

环知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

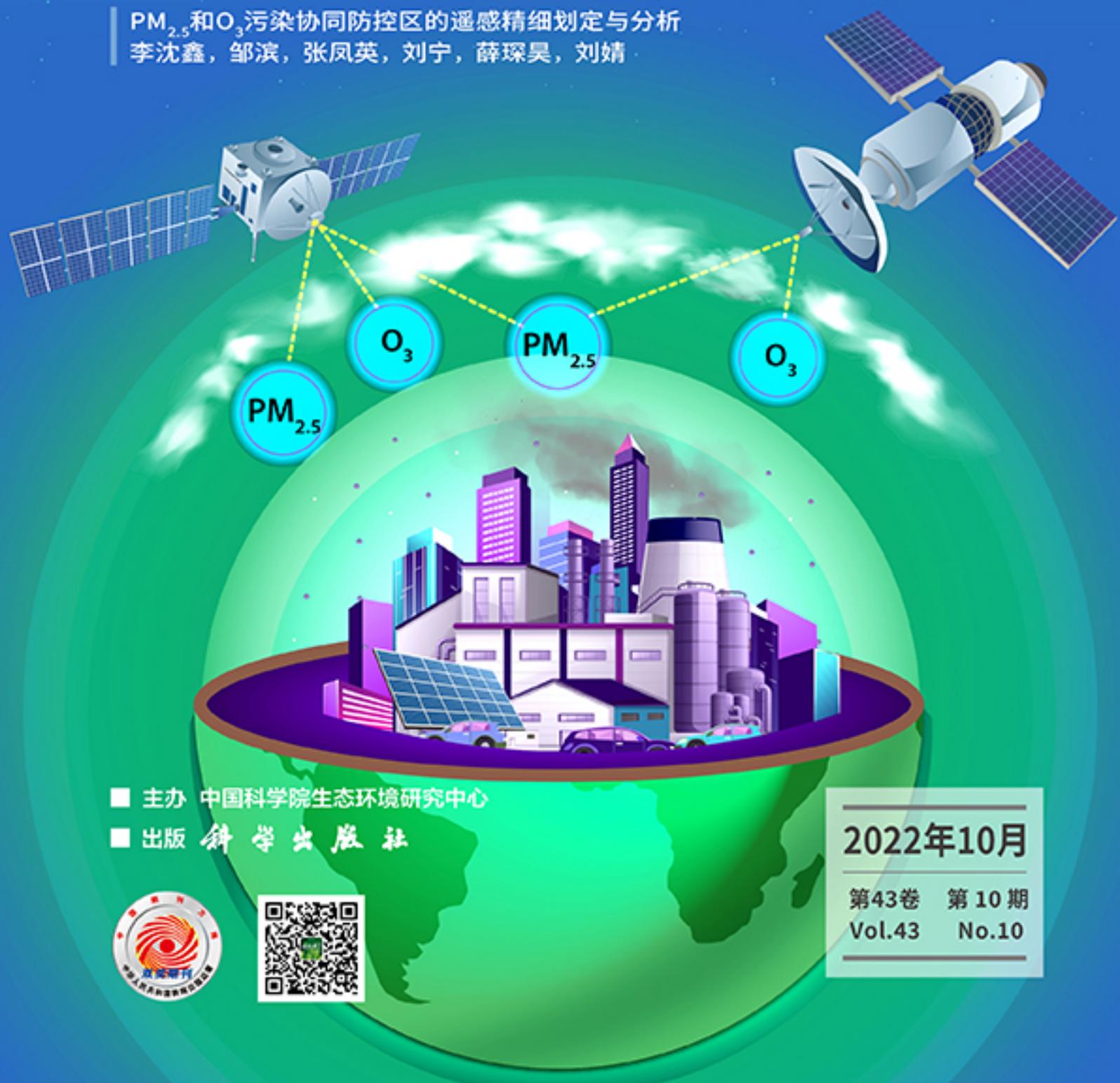
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞潼, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸娟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂@FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊娟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析

鲁涵^{1,2,3}, 曾妍妍^{1,2,3*}, 周金龙^{1,2,3}, 孙英^{1,2,3}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 乌鲁木齐 830052; 3. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为了揭示新疆喀什噶尔河下游平原区地下水咸化的分布特征和形成机制, 综合运用数理统计、Duorv 图、PCA-APCS-MLR 模型、离子比值和水文地球化学模拟等方法, 对 2018 年采集的 69 组地下水样品进行分析。结果表明, 研究区地下水总体呈弱碱性, TDS 的变化范围为 573.0 ~ 16 700.0 mg·L⁻¹, 地下水化学类型主要为 HCO₃·SO₄·Cl、SO₄ 和 SO₄·Cl 型; 咸化系数计算结果表明, 从潜水至深层承压水咸化程度呈现出逐渐增加的规律; 蒸发浓缩作用和溶滤作用是导致研究区地下水咸化的主要因素, 从潜水至深层承压水碳酸盐岩、硅酸盐岩的风化溶解和阳离子交换作用逐渐减弱, 而蒸发盐岩的风化溶解持续加强, 也是导致深层地下水咸化程度大于浅层地下水的首要因素; 人类活动对研究区地下水咸化也产生了一定的影响; 相邻含水层咸水的越流补给加剧了研究区地下水的咸化。

关键词: 地下水; 水化学特征; 离子来源; 咸化成因; 喀什噶尔河下游平原区

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4459-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201264

Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River

LU Han^{1,2,3}, ZENG Yan-yan^{1,2,3*}, ZHOU Jin-long^{1,2,3}, SUN Ying^{1,2,3}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Research Center, Urumqi 830052, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: This study revealed the distribution characteristics and formation mechanism of groundwater salinization in the plain area of the lower Kashgar River in Xinjiang, which can provide scientific basis for a local sustainable groundwater exploitation plan and practical significance for local water supply security and social stability. Fifteen phreatic water samples, 38 shallow confined groundwater samples, and 16 deep confined groundwater samples were collected in September 2018. Mathematical statistics, a Duorv diagram, PCA-APCS-MLR model, ion ratios, and hydrogeochemical simulations were comprehensively used for sample analysis. The results showed that groundwater was weakly alkaline in general (pH ranged between 6.48 and 8.60 with an average of 7.57), with total dissolved solids (TDS) ranging from 573.0 to 16 700.0 mg·L⁻¹. Groundwater was mainly composed of Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, and Ca²⁺. The main groundwater hydrochemical types included were HCO₃·SO₄·Cl, SO₄, and SO₄·Cl. No brine was observed in the study area, phreatic water was mainly composed of brackish water and saline water, and confined groundwater was mainly composed of saline water. The salinization coefficient calculation results showed that the salinization degree gradually increased from phreatic water to deep confined groundwater. Evaporation concentration and lixiviation were the main factors leading to the salinization of groundwater. The dissolution and cation exchange of carbonate and silicate rocks gradually weakened from phreatic water to deep confined groundwater, whereas the dissolution of evaporite rock always dominated and was gradually strengthened, which was also the primary factor that caused the salinity of deep groundwater to be higher than that of shallow groundwater. Human activities such as agricultural fertilization, unreasonable use of surface water for irrigation, and improper treatment of domestic sewage had a certain impact on groundwater salinization. The leaking recharge of salt water from adjacent aquifers aggravated the groundwater salinization.

Key words: groundwater; chemical characteristics; ion source; causes of salinization; plain area of the lower Kashgar River

地下水对于维持陆地生态系统和满足干旱地区日益增长的农业和生活用水需求至关重要^[1]。在中国甘肃^[2]、宁夏^[3]、新疆^[4]和内蒙古^[5]等西北干旱地区地下水咸化已成为水资源管理中的一个主要问题, 成为地区经济发展的限制性因素^[6]。高盐地下水对公众健康及农作物生产构成风险, 人体摄入过多的盐, 会导致腹泻、呕吐和肝功能损害等问题^[7]; 潜水盐碱化会影响土壤肥力和植被的特征, 并且由于长期过度开采地下水, 导致浅层含水层中的含盐地下水越流补给深层含水层, 威胁和减少深层含水层中的可再生新鲜地下水资源^[8]。以往研究表明, 导致地下水咸化的主要原因可以概括为: 补给和排泄过程中的蒸发^[9]、深根植物的蒸腾作用^[10]、矿物

溶解^[11~13]、深层卤水补给^[14]和人类活动影响(农业施肥、生活污水和不合理地使用地表水灌溉)^[15~17]等。

依据地下水水化学测试数据, 结合水文地质条件, 综合运用多元统计分析方法、图解法和水文地球化学模拟等方法, 是研究地下水咸化机制的常用方法。王雨山等^[3]对宁夏西部海原盆地地下水咸化的水文地球化学过程进行了研究, 发现溶滤作用是控

收稿日期: 2022-01-26; 修订日期: 2022-03-05

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01B18); 新疆水利工程安全与水灾害防治自治区重点实验室2021年开放课题项目(ZDSYS-JS-2021-10); 国家自然科学基金项目(41662016)

作者简介: 鲁涵(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水文地球化学及地下水保护, E-mail: 1625547591@qq.com

* 通信作者, E-mail: 644257818@qq.com

制海原盆地地下水咸化的首要因素. 张杰等^[6]对新疆叶尔羌河流域平原区地下水咸化进行了分析, 因子分析和聚类分析表明, 影响地下水咸化的因素可分为水文地质条件控制、地下水化学环境影响和人为活动影响这三类. 曾邯斌等^[5]分析内蒙古河套灌区西部浅层地下水咸化机制, 主成分分析和水文地球化学模拟结果表明, 蒸发作用和岩盐溶解对区内浅层地下水咸化贡献最大.

喀什噶尔河发源于帕米尔与北部天山支脉阿里山, 流经乌恰、疏勒、伽师和巴楚等县, 本文选取喀什噶尔河下游平原区为研究区, 行政区隶属喀什地区巴楚县. 喀什地区拥有“五口通八国, 一路连欧亚”的独特地缘优势, 是现今“一带一路”丝绸之路经济带的核心, 巴楚县作为喀什地区的东大门, 是全国人流和物流由喀什进入中亚的重要通道, 其战略地位尤为重要^[18]. 研究区内广泛分布地下水^[19], 但咸化程度和咸化机制研究程度略有欠缺, 若不合理开发, 则会引起农作物减产和优质含水层污染等一系列问题. 因此, 查明导致地下水咸化的物理和化学过程中的相关因素显得尤为必要, 且有助于制定防治地下水咸化的措施, 对合理规划、管理和利用当地地下水资源具有重要意义.

1 研究区概况

研究区位于新疆西南部, 地处天山南麓, 塔里木盆地西北缘, 地理坐标: $77^{\circ}19' \sim 79^{\circ}52' E$, $38^{\circ}47' \sim 40^{\circ}17' N$ (图 1). 研究区总面积 $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中, 平原区面积为 $1.18 \times 10^4 \text{ km}^2$ (绿洲灌区面积为 $0.28 \times 10^4 \text{ km}^2$), 山区面积为 $0.06 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20]. 由于受地理位置和水汽条件的影响, 研究区形成了降水量少、蒸发量大的温带大陆性干旱气候; 区内地形平坦, 其地势总体为西南高, 东北低, 最高海拔 1 170 m, 最低海拔 1 102 m, 平均坡降 0.45‰; 出露地层均为第四纪冲洪积层和风积层, 厚度表现为东北薄、西南厚的特点; 地貌为典型的堆积地貌, 按成因不同可分为河流冲积平原和风积沙漠^[18,20]. 含水层为第四纪松散沉积物, 是地下水赋存的良好介质, 其发育方向与河流方向一致, 由于构造的影响, 含水层的厚度自西南向东北逐渐变薄, 岩性主要以中细砂、细砂及粉细砂组成, 局部地段有中粗砂分布, 其岩性在沿河流方向上变化不大, 而远离河床或古河道、古河床, 岩性的颗粒相对变细, 但仍以细砂、粉细砂和粉砂为主^[20].

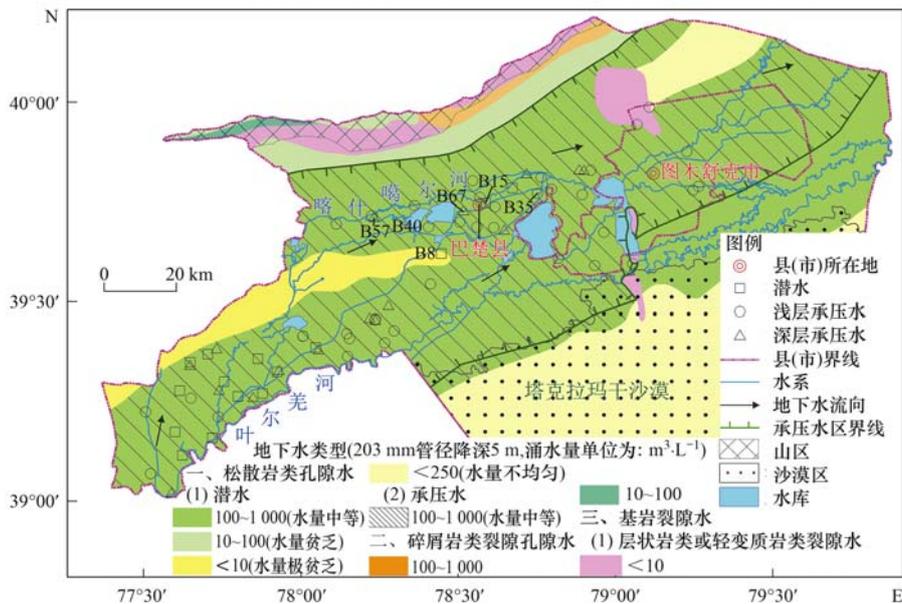


图 1 区域水文地质和地下水采样点分布示意

Fig. 1 Regional hydrogeological and distribution of groundwater sampling sites

研究区地下水的补给主要方式为河道水渗漏补给、田间浇灌水渗漏补给、山前侧向径流补给和渠系水渗漏补给等; 地形地势对地下径流方式起主要影响作用, 地下水水力坡度小于 1‰, 径流比较缓慢; 地下水的排泄主要方式为蒸发、开采和侧向径流等^[21].

2 材料与方法

2.1 地下水采样与测试

地下水采样点布设以《区域地下水污染调查评价规范》(DZ/T 0288-2015) 为依据, 以绿洲灌区为重点控制区, 在 2018 年 9 月共采集了 69 组地下水

水样(潜水、浅层承压水和深层承压水水样分别为 15、38 和 16 组,图 1),井深为 7~150 m,水样采集时段内未有降水出现。取样前,聚乙烯瓶用所取水样润洗 3~5 次,水样过滤采用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜,加硝酸酸化至 $\text{pH} < 2$ 的水样用于阳离子分析,贴好标签密闭冷藏保存。

pH、水温、溶解氧(DO)、氧化还原电位(Eh)和电导率(EC)等现场测试指标均由哈纳(HANNA) HI98121 笔式测定仪测定。地下水样的水化学指标测试由新疆地矿局第二水文地质工程地质大队实验室完成。采用火焰原子吸收分光光度法测定 K^+ 和 Na^+ , 乙二胺四乙酸二钠滴定法测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 和总硬度(TH),硝酸银容量法测定 Cl^- ,硫酸钡比浊法测定 SO_4^{2-} ,检测限均为 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 采用紫外分光光度法测定 NO_3^- ,检出限为 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 使用电子天平 MP8-1 测定溶解性总固体(TDS),检出限为 $0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。利用阴阳离子平衡法对数据进行可靠性检验,经检验 69 个水样的阴阳离子平衡相对误差 E 在 $\pm 5\%$ 之间,表明所有数据都是可靠的。

2.2 研究方法

为了进一步分析研究区地下水咸化成因,运用主成分分析-绝对主成分-多元线性回归模型(PCA-

APCS-MLR)对地下水化学组分来源进行解析,且在回归方程中 11 项指标线性拟合 R^2 在 $0.70 \sim 0.97$ 之间,预测值与实测值比值在 $0.90 \sim 1.11$,表明模型对研究区地下水化学组分来源的识别及对贡献的分配较为准确;运用 Gibbs 图解法和离子比值法来分析地下水化学组分的来源及形成作用;运用水文地球化学模拟软件 PHREEQC 对地下水水流路径进行反向水文地球化学模拟,确定模拟路径上矿物的溶解沉淀量,分析水流路径中各水化学组分的变化特征,探讨其形成过程的水化学环境。

3 结果与讨论

3.1 地下水水化学特征

从研究区地下水化学指标统计表可以看出(表 1),地下水中 pH 的变化范围为 $6.48 \sim 8.60$,均值为 7.57,整体呈弱碱性;潜水 TDS 的变化范围为 $805.1 \sim 5749.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $3288.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;浅层承压水 TDS 的变化范围为 $573.0 \sim 9250.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $4191.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;深层承压水 TDS 的变化范围为 $597.4 \sim 16700.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $4852.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 为地下水中的优势离子,初步揭示岩盐和石膏等蒸发盐岩在地下水中的溶解过程^[22]。

表 1 地下水化学指标统计¹⁾

Table 1 Statistics of groundwater hydrochemical indexes

指标	潜水(N=15)			浅层承压水(N=38)			深层承压水(N=16)		
	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值
pH	7.28	6.48	7.76	7.35	6.85	8.60	8.08	7.15	8.60
K^+	45.1	11.5	120.4	32.4	8.4	221.1	96.9	8.8	437.7
Na^+	523.5	112.6	943.4	730.7	73.8	1989.6	999.0	65.5	3939.5
Ca^{2+}	326.3	80.2	615.4	392.8	59.4	858.0	418.3	72.6	1040.0
Mg^{2+}	177.9	51.5	353.8	193.9	29.7	411.0	205.1	32.1	593.0
Cl^-	569.6	112.0	1187.8	941.5	78.7	2740.0	1476.7	83.7	5980.0
SO_4^{2-}	1402.3	228.4	2613.7	1631.8	171.6	4050.0	1749.8	160.0	4990.0
HCO_3^-	439.8	174.8	766.4	368.6	88.0	550.1	231.6	59.9	491.4
NO_3^-	0.7	0.1	2.4	3.4	0.06	53.2	5.3	0.1	5.3
TDS	3288.3	805.1	5749.8	4191.3	573.0	9250.0	4852.9	597.4	16700.0
TH	1547.1	448.4	2993.0	1779.5	320.3	3840.0	1980.5	313.3	5040.0

1) pH 为无量纲,其余指标单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

从地下水 Durov 图可以看出(图 2),在阴离子三角图中水样点主要分布在 SO_4^{2-} 轴,在阳离子三角图中水样点主要分布在 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 轴与 Mg^{2+} 轴之间,并更偏向于 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 轴;pH 和 TDS 均呈现出深层承压水 > 浅层承压水 > 潜水的规律。采用舒卡列夫分类法划分地下水化学类型,潜水中地下水化学类型共有 4 类,分别为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 、 SO_4 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型,分别占水样总数的 6.7%、26.6%、20.0% 和 46.7%,地下水化学类型主要为

$\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 、 SO_4 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型,占比为 93.3%;浅层承压水中地下水化学类型共有 4 类,分别为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 、 SO_4 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型,分别占水样总数的 5.3%、5.3%、5.3% 和 84.1%,地下水化学类型主要为 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型,占比为 84.1%;深层承压水中地下水化学类型共有 3 类,分别为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4$ 、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型,分别占水样总数的 6.3%、12.4% 和 81.3%,地下水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 和 $\text{SO}_4\cdot\text{Cl}$ 型,占比为 93.7%。

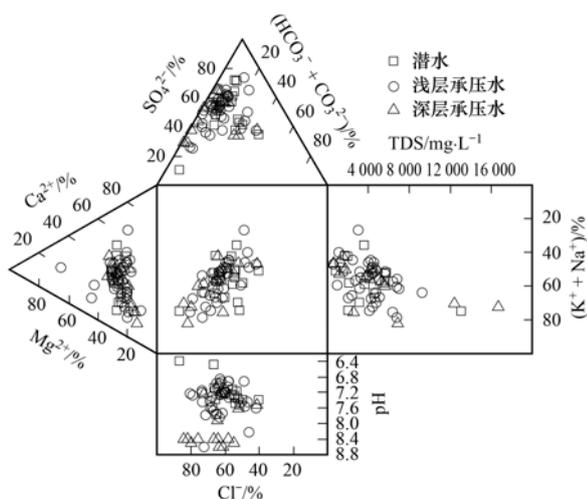


图2 地下水 Durov 图

Fig. 2 Durov diagram of groundwater

3.2 TDS 空间分布特征

TDS 常用来指示地下水咸化特征,按 TDS 将地下水划分为淡水 ($< 1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、微咸水 ($1 \sim 3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、咸水 ($3 \sim 10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)、盐水 ($10 \sim 50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和卤水 ($> 50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[23]. 从不同类型地下水按 TDS 分区面积和占比统计(表 2)和地下水 TDS 空间分布特征(图 3)可以看出,研究区不存在卤水,潜水 TDS 从南向北呈逐渐增加的分布规律,主要以微咸水和咸水分布为主,面积占比分别为 54.1% 和 45.8%,淡水仅零星分布于研究区的西南部;浅层承压水中广泛分布咸水,面积占比为 91.1%,微咸水和淡水分布于研究区的西南部和中部;深层承压水中主要以咸水的分布为主,面积占比为 77.8%,盐水分布于研究区的中部,微咸水和淡水分布于研究区

表 2 不同类型地下水按 TDS 分区面积和占比统计

Table 2 Statistics of TDS zoning area and proportion of different groundwater types

TDS / $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	潜水		浅层承压水		深层承压水	
	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%	面积/ km^2	比例/%
<1	8.51	0.1	50.51	0.5	152.16	1.6
1~3	6359.89	54.1	806.56	8.4	1069.09	11.1
3~10	5386.18	45.8	8792.52	91.1	7505.83	77.8
10~50	—	—	—	—	922.51	9.5
合计	11754.58	100.0	9649.59	100.0	9649.59	100.0

的西南部.在潜水、浅层承压水和深层承压水中微咸水和咸水的总面积占比均超过了 85.0% 以上.

3.3 地下水咸化程度

通过计算地下水咸化系数 (salinization coefficient, SC) 确定地下水咸化程度, SC 范围为 ≤ 1 、 $1 \sim 2$ 和 > 2 , 分别表示未咸化水、微咸化水和咸化水^[6]. 公式如下:

$$SC = c_{\text{Cl}^-} / (c_{\text{HCO}_3^-} + c_{\text{CO}_3^{2-}}) \quad (1)$$

式中, c_{Cl^-} 、 $c_{\text{HCO}_3^-}$ 和 $c_{\text{CO}_3^{2-}}$ 分别为地下水水样中的 Cl^- 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

由地下水咸化系数结果可知(表 3), 研究区

主要分布咸化水, 其次为微咸化水和未咸化水. 其中潜水中未咸化水占比最高为 46.6%, 其次为微咸化水 (26.7%) 和咸化水 (26.7%); 浅层承压水中咸化水占比最高为 60.5%, 其次为微咸化水 (23.7%) 和未咸化水 (15.8%); 深层承压水中咸化水占比最高为 62.4%, 其次为微咸化水 (18.8%) 和未咸化水 (18.8%). 咸化水样本占比深层承压水 > 浅层承压水 > 潜水. 从研究区 TDS 与井深关系也可以看出(图 4), 随井深的增大, TDS 呈现出逐渐增大的趋势(深层承压水 > 浅层承压水 > 潜水).

表 3 地下水咸化系数

Table 3 Salinization coefficient of groundwater

咸化系数	潜水		浅层承压水		深层承压水		全水样	
	样本数	占比/%	样本数	占比/%	样本数	占比/%	样本数	占比/%
<1	7	46.6	6	15.8	3	18.8	16	22.9
1~2	4	26.7	9	23.7	3	18.8	16	22.9
>2	4	26.7	23	60.5	10	62.4	38	54.2
合计	15	100.0	38	100.0	16	100.0	70	100.0

3.4 地下水咸化成因

3.4.1 PCA-APCS-MLR 源解析

对研究区 69 组水样中的 pH、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、TDS 和 TH 共 11 项指标进行主成分分析, 检验结果得到 KMO 值为

0.67, 接近 0.70, Bartlett 球形检验显著性水平小于 0.01, 表明数据具有较强的相关性, 可以做主成分分析^[24]. 选取了 3 个特征值大于 1 的公因子 (F1、F2 和 F3), 累计方差贡献率为 84.393%, 公因子特征值和成分矩阵如表 4 所示.

表 4 公因子特征值和成分矩阵¹⁾

Table 4 Common factor eigenvalues and component matrix

公因子	解释的总方差			化学指标	成分矩阵		
	初始特征值				公因子		
	合计	方差贡献率/%	累积贡献率/%		1	2	3
1	6.538	59.434	59.434	pH	0.068	0.888	-0.234
2	1.641	14.922	74.356	K ⁺	0.783	0.404	-0.194
3	1.104	10.037	84.393	Na ⁺	0.904	0.022	-0.234
4	0.872	7.923	92.316	Ca ²⁺	0.878	-0.114	0.276
5	0.398	3.618	95.934	Mg ²⁺	0.943	-0.059	-0.023
6	0.212	1.924	97.858	Cl ⁻	0.874	0.021	-0.255
7	0.139	1.266	99.125	SO ₄ ²⁻	0.874	0.060	0.226
8	0.073	0.659	99.784	HCO ₃ ⁻	0.106	-0.814	-0.303
9	0.019	0.176	99.960	NO ₃ ⁻	0.001	0.014	0.815
10	0.003	0.028	99.988	TDS	0.983	-0.037	-0.081
11	0.001	0.012	100.000	TH	0.964	-0.054	0.115

1) 黑体字表示指标在因子上的最高载荷值

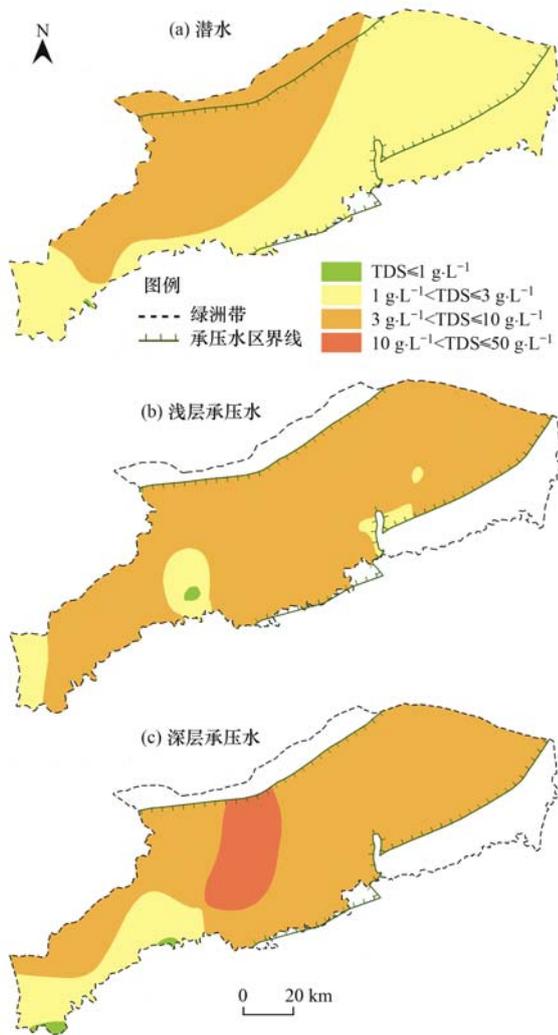


图 3 地下水 TDS 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of groundwater TDS

在主成分分析的基础上,得到各水化学指标贡献率.从成分矩阵(表 4)和指标贡献率(图 5)可以看出,第一主成分 F1 的主要荷载为 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、TDS 和 TH,其贡献率分别

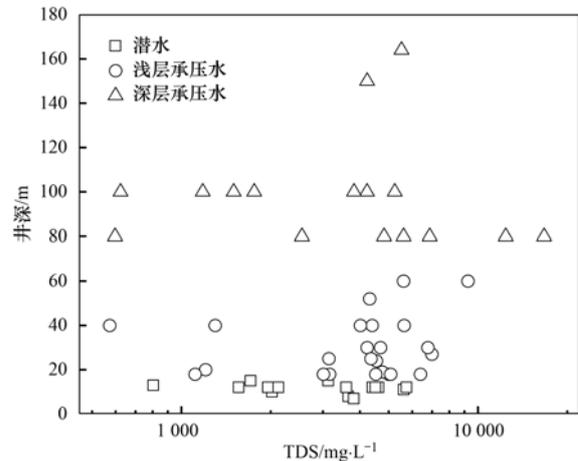


图 4 TDS 与井深关系

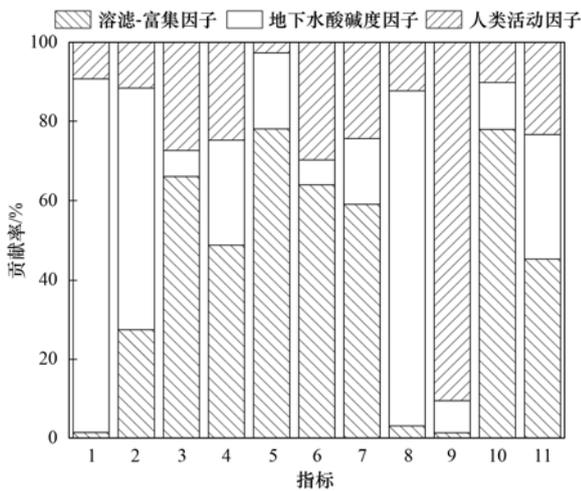
Fig. 4 Relationship between TDS and well depth

为 27.4%、66.0%、48.7%、78.0%、63.9%、59.0%、77.9% 和 70.4%。在地下水径流的过程中,溶滤作用使白云石(Ca²⁺、Mg²⁺)、钾长石(K⁺)、石膏(Ca²⁺、SO₄²⁻)和岩盐(Na⁺、Cl⁻)等矿物发生溶解,此外,研究区属于温带大陆性干旱气候,强烈的蒸发浓缩作用导致浅层地下水中盐分不断积累,从而为形成高矿化度的氯化物水提供了基本条件^[4].因此,将第一主成分 F1 归结为溶滤-富集因子^[25].

第二主成分 F2 的主要荷载为 pH,贡献率为 89.0%,表明地下水酸碱度对地下水咸化具有一定的影响^[6],HCO₃⁻ 与第二主成分 F2 具有较强的负相关性,贡献率为 84.5%,碳酸盐岩的溶解是地下水中 HCO₃⁻ 的主要来源,对地下水酸碱度具有调节作用^[25].因此,将第二主成分 F2 归结为地下水酸碱度因子.

第三主成分 F3 的主要荷载为 NO₃⁻,其贡献率为 90.5%,NO₃⁻ 反映人类活动对地下水的影响^[17],

表明研究区地下水咸化受人类活动的影响. 研究区农户为了提高作物产量, 使用各种肥料增加土壤养分、不合理地使用地表水灌溉和生活污水处理不当等对研究区地下水化学组分造成不同程度的污染^[20,26]. 因此, 将第三主成分 F3 归结为人类活动因子.



1. pH, 2. K^+ , 3. Na^+ , 4. Ca^{2+} , 5. Mg^{2+} , 6. Cl^- ,
7. SO_4^{2-} , 8. HCO_3^- , 9. NO_3^- , 10. TDS, 11. TH

图5 各因子中指标源贡献率

Fig. 5 Contribution rate of index sources in each factor

3.4.2 溶滤作用

3.4.2.1 离子比值法

地下水中的溶解离子主要来源有大气输入、岩石风化作用和人类活动输入等^[27,28]. 为进一步分析研究区地下水中主要离子的来源, 应用水体中各种离子比值关系分析其水文地球化学过程^[29]. 不同岩石的风化会产生不同的离子, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩的风化溶解, Na^+ 和 K^+ 主要来自于硅酸盐岩和蒸发盐岩的风化溶解, HCO_3^- 主要来源于碳酸盐岩和硅酸盐岩的风化溶解, SO_4^{2-} 和 Cl^- 主要来源于蒸发盐岩的风化溶

解, 通常用混合图来揭示化学风化作用产生的离子来源^[30].

地下水中主要的离子成分主要受碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩等矿物溶解的控制, 利用 $Cl^- + SO_4^{2-}$ 与 HCO_3^- 和 $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ 与 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ (毫克当量浓度的比值, 下同) 关系来识别碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩风化对研究区地下水咸化的贡献^[31,32]. 如图6(a)所示, 地下水采样点主要分布在蒸发盐岩控制区, 且从潜水至深层承压水地下水水样点逐渐远离1:1直线. 若 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 是碳酸盐岩(方解石和白云石)和蒸发盐岩(石膏)溶解的产物, 那么在阳离子和阴离子之间, 就应该存在电荷平衡^[33]. 如图6(b)所示, 地下水采样点主要分布在1:1等值线附近, 且部分地下水样品 $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ 的含量高于 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$, 说明 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 多余的负电荷就将需要另一种主要阳离子来平衡(如 Na^+)^[33]. 结合图6(a)和图6(b), 研究区地下水咸化主要是碳酸盐岩、硅酸盐岩和蒸发盐岩风化溶解的贡献, 且蒸发盐岩的溶解占主导地位. 由研究区地下水化学指标统计表可知(表1), SO_4^{2-} 和 Cl^- 的平均含量从潜水至深层承压水逐渐增加, 而 HCO_3^- 的平均含量在逐渐减小, 且在深层地下水中 SO_4^{2-} 和 Cl^- 的平均含量是 HCO_3^- 的7.55和6.38倍, 间接表明深层地下水主要受蒸发盐岩溶解的控制.

地下水中的 Na^+ 和 K^+ 主要来源于大气降水、硅酸盐矿物和蒸发盐矿物溶解^[34], 盐水和岩盐溶解的 Na^+/Cl^- 比值分别为0.86和1左右^[29]. Ca^{2+}/Mg^{2+} 的比值常用来揭示 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的来源, 如果 $Ca^{2+}/Mg^{2+} = 1$, 则表示 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源于白云石的溶解; 若是 $1 < Ca^{2+}/Mg^{2+} < 2$, 则表示有更多方解石的溶解; 当 $Ca^{2+}/Mg^{2+} > 2$ 时, 则表示有硅酸盐岩或石膏的溶解来提供 Ca^{2+} ^[30]. 如图7(a)所示, 从

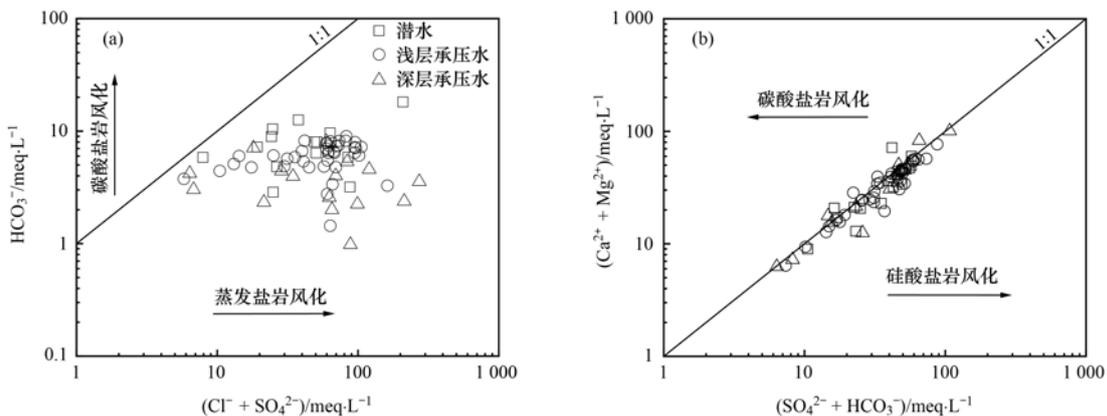


图6 $Cl^- + SO_4^{2-}$ 与 HCO_3^- 和 $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ 与 $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ 离子比值关系

Fig. 6 Relationship between $Cl^- + SO_4^{2-}$ and HCO_3^- , $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ and $Ca^{2+} + Mg^{2+}$

潜水至深层承压水 Na^+/Cl^- 的比值呈现出逐渐减小的趋势,且 Na^+/Cl^- 的平均比值分别为 1.47、1.22 和 1.15,表明在研究区潜水中的 Na^+ 除了来源于大气降水和岩盐的溶解外,还受到含钠硅酸盐矿物的溶解和阳离子交换作用的影响^[17];在浅层承压水和深层承压水中 Na^+/Cl^- 的平均比值更接近 1,表明 Na^+ 和 Cl^- 主要受岩盐溶解的影响,间接表明蒸发盐岩的溶解逐渐加强,硅酸盐岩风化溶解和阳离子交换作用逐渐减弱;此外,个别水样点落在 $\text{Na}^+/\text{Cl}^- = 1$ 线下方,由于 Cl^- 在地下水中较为稳定,不易受到物理、化学和微生物的影响,其浓度一般只在 Cl^- 浓度不同的水体发生混合

的情况下才会改变^[35],研究区长期使用一些未经处理的劣质井和报废井,使隔水层遭到破坏,导致高矿化度的浅层地下水沿井壁下渗补给深层承压水^[4],相邻含水层之间咸水的越流补给是导致研究区地下水咸化的次要因素^[36].如图 7(b)所示,潜水、浅层承压水和深层承压水中 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 的平均比值分别为 1.16、1.34 和 1.29,大部分地下水采样点分布在 $1 < \text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+} < 2$ 之间,表明地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来源于方解石的溶解,潜水的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 值接近 1,表明潜水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 除了来源于方解石的溶解外,还可能来源于白云石等的溶解.

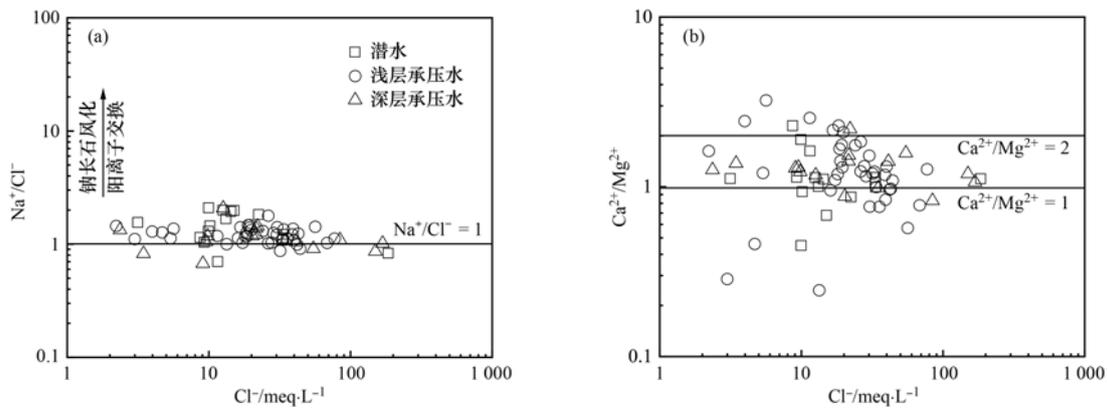


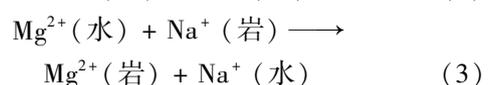
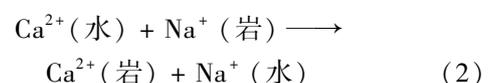
图7 Cl^- 与 Na^+/Cl^- 和 Cl^- 与 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 离子比值关系

Fig. 7 Relationship between Cl^- and Na^+/Cl^- , Cl^- and $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$

利用 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的比值关系可以进一步分析碳酸盐岩和石膏溶解对地下水化学组分的贡献^[37,38],通常情况下,碳酸盐岩矿物溶解所产生的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 值为 2,当发生阳离子交换作用时,比值会发生改变,且 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 的值接近 1,这可以验证阳离子交换作用是否盛行;若硫酸参与碳酸盐岩矿物溶解过程,则 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 的比值为 1, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 的值为 2^[37,38],如图 8(a)所示,地下水采样点主要分布在石膏溶解线附近,个别水样受到了硫酸参与碳酸盐岩溶解的影响,表明地下水中的 Ca^{2+} 主要来源于石膏的溶解,而少部分 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 来源于碳酸盐岩的溶解.因此,石膏等蒸发盐岩的风化溶解是导致研究区地下水咸化的主要原因.

阳离子交换作用主要发生在 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 之间,地下水和岩石长期的相互作用过程中,岩石表面颗粒带有的负电荷在一定条件下将吸附地下水中的某些阳离子,而将原先吸附的部分阳离子释放到地下水中^[39],如图 8(b)显示,地下水采样点主要分布在第四象限,个别采样点分布在第一象限,

表明地下水中主要发生了反向的阳离子交换作用,由 3.4.1 节可知,地下水酸碱环境对研究区地下水咸化具有一定的影响作用,研究区地下水 pH 值变化范围为 6.48~8.60,弱碱性的地下水环境有利于阳离子交换作用,同时, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 的吸附亲和力高于 Na^+ ,使得地下水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 置换出了岩石表面吸附的 Na^+ [式(2)和式(3)],导致地下水中 Na^+ 升高,使地下水趋于咸化^[40].潜水、浅层承压水和深层承压水的水样分别分散在斜率为 -0.89 (R^2 为 0.9593)、 -0.77 (R^2 为 0.7942) 和 -0.75 (R^2 为 0.6555) 的直线附近,结合图 8(a),潜水、浅层承压水和深层承压水的 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 平均比值分别为 5.25、6.54 及 13.67,逐渐远离 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^- = 2$ 的直线,表明从潜水至深层承压水阳离子交换作用逐渐减弱.



综上所述,在研究区潜水、浅层承压水和深层承压水中均受到碳酸盐岩、硅酸盐岩、蒸发盐岩的

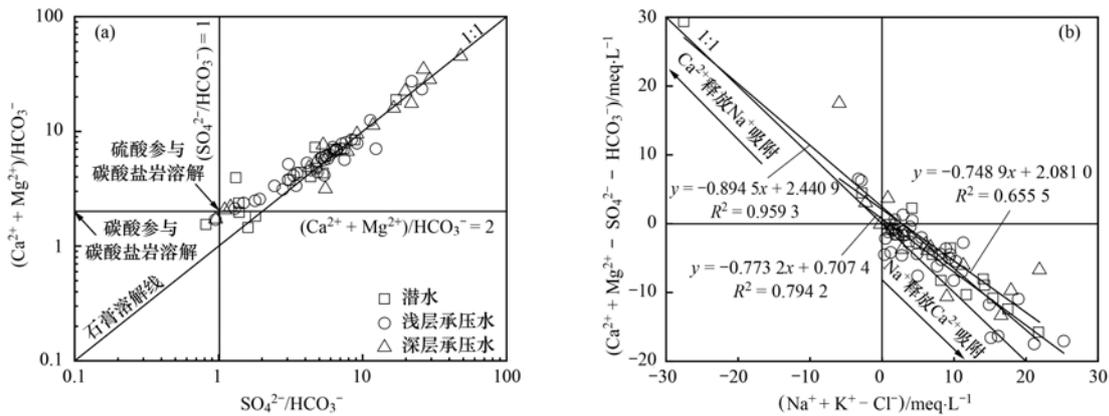


图 8 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$ 和 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 与 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$ 离子比值关系

Fig. 8 Relationship between $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ and $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/\text{HCO}_3^-$, $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ and $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-)$

风化溶解和阳离子交换作用的影响,且从潜水至深层承压水蒸发盐岩的风化溶解逐渐加强,而碳酸盐岩、硅酸盐岩风化溶解和阳离子交换作用逐渐减弱。

3.4.2.2 饱和指数法

为进一步了解研究区地下水中主要矿物的溶解情况,利用 PHREEQC 软件计算研究区地下水中不同矿物的饱和指数 (saturation index, SI),分析地下水中各矿物的沉淀、平衡和溶解状态^[41]。饱和指数 $\text{SI} > 0$,水溶液处于过饱和(沉淀); $\text{SI} = 0$,水溶液处于饱和(平衡); $\text{SI} < 0$,水溶液处于不饱和(溶解)^[42]。

在潜水、浅层承压水和深层承压水中方解石、白云石和文石的平均饱和指数分别为 0.57、0.61 和 0.95; 1.23、1.27 和 1.85; 0.43、0.47 和 0.77。石膏、硬石膏和岩盐的平均饱和指数分别为 -0.51、-0.42 和 -0.45; -0.72、-0.64 和 -0.70; -5.19、-5.09 和 -5.06。从研究区 TDS 与 SI 关系可以看出(图 9),方解石和文石的饱和指数呈现出与 x 轴保持水平的关系,仅个别白云石的饱和指数呈现出随 TDS 增大而增大的趋势;石膏、硬石膏和岩盐的饱和指数呈现出随 TDS 的增大而增大的变化趋势,且岩盐的增大趋势大于石膏和硬石膏的增大趋势。这说明石膏、硬石膏和岩盐等蒸发盐岩的溶解对于研究区地下水咸化的贡献最大,

与前文结论一致,蒸发盐岩溶解始终占据主导地位。

3.4.3 反向水文地球化学模拟

PHREEQC 软件可定量模拟各种自然过程和人为活动影响下的水-岩相互作用^[43]。研究区地势平缓,地下水水力坡度较小,地下水水径流速度缓慢^[44],沿地下水流方向,从潜水、浅层承压水和深层承压水中各选取一条水流路径进行模拟,路径分别为 B8→B15、B40→B35 和 B57→B67(图 1)。研究区含水层中主要矿物有方解石、白云石、石膏和岩盐等^[40]。故将方解石和白云石等两种碳酸盐矿物、石膏和岩盐等两种蒸发盐矿物和阳离子交换等作为“可能矿物相”;考虑潜水处于开放状态,所以在潜水路经中,将 CO_2 也作为“可能矿物相”。

反向模拟结果如表 5 所示,沿地下水水流运动方向,在潜水、浅层承压水和深层承压水中方解石一直处于沉淀状态;白云石和石膏一直处于溶解状态;岩盐也由沉淀状态转为溶解状态。白云石一直处于溶解状态,这是由于石膏的溶解使地下水中的 Ca^{2+} 浓度增大,导致方解石先沉淀下来,使释放出来的 Ca^{2+} 被再次沉淀,间接促使白云石进一步溶解(方解石的沉淀量大于白云石的溶解量)^[45];在浅层承压水和深层承压水中石膏和岩盐的溶解量进一步增强,并且 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 作为研究区地下水中的优势阴阳离子,是 TDS 的主导因素,从而

表 5 典型地下水流路径上矿物的溶解沉淀量¹⁾/mmol·L⁻¹

Table 5 Amount of dissolved and precipitated minerals in typical groundwater flow paths/mmole·L⁻¹

矿物相	化学式	潜水 (B8→B15)	浅层承压水 (B40→B35)	深层承压水 (B57→B67)
方解石	CaCO_3	-1.503×10^{-2}	-2.078×10^{-2}	-3.561×10^{-2}
白云石	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	5.547×10^{-3}	1.115×10^{-2}	1.768×10^{-2}
石膏	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1.363×10^{-2}	1.765×10^{-2}	3.029×10^{-2}
岩盐	NaCl	-1.477×10^{-4}	2.120×10^{-2}	1.498×10^{-1}
CO_2	CO_2	-3.464×10^{-3}	—	—
阳离子交换	NaX	-4.501×10^{-3}	1.031×10^{-2}	4.616×10^{-3}
	CaX_2	2.250×10^{-3}	-5.157×10^{-3}	-2.308×10^{-3}

1) 正值表示溶解,负值表示沉淀;“—”表示未参与反应

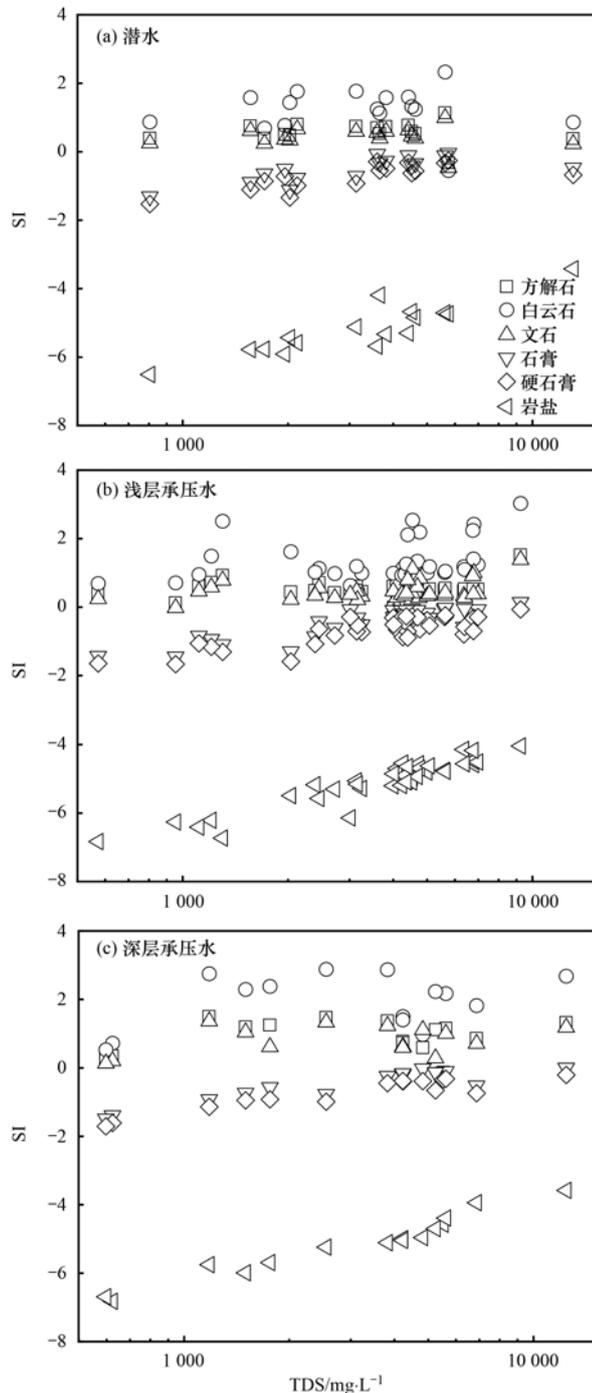


图9 地下水中 TDS 与 SI 关系

Fig. 9 Relationship between groundwater TDS and SI

使 TDS 呈现出深层承压水 > 浅层承压水 > 潜水(图 4)。在潜水、浅层承压水和深层承压水中,矿物的溶解沉淀量大于阳离子交换量,表明研究区地下水溶解沉淀作用强于阳离子交换作用,因此,石膏和岩盐等蒸发岩类的溶解对研究区地下水咸化起主要控制作用,与前文分析结果一致。

4 结论

(1)研究区内地下水总体呈弱碱性,TDS 的变化范围为 $573.0 \sim 16\,700.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,地下水化学类

型主要为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 、 SO_4 和 $\text{SO}_4 \cdot \text{Cl}$ 型。根据研究区 TDS 分布和咸化系数结果,在潜水、浅层承压水和深层承压水中微咸水和咸水的总面积均超过了 85%,且在深层承压水中出现盐水,浅层承压水和深层承压水咸化程度大于潜水。

(2)研究区地下水咸化受蒸发浓缩作用、溶滤作用、阳离子交换作用和人类活动的共同影响,其中蒸发浓缩作用和溶滤作用是影响和控制研究区地下水咸化的主要因素。从潜水至深层承压水蒸发盐岩的风化溶解呈现出持续增强的规律,而碳酸盐岩、硅酸盐岩风化溶解和阳离子交换作用呈现出逐渐减弱的规律;相邻含水层咸水的越流补给加剧了研究区地下水咸化。

(3) Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 作为研究区地下水中的优势阴阳离子,主要来源于石膏和岩盐的风化溶解。在潜水、浅层承压水和深层承压水中石膏和岩盐的饱和指数均与 TDS 呈现出显著的正相关关系,且沿地下水流动运动方向,在浅层承压水和深层承压水中石膏和岩盐的溶解量进一步增强,是导致深层地下水咸化程度大于浅层地下水的首要因素。

参考文献:

- [1] Liu Y L, Jin M G, Wang J J. Insights into groundwater salinization from hydrogeochemical and isotopic evidence in an arid inland basin[J]. *Hydrological Processes*, 2018, **32**(20): 3108-3127.
- [2] Lin J J, Ma R, Hu Y L, et al. Groundwater sustainability and groundwater/surface-water interaction in arid Dunhuang Basin, Northwest China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, **26**(5): 1559-1572.
- [3] 王雨山,李戎,李海学,等. 海原盆地地下水咸化特征和控制因素[J]. *水文地质工程地质*, 2019, **46**(4): 10-17, 57. Wang Y S, Li S, Li H X, et al. Groundwater salinization characteristics and controlling factors in the Haiyuan Basin [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2019, **46**(4): 10-17, 57.
- [4] 林丽,曾妍妍,周金龙. 塔里木盆地平原区深层承压水咸化成因分析[J]. *人民黄河*, 2017, **39**(5): 72-75. Lin L, Zeng Y Y, Zhou J L. Cause analysis of salinization of deep confined groundwater in Tarim Basin Plain [J]. *Yellow River*, 2017, **39**(5): 72-75.
- [5] 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.
- [6] 张杰,周金龙,乃尉华,等. 新疆叶尔羌河流域平原区浅层地下水咸化空间分布及成因[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(23): 126-134. Zhang J, Zhou J L, Nai W H, et al. Spatial distribution and cause of salinization of shallow groundwater in plain terrain of the Yarkant River Basin, Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, **35**(23): 126-134.
- [7] Chen X, Jiang C L, Zheng L G, et al. Evaluating the genesis and dominant processes of groundwater salinization by using

- hydrochemistry and multiple isotopes in a mining city [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117381.
- [8] Lorenzen G, Sprenger C, Baudron P, *et al.* Origin and dynamics of groundwater salinity in the alluvial plains of western Delhi and adjacent territories of Haryana State, India [J]. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(15): 2333-2345.
- [9] Tweed S, Leblanc M, Cartwright I, *et al.* Arid zone groundwater recharge and salinisation processes; an example from the Lake Eyre Basin, Australia [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, **408**(3-4): 257-275.
- [10] Huang T M, Pang Z H. The role of deuterium excess in determining the water salinisation mechanism; a case study of the arid Tarim River Basin, NW China [J]. *Applied Geochemistry*, 2012, **27**(12): 2382-2388.
- [11] 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.
- [12] Farid I, Zouari K, Rigane A, *et al.* Origin of the groundwater salinity and geochemical processes in detrital and carbonate aquifers: case of Chougafiya basin (Central Tunisia) [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, **530**: 508-532.
- [13] Sunkari E D, Abu M, Zango M S. Geochemical evolution and tracing of groundwater salinization using different ionic ratios, multivariate statistical and geochemical modeling approaches in a typical semi-arid basin [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2021, **236**, doi: 10.1016/j.jconhyd.2020.103742.
- [14] 王雨山, 李成, 孟莹, 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.
- [15] Pulido-Bosch A, Rigol-Sanchez J P, Vallejos A, *et al.* Impacts of agricultural irrigation on groundwater salinity [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, **77**(5), doi: 10.1007/s12665-018-7386-6.
- [16] Li Q H, Zhang Y P, Chen W, *et al.* The integrated impacts of natural processes and human activities on groundwater salinization in the coastal aquifers of Beihai, Southern China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2018, **26**(5): 1513-1526.
- [17] 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 等. 无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 220-229.
Li S J, Han X, Wang W H, *et al.* Hydrochemical characteristics and controlling factors of surface water and groundwater in Wuding River Basin [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 220-229.
- [18] 杨志莹. 巴楚县耕地保护绩效评价研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
Yang Z Y. The study on performance evaluation of cultivated land protection policy in Bachu County [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [19] Li Q, Zhou J L, Zhou Y Z, *et al.* Salinization of deep groundwater in plain areas of Xinjiang: causes and countermeasures [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2014, **52**(13-15): 2724-2733.
- [20] 孙英, 周金龙, 魏兴, 等. 巴楚县平原区地下水水化学特征及成因分析 [J]. *环境化学*, 2019, **38**(11): 2601-2609.
Sun Y, Zhou J L, Wei X, *et al.* Hydrochemical characteristics and cause analysis of groundwater in the plain area of Bachu County [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(11): 2601-2609.
- [21] 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 等. 巴楚县浅层地下水中氟的分布特征及影响因素分析 [J]. *环境化学*, 2021, **40**(11): 3455-3463.
Lu H, Zeng Y Y, Zhou J L, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of fluorine in shallow groundwater of Bachu County [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, **40**(11): 3455-3463.
- [22] Dhaoui O, Antunes I, Agoubi B, *et al.* Geochemical processes of groundwater salinization in an arid area, southeastern Tunisia [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, **14**(17), doi: 10.1007/s12517-021-08155-3.
- [23] 曾妍妍, 周金龙, 乃尉华, 等. 新疆喀什噶尔河流域地下水形成的水文地球化学过程 [J]. *干旱区研究*, 2020, **37**(3): 541-550.
Zeng Y Y, Zhou J L, Nai W H, *et al.* Hydrogeochemical processes of groundwater formation in the Kashgar River Basin, Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37**(3): 541-550.
- [24] 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 等. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2476-2488.
Shen C Y, Yan Y, Yu R L, *et al.* APCS-MLR combined with PMF model to analyze the source of metals in sediment of Xinglin Bay suburban watershed, Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2476-2488.
- [25] 雷米, 周金龙, 张杰, 等. 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1873-1884.
Lei M, Zhou J L, Zhang J, *et al.* Hydrochemical characteristics and transformation relationship of surface water and groundwater in the plain area of Bortala River Basin, Xinjiang [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1873-1884.
- [26] 金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 等. 基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 1696-1705.
Jin Z F, Hu J, Wu A J, *et al.* Identify the nitrate sources in different land use areas based on multiple isotopes [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1696-1705.
- [27] 蒲俊兵, 袁道先, 蒋勇军, 等. 重庆岩溶地下水水文地球化学特征及环境意义 [J]. *水科学进展*, 2010, **21**(5): 628-636.
Pu J B, Yuan D X, Jiang Y J, *et al.* Hydrogeochemistry and environmental meaning of Chongqing subterranean karst streams in China [J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(5): 628-636.
- [28] El Alfy M, Lashin A, Al-Arifi N, *et al.* Groundwater characteristics and pollution assessment using integrated hydrochemical investigations GIS and multivariate geostatistical techniques in arid areas [J]. *Water Resources Management*, 2015, **29**(15): 5593-5612.
- [29] 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.
- [30] 张涛, 王明国, 张智印, 等. 然乌湖流域地表水水化学特征

- 及控制因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- Zhang T, Wang M G, Zhang Z Y, *et al.* Hydrochemical characteristics and possible controls of the surface water in Ranwu Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4003-4010.
- [31] 李玲, 周金龙, 齐万秋, 等. 新疆和田河流域绿洲区浅层地下水水化学特征及成因分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, **29**(3): 14-20.
- Li L, Zhou J L, Qi W Q, *et al.* Hydrochemical characteristics and formation reasons of shallow groundwater in oasis area of Hotan River Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, **29**(3): 14-20.
- [32] 李军, 邹胜章, 赵一, 等. 会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1750-1760.
- Li J, Zou S Z, Zhao Y, *et al.* Major ionic characteristics and factors of Karst groundwater at Huixian Karst Wetland, China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 1750-1760.
- [33] 吴玺, 安永会, 魏世博, 等. 黑河下游鼎新谷地浅层地下水水化学特征及演化规律[J]. 干旱区资源与环境, 2021, **35**(9): 103-109.
- Wu X, An Y H, Wei S B, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of shallow groundwater in Dingxin valley, lower reaches of Heihe River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(9): 103-109.
- [34] 崔玉环, 王杰, 刘友存, 等. 升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(7): 3223-3231.
- Cui Y H, Wang J, Liu Y C, *et al.* Hydro-chemical characteristics and ion origin analysis of surface groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River interface [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3223-3231.
- [35] 李耕, 韩志伟, 申春华, 等. 典型岩溶小流域水体中硝酸盐分布特征及成因: 以普定后寨河流域为例[J]. 地球科学, 2019, **44**(9): 2899-2908.
- Li G, Han Z W, Shen C H, *et al.* Distribution characteristics and causes of nitrate in waters of typical small Karst Catchment: a case of the Houzhai River Catchment[J]. *Earth Science*, 2019, **44**(9): 2899-2908.
- [36] Sudaryanto, Nailly W. Ratio of major ions in groundwater to determine saltwater intrusion in Coastal Areas [J]. *IOP Conference Series; Earth and Environmental Science*, 2018, **118**, doi: 10.1088/1755-1315/118/1/012021.
- [37] 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.
- [38] 张宏鑫, 吴亚, 罗炜宇, 等. 雷州半岛岭北地区地下水水地球化学特征[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.
- [39] 李笑, 于爽, 李亮, 等. 石期河流域地下水化学特征及物质来源分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 4021-4029.
- Li X, Yu S, Li L, *et al.* Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in Shiqi River Basin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4021-4029.
- [40] 曾妍妍. 新疆喀什地区西部劣质地下水形成机理研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2018.
- Zeng Y Y. Study on formation mechanism of poor quality groundwater in Western Kashgar prefecture of Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2018.
- [41] 张艳, 吴勇, 杨军, 等. 阆中市思依镇水化学特征及其成因分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- Zhang Y, Wu Y, Yang J, *et al.* Hydrochemical characteristic and reasoning analysis in Siyi Town, Langzhong City [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3230-3237.
- [42] 栾凤娇. 新疆南部典型区地下水中氟的分布特征及富集因素研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017.
- Luan F J. Distribution characteristics and enrichment factors of fluoride in groundwater in typical areas of southern Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.
- [43] 魏兴, 周金龙, 乃蔚华, 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.
- [44] 王智, 杜海波. 巴楚县地下水资源及开发利用模式的探讨[J]. 新疆水利, 2003, (2): 16-19, 43.
- [45] 李华, 文章, 谢先军, 等. 贵阳市三桥地区岩溶地下水水化学特征及其演化规律[J]. 地球科学, 2017, **42**(5): 804-812.
- Li H, Wen Z, Xie X J, *et al.* Hydrochemical characteristics and evolution of karst groundwater in Sanqiao District of Guiyang City [J]. *Earth Science*, 2017, **42**(5): 804-812.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)