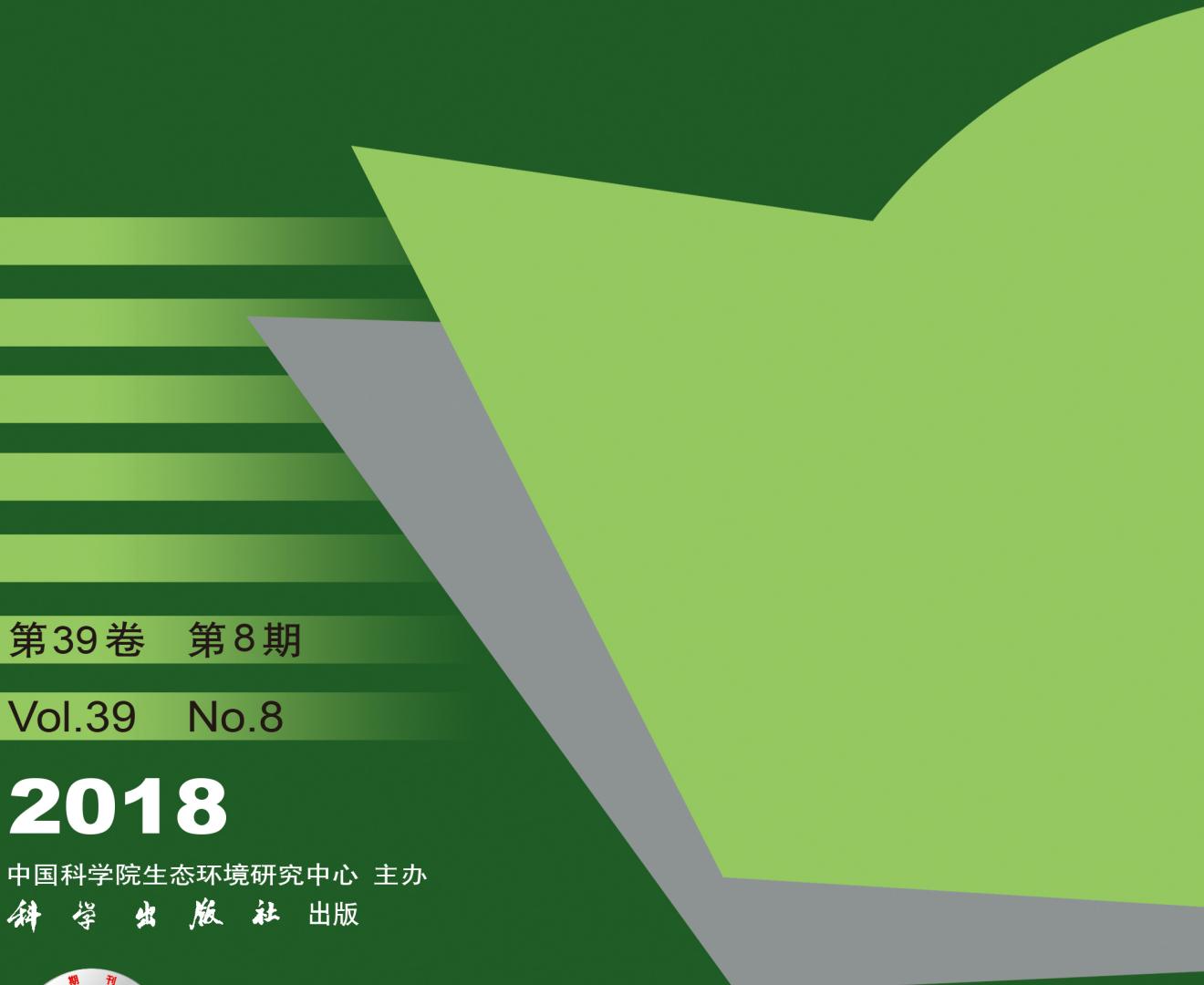


环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE



第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

- 我国城市 $PM_{2.5}$ 污染的健康风险及经济损失评价 李惠娟, 周德群, 魏永杰(3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响 孙晓伟, 郭秀锐, 程水源(3476)
基于区域传输矩阵和 $PM_{2.5}$ 达标约束的大气容量计算方法 李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌(3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征 温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂(3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜(3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光(3511)
城市生活垃圾露天焚烧 $PM_{2.5}$ 及其组分排放特征 王艳, 郝炜伟, 程轲, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋(3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢(3524)
大连地区夏季非甲烷烃(NMHC)特征及其来源解析 纪德钰(3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析 张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启(3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数 王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平(3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别 翟增秀, 孟洁, 王亘, 翟友存, 曹阳, 邹克华(3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征 胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼(3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景 樊守彬, 郭津津, 李雪峰(3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露 陶双成, 高硕晗, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙(3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化 李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英(3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义 吕伟伟, 姚昕, 张保华(3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价 朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯(3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性 姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳(3622)
珠江三角洲高砷地下水赋存环境特征及成因分析 张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华(3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响 宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波(3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析 程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏(3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子 王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋(3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析 张亚迪, 宋永会, 彭剑峰, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强(3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响 刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利(3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N_2O 排放影响 余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋(3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布 尚宇, 周毅, 廖安意, 方正(3696)
水体中 $Cr(VI)$ 对不同混凝剂混凝过程的影响 高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升(3704)
 $Co_3O_4/BiVO_4$ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A 李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭(3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 $Pb(II)$ 的吸附性能和机制 于长江, 董心雨, 王苗, 林强(3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制 赵华轩, 郎印海(3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证 陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青(3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解 关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾(3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮 叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民(3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能 陈思, 白波, 王洪伦, 索有瑞(3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能 许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕锋, 夏四清(3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟(3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能 王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇(3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因 康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 钟珍芳, 王跃, 谭欣林(3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性 吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环(3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析 刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂(3807)
生物炭对华北农田土壤 N_2O 通量及相关功能基因丰度的影响 刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平(3816)
设施菜田土壤 N_2O 产生对 O_2 的响应 陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国(3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性 孙晓艳, 柳检, 罗立强(3835)
南京市铅锌矿采场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征 李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录(3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果 杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄(3854)
基于稳定同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移 季杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新(3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程 赵鹏宇, 李毳, 柴宝峰(3876)
转 $cryIAb$ 和 $epsps$ 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响 王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林(3885)
脱硫石膏对稻田 CH_4 释放及其功能微生物种群的影响 胡翔宇, 向秋洁, 木志坚(3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征 杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水(3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源镉 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响 宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛(3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价 康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚, 闫宇航(3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响 涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民(3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响 祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君(3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO_2 排放 林婷, 吴烨, 何晓旖, 张少君, 郝吉明(3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展 叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊(3954)
《环境科学》征订启事(3543) 《环境科学》征稿简则(3570) 信息(3600, 3728, 3844)

珠江三角洲高砷地下水赋存环境特征及成因分析

张昌延, 何江涛*, 张小文, 倪泽华

(中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 水资源与环境工程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:为了弄清珠江三角洲地区浅层地下水中砷迁移、富集的主控因素及砷的来源, 利用珠江三角洲地区地下水污染调查所取得数据资料, 运用聚类分析方法对研究区进行分区, 分别对砷异常分布特征以及地下水赋存环境进行分析。结果表明, 研究区地下水砷浓度范围为从未检出至 $560 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要以 As(Ⅲ)的形式存在; 高砷地下水主要分布在第四系松散沉积物覆盖的平原区, 其中佛山顺德地区最高, 广州市中部与中山市次之; 研究区地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水为主, 高砷地下水具有 pH 值较高, NH_4^+ 、Fe、Mn、耗氧量浓度较高, 且 NO_3^- 浓度低的特征。通过对高砷地下水各指标散点图与因子分析, 结合人类活动对珠三角地下水环境影响推断, 在天然沉积环境与污染输入的共同影响下, 平原区形成有利于高砷地下水赋存的中性至弱碱性还原环境。浅层地下水在微生物作用与有机污染物输入下, 引起含砷铁锰氧化物的还原溶解, 导致砷的释放。而佛山市南部顺德等地区工业污染则是地下水中砷污染的主要来源。

关键词:地下水; 砷; 赋存环境特征; 成因分析; 珠江三角洲

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3631-09 DOI: 10.13227/j.hjkx.201712159

Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta

ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao*, ZHANG Xiao-wen, NI Ze-hua

(Key Laboratory of Water Resources and Environmental Engineering, School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: To determine the main factors affecting the migration, enrichment, and sources of arsenic in the shallow groundwater of the Pearl River Delta (PRD), clustering analysis was used to partition the study area and then analyze the abnormal distribution of arsenic and groundwater storage environment in each part area based on the data obtained from the investigation of groundwater pollution in the PRD region. The results showed, in the study area, arsenic was mainly represented by As(Ⅲ), and its concentration ranged from under the detection limit to $560 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. High-arsenic groundwater was mainly distributed in the plain area covered by Quaternary loose sediment, with the Shunde District in Foshan City having the highest, followed by Zhongshan City and central Guangzhou. The hydrochemical type of groundwater in the study area was mainly $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ type water. The high-arsenic groundwater had the characteristics of high pH value; high concentrations of NH_4^+ , Fe, and Mn; and a high permanganate index, in addition to a low concentration of NO_3^- . Based on scatter plot and factor analysis of various indicators of arsenic in groundwater and the impact of human activities on the groundwater environment of the PRD, it was concluded in this study that under the common influence of natural sedimentary environment and pollution input, a neutral or weak-alkaline-reducing environment, which was conducive to the occurrence of high-arsenic groundwater, was formed in the plain area. The role of microorganisms and the input of organic pollutants in the shallow groundwater led to the reduction and dissolution of arsenic-containing Fe-Mn oxide, resulting in the release of arsenic. The source of arsenic contamination in the groundwater was mainly the industrial pollution in Shunde and other areas in southern Foshan City.

Key words: groundwater; arsenic; geochemical characteristics; genesis analyses; Pearl River Delta

地下水砷浓度异常已经成为十分严重的全球环境地质问题之一。据报道, 当今世界有数亿人口受到高砷地下水的影响, 受影响的国家主要有孟加拉国、印度、缅甸、越南、阿根廷、美国及中国等, 其中以孟加拉、印度和中国最为严重^[1,2]。除了天然过程导致的原生高砷地下水, 砷作为农药、陶瓷、玻璃以及电子产品等工农业制品的原料, 在生产或使用过程中不合理地排放也是导致地下水砷污染的一个重要原因^[3]。

我国饮水型砷中毒主要分布于台湾、新疆、山西、内蒙古、云南、贵州、湖南等省市、自治州的

40个县(旗、市)。自2005年以来, 在湖北仙桃、洪湖等地先后发现了饮水型砷中毒病人, 以江汉平原为代表的河流三角洲地区的高砷地下水开始备受关注^[4]。相比国内山西大同盆地、内蒙古河套平原等干旱内陆盆地, 湿润河流三角洲地区高砷地下水发现较晚, 对于这些地区地下水中As的分布特征、水化学环境、迁移转化影响因素的研究成为热点。

收稿日期: 2017-12-20; 修订日期: 2018-01-27

基金项目: 国土资源大调查项目(1212011121170)

作者简介: 张昌延(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水环境, E-mail:196628680@qq.com

* 通信作者, E-mail:jthe@cugb.edu.cn

珠江三角洲地区为我国经济高速发展的地区之一，然而，伴随着经济的快速发展，也引发了一系列环境问题，使一向以地表水作为主要供水水源的珠三角地区呈现出水质型缺水局面，广州、佛山以及东莞三地区的各水系尤为严重^[5]。已经有报道表明珠江三角洲地区部分地表水、土壤和地下水都受到了一定程度砷污染^[6~8]。砷在地下水中的迁移转化会随水文地球化学条件而变化^[9]，因此有必要对该地区地下水砷的分布、形成机制进行探讨研究，为该区的水、土资源防治规划提供科学依据。本文基于珠江三角洲地区浅层地下水污染调查数据，尝试运用聚类分析和因子分析的方法，对高砷地下水地区的地下水水化学条件和水化学特征进行研究，总结珠江三角洲地区高砷地下水水环境特征，探讨该地区地下水砷的迁移释放机制。

1 材料与方法

1.1 自然地理概况

珠江三角洲地区位于广东省中南部，南边濒临南海，毗邻港澳。东、西、北三面低山、丘陵环绕，中南部为河网密布的三角洲平原，平原内地势低平，海拔为-0.2~0.9 m，陆地总面积41 698 km²，常住人口达到5 874.27万^[10]。该地区属于亚热带季风气候区，气候温暖湿润，年平均气温22.0~24.4℃；雨量充沛，受季风影响，有暴雨多、季节性强的特点，年均降水量1 800~2 200 mm，并且集中在4~9月，占总降雨量的80%以上。区内河网如织，主要水道百余条，长约1 700 km。珠三角平原区以人为土地利用类型为主，受产业用地以及交通城镇发展的影响，生态用地被大量挤占。以电子信息、电器机械、石油化工、纺织业等为代表的九大产业占全部工业的近五成。农业区主要种植蔬菜和花卉，且受周围地表污水灌溉严重。

1.2 地质与水文地质条件

珠江三角洲地区地层隶属华南地层东南地层区，从震旦系至第四系均有出露，以泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、第四系为主。其中第四系主要由海陆交互相堆积物构成，广泛分布于珠江三角洲的平原地区。珠江三角洲在构造单元上属华南褶皱系粤北、粤中坳陷带，主要坳陷为三水坳陷盆地。

珠江三角洲地区地下水分为松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类裂隙岩溶水、基岩裂隙水三大类。在三角洲平原区以第四系松散沉积层的孔隙水为主，含水层岩性以粗中砂及卵砾石为主。松散岩类孔隙水

主要补给来源为降雨形成的地表漫流通过表层砂性土直接入渗补给，循环交替由中游向下游逐渐变弱，水平排泄入河；三角洲海冲积层地段地下水、地表水之间水力关系复杂，丰、枯期多呈互补排特征。第四系松散岩类分布区因地形平缓，地下水以水平径流为主，水流途径长，水流滞缓，且地表非连续分布弱透水黏土层，亦有利于地表径流入渗补给。地下水总体自北向南，自北向南东汇流，多经珠江口和伶仃洋排泄入海。

1.3 样品采集与分析

2005~2015年中国地调局组织实施了全国地下水污染调查评价工作，该次污染调查主要为1:25万区域调查及部分1:5万重点城市调查，调查涵盖了中国陆域的主要平原盆地地区，其中珠江三角洲为本次调查工作首个开展的地区。本次研究基于全国地下水污染调查所获取的资料，数据选取了珠江三角洲地区2005~2009年的每年11月至次年3月旱季地下水采样点，其中2005~2006年数据为1:25万区域地下水污染调查获取，2007~2009年数据为1:5万重点区调查获取。地下水样品总数为501组，调查对象以民用井为主，井深一般在10 m以内，属于浅层地下水。地下水采样点分布见图1，样品由国土资源部广东省物料实验检测中心测试，测试指标包括pH、Eh、总硬度、TDS、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺、

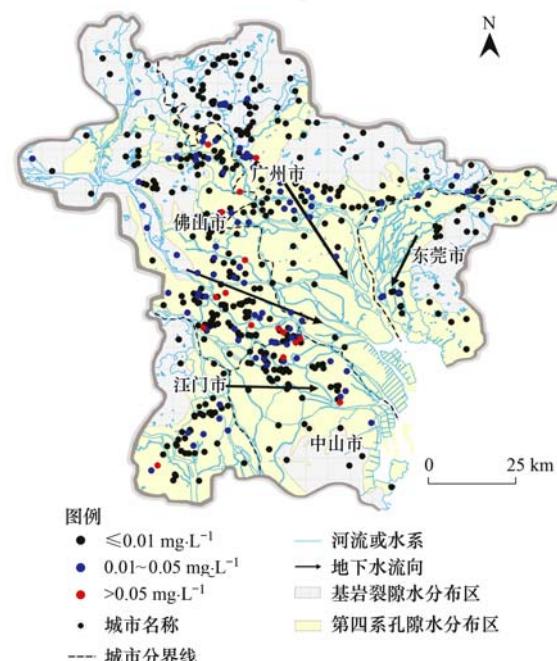


图1 珠江三角洲地下水采样点及砷浓度分布示意

Fig. 1 Distribution of groundwater sampling points and arsenic concentrations in the Pearl River Delta

总铁(Fe)、F⁻、磷酸根(PO₄³⁻)、耗氧量(高锰酸盐指数)、偏硅酸、Cu、Mn、Zn、Hg、Cr⁶⁺、总砷(\sum As)、Pb、Cd、Ni、Co、总Cr、Ba、Se、Mo、Al、Br、I⁻共36项指标。

2 结果与讨论

2.1 地下水中砷分布特征及水化学特征

2.1.1 砷异常分布特征

首先利用SPSS 19.0统计分析软件,选用离差和平方(ward)算法和欧式距离^[11],对研究区地下水样进行Q型聚类分析,选取pH、Eh、TDS、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻、NO₃⁻、TFe、Mn、 \sum As共14项化学组分对研究区501组水样进行聚类分析,可以将样品分为三大类,即A、B和C类,将A、B、C这3类地下水样投影到研究区,从中可以看出:绝大多数A类地下水分布在靠近低山丘陵基岩;大多数C类地下水为近海受海水入侵影响的咸水,TDS均大于3 g·L⁻¹;而B类地下水基本分布在第四系松散沉积物覆盖的平原区。由于平原区范围较大,虽然地下水主要水化学类型相同,但次要组分差异较大,因此再选取pH、NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺、TFe、Mn、PO₄³⁻、 \sum As、Pb、Cd、Ni及耗氧量共12项次要组分及重金属对B类地下水分布平原区319组水样进行第二次聚类分析,将样品分为B1、B2两大类,来探究平原区内次要与微量组分差异。根据两次聚类分析结果投影,按照A、B1、B2、C类地下水分布可以将研究区划分为I、II、III、IV这4个区(图2),分别对砷

异常分布特征、高砷地下水的赋存环境以及成因进行研究。而由于IV区采样点较少,且地下水受海水入侵影响规律性较弱,本次研究将不作分析。

从图1中看出,区域地下水砷浓度异常点主要分布在平原区的佛山市东南部和广州市西南部,分布形态上局部多呈不规则的片状。研究区地下水中As的浓度范围从未检出到560 μg·L⁻¹,平均值为12.78 μg·L⁻¹,其中As浓度>10 μg·L⁻¹的样品数为117组,占样品总数23.35%。结合聚类分析分区结果(图2),并从三区地下水As质量浓度箱型图(图3)可以看出:I区地下水中As浓度最低,II、III区地下水中As浓度均较高,II区要略高于III区。

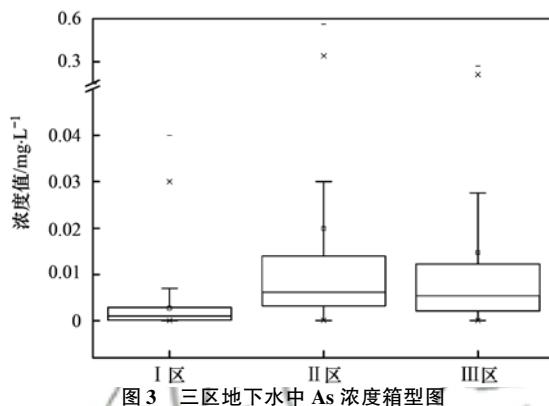


Fig. 3 Box plots of the concentrations of the arsenic in the three areas

根据GB/T 14848-2017《地下水质量标准》将As>10 μg·L⁻¹的地下水水样视为超标水样,通过超标水样的pH和Eh值绘制出研究区布拜图(图4),来推测研究区地下水中砷的赋存形态。在Eh-pH图解上可以看出,三区中As(Ⅲ)都是地下水中砷的主要存在形式,占总砷的比重很大。有研究表明,As(Ⅲ)的毒性要远远大于As(V),As(Ⅲ)为一种胞浆毒物,易与巯基(-SH)、氨基(-NH₂)等结合,而影响细胞的正常代谢,导致砷中毒^[12,13]。氧化还原条件是影响砷价态的主要原因。在富氧化性的水体中As(V)占优势;而在还原性水体中以As(Ⅲ)形式存在^[14],这也表明研究区高砷地下水基本处于还原环境中。

2.1.2 高砷地下水水化学特征

地下水水化学特征受区域地质、地下水赋存条件和埋深以及水循环条件等因素的控制。根据三区地下水Durov图(图5)可以看到:三区地下水中阳离子均以Ca²⁺型水为主,II区与III区存在部分Na⁺型水;阴离子较为分散,其中I区以HCO₃⁻与SO₄²⁻

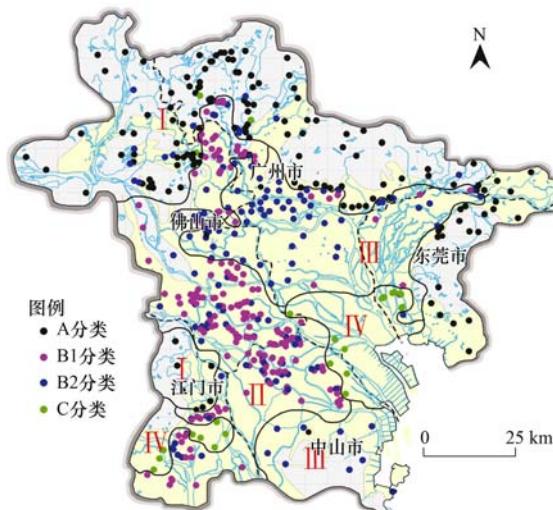


图2 聚类分析结果投影及研究区划分

Fig. 2 Projection of cluster analysis results and division of the study area

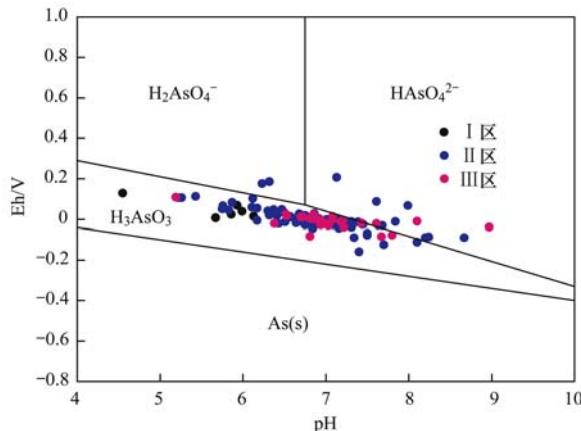


图4 根据 Eh-pH 预测珠三角高砷地下水砷的形态分布

Fig. 4 Eh-pH diagram for arsenic speciation
in groundwater of the Pearl River Delta

型水为主，II区以 HCO_3^- 型水为主，而 SO_4^{2-} 与 Cl^- 型水均有分布，而III区主要为 HCO_3^- 型水。地下水砷含量较高的II区与III区的水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$ 型、 $\text{Cl-HCO}_3\text{-Ca}$ 型，从靠近丘陵的山前平原到滨海平原中心的低洼带，地下水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 含量呈现增加趋势。

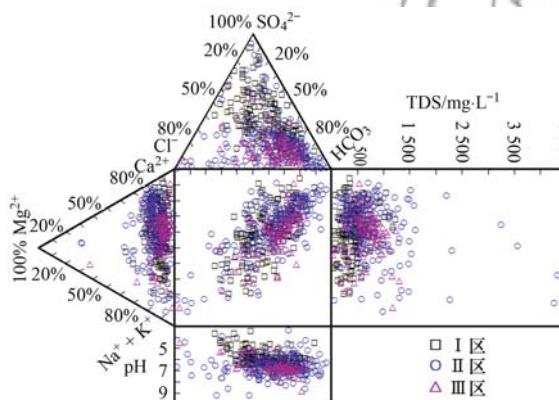


图5 珠江三角洲地下水 Durov 图
Fig. 5 Durov diagram of groundwater from
the Pearl River Delta

珠江三角洲地下水 TDS 含量普遍较高，范围从靠近丘陵的 $124.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 到沿海海水入侵地区的 $24497 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从研究区地下水 Durov 图可以看到，I 区地下水 TDS 最低，II 区地下水 TDS 最高，而且含量变化较大。Wang 等^[15]的研究指出珠三角地下水 TDS 浓度主要受全新世海水入侵尺度的控制。

研究区地下水 pH 值范围在 $3.43 \sim 11.22$ ，变化范围较大，平均值为 6.57 。通过对三区地下水 pH 值可以发现：I 区 pH 值最低，平均值为 5.91 ，显示其处于酸性环境；II 变化范围最大，平均值为

6.67 ，表现为中性至弱酸性环境；而 III 区 pH 值较集中，平均值为 6.78 ，显示其处于中性环境。总体来说，珠三角地下水 pH 值普遍偏低，这与我国内陆盆地碱性的高砷地下水环境有明显差异。珠江三角洲地下水 pH 值受到了人类活动的严重影响，已有研究表明，珠江三角洲由于工业废气排放量大，导致该地区受酸雨污染严重，致使地下水酸化^[16,17]。珠江三角洲城市化水平较高，平原地区部分地面被道路和建筑物覆盖，地下水受酸雨影响较小，且咸潮及海水入侵也会影响沿海地带地下水的酸碱性。而丘陵地区，由于地表土层较粗，渗透性好，酸雨很容易入渗补给地下水。所以导致 I 区地下水 pH 值明显低于 II 区与 III 区。

根据三区地下水各组分浓度箱型图（图 6）中可以看到，在地下水主要组分方面，II、III 区地下水中的 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- 浓度值相近，I 区这些离子浓度均较低；I 区地下水中的 SO_4^{2-} 浓度最高，II 区地下水中的 K^+ 浓度最低，而 III 区中 K^+ 浓度最高， SO_4^{2-} 浓度最低。上述离子的浓度与研究区内

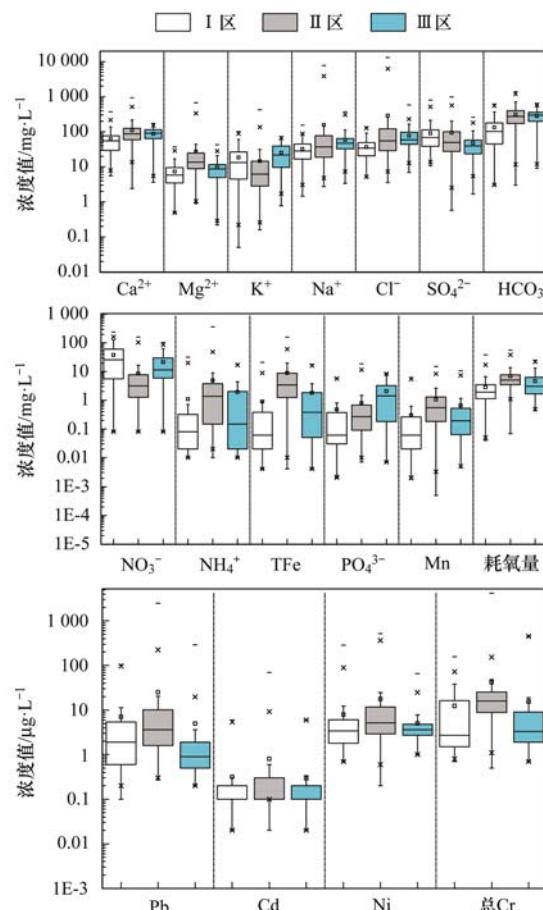


图6 I、II、III 区地下水各水化学指标浓度箱型图
Fig. 6 Box plots of the concentrations of the chemical indicators
in groundwater of the I, II and III area

地形地貌、水岩作用及农业施肥活动密切相关。在部分次要组分方面, NH_4^+ 、TFe、Mn、耗氧量在地下水中的浓度均为Ⅱ区高于Ⅲ区高于Ⅰ区, 而Ⅱ区中 NO_3^- 浓度最低。而在研究区地下水巾检出率较高的重金属 Pb、Cd、Ni 以及总 Cr 浓度均是Ⅱ区最高。低浓度的 SO_4^{2-} , 以及高浓度的 NH_4^+ 与耗氧量反映了Ⅱ、Ⅲ区地下水主要处于还原环境中。Ⅱ区地下水巾高浓度的 TFe、Mn、耗氧量以及重金属含量反映该区受工业污染严重, 工业废水不合理排放以及使用工业废水灌溉均会导致地下水巾这些组分浓度升高。Ⅲ区较高浓度的 K^+ 与 NO_3^- 反映该区可能受农业活动影响较大, 农业中化肥的施用、生活

污水以及动物和人类排泄物都是 K^+ 、 NO_3^- 的主要来源。

2.2 高砷地下水赋存环境及条件

2.2.1 砷富集的水化学因素分析

在 As 含量高的Ⅱ区与Ⅲ区地下水中 pH、 NH_4^+ 、TFe、Mn、 PO_4^{3-} 以及耗氧量浓度相较Ⅰ区普遍较高, 并且Ⅲ区 NO_3^- 浓度较高。但从 NO_3^- 与 As 的散点图(图 7)上可以看到, 两区的高砷水点中 NO_3^- 浓度均较低, NO_3^- 浓度高的氧化环境中 As 浓度普遍较低, 说明还原环境对 As 在地下水中的富集起了重要作用, 并且人为输入的 NO_3^- 可能会在一定程度上抑制地下水巾 As 的释放。

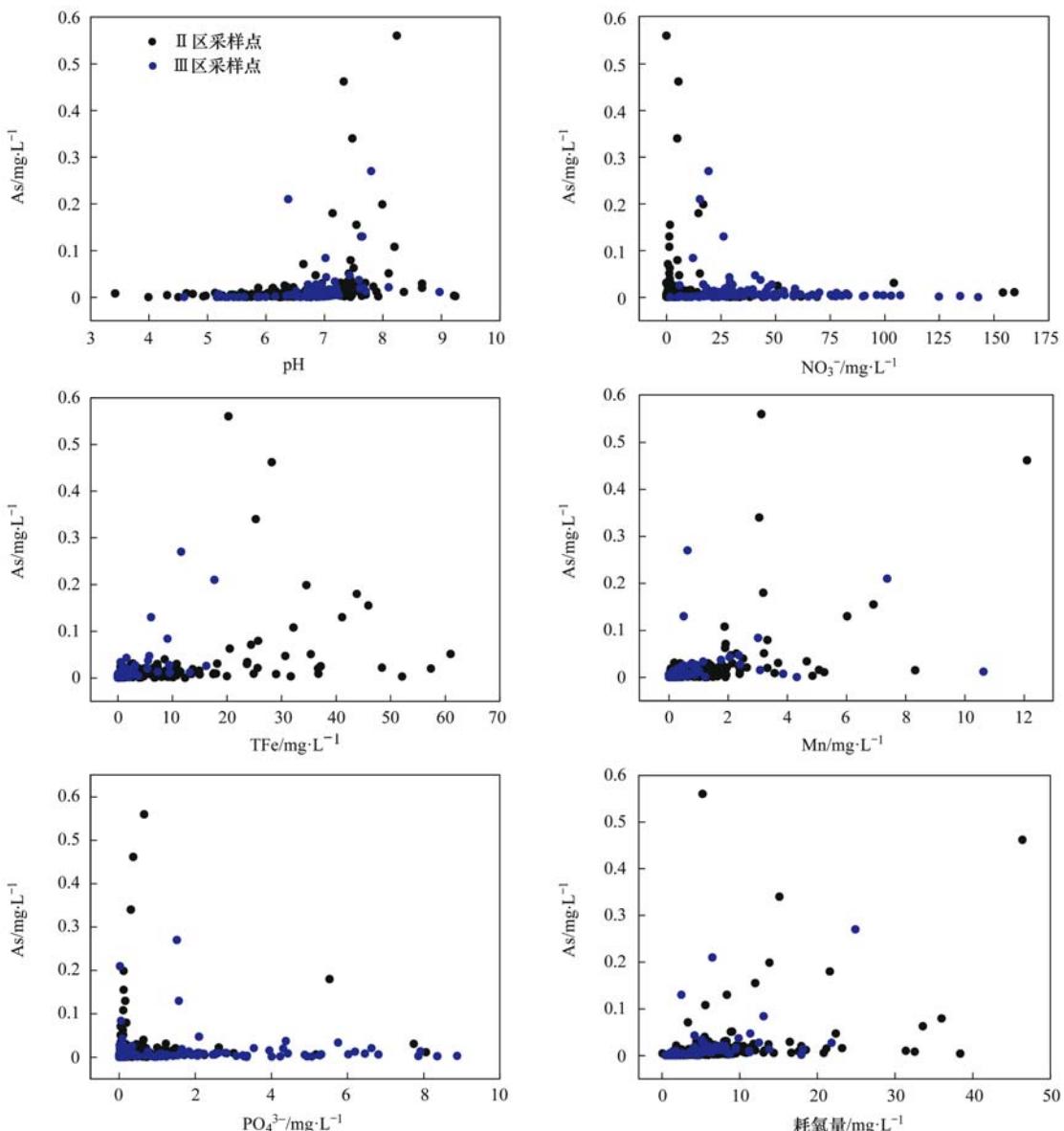


图 7 Ⅱ 区与Ⅲ 区地下水巾砷浓度与 pH 值、 NO_3^- 、TFe、Mn、 PO_4^{3-} 、耗氧量浓度关系

Fig. 7 Relationships between arsenic concentration and pH value; concentrations of NO_3^- , TFe, Mn, PO_4^{3-} , and permanganate index in groundwater of the Ⅱ and Ⅲ area

pH 是影响地下水砷活性的一个重要因素^[18]。As 在地下水中 (pH 为 4~9) 主要以砷酸盐或亚砷酸盐的形式存在, 使得地下水中 As 容易被含水介质中带正电的物质吸附。pH 值的增大会使胶体和黏土矿物带更多负电荷, 降低对以阴离子形式存在的砷酸和亚砷酸的吸附^[19]。在Ⅱ区与Ⅲ区 As 与 pH 的散点图上可以看到, 当 pH > 6.5 后, 地下水中 As 的含量明显升高, 指明 pH 是控制该地区地下水中 As 浓度的重要因素之一。

珠江三角洲沉积物中存在着丰富的氧化铁, 如磁铁矿、磁铁矿、褐铁矿^[20]。平原区含水顶板普遍覆盖有一层淤泥, 且淤泥中富含有机质, 加剧了含铁氧化物在缺氧还原环境的分解^[21], 并且有研究报道, 佛山市南海区等地区工厂较多, 受附近金属厂废水污染的排污沟水体中的铁含量最高^[22]。Mn 离子的化学性质与 Fe 相似, 其分布特征也与 Fe 有相似之处。以往许多研究已经证明, 还原环境下铁锰氧化物或氢氧化物被还原成溶解性很大的低价态离子, 使它们表面吸附的 As 进入地下水中, 是地下水中 As 的主要来源之一^[19]。在Ⅱ、Ⅲ区地下水 Fe、Mn 与 As 的散点图可以看到, As 浓度有随 Fe、Mn 浓度增大的趋势, Ⅲ区 As 与 Fe、Mn 之间的相关性要好于Ⅱ区, 这可能是由于Ⅱ区地下水受到工业排污影响较大导致部分相关性被掩盖。

PO_4^{3-} 和 AsO_4^{3-} 具有相似的化学结构及解离常数, 均可吸附在矿物表面, 当两种离子共存时会在金属表面发生竞争吸附^[23]。从两区地下水中 PO_4^{3-}

与 As 的散点图可以看到, PO_4^{3-} 与 As 之间没有表现出正相关性, 说明 PO_4^{3-} 的竞争吸附机制不是研究区地下水富砷的主要原因。

平原区地下水中耗氧量(高锰酸钾指数)含量较高, 超Ⅲ类水超标率达到 67.61%, 超Ⅳ类水超标率为 12.54%。耗氧量能间接反映地下水受有机污染的程度, 除了沉积物中丰富的有机质外, 生活污水和工业废水排放也会使耗氧量含量升高。许多研究表明, 有机物不仅是氧化还原的驱动剂, 而且会促进微生物呼吸增强 As 释放^[24,25]。As 浓度高的Ⅱ区与Ⅲ区地下水中耗氧量高, 反映了高砷地下水普遍处于有机质富集的环境, 或是遭受了污染。

2.2.2 赋存条件分析

利用因子分析对高砷地下水的赋存条件进行研究, 因子分析是根据变量相关性大小将变量分组, 使得同组内的变量之间相关性较高, 不同组的变量相关性较低, 根据变量在各因子上的载荷来区分自然过程和人类活动等因素对地下水水质的影响以及影响强度^[26,27]。本次研究分别对地下水中 As 浓度较高的Ⅱ区与Ⅲ区中的 TDS、pH、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、Fe、Mn、As 以及耗氧量共 15 个指标进行因子分析。利用 SPSS 19.0 采用主成分分析法提取因子, 选取特征值大于 1 的特征根, 根据特征值方差累计贡献率百分比确定选取的因子数。采用方差最大正交旋转法对因子轴适当旋转, 得到旋转后的因子载荷矩阵(见表 1、表 2)。

表 1 Ⅱ区地下水各参数的旋转因子载荷矩阵¹⁾

Table 1 Matrix of rotated factor loading of chemical parameters in the Ⅱ area

指标	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
TDS	0.956 *	0.074	0.233	0.120
pH	0.053	0.515 *	-0.199	0.244
Ca^{2+}	0.841 *	-0.064	0.227	0.075
Mg^{2+}	0.926 *	0.064	0.259	0.085
K^+	0.916 *	0.124	0.037	0.061
Na^+	0.978 *	0.092	0.095	0.058
Cl^-	0.971 *	0.079	0.164	0.019
SO_4^{2-}	0.113	-0.042	0.702 *	0.039
HCO_3^-	0.200	0.050	0.332	0.707 *
NO_3^-	0.129	-0.020	0.011	-0.488
NH_4^+	0.443	0.007	-0.033	0.614 *
Fe	0.128	0.413	0.656 *	0.079
耗氧量	0.280	0.505 *	0.042	0.408
Mn	-0.002	0.815 *	0.288	-0.049
As	0.097	0.732 *	0.274	0.112
特征值	4.942	2.097	2.002	1.400
贡献率/%	32.949	13.977	13.348	9.330
累计贡献率/%	32.949	46.926	60.274	69.604

1) * 表示较高的因子载荷, 下同

表2 III区地下水各参数的旋转因子载荷矩阵

Table 2 Matrix of rotated factor loading of chemical parameters in the III area

指标	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄
TDS	0.775 *	0.060	0.608 *	0.050
pH	0.591 *	0.357	-0.292	-0.253
Ca ²⁺	0.898 *	0.012	0.076	-0.020
Mg ²⁺	0.304	0.031	0.557 *	-0.429
K ⁺	0.633 *	-0.013	0.182	0.448
Na ⁺	0.098	0.084	0.953 *	0.061
Cl ⁻	0.047	0.107	0.908 *	0.204
SO ₄ ²⁻	0.378	-0.412	0.317	-0.129
HCO ₃ ⁻	0.903 *	0.134	0.140	-0.125
NO ₃ ⁻	-0.013	-0.163	0.118	0.821 *
NH ₄ ⁺	0.191	0.649 *	0.066	-0.084
Fe	0.023	0.850 *	-0.010	-0.141
耗氧量	0.211	0.585 *	0.241	-0.276
Mn	-0.065	0.715 *	0.039	0.134
As	0.035	0.773 *	0.028	-0.097
特征值	3.306	2.960	2.737	1.333
贡献率/%	22.038	19.735	18.245	8.884
累计贡献率/%	22.038	41.773	60.018	68.902

由Ⅱ区旋转因子载荷矩阵可以看到,第一主因子F₁中TDS、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺和Cl⁻的因子载荷较大,表示岩石溶滤作用、蒸发浓缩作用或海水入侵对该区水化学成分的影响。As载荷最大的因子F₂中pH、耗氧量、Mn有较大的正载荷,Fe的载荷稍低,说明pH较高,富含有机质、Fe、Mn的环境,与As在地下水中的富集有着密切的关系。因子F₃中As也有较大载荷,该因子中Fe与SO₄²⁻的因子载荷较高,平原区还原环境下SO₄²⁻主要来源为工业废气中排放的SO₂与O₂、H₂O反应生成SO₄²⁻随酸雨进入地下水,而该因子中的Fe很可能是由于工业废水不合理排放的影响,导致地下水也受到相应的铁污染。因子F₄代表了工业污染对该区地下水化学组分的影响,而As也有较高的载荷,说明工业污染对地下水中As污染有着紧密的联系。因子F₄对变量HCO₃⁻、NH₄⁺有显著的正载荷,对耗氧量的载荷稍低,对NO₃⁻有一定的负载荷。该因子可视为还原环境因子,高浓度的氨氮与耗氧量,低浓度的NO₃⁻指示了较强的还原环境,这与砷在水中富集有重要关系。

Ⅲ区旋转因子载荷矩阵可以看到,第一主因子F₁中TDS、pH、Ca²⁺、HCO₃⁻有显著的正载荷,表示岩石溶滤作用是该区水化学成分的主要影响因素影响。As载荷最大的因子为F2, NH₄⁺、Fe、耗氧量、Mn有较大的正载荷,pH的载荷稍低,而SO₄²⁻有一定的负载荷,说明在pH呈中性至弱碱性,富

含有机质、Fe、Mn的还原环境,有利于地下水中As的富集。因子F₃中TDS、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻的因子载荷较大,该因子表明蒸发浓缩作用或海水入侵对该区水化学成分的影响。而因子F₄中K⁺与NO₃⁻的因子载荷较高,这两项组分主要来源于农业中化肥的施用、生活废水以及动物和人类排泄物等,该因子代表了生活污水及农业活动对地下水水化学组分的影响,而因子中As载荷低,说明生活污水及农业活动对地下水中As的富集影响较小。

通过对高砷地下水的赋存环境分析可以推断,在pH呈中性至弱碱性的还原环境中,有机物驱动下,微生物作用引起含砷铁锰氧化物还原溶解,是研究区原生高砷地下水的主要形成原因。

2.3 来源分析

变异系数是反映样本离势的重要特征参数,离散程度的大小可以反映地质环境的异常情况和元素的分布状况。通过对三区地下水As浓度变异系数计算,三区变异系数分别为1.69、2.98、2.16,变异系数均较大,平原区的变异系数均大于2,其中Ⅱ区变异系数最大,变异性表现为非常不稳定。一般在地下水中,人为输入的物质在空间上具有离散程度高、波动性大的特征^[28]。由此初步推测,研究区地下水中的砷可能主要为人类来源。

在对Ⅱ区与Ⅲ区地下水部分组分浓度对比时可以看到,Ⅱ区中的Fe、Mn、耗氧量以及重金属等浓度要明显高于Ⅲ区,这很可能是由于Ⅱ区受到更

强烈的工业污染影响。而Ⅲ区中 K^+ 与 NO_3^- 的浓度较高, 又很可能是由于农业活动、生活污水对地下水影响较大。此外, 在 As 与 Fe、Mn、耗氧量的散点图上可以看到, 数据点较为分散、规律性较弱。通过对数据统计, 在 $pH > 6.5$, $Fe > 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $Mn > 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 耗氧量 $> 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 $As \leq 0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的采样点有 54 个, 其中Ⅱ区 45 个, Ⅲ区 9 个, 说明有利于 As 富集的赋存条件并不是地下水 As 超标的唯一原因。

依据上述推测对研究区地表水及污染源进行进一步分析。研究区地表水采样数据一共有 55 组, 其中包括 47 组河水样品与 8 组垃圾渗滤液样品, 其分布情况见图 8。地表水中 As 浓度范围在 $0.2 \sim 722.5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浓度变化较大。根据文献[29], 地表水水样中超Ⅲ类水标准为 10 组, 超Ⅳ类水标准为 8 组, 其中 8 组垃圾渗滤液有 5 组超Ⅳ类水标准, 说明研究区地表水一定程度受到砷污染的影响。对污染源的调查包括工业潜在污染源、养殖场、垃圾场以及固体废物堆积场, 其中工业潜在污染源主要为电子厂、五金厂、陶瓷厂、化工厂以及塑料厂等。根据调查采样时的记录, 研究区存在许多中小企业废水处理能力较差, 大部分工业废水与生活污水未经处理就直接排入附近地表水体。垃圾填埋场污水池旁的渗滤液样品说明, 降雨淋滤固体废物也会导致地表水受到砷污染, 受污染的地表水体下渗补给地下水会使地下水受到不同程度的影响。

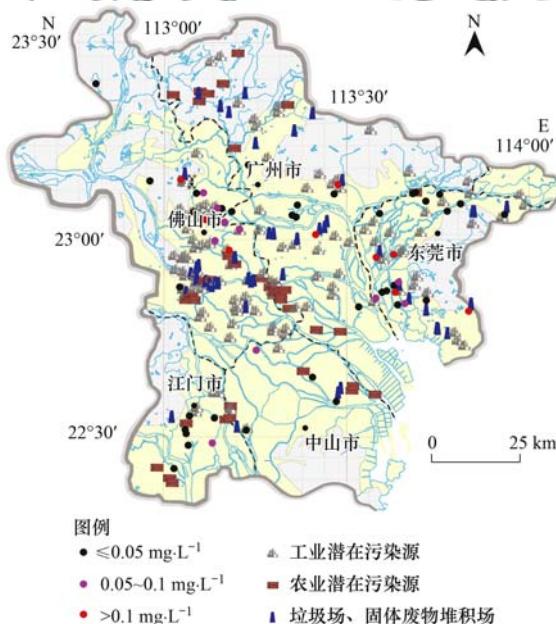


图 8 珠江三角洲地表水采样点与潜在污染源分布

Fig. 8 Distribution of surface water sampling sites and potential sources of pollution in the Pearl River Delta

从图 8 中潜在污染源的分布上可以看到, 地表水砷浓度超标的采样点与工业潜在污染源密集区很大程度上相吻合, 并且多分布在Ⅱ区, 这也进一步证明了工业污染对Ⅱ区地下水 As 超标的影响。

3 结论

(1) 珠江三角洲地区浅层地下水总砷浓度从未检出至 $560 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $12.78 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 且主要以 $As(III)$ 的形式存在。聚类分析结果表明, 高砷地下水主要分布在第四系松散沉积物覆盖的平原区, 其中以佛山顺德地区最高, 广州市中部与中山市次之。

(2) 研究区高砷地下水水化学类型以 HCO_3-Ca 型水为主。高砷地下水具有 pH 值较高, NH_4^+ 、Fe、Mn、耗氧量浓度高且 NO_3^- 浓度低的特征, 表明砷在地下水中的赋存受碱性、还原环境的控制。

(3) 来源分析表明, 人为污染是研究区浅层地下水砷的主要可能来源, 在原生和输入有机物驱动下, 微生物作用引起含砷铁锰氧化物还原溶解, 从而进入到地下水环境, 并稳定存在于中性至弱碱性的还原环境中。

致谢: 感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所孙继朝教授团队在本次研究中给予的大力支持。

参考文献:

- [1] Nordstrom D K. Worldwide occurrences of arsenic in ground water[J]. Science, 2002, **296**(5576): 2143-2145.
- [2] 金银龙, 梁超轲, 何公理, 等. 中国地方性砷中毒分布调查(总报告)[J]. 卫生研究, 2003, **32**(6): 519-540.
- [3] Jin Y L, Liang C K, He G L, et al. Study on distribution of endemic arsenism in China [J]. Journal of Hygiene Research, 2003, **32**(6): 519-540.
- [4] Smith E, Naidu R, Alston A M. Arsenic in the soil environment: A review[J]. Advances in Agronomy, 1998, **64**: 149-195.
- [5] 王靖文, 叶恒朋, 熊培生, 等. 江汉平原高砷地下水区地下水的化学特征及指示[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(3): 35-39.
- [6] Wang J W, Ye H P, Xiong P S, et al. Study on the chemical characteristics of groundwater and instructions of high arsenic groundwater at Jianghan Plain [J]. Environmental Pollution and Control, 2014, **36**(3): 35-39.
- [7] 狄效斌, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区水环境污染特点及其相关因素探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2008, **6**(4): 60-62.
- [8] Di X B, Sun J C, Jing J H, et al. Features and factors of water environmental contamination in Pearl River Delta region [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, **6**(4): 60-62.
- [9] 欧阳婷萍, 匡耀求, 谭建军, 等. 珠江三角洲经济区河水中微量元素的空间分布[J]. 水文地质工程地质, 2004, **31**

- (4): 66-69.
- Ouyang T P, Kuang Y Q, Tian J J, et al. Spatial distribution of trace element in rivers in the Pearl River Delta economic zone [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, **31**(4): 66-69.
- [7] 柴世伟, 温琰茂, 韦献革, 等. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, **43**(4): 90-94.
- Chai S W, Wen Y M, Wei X G, et al. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River Delta[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseini*, 2004, **43**(4): 90-94.
- [8] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲典型区水土中砷的分布[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, **49**(1): 131-137.
- Huang G X, Sun J C, Jing J H, et al. Distribution of arsenic in water and soil in the representative area of the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseini*, 2010, **49**(1): 131-137.
- [9] McArthur J M, Ravenscroft P, Safiulla S, et al. Arsenic in groundwater: Testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh[J]. *Water Resources Research*, 2001, **37**(1): 109-117.
- [10] 广东省统计局. 广东统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [11] Yidana S M. Groundwater classification using multivariate statistical methods: Southern Ghana[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, **57**(5): 455-469.
- [12] Ferguson J F, Gavis J. A review of the arsenic cycle in natural waters[J]. *Water Research*, 1972, **6**(11): 1259-1274.
- [13] 汤洁, 卞建民, 李昭阳, 等. 中国饮水型砷中毒区的水化学环境与砷中毒关系[J]. 生态毒理学报, 2013, **8**(2): 222-229.
- Tang J, Bian J M, Li Z Y, et al. Relationship between hydrochemical environment and arsenism in areas with arsenic poisoning drinking water in China [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, **8**(2): 222-229.
- [14] Guo H M, Stüben D, Berner Z. Adsorption of arsenic(III) and arsenic(V) from groundwater using natural siderite as the adsorbent[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, **315**(1): 47-53.
- [15] Wang Y, Jiao J J. Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in the confined Quaternary aquifer of the Pearl River Delta, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, **438-439**: 112-124.
- [16] 荆继红, 孙继朝, 韩双平, 等. 珠江三角洲地区酸雨及酸化地下水分布特征[J]. 上海地质, 2010, (2): 8-12.
- Jing J H, Sun J C, Han S P, et al. Distributions of acid rain and acidified groundwater in Pearl River Delta [J]. *Shanghai Geology*, 2010, (2): 8-12.
- [17] 张玉玺, 孙继朝, 陈玺, 等. 珠江三角洲浅层地下水pH值的分布及成因浅析[J]. 水文地质工程地质, 2011, **38**(1): 16-21.
- Zhang Y X, Sun J C, Chen X, et al. Characteristics and preliminary analyses of the formation of pH in shallow groundwater in the Pearl River delta [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, **38**(1): 16-21.
- [18] Mariner P E, Holzmer F J, Jackson R E, et al. Effects of high pH on arsenic mobility in a shallow sandy aquifer and on aquifer permeability along the adjacent shoreline, commencement bay superfund site, Tacoma, Washington[J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(5): 1645-1651.
- [19] 郭华明, 王焰新, 李永敏. 山阴水砷中毒区地下水砷的富集因素分析[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 60-67.
- Guo H M, Wang Y X, Li Y M. Analysis of factors resulting in anomalous arsenic concentration in groundwaters of Shanxin, Shanxi Province[J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(4): 60-67.
- [20] Jiao J J, Wang Y, Cherry J A, et al. Abnormally high ammonium of natural origin in a coastal aquifer-aquitard system in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(19): 7470-7475.
- [21] 张英. 珠江三角洲地区地下水环境背景值研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2011.
- Zhang Y. Study on natural background levels in groundwater of Pearl River Delta[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2011.
- [22] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2008, **35**(3): 531-538.
- Huang G X, Sun J C, Jing J H, et al. Distribution and origin of iron in groundwater of the Zhujiang delta[J]. *Geology in China*, 2008, **35**(3): 531-538.
- [23] Zhao H S, Stanforth R. Competitive adsorption of phosphate and arsenate on goethite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(24): 4753-4757.
- [24] Anawar H M, Tareq S M, Ahmed G. Is organic matter a source or redox driver or both for arsenic release in groundwater? [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2013, **58-60**: 49-56.
- [25] Al Lawati W M, Jean J S, Kulp T R, et al. Characterisation of organic matter associated with groundwater arsenic in reducing aquifers of southwestern Taiwan [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 970-979.
- [26] 鲁守刚, 邓娅敏, 张美雁, 等. 基于多元统计分析的高砷地下水水化学特征研究——以内蒙古杭锦后旗为例[J]. 中国农村水利水电, 2014, (12): 40-44, 48.
- Lu S G, Deng Y M, Zhang M Y, et al. Application of multivariate statistical analysis to research hydrogeochemistry of high arsenic groundwater: A case study at Hangjinhouqi, Inner Mongolia [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014, (12): 40-44, 48.
- [27] 蒋勇军, 吴月霞, Groves C, 等. 利用因子分析确定岩溶地下河系统水质的影响因素[J]. 水文地质工程地质, 2009, **36**(4): 1-7.
- Jiang Y J, Wu Y X, Groves C, et al. Identification of influencing factors of groundwater quality variation using factor analysis[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, **36**(4): 1-7.
- [28] 程东会, 陈鸿汉, 何江涛, 等. 北京城近郊区地下水人为影响和水-岩作用指示性指标研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, **34**(5): 37-42.
- Cheng D H, Chen H H, He J T, et al. A study of indicators of anthropogenic influence and water-rock interaction in groundwater system in the urban region of Beijing [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, **34**(5): 37-42.
- [29] GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].

CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, et al. (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, et al. (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, et al. (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, et al. (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, et al. (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-rui, et al. (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	JI De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, et al. (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, et al. (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, et al. (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, et al. (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, et al. (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, et al. (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, et al. (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, et al. (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, et al. (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, et al. (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, et al. (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, et al. (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, et al. (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, et al. (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, et al. (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, et al. (3696)
Effect of Cr(Ⅵ) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, et al. (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, et al. (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(Ⅱ)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, et al. (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, et al. (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, et al. (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, et al. (3753)
Preparation of Prussian Blue@ Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, et al. (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, et al. (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, et al. (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, et al. (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, et al. (3789)
Characteristic of Benzo[<i>a</i>]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-qi, WANG Ming, et al. (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, et al. (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, et al. (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, et al. (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, et al. (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, et al. (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, et al. (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, et al. (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, et al. (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, et al. (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, et al. (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, et al. (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, et al. (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-qi, et al. (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, et al. (3954)