sub>-Na·Ca型等;Ⅱ类和Ⅲ类地下水中Na<sup>+</sup>分布相对比较集中,Mg<sup>2+</sup>含量占比与Ⅰ类地下水相比明显升高,占阳离子总量的35%~44%,阴离子以SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和Cl<sup>-</sup>为主,占阴离子总量比例在80%以上,且Cl<sup>-</sup>含量占比明显大于Ⅰ类地下水,此类水化学类型比较单一,多

表 1 研究区浅层地下水水化学指标<sup>1)</sup>

Table 1 Hydrochemical indexes of shallow groundwater from the study area

样品编号	HS03	HS04	HS13	HS14	HS15	HS16	HS26	HS27
井深/m	43	45	22	12	12	24	42	63
水位埋深/m	11.80	12.79	5.34	5.98	5.38	6.89	4.70	3.33
pH	7.84	7.62	8.03	6.87	7.45	8.18	7.73	7.43
TDS/mg·L <sup>-1</sup>	2 248.31	1 770.26	3 120.54	2 051.84	893.85	663.87	176.06	1 026.85
高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	1.74	1.65	2.92	5.52	0.95	0.57	1.23	1.60
$\rho(\text{Na}^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	729.21	475.34	949.76	362.33	193.31	216.17	32.85	253.75
$\rho(\text{K}^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.75	1.15	4.85	53.55	2.55	1.75	3.55	0.95
$\rho(\text{Ca}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	10.6	54.1	3.8	185.8	57.6	17.3	22.9	53.6
$\rho(\text{Mg}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	102.2	116.7	121.4	92.3	43.6	9.6	3.2	30.5
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	356.0	350.5	582.5	516.0	263.0	168.0	35.5	443.0
$\rho(\text{Cl}^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	481.10	445.43	1 162.53	784.52	181.10	162.25	24.45	144.56
$\rho(\text{HCO}_3^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1 130	655	450	115	265	175	95	200
$\rho(\text{CO}_3^{2-})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0	70	0	0	0	0	0
$\rho(\text{NO}_3^- \cdot \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.02	0.04	0.03	0.26	17.52	0.02	4.38	0.02
$\rho(\text{NO}_2^- \cdot \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.004	0.003	0.006	0.042	0.137	0.002	0.003	0.003
$\rho(\text{F}^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.83	2.75	0.12	0.15	0.28	1.43	0.25	0.72
$\rho(\text{TFe})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.007	0.004	0.194	0.208	0.004	0.115	0.118	0.004
$\rho(\text{TMn})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.063	0.001	0.028 9	0.573	0.001	0.030	0.007	0.037
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-9.14	-9.08	-7.21	-9.83	-9.15	-10.81	-11.14	-9.81
$\delta\text{D}/\text{‰}$	-68.24	-67.47	-51.45	-72.97	-65.9	-80.28	-77.61	-71.78
样品编号	HS01	HS18	HS19	HS20	HS22	HS23	HS24	HS25
井深/m	8	100	100	100	100	100	100	100
水位埋深/m	5.51	8.80	7.36	6.57	7.35	9.13	4.9	4.47
pH	6.82	7.42	7.24	7.28	7.53	7.54	7.24	7.23
TDS/mg·L <sup>-1</sup>	4 438.32	8 222.17	9 226.37	4 633.79	4 930.74	7 189.43	5 795.98	17 569.65
高锰酸盐指数/mg·L <sup>-1</sup>	4.23	4.29	5.72	2.94	4.13	3.20	3.65	7.44
$\rho(\text{Na}^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	379.94	1 680.61	1 786.75	820.33	974.28	1 660.88	1 260.67	3 520.34
$\rho(\text{K}^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7.45	8.55	9.55	11.65	6.55	5.45	12.55	14.45
$\rho(\text{Ca}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	616.3	380.4	389.6	350.8	368.4	240.6	275.7	807.6
$\rho(\text{Mg}^{2+})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	374.1	597.7	682.2	268.2	286.8	422.2	364.5	1370.3
$\rho(\text{SO}_4^{2-})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	226.0	1 740.5	2 270.0	1 860.0	1 598.0	2 000.0	1 390.0	5 150.0
$\rho(\text{Cl}^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2 490.20	3 610.33	3 850.21	992.08	1 530.86	2 720.75	2 250.38	6 480.25
$\rho(\text{HCO}_3^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	565	410	475	660	330	280	485	455
$\rho(\text{CO}_3^{2-})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\rho(\text{NO}_3^- \cdot \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	59.43	0.85	0.14	0.31	1.98	0.38	0.02	0.02
$\rho(\text{NO}_2^- \cdot \text{N})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.322	0.057	0.108	0.391	0.104	0.026	0.009	0.017
$\rho(\text{F}^-)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.13	0.42	0.32	0.43	0.77	1.53	1.12	0.03
$\rho(\text{TFe})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.004	0.031	0.061	0.016	0.071	0.021	0.064	0.018
$\rho(\text{TMn})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.005	1.121	2.022	1.123	1.184	0.538	0.665	1.384
$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	-7.99	-9.21	-9.33	-7.94	-9.75	-10.34	-9.65	-7.85
$\delta\text{D}/\text{‰}$	-59.5	-67.97	-68.37	-62.06	-74.72	-78.49	-73.69	-62.06

1) pH 无量纲; TFe 表示总铁; TMn 表示总锰

数为  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$  型. 从上述可以看出, 随着 TDS 增大, 浅层地下水水化学类型由  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$  向  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$  型过渡.

### 3.2 易溶盐水化学特征

对钻孔 21 个沉积物样品的水溶性离子含量进行统计(表 2). 结果发现, 样品中 pH 值范围为 7.53 ~ 8.26, 平均值为 7.85, 总体呈弱碱性; 各样品的全盐含量范围为 1.83 ~ 6.509  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 3.756  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 阳离子方面, 以  $\text{Na}^+$  为主, 含量范围为 0.332 ~ 1.628  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值为 0.788  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 其

次是  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$ , 含量平均值为 0.242  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.078  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 阴离子方面, 以  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  为主, 含量范围分别为 0.380 ~ 3.070  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.323 ~ 1.472  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均值 1.427  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.727  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 结合水化学测试结果分析(表 1), 沉积物样品的易溶盐水化学特征与浅层水化学组分相似, 均为  $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Mg}$  或者  $\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Na}$  型, 但样品的全盐量较浅层地下水 TDS 要低, 这是因为地下水在径流过程中已溶解了地层沉积物吸附的大部分可溶性矿物. 同时, 全盐量与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  相关系数大于

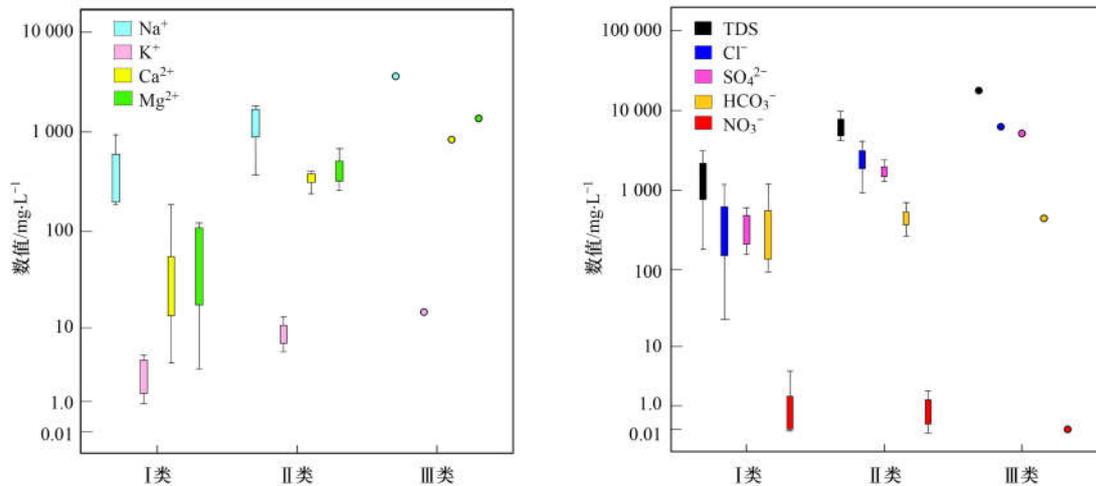


图 4 研究区地下水中主要阴阳离子箱式图

Fig. 4 Box diagrams of main cations and anions of shallow groundwater samples

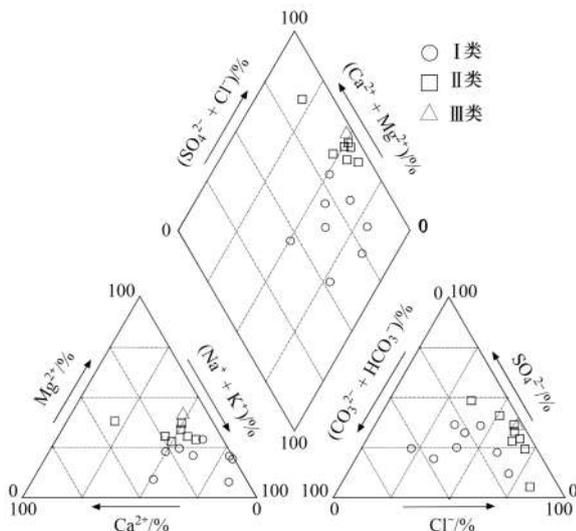


图 5 研究区浅层地下水 Piper 三线图

Fig. 5 Piper diagram of shallow groundwater

0.8(表 3), 而  $\text{Na}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  有显著相关关系 ( $P < 0.01$ ), 说明这 3 种离子对全盐量的贡献较大, 三者有同源关系. 此外, 通过沉积物中水溶性离子垂向分布特征分析得出(图 6), 沉积物岩性与各离子含量有一定对应关系. 即沉积物颗粒越细, 其对应的水溶性离子浓度越高, 在细砂或砾石层中各类离子浓度较低. 综上分析, 含水介质中盐分来源与细颗粒沉积物吸附的岩盐和芒硝矿物溶解有关.

### 3.3 地下水氢氧稳定同位素特征

$\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  同位素的组成反映着地下水的补给来源与循环模式<sup>[19]</sup>. 根据测试结果(表 1), 研究区内 I 类地下水  $\delta^{18}\text{O}$  值域为  $-11.15\text{‰} \sim -7.21\text{‰}$ , 均值为  $-9.52\text{‰}$ ;  $\delta\text{D}$  值域为  $-80.29\text{‰} \sim -51.45\text{‰}$ , 均值为  $-69.46\text{‰}$ ; 相比之下, II 类地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  同位素变化范围较小, 值域分别为  $-10.34\text{‰} \sim$

表 2 钻孔易溶盐测定结果统计特征

Table 2 Statistics of hydrochemistry parameters of the soluble salt in borehole in the study area

项目	pH	$\omega/\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$							
		全盐	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
最小值	7.53	1.830	0.323	0.380	0.280	0.332	0.006	0.116	0.038
最大值	8.26	6.509	1.472	3.070	0.980	1.628	0.014	0.400	0.140
平均值	7.85	3.756	0.727	1.427	0.488	0.788	0.011	0.242	0.078
标准差	0.33	1.385	0.252	0.671	0.193	0.373	0.002	0.075	0.023

表 3 钻孔易溶盐水溶性离子相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficients between major ions of soluble salt in borehole

	全盐	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$
全盐	1.000	0.801 **	0.929 **	0.680 **	0.970 **	0.390	0.291	0.751 **
$\text{Cl}^-$		1.000	0.571 **	0.600 **	0.819 **	0.438 *	0.273	0.539 *
$\text{SO}_4^{2-}$			1.000	0.438 *	0.847 **	0.402	0.259	0.816 **
$\text{HCO}_3^-$				1.000	0.751 **	-0.033	0.113	0.270
$\text{Na}^+$					1.000	0.295	0.352	0.584 **
$\text{Ca}^{2+}$						1.000	0.408	0.407
$\text{K}^+$							1.000	-0.083
$\text{Mg}^{2+}$								1.000

1) \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关, \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关

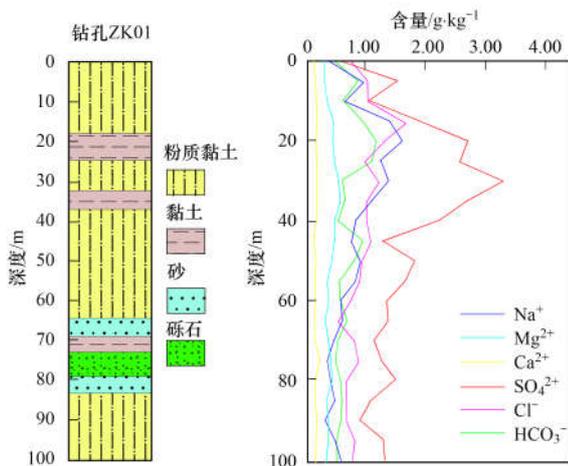


图6 ZK01 钻孔易溶盐组分随深度变化

Fig. 6 Concentrations of soluble ions with well depth in borehole ZK01

-7.99‰和 -78.49‰ ~ -59.50‰, III类地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  同位素相对前两者则更为富集,其值分别为 -10.34‰和 -7.85‰. 结合各类型地下水在  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta\text{D}$  图(图7)中的相对位置关系分析,所有样点都处于衡水大气降水线( $\delta\text{D} = 7.08 \times \delta^{18}\text{O} + 0.96$ )<sup>[20]</sup>下方,表明浅部地下水补给来源为大气降水,且在入渗补给过程中均经历了明显的蒸发过程.同时, I类地下水样点沿着衡水大气降水线分布较散,说明其受到不同时期的降水补给影响,导致  $\delta^{18}\text{O}$  值域较大; II类地下水在图7中的位置可以分为两个区域,其中A区与多数I类地下水具有相类似的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta\text{D}$  值且盐度相对较低,说明这部分地下水与I类地下水具有相似的补给来源和溶滤时间; B区地下水的  $\delta^{18}\text{O}$  值与III类地下水更为接近,略小于当地夏季降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的平均值( $\delta^{18}\text{O} = -7.1\text{‰}$ ),说明两者主

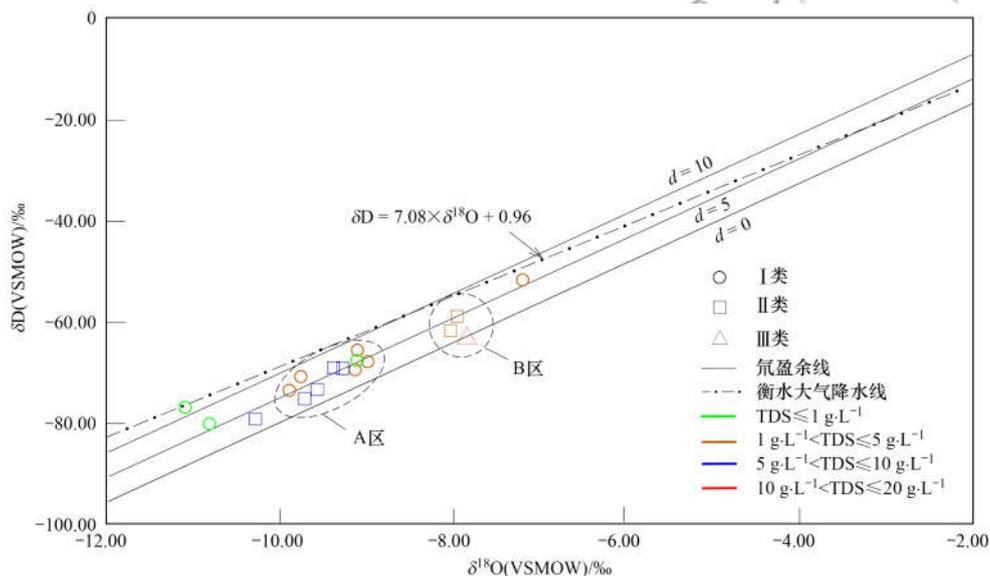


图7 研究区浅层地下水中  $\delta\text{D}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  同位素比值

Fig. 7 Plots of  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  of shallow groundwater samples

要受夏季集中降雨入渗补给,且补给过程受到蒸发作用影响.

同时,前人常用氡盈余( $d = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ )来反映受水汽来源地的水体蒸发时周围环境空气相对湿度的影响.如果相对湿度是100%,若发生平衡分馏时,氡盈余为0,随着湿度的降低,氡盈余呈逐步升高<sup>[21]</sup>.从图7分析得出: I类地下水样点主要分布在  $d = 5$  与  $d = 10$  线之间,其氡盈余平均值为6.72, II类地下水氡盈余平均值为4.11, III类地下水中氡盈余值为0.74,说明湿润温暖的气候条件有利于地下水咸化过程进行.

### 3.4 主要水岩作用

#### 3.4.1 溶滤作用

Gibbs 对世界上主要河流、湖泊和海洋等地表

水中的 TDS 与  $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  的关系进行了总结,将地表水中主要离子来源归结为蒸发结晶作用、大气降水作用和岩石风化作用3种类型<sup>[22]</sup>.前人通常采用 Gibbs 图来解释地下水所经历的水文地球化学过程<sup>[23~25]</sup>,但是在判定地下水咸化机制时,地下水中盐分增加并不是由图8(a)中所经历的蒸发结晶形成,而是由海水入侵地下水或蒸发岩的溶解造成的<sup>[26]</sup>.由图8(b)可知,研究区浅层地下水中  $\rho(\text{Na}^+)/\rho(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  范围为0.51 ~ 0.95,且大部分大于0.7,说明地下水中  $\text{Na}^+$  来源比较单一<sup>[27]</sup>,同时 II类和 III类样点均沿着海水入侵或者蒸发岩溶解趋势线分布,说明地下水咸化过程与海水混入或蒸发岩溶解紧密相关.

此外通过统计分析发现:浅层地下水样品中

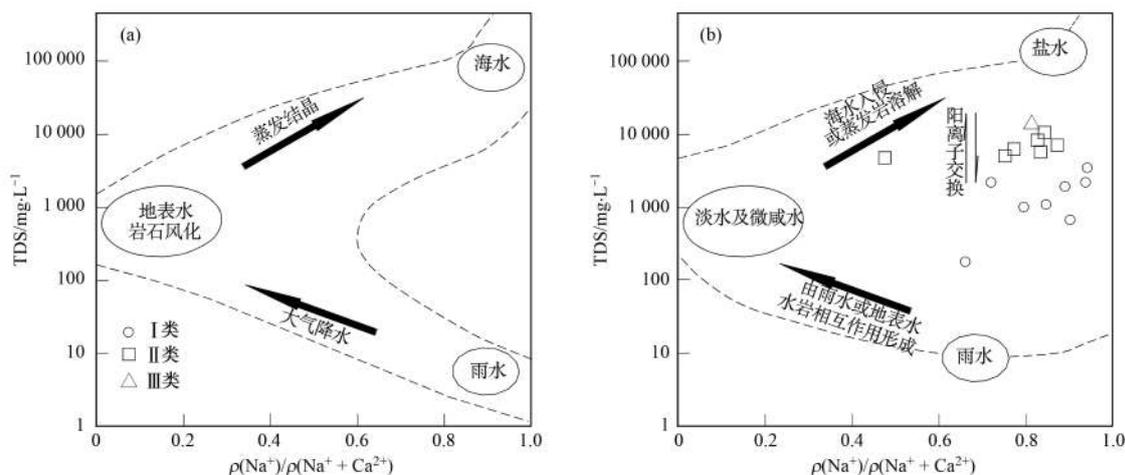


图8 研究区浅层地下水 Gibbs 图

Fig. 8 Gibbs plot of shallow groundwater samples

TDS 与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^{-}$  浓度显著正相关(相关系数分别为 0.836、0.991、0.977、0.962 和 0.979),表明这些离子的富集与地下水咸化过程关系密切. 利用  $N(\text{Na}^{+})$  和  $N(\text{Cl}^{-})$  (毫克当量,下同)关系来判断地下水中钠离子的来源<sup>[28,29]</sup>,从图 9 (a)分析得出,大多数样品点分布在 1:1 线之上, $N(\text{Na}^{+})$  和  $N(\text{Cl}^{-})$  显著相关,相关系数为 0.978,说明岩盐溶解是地下水中  $\text{Na}^{+}$  的主要来源<sup>[30]</sup>,同时部分 II 类和 III 类地下水样点位于 1:1 线之下,这表明在地下水咸化过程中, $\text{Na}^{+}$  的来源除岩盐的溶解提供外还有其他来源<sup>[31]</sup>. 若以  $N(\text{Na}^{+} - \text{Cl}^{-} + \text{Ca}^{2+} +$

$\text{Mg}^{2+})$  表示非岩盐成因的阳离子,图 9 (b) 显示该指标和  $N(\text{SO}_4^{2-})$  显著正相关(相关系数为 0.963),且所有样品点落在 1:1 线附近,表明硫酸盐是当地浅层地下水中  $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子的共同来源. 同时利用  $N(\text{Na}^{+})/N(\text{Cl}^{-})$  来判断地下水中氯离子成因<sup>[32]</sup>,从图 9 (c) 分析得出,多数 I 类地下水  $N(\text{Na}^{+})/N(\text{Cl}^{-})$  多大于 1,最大可达 2.87; II 类和 III 类地下水的  $N(\text{Na}^{+})/N(\text{Cl}^{-})$  均值为 0.87,接近海水比值(0.85);但结合图 9 (d) 进一步判断,发现 II 类和 III 类地下水中  $N(\text{Mg}^{2+})/N(\text{Cl}^{-})$  值均大于 0.5,远高于海水比值(0.20),并逐渐靠近大气降水

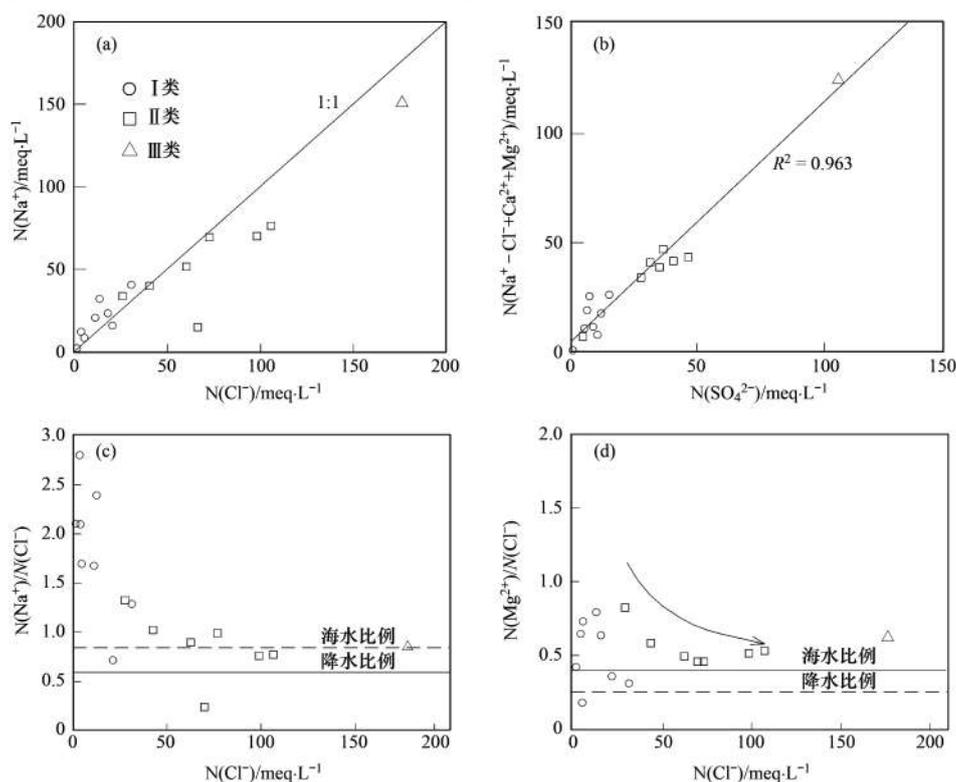


图9 研究区浅层地下水样点离子关系

Fig. 9 Relationship between the major ions of shallow groundwater samples

中  $N(\text{Mg}^{2+})/N(\text{Cl}^-)$  值, 这表明地下中盐分多来自于降水溶滤含水层中含镁矿物, 而非来自于海水入侵或残留海水<sup>[33]</sup>.

利用矿物饱和指数(SI)可以判断地下水中矿物溶解和沉淀的趋势<sup>[34]</sup>. 研究区浅层地下水  $\text{SI}_{\text{石膏}}$  和  $\text{SI}_{\text{白云石}}$  的值域范围分别为  $-7.65 \sim -3.42$  和  $-2.54 \sim 0.09$ , 且  $c(\text{Cl}^-)$  随石膏和岩盐饱和指数变大有明显升高的趋势[图 10(a)], 表明地下水中盐分的增加主要受岩盐和石膏等蒸发岩矿物的溶解控制. 同时, 浅层地下水  $\text{SI}_{\text{方解石}}$  和  $\text{SI}_{\text{白云石}}$  的值域范围分别为  $-0.62 \sim 0.63$  和  $-1.39 \sim 2.22$ , 其中 II 类和 III 类地下水中的  $\text{SI}_{\text{白云石}}$  和  $\text{SI}_{\text{方解石}}$  均大于 0 [图 10(b)], 说明此

类地下水溶解白云石和方解石已达饱和状态, 矿物溶解微弱, 趋于形成方解石和白云石沉淀, 而碳酸盐达饱和状态是由钙镁硫酸盐风化过程中  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  输入过量造成的<sup>[35]</sup>. 牛宏等<sup>[36]</sup> 通过对衡水地区咸水层沉积物颗粒及孔隙水同位素研究发现, 该地区中更新世以来处于较为稳定的整体沉降环境中, 浅部地层为干旱气候条件下的河湖相及沼泽相沉积, 岩层中富含石膏和芒硝等蒸发岩, 从而造成了含水介质中可溶盐含量普遍较高, 这一点从前文钻孔易溶盐分析也可以验证. 综上分析, 研究区含水介质中硫酸盐、盐岩等蒸发岩矿物的风化溶解是导致浅层地下水咸化的重要因素.

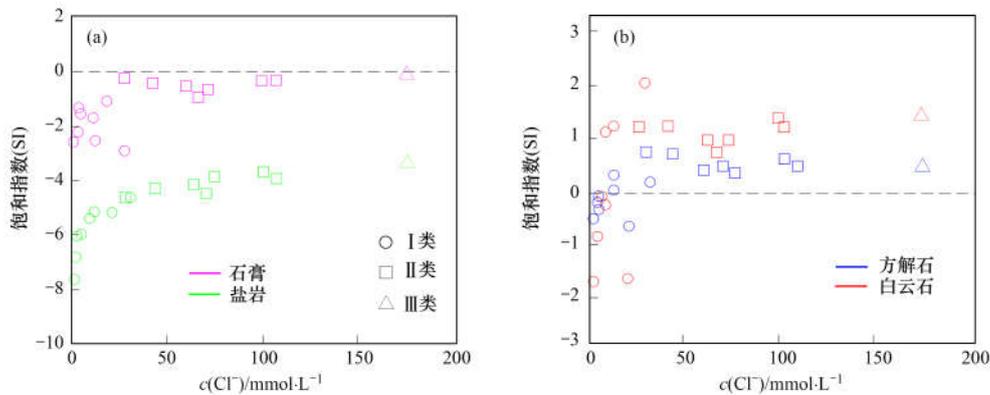


图 10 研究区浅层地下水  $\text{Cl}^-$  与矿物饱和指数关系

Fig. 10 Relationships between  $\text{Cl}^-$  concentrations and calculated saturation indices of shallow groundwater

### 3.4.2 蒸发浓缩作用

$\delta^{18}\text{O}$  与  $\text{Cl}^-$  的关系可以指示地下水所经历多种水文地球运移作用<sup>[6]</sup>. 若地下水中  $c(\text{Cl}^-)$  的增加是由岩石风化溶解而导致的, 则地下水中氢氧稳定同位素变化很小, 若地下水只受到蒸发作用的影响, 则随着地下水中  $c(\text{Cl}^-)$  的增加, 地下水  $\delta^{18}\text{O}$  值会等比例增加<sup>[37]</sup>. 从图 11(a) 中分析得出, 研究区 I 类地下水中  $c(\text{Cl}^-)$  偏小且相对稳定, 对应的  $\delta^{18}\text{O}$  值变化较

大, 根据前文分析可知, 该类地下水补给来源是不同时期的大气降水, 地下水中盐分与所在区域地层中可溶盐本底值有关; II 类和 III 类地下水样点多位于蒸发线与溶滤线之间, 此类地下水中  $c(\text{Cl}^-)$  变化速率略高于  $\delta^{18}\text{O}$  值, 应该是溶滤和蒸发共同作用的结果. 此外, 利用浅层地下水  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\rho(\text{K}^+)$  关系 [图 11(b)] 分析可知, II 类和 III 类地下水中  $\rho(\text{K}^+)$  与  $\delta^{18}\text{O}$  值呈现正相关关系, 考虑到地下水中钾离子生

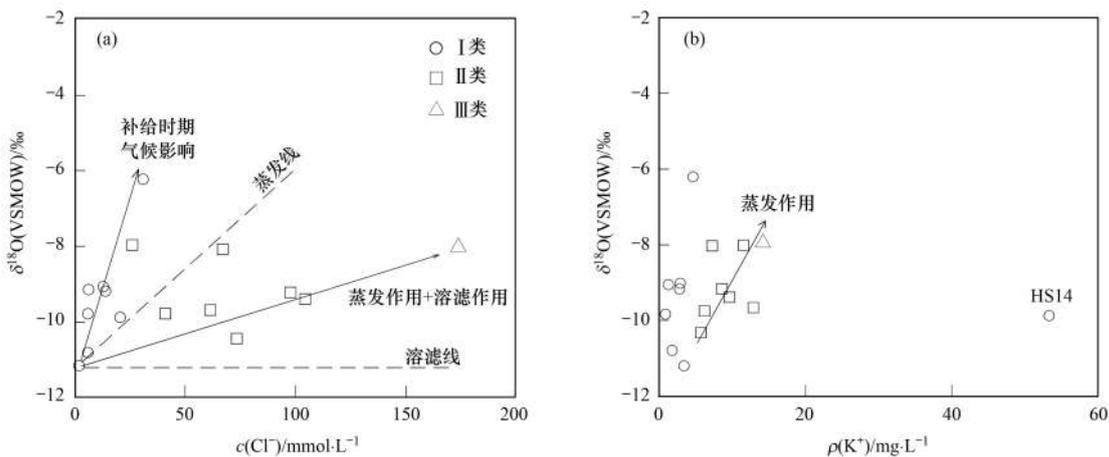


图 11 研究区浅层地下水  $\delta^{18}\text{O}$  与  $\text{Cl}^-$  和  $\text{K}^+$  关系

Fig. 11 Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$  concentrations of shallow groundwater samples

物活性强,易被沉积物颗粒或植被根系吸附,其浓度升高多与矿物溶滤、蒸发和人为污染有关,而通常情况下含钾矿物的风化溶解并不会造成地下水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的升高<sup>[38,39]</sup>,因此II类和III类地下水应该是受到蒸发作用的影响;另外HS14样点 $\rho(\text{K}^+) = 53.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,结合该点井深(12 m)和水位埋深(5.98 m)数据,应该是人为施用钾肥随灌溉水下渗而造成了局部地区地下水中钾离子浓度异常。

### 3.4.3 氧化还原作用

氧化还原过程控制着地下水中许多组分的迁移转化,其主要影响因素有地下水系统开放程度、微

生物活动强度和有机物质多寡<sup>[40-42]</sup>。通过图12(a)分析得出,除了少数I类地下水样点外,其它地下水的二氧化碳分压均高于大气中二氧化碳分压( $p\text{CO}_2 = 10^{-3.5} \text{ Pa}$ ),从前文分析可知当地含水介质中黏性沉积物分布厚度大,地下水在径流过程中溶解了黏土相沉积物中微生物分解产生的 $\text{CO}_2$ ,所以造成了水中二氧化碳浓度的增高;同时,从II类和III类地下水中 $\text{Cl}^-$ 浓度与高锰酸盐指数关系来看[图12(b)],两者有明显的正相关关系( $R^2 = 0.708$ );说明浅层地下水中还原性物质的增加会加速盐岩、硫酸盐等矿物的风化溶解,从而导致地下水盐度的升高。

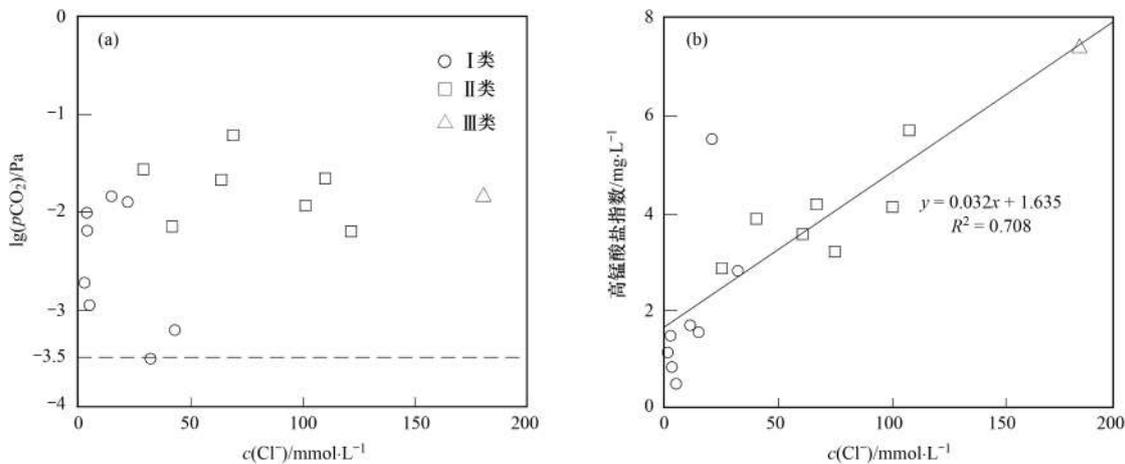


图12 研究区浅层地下水中 $\text{Cl}^-$ 与 $p\text{CO}_2$ 和高锰酸盐指数之间关系

Fig. 12 Relationship between concentrations of  $\text{Cl}^-$  and pressure of carbon dioxide and permanganate index in shallow groundwater

### 3.5 浅层咸水成因分析

研究区地处华北平原中部,第四纪以来岩相结构以河湖相泥质和砂质沉积为主。据高业新<sup>[43]</sup>对衡水地区地层时代的划分,35 m以浅为全新世( $Q_4$ )地层,35~100 m为晚更新世( $Q_3$ )地层。区内晚更新世晚期属于第四纪末次冰期,此时全球气候变冷,海平面下降,中国大陆的范围向东延伸,本地出现大陆干旱草原性气候,具备了大陆盐渍化发生的外部条件;进入全新世以来,当地气候回暖,水动力条件减弱,蒸发作用增强,促进了大陆盐渍化的进一步发展<sup>[16,44]</sup>。从本次钻孔沉积物岩性及水溶性离子垂向分布特征分析(图6),全盐量和氯离子浓度最大值出现在20~40 m处的全新世黏性土地层,而 $n(\text{Na}^+)/n(\text{Cl}^-)$ 和 $n(\text{Mg}^{2+})/n(\text{Cl}^-)$ 等相关指标具有典型的大陆盐渍化特征<sup>[45]</sup>。同时,地下水氢氧同位素也显示地下水咸化阶段发生在湿度较大、气温较高的内陆湿地环境,咸化过程主要与不同时期降雨长期溶滤地层中岩盐和硫酸盐矿物有关。此外,据扬子庚等<sup>[46]</sup>统计的华北平原海侵记录,华北平原自老至新有渤海、海兴、津西、黄骅、青县、沧西、献县和沧东这8次海进,以上海进大多局限在华北

平原东部,最远达到沧州献县一带,研究区内第四纪时期没有发生海侵活动,其中距离最近的献县海进最少40~50 km,据此判断当地浅部地下水咸化过程受到海侵影响不大。

## 4 结论

(1) 研究区浅层地下水pH值范围为6.82~8.18,TDS范围为176.06~17569.65  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。随着地下水咸化程度的增加,水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型逐渐转化为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型。沉积物全盐量为1.830~6.509  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其水化学特征与浅层水化学组分相似,含水介质中盐分与细颗粒沉积物吸附的芒硝和岩盐矿物有关。

(2) 浅层地下水主要补给来源是不同地质时期的大气降雨,同时在入渗补给时受到蒸发作用的影响。氡盈余分析表明,湿润温暖的气候条件对于浅层咸水的形成具有促进作用。

(3) 溶滤作用是控制研究区浅层地下水咸化的首要因素,地下水中盐分主要来源于含水层介质中岩盐及硫酸盐矿物的溶解;同时蒸发作用和还原性环境也加剧了浅层地下水中盐分的积累,但地下水

咸化过程受到人类活动及海水入侵的影响较小。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 沈照理. 水文地球化学基础[M]. 北京:地质出版社, 1993.
- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] 杨巧凤, 王瑞久, 徐素宁, 等. 莱州湾沿岸寿光、莱州和龙口地下水的稳定同位素与地球化学[J]. 地质学报, 2016, **90**(4): 801-817.  
Yang Q F, Wang R J, Xu S N, *et al.* Hydrogeochemistry and stable isotopes of groundwater from Shouguang, Laizhou and Longkou in the south coast aquifer of Laizhou Bay[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, **90**(4): 801-817.
- [ 4 ] 王雨山, 李成, 孟益, 等. 宁夏清水河上游浅层地下水咸化作用研究[J]. 现代地质, 2017, **31**(1): 191-199.  
Wang Y S, Li S, Meng Y, *et al.* Study on the salinization mechanism of shallow groundwater along the upstream Qingshui River in Ningxia[J]. Geoscience, 2017, **31**(1): 191-199.
- [ 5 ] Mejri S, Chekirbene A, Tsujimura M, *et al.* Tracing groundwater salinization processes in an inland aquifer: A hydrogeochemical and isotopic approach in Sminja aquifer (Zaghuan, northeast of Tunisia)[J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, **147**: 511-522.
- [ 6 ] 曾邯斌, 苏春利, 谢先军, 等. 河套灌区西部浅层地下水咸化机制[J]. 地球科学, 2021, **46**(6): 2267-2277.  
Zeng H B, Su C L, Xie X J, *et al.* Mechanism of salinization of shallow groundwater in western Hetao irrigation area[J]. Earth Science, 2021, **46**(6): 2267-2277.
- [ 7 ] Habtemichael Y T, Fuentes H R. Hydrogeochemical analysis of processes through modeling of seawater intrusion impacts in Biscayne aquifer water quality, USA[J]. Aquatic Geochemistry, 2016, **22**(3): 197-209.
- [ 8 ] Masoud A A, El-Horiny M M, Atwia M G, *et al.* Assessment of groundwater and soil quality degradation using multivariate and geostatistical analyses, Dakhla Oasis, Egypt [J]. Journal of African Earth Sciences, 2018, **142**: 64-81.
- [ 9 ] Khaska M, Le Gal La Salle C, Lancelot J, *et al.* Origin of groundwater salinity (current seawater vs. saline deep water) in a coastal karst aquifer based on Sr and Cl isotopes. Case study of the La Clape massif (southern France) [J]. Applied Geochemistry, 2013, **37**: 212-227.
- [ 10 ] Shamsavari A A, Khodaei K, Asadian F, *et al.* Determination of origin and distribution of saline water in the aquifer of Kharg Island, Iran[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(5): 3129-3137.
- [ 11 ] 侯国华, 高茂生, 党显璋, 等. 江苏盐城滨海地区浅层地下咸水的水盐来源及咸化成因[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, **41**(4): 48-59.  
Hou G H, Gao M S, Dang X Z, *et al.* Water and salt sources and salinization of shallow saline groundwater in the coastal area of Yancheng, Jiangsu [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, **41**(4): 48-59.
- [ 12 ] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 2017, **44**(6): 1115-1127.  
Guo H P, Bai J B, Zhang Y Q, *et al.* The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. Geology in China, 2017, **44**(6): 1115-1127.
- [ 13 ] 张素娥, 寇秋焕, 李志军. 河北省衡水市地质灾害分布特征及其成因分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2006, **17**(4): 8-12.  
Zhang S E, Kou Q H, Li Z J. Distribution features and its origin of the geological disaster in Hengshui City, Hebei province[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006, **17**(4): 8-12.
- [ 14 ] 李文鹏, 王龙凤, 杨会峰, 等. 华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J]. 中国水利, 2020, (13): 26-30.  
Li W P, Wang L F, Yang H F, *et al.* The groundwater over exploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. China Water Resources, 2020, (13): 26-30.
- [ 15 ] 陈浩, 王贵玲, 张薇, 等. 河北平原地下水水化学演化[J]. 地球与环境, 2005, **33**(S1): 620-623.  
Chen H, Wang G L, Zhang W, *et al.* The evolution of groundwater chem character in Hebei Plain [J]. Earth and Environment, 2005, **33**(S1): 620-623.
- [ 16 ] 张人权, 梁杏, 靳孟贵. 末次盛冰期以来河北平原第四系地下水流系统的演变[J]. 地学前缘, 2013, **20**(3): 217-226.  
Zhang R Q, Liang X, Jin M G. The evolution of groundwater flow systems in the Quaternary of Hebei Plain since the Last Glacial Maximum[J]. Earth Science Frontiers, 2013, **20**(3): 217-226.
- [ 17 ] 邓兴. 河北省衡水市地下水水位动态特征及变化趋势分析[D]. 石家庄, 河北地质大学, 2019.
- [ 18 ] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础[M]. (第六版). 北京:地质出版社, 2011.
- [ 19 ] 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.
- [ 20 ] 王仕琴, 宋献方, 肖国强, 等. 基于氢氧同位素的华北平原降水入渗过程[J]. 水科学进展, 2009, **20**(4): 495-501.  
Wang S Q, Song X F, Xiao G Q, *et al.* Applience of oxygen and hydrogen isotope in the process of precipitation infiltration in the shallow groundwater areas of North China Plain[J]. Advances in Water Science, 2009, **20**(4): 495-501.
- [ 21 ] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, **16**(4): 436-468.
- [ 22 ] Gibbs R J. Mechanisms controlling world water chemistry[J]. Science, 1970, **170**(3962): 1088-1090.
- [ 23 ] 孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 等. 永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4202-4210.  
Kong X L, Yang Y H, Cao B, *et al.* Hydrochemical characteristics and factors of surface water and groundwater in the upper Yongding River basin[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4202-4210.
- [ 24 ] Sahib L Y, Marandi A, Schüth C. Strontium isotopes as an indicator for groundwater salinity sources in the Kirkuk region, Iraq[J]. Science of the Total Environment, 2016, **562**: 935-945.
- [ 25 ] 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.
- [ 26 ] Marandi A, Shand P. Groundwater chemistry and the Gibbs diagram[J]. Applied Geochemistry, 2018, **97**: 209-212.

- [27] Chen Y, Zhu S Y, Xiao S J. Discussion on controlling factors of hydrogeochemistry and hydraulic connections of groundwater in different mining districts [J]. *Natural Hazards*, 2019, **99**(2): 689-704.
- [28] Zhang Y P, Li Q H, Luo Y X, *et al.* Groundwater salinization in a subtropical region, Beihai, southern China: insights from hydrochemistry and multiple isotopes (H, O, S, Sr) [J]. *Applied Geochemistry*, 2022, **141**, doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105323.
- [29] 张太平, 王奎锋, 王强, 等. 黄河三角洲水盐演化及补给来源——基于水化学与同位素分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, **37**(4): 231-239.  
Zhang T P, Wang K F, Wang Q, *et al.* Evolution characteristics and recharge sources of water and salt in the Yellow River Delta—Based on water chemistry and isotope analysis [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, **37**(4): 231-239.
- [30] 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.
- [31] 张涛, 何锦, 李敬杰, 等. 蛤蟆通河流域地下水水化学特征及控制因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4981-4990.  
Zhang T, He J, Li J J, *et al.* Major ionic features and possible controls in the groundwater in the Hamatong River basin [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4981-4990.
- [32] Panno S V, Hackley K C, Hwang H H, *et al.* Characterization and Identification of Na-Cl sources in ground water [J]. *Groundwater*, 2006, **44**(2): 176-187.
- [33] 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]. *地质前缘*, 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.
- [34] Luo W T, Gao X B, Zhang X. Geochemical processes controlling the groundwater chemistry and fluoride contamination in the Yuncheng Basin, China—an area with complex hydrogeochemical conditions [J]. *PLoS One*, 2018, **13**(7), doi: 10.1371/journal.pone.0199082.
- [35] Ferchichi H, Farhat B, Ben-Hamouda M F, *et al.* Understanding groundwater chemistry in Mediterranean semi-arid system using multivariate statistics techniques and GIS methods: case of Manouba aquifer (Northeastern Tunisia) [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, **10**(23), doi: 10.1007/s12517-017-3314-4.
- [36] 牛宏, 梁杏, 李静, 等. 衡水地区咸水层沉积物粒度及氧同位素的古气候指示[J]. *地球科学*, 2016, **41**(3): 499-507.  
Niu H, Liang X, Li J, *et al.* Paleoclimate instruction of sediment grain size and deuterium-oxygen isotope in saline stratum of Hengshui [J]. *Earth Science*, 2016, **41**(3): 499-507.
- [37] Xie X J, Wang Y X, Su C L, *et al.* Influence of irrigation practices on arsenic mobilization: evidence from isotope composition and Cl/Br ratios in groundwater from Datong Basin, Northern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **424-425**: 37-47.
- [38] Véry A A, Sentenac H. Molecular mechanisms and regulation of K<sup>+</sup> transport in higher plants [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2003, **54**: 575-603.
- [39] 李莎, 成建梅, 李敏敏, 等. 人类开采活动影响下的衡水地区地下水水质特征及演化[J]. *南水北调与水利科技*, 2016, **14**(3): 55-61, 100.  
Li S, Cheng J M, Li M M, *et al.* Water quality characteristics and evolution of groundwater system influenced by human exploitation activity in Hengshui area [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, **14**(3): 55-61, 100.
- [40] Guo H M, Wang Y X. Geochemical characteristics of shallow groundwater in Datong basin, northwestern China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2005, **87**(3): 109-120.
- [41] 田夏, 费宇红, 李亚松, 等. 南襄盆地浅层地下水质量影响因素解析[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, **15**(6): 132-136.  
Tian X, Fei Y H, Li Y S, *et al.* Impact factors of shallow groundwater quality in the Nanyang-Xiangyang basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, **15**(6): 132-136.
- [42] Chen J, Huang Q W, Lin Y L, *et al.* Hydrogeochemical characteristics and quality assessment of groundwater in an irrigated region, northwest China [J]. *Water*, 2019, **11**(1), doi: 10.3390/w11010096.
- [43] 高业新. 华北平原典型地区大规模开采条件下不同层位含水组地下水互动关系研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2008.
- [44] 范淑贤, 刘海坤, 徐建明, 等. 3.50Ma BP 以来河北衡水地区古植被与环境演化[J]. *现代地质*, 2009, **23**(1): 75-81.  
Fan S X, Liu H K, Xu J M, *et al.* Palaeovegetation and environmental evolution in Hengshui district of Hebei province since 3.50 Ma BP [J]. *Geoscience*, 2009, **23**(1): 75-81.
- [45] 周晓妮, 刘少玉, 王哲, 等. 华北平原典型区浅层地下水水化学特征及可利用性分析——以衡水为例[J]. *水科学与工程技术*, 2008, (2): 56-59.  
Zhou X N, Liu S Y, Wang Z, *et al.* The chemical characteristics and available analysis of shallow groundwater in the typical area of plain of North China—take Hengshui in example [J]. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2008, (2): 56-59.
- [46] 扬子庚, 李幼军, 丁秋玲, 等. 试论河北平原东部第四纪地质几个基本问题[J]. *地质学报*, 1979, **53**(4): 263-279.  
Yang Z G, Li Y J, Ding Q L, *et al.* Some fundamental problems of quaternary geology of eastern Hebei plain [J]. *Acta Geological Sinica*, 1979, **53**(4): 263-279.

## CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Pollution in Tianjin from 2013 to 2020 .....	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020 .....	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing .....	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O <sub>3</sub> Pollution During 13 <sup>th</sup> Five-Year Period in Tianjin .....	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm .....	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China .....	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment .....	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020 .....	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River .....	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing .....	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City .....	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin .....	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems .....	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments .....	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter .....	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants .....	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters .....	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan .....	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District .....	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model .....	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area .....	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China .....	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure .....	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area .....	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth .....	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content .....	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil .....	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi ( <i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil .....	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils .....	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil .....	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil .....	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil .....	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland .....	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars .....	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil .....	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River .....	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation .....	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism .....	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvo-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China .....	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak .....	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost .....	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures .....	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China .....	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weibei Dry Plateau Region of Shaanxi .....	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China .....	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration .....	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland .....	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level .....	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants .....	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment .....	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions .....	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-yang, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review .....	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology .....	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)