

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

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

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽珺,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选

赵鹏, 何江涛*, 王曼丽, 黄德亮, 王磊, 梁雨

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

摘要: 优控污染物的筛选是环境管理和环境质量保护的有效技术手段, 快速高效地筛选识别出地下水中需要优先控制的污染物, 对地下水污染防治具有重要的指导意义. 为了探究一套适用于基础资料薄弱地区的优控污染物筛选体系, 本文在地下水检测分析数据的基础上, 运用指标分类污染评价方法, 结合污染程度频率评分叠加, 建立了基于污染评价的优控污染物筛选体系. 将该体系应用于格尔木地区地下水中优控污染物的筛选, 运用基于风险评价的优控污染物筛选体系对结果进行验证, 并探讨两种体系的差异性. 结果表明: 格尔木地区地下水中优控污染物为 TDS、总硬度、氯离子、硫酸根、钠、氟、总铁、砷、菲、铝共 3 类 10 种, 与基于风险评价的地下水中优控污染物筛选结果基本一致, 筛选结果具有一定的可靠性. 基于风险评价的体系过程复杂, 对基础资料要求较多, 但具有一定的前瞻性, 适用于基础资料丰富的地区; 基于污染评价的体系过程简便, 对基础资料要求少, 但易受背景值计算的影响, 更适用于污染源基础资料薄弱的地区地下水中优控污染物的筛选.

关键词: 地下水优控污染物; 污染评价; 风险评价; 指标分类; 环境管理

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0800-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201706283

Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment

ZHAO Peng, HE Jiang-tao*, WANG Man-li, HUANG De-liang, WANG Lei, LIANG Yu

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

Abstract: Screening of priority control pollutants is an effective technical means for environmental management and environmental quality protection. Quick and efficient identification of pollutants is useful when attempting to prevent and control groundwater pollution. In order to explore a screening system for a set of priority pollutants that can be applied to regions with weak basic information, a screening method of priority pollutants based on contamination assessment is put forward in this paper. Based on the data of groundwater detection and analysis, using the evaluation method for pollution index classification, and combined with the pollution degree frequency score superposition method. The screening method of priority control pollutants in groundwater based on contamination assessment was established. This method was applied to the screening of pollutants in groundwater in the city of Golmud in Qinghai Province, China. The results were verified by using the screening system based on risk assessment, and the differences in the two systems are discussed. The results show that three categories of 10 kinds of chemical parameters, including TDS, total hardness, chloride, sulfate, sodium, fluorine, total iron, pyrene, phenanthrene, and aluminum, were determined as priority control pollutants in the Golmud region. It was consistent with the results of the screening method based on the risk assessment, and the screening results were reliable. The method based on risk assessment is complex and requires additional basic information, but it has certain foresight and is suitable for regions with abundant basic data. The method based on contamination assessment is simple and convenient and requires less abundant basic data. However, it is easily affected by background values. It is more suitable for the screening of priority control pollutants in regions with weak pollution source information.

Key words: priority control pollutants in groundwater; contamination assessment; risk assessment; index classification; environmental management

地下水由于其良好的感官特性、微生物安全性和资源可用性, 在世界上许多国家和地区作为其可靠性饮用水源^[1]. 然而, 随着社会经济的快速发展, 地下水源的安全性受到越来越多的化学污染物的威胁. 据统计, 仅欧洲商业化学物质的库存种类就达 10 万种以上^[2], 而大量有毒有害物质进入水环境中会严重影响饮用水安全和人体健康. 由于各种污染物对人体危害性及其在水环境中的含量不同, 就需要优先监测和控制对人体危害性大且含量高的污染物, 从而有效地防控地下水环境问题.

优控污染物(priority control pollutants, PCPs)是指从众多有毒有害的污染物中筛选出在环境中出现几率高、对周围环境和人体健康危害较大, 并具潜在环境威胁的化学物质, 以达到优先控制的目的^[3,4]. 美国、加拿大、欧盟、荷兰、澳大利亚和日

收稿日期: 2017-06-29; 修订日期: 2017-08-24

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409029-2, 200909038-1)

作者简介: 赵鹏(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水环境及水文地质, E-mail: 597108193@qq.com

* 通信作者, E-mail: jthe@cugb.edu.cn

本等国家和组织先后开展了优先污染物筛选和排序研究,如美国优先污染物筛选和排序名单包括了129种水环境优先污染物,后来又补充了80种^[5-8].我国的优控污染物研究工作起步较晚,1989年原国家环境保护局通过了“中国水中优先控制污染物黑名单”,其中包括68种污染物^[9].目前国内外普遍运用的优控污染物筛选方法体系中,计分排序是主要筛选的方法^[10],如:模糊数学法^[11,12]、潜在危害指数法^[3,13]、Hasse图解法^[14,15]、综合评分法^[16,17]等.已有的方法主要针对地表环境及水土环境优控污染物的研究,对于地下水中的优控污染物筛选研究较少,且方法体系尚不完善.而地下水中的优控污染物筛选有其特殊性,既要考虑污染物的危害性、含量等参数,也要考虑研究区经济发展水平、水文地质条件以及区域性差异的影响.整体来看,国内外已有的地下水中优控污染物筛选研究忽略了区域性差异,且筛选对象以有机物或毒性大的无机物为主,往往由于某些地区研究程度较低且基础资料不足或难以获取,势必会对方法的适用性造成影响;或由于某些地区水文地质条件的特殊性,导致地下水中一些毒性小的无机物含量过高同样也会严重影响饮用水安全,这类污染物也应该作为优控物的研究范畴,因此,区域性差异对方法的选择有重要影响.

本研究从地下水角度出发,综合考虑区域性差异的影响,建立了一套既能反映地下水环境现状又简便易行,且专门适用于基础资料薄弱地区的地下水中优控污染物筛选方法体系,以期对地下水污染防治及水环境安全管理起到一定的指示作用.

1 材料与方法

1.1 研究思路

筛选环境优控污染物时,首先要考虑化学物质自身的毒性和环境行为,同时还要考虑污染物在环境中的残留现状^[18].地下水中优控污染物的筛选则更为复杂,既要考虑污染物在地下水环境中的含量及其危害性,还要考虑研究区经济发展水平和水文地质条件等特殊性.现有的基于风险评价的地下水中优控污染物筛选体系[图1(a)],从地表污染源量化出发,通过包气带分区概化,考虑污染物在包气带衰减作用的折减系数,计算出进入地下水中的污染物的量.再耦合污染物毒性并评分排序,实现地下水中的主要污染物筛选,该体系在实际运用中得到了较好的效果^[19-22].但该体系在进

行地下水中主要污染物筛查时所需资料较多,且对包气带介质有一定的概化,对于经济发展水平低、地表污染源基础资料不足且难以获取的地区可行性较低,也可能会导致最终的筛选结果产生误差.而水质监测数据直接反映了地下水中污染物含量的现状水平,水质标准限值^[23](groundwater quality standards, GQS)或健康基准值^[24-26](health-based screening levels, HBSLs)可作为污染物对人体健康危害程度的表征.综合考虑社会经济条件及监测技术水平,本研究从地下水的角度出发,拟建立一套基于污染评价的地下水中优控污染物筛选方法.

国内外地下水污染评价方法众多^[27,28],而地下水中污染物种类的多样性及其属性和含量的差异较大,基于污染评价的地下水中优控污染物的筛选则需要污染评价的基础上将不同类型的污染物有效地统一起来进行比较,且能最大限度地利用水质监测数据.本研究借鉴许真^[29]等提出的地下水污染指标分类综合评价方法,将指标分为天然组分和人工组分两类.在地下水环境中,针对天然情况下不会出现的污染物指标,认为其没有背景值,为人工组分,只要在实际调查中检出这类污染物指标就视为遭受到了污染;而对于在天然情况下原本就可能存在的指标组分,认为其存在背景值,将其定义为天然组分,以背景值或对照值作为评价标准,超过背景值即认为可能存在污染^[29].因此,本文在地下水检测分析数据的基础上,运用指标分类污染评价方法,结合污染程度频率评分叠加,建立了一套基于污染评价的地下水中优控污染物筛选体系[图1(b)].

1.2 数据来源

1.2.1 研究区概况

研究区位于青海省格尔木市,该地地处青藏高原腹地,位于柴达木盆地南缘中部,南依昆仑山,北临达布逊湖,地理坐标东经 $94^{\circ}25'$ ~ $95^{\circ}19'$,北纬 $36^{\circ}09'$ ~ $37^{\circ}07'$,平均海拔2 880 m,研究区面积 577.5 km^2 [图2(a)].

该区降雨稀少,多年平均降雨量仅44 mm;蒸发强烈,年平均蒸发强度高达2 600 mm,温度较低,多年平均气温仅为 6°C ,属于高原大陆性气候.区内发育的主要河流为格尔木河,干流长378.5 km,集水面积 $18\,648\text{ km}^2$,多年平均流量为 $25.51\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,是柴达木盆地的第二大河.受地形地貌、地层岩性、地质构造等因素控制,格尔木山前平原地下水具有干旱内陆盆地冲洪积扇地下水分布的一般规律,在山前倾斜平原中上部为单一潜水,地层

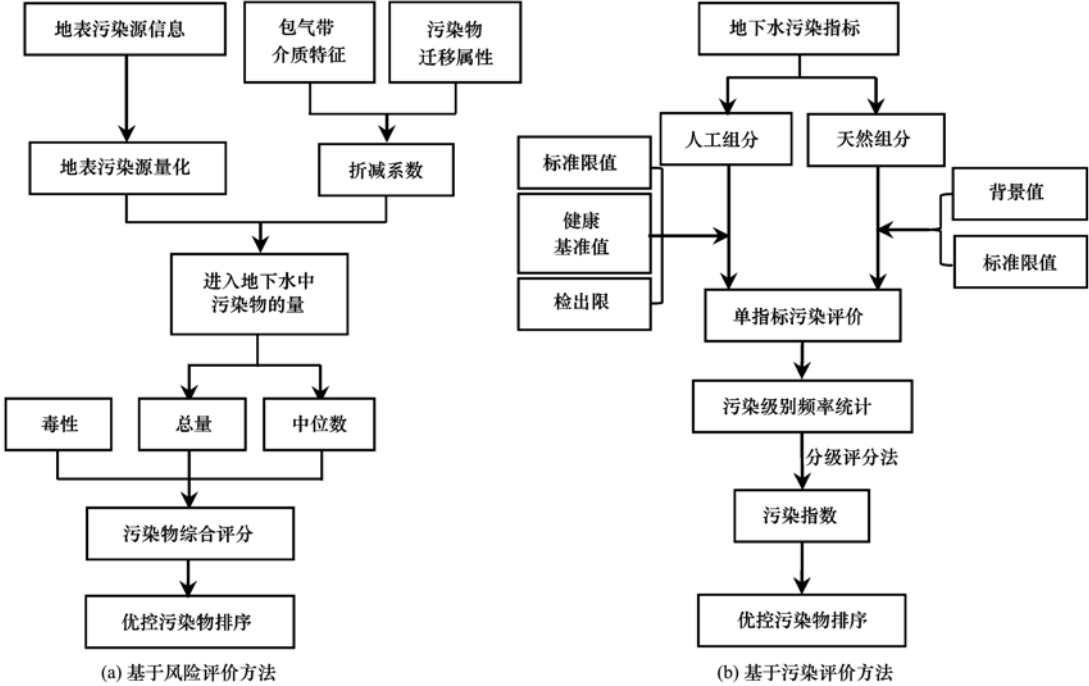


图 1 地下水中优控污染物筛选体系框架

Fig. 1 Framework of priority control pollutants in groundwater

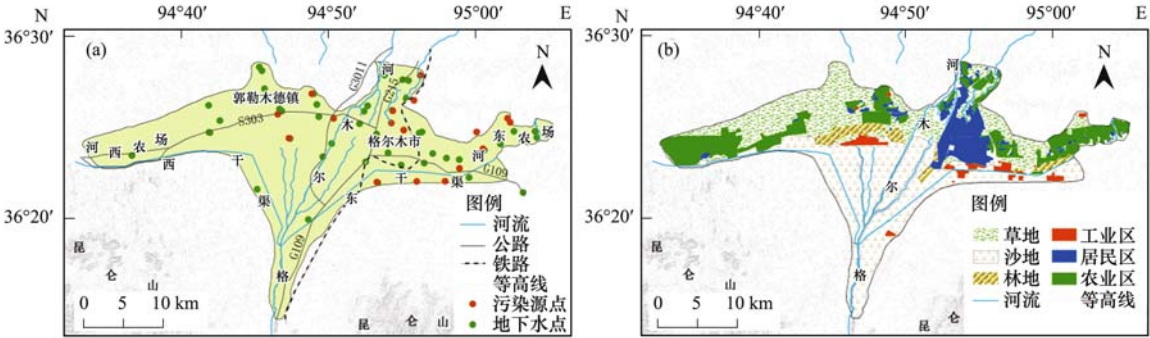


图 2 研究区基础要素

Fig. 2 Basic elements of the study area

岩性为砂砾卵石及砂层，厚度 > 200 m，在冲洪积扇溢出带，沉积地层颗粒从上游到下游逐渐由粗变细，地形渐缓，地下水位埋深由深至浅，于平原中前缘带进入山前平原区。由于含水层厚度大，是地下水的极富水地带；山前平原前缘，地形平缓，含水层以细颗粒为主，形成了多层互层结构，地下水变为承压或自流水。地下水主要补给来源于格尔木河的入渗补给，此外，还包括沟谷洪流入渗、水库渗漏以及灌溉回归水；地下水主要由南向北径流，泉集河、蒸发、侧向流出及人工开采是地下水的主要排泄方式，区内地表水和地下水互相转化频繁。

格尔木市依托盐化、石化为支柱产业，以河东农场、河西农场为代表的农牧业为该区的重

要产业。区内的居民生活、牲畜、服务业、少部分林草地及大部分工业用水主要使用地下水，农业灌溉用水主要引自格尔木河。该区土地开发利用程度较低，以农业用地和建设用地为主，未利用的沙地、草地较多[图 2(b)]。

1.2.2 水样测试与指标初筛

本研究以青海省格尔木市为研究区，于 2016 年 6 月对格尔木进行野外踏勘及地下水污染调查。通过分析总结已有资料及野外踏勘资料，于 2016 年 7 月对格尔木研究区进行水样采集，共采集地表污染源水样 17 组，潜水地下水样 51 组，水井深度在 5 ~ 130 m 之间，采样方法及样品封装保存严格按照 DZ/T 0288-2015《区域地下水污染调查评价规

范》进行。根据污染源调查资料和文献调研，测试指标包括重点区调查监测项目中的必测和选测指标共计 93 项，水样测试工作由河北环境地质勘察院和中国环境科学研究院共同承担。

根据地下水样测试结果，结合研究区地下水污染调查成果及地下水测试结果，综合国内外优控污染物初始清单的确定原则^[9]，对于格尔木研究区优控污染物初始清单的确定应遵循以下 3 点原则：①优先筛选检出量大的污染物；②优先选择规范中要求研究区水样必测的污染物；③优先选择国内外优控污染物名单中包含的污染物。

对于不符合以上原则的 22 项指标予以剔除，最终确定优控污染物初始清单包括综合指标、无机盐离子、重金属、多环芳烃、挥发性有机物、有机氯等共 71 项。

结合研究区特点及指标实际检出情况，进行指标分类：认为地下水中感官性状及一般化学指标为天然组分；由于地下水中的三氮在不同条件下相互转化，认为硝氮、亚硝氮为天然组分；碘化物、氯化物广泛存在于自然界中，为天然组分；汞、镉、砷、铬为地下水常规指标，且存在天然来源，划分为天然组分；钡、镍、铅均存在天然来源，划分为天然组分。

已有研究证实 PAHs 绝大部分由人为活动污染造成^[30]，格尔木研究区地下水中的 PAHs 检出率低且含量较低，而在地表污染源中检出量相对较高，且该区有较大规模的石化产业。因此，将蒽、萘、葱、荧葱、苯并(a)葱、菲等 PAHs 划分为人工组分；对于其他非常规指标在天然状态下无来源，划分为人工组分。组分划分结果如表 1 所示。

表 1 格尔木研究区优控污染物初始清单

Table 1 Initial list of priority control pollutants in the Golmud region	
指标类别	指标名称
天然组分(23 项)	TDS、COD、总硬度、钠、铝、总铁、氯离子、硫酸根、氟化物、硝氮、氨氮、亚硝氮、碘化物、锌、汞、镉、钡、锰、镍、铜、砷、铬、铅
人工组分(48 项)	1,1-二氯乙烯、二氯甲烷、三氯甲烷、1,2-二氯乙烷、四氯化碳、三氯乙烯、1,2-二氯丙烷、四氯乙烯、1,4-二氯苯、氯乙烯、1,1,1-三氯乙烷、溴二氯甲烷、1,1,2-三氯乙烷、溴仿、一氯二溴甲烷、1,3-二氯苯、1,2-二氯苯、甲苯、苯、乙苯、1,2,4-三氯苯、六氯苯、滴滴涕(总量)、Dieldrin 狄氏剂、Endosulfan I α 硫丹、Endosulfan II、Endrin 异狄氏剂、Heptachlor 七氯、环氧七氯、α-BHC、β-BHC、δ-BHC、蒽、萘、葱、荧葱、萘烯、萘、芘、苯并(a)葱、苯并(b)荧葱、苊、菲、苯并(k)荧葱、苯并(a)芘、苊苯(1,2,3-cd)芘、二苯并(a,h)葱、苯并(g,h,i)芘

1.3 指标分类污染评价方法

由于地下水中污染组分的含量、来源、单位的数量级等差异，将所有指标一起评价可能会引起歧义，而且指标间评价结果的可比性较差。根据指标分类评价的原则，将污染指标分为天然组分和人工组分两类，参照指标分类污染评价方法对两类指标分别进行污染评价。

对于天然组分，直接运用已有的天然组分污染级别分类评价方法^[29]进行污染评价。而对于人工组分，一类是对于给出水质标准的指标，直接运用已有的人工组分污染级别分类评价方法^[29]进行评

价；另一类是对于没有给出水质标准的指标，在以往的人工组分污染级别分类方法的基础上引入健康基准值(HBSLs)，并对该方法进行修正。HBSLs 是美国地质调查局(USGS)1991 年对无强制执行标准值的污染物制定的基于健康的评价基准值，作为水质标准的补充。它是针对水中污染物估算的基准浓度值，衡量污染物通过饮水途径进入人体引起的潜在健康问题^[24]。因此用 USGS 给出的 HBSLs 代替原方法中的 GQS_Ⅲ，再按照将 HBSLs 放大两倍原则^[31]代替原方法中的 GQS_N，指标分类污染评价方法见表 2。

表 2 指标分类污染评价方法¹⁾

Table 2 Pollution assessment methods of index classification			
天然组分污染级别分类	人工组分污染级别分类	污染级别	级别描述
$c \leq \text{NBL}$	$c \leq \text{TDF}$	1	未污染
$\text{NBL} < c \leq 0.5(\text{NBL} + \text{GQS}_{\text{Ⅲ}})$	$\text{TDF} < c \leq 5\text{TDF}$	2	疑似污染
$0.5(\text{NBL} + \text{GQS}_{\text{Ⅲ}}) < c < \text{GQS}_{\text{Ⅲ}}$	$5\text{TDF} < c \leq \text{GQS}_{\text{Ⅲ}}(\text{HBSLs})$	3	轻度污染
$\text{GQS}_{\text{Ⅲ}} < c \leq \text{GQS}_{\text{Ⅳ}}$	$(\text{HBSLs}) \text{GQS}_{\text{Ⅲ}} < c \leq \text{GQS}_{\text{Ⅳ}}(2\text{HBSLs})$	4	中污染
$\text{GQS}_{\text{Ⅳ}} < c$	$(2\text{HBSLs}) \text{GQS}_{\text{Ⅳ}} < c$	5	重污染

1) c 表示污染物实测浓度；NBL 表示背景值；GQS 表示 DZ/T 0290-2015《地下水水质标准》限值；HBSLs 表示健康基准值；TDF 表示 DZ/T 0288-2015《区域地下水污染调查评价规范》目标检出限

2 结果与分析

2.1 指标分类污染评价

根据地下水测试结果,运用 1.3 节的方法分别对 51 组地下水样的 71 项指标进行污染评价.对于天然组分的污染评价,需要计算天然组分的背景值,地下水环境单元的划分是背景值计算的基础,它是指一定时间、一定范围内水环境要素和元素一致的水域地区,具有时间和区域变异性^[32].综合考虑研究区水文地质条件、水化学特征、地形地貌等因素进行地下水环境单元划分(图 3),在数据特征分析及异常识别的基础上运用“平均值加减两倍标准差”方法^[33,34]计算天然组分的背景值(表 3),再

结合水质标准限值运用天然组分污染分级方法进行评价,指标分类污染评价统计结果如图 4 所示.

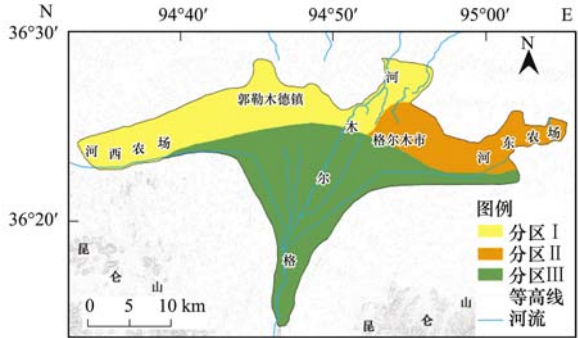


图 3 格尔木研究区地下水环境单元分区

Fig. 3 Subregions of environmental units of the groundwater in Golmud

表 3 天然组分背景值¹⁾/mg·L⁻¹

Table 3 Background levels of natural components/mg·L⁻¹

指标	各单元分区背景值			指标	各单元分区背景值		
	分区 I	分区 II	分区 III		分区 I	分区 II	分区 III
TDS	853.93	2 073 *	1 008.24 *	总铁	0.181 9	0.18	0.193 8
COD	0.45	1.2	0.5	碘化物	0.002	0.017 4	0.002
总硬度	387.32	725.47 *	371.88	铝	0.173 4	0.11	0.189 9
钠	128.62	350.16 *	171.95	锌	0.008	0.032 6	0.016
氯离子	181.14	566.93 *	249.69	钡	0.035	0.027 8	0.032 5
硫酸根	127.17	684.76 *	165.03	镉	0.001	0.001	0.001
氨氮	0.032	0.032	0.032	汞	0.000 1	0.000 1	0.000 1
硝氮	3.7	6.290 5	1.866 7	锰	0.005	0.005	0.005
亚硝氮	0.002 2	0.011 7	0.0012	镍	0.005	0.005	0.005
氟	0.378	1.12 *	0.657	砷	0.001	0.001	0.001
铜	0.005	0.005 8	0.005	铬	0.004	0.004	0.004
铅	0.005	0.005	0.005				

1) * 表示背景值含量大于Ⅲ类标准限值的劣质指标,进行污染评价时从劣不从优

地下水指标分类污染评价统计结果显示(图 4),格尔木地区地下水中污染指标以无机盐类为主,这与该区岩性特征和强烈的蒸发条件以及大范围农业活动密切相关;多环芳烃类物质也存在一定程度的污染,可能受该区石化工业和输油管道泄漏影响较大;VOC 类指标以未污染为主,实际检出量小或未检出.

2.2 优控污染物清单

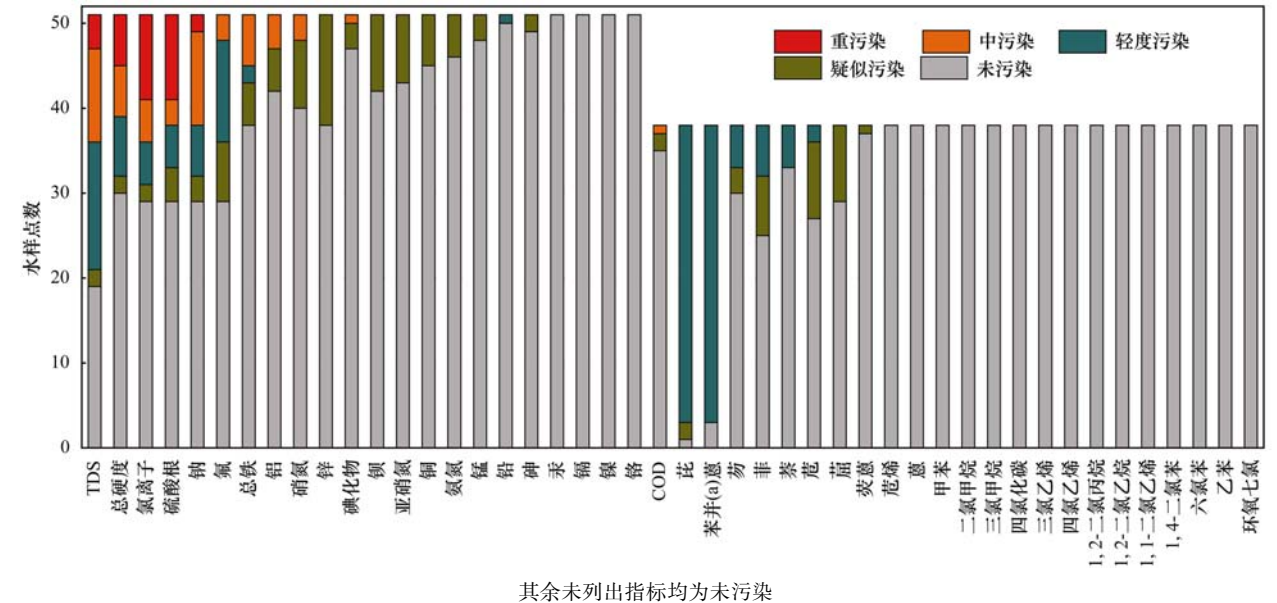
依据统计学原理,用各个指标污染程度频率分布来表征该指标的污染程度大小,且能最大限度地利用所有水样测试数据.由于同一指标在不同采样点的污染级别不尽相同,因此在污染评价结果的基础上,统计每项指标在各个污染级别的采样点数目,并计算其相应频率.将所有指标在相同污染级别的频率由小到大排序并从 1~n 赋值,并运用层次分析法计算得到污染级别在未污染、疑似污染、

轻度污染、中污染、重污染权重依次为 0、0.05、0.15、0.3、0.5.根据式(1)按照分级评分法叠加得到各个指标的综合污染指数 P_i ,按照各个指标的综合污染指数大小排序,从而实现优控污染物的筛选,结果如表 4 所示.

$$P_i = \sum (V_{ij}W_j)$$
 (1)

式中, P_i 表示指标 i 的综合污染指数; V_{ij} 表示污染指标 i 在 j 类污染级别中的评分值; W_j 表示 j 类污染级别的权重.

由表 4 可见,运用该方法筛选结果中排序靠前的以天然组分的盐类指标为主,得分相同且均为 1 的主要为低于检出限或未检出的人工组分.优控污染物的筛选原则是对经济环境的各种因素进行分析,确定在数量上优先控制水系中 30% 定量检出的污染物,在种类上筛选出综合评价指数高的污染物^[3],结合格尔木社会经济发展水平及地下水中污



其余未列出指标均为未污染

图4 指标分类污染评价结果统计

Fig. 4 Statistics for the contamination assessment results

表4 频率分级评分叠加结果及污染物排序¹⁾
Table 4 Results of the scoring and pollutant rankings

排序	指标名称	未污染		疑似污染		轻度污染		中污染		重污染		得分
		频率	赋值	频率	赋值	频率	赋值	频率	赋值	频率	赋值	
1	TDS *	0.373	3	0.039	3	0.294	10	0.216	8	0.078	3	5.55
2	总硬度 *	0.588	5	0.039	3	0.137	7	0.118	7	0.118	4	5.30
3	氯离子 *	0.569	4	0.039	3	0.098	5	0.098	6	0.196	5	5.05
4	硫酸根 *	0.569	4	0.078	6	0.098	5	0.059	4	0.196	5	4.60
5	钠 *	0.569	4	0.059	5	0.118	6	0.216	8	0.039	2	4.40
6	氟 *	0.569	4	0.137	9	0.235	9	0.059	4	0	1	3.50
7	总铁 *	0.745	8	0.098	7	0.039	3	0.118	7	0	1	3.30
8	砷 *	0.026	1	0.053	4	0.921	11	0	1	0	1	2.65
9	菲 *	0.658	6	0.184	12	0.158	8	0	1	0	1	2.60
10	铝 *	0.824	11	0.098	7	0	1	0.078	5	0	1	2.55
11	苯并(a)蒽	0.079	2	0.000	1	0.921	11	0	1	0	1	2.50
12	硝氮	0.784	10	0.157	10	0	1	0.059	4	0	1	2.35
13	蒎	0.789	10	0.079	6	0.132	7	0	1	0	1	2.05
14	蒎	0.711	7	0.237	13	0.053	4	0	1	0	1	1.90
15	COD	0.921	13	0.053	1	0	7	0.026	1	0	1	1.75
15	萘	0.868	16	0	4	0.132	1	0	3	0	1	1.75
16	锌	0.745	8	0.255	14	0	1	0	1	0	1	1.65
17	蒎	0.763	9	0.237	13	0	1	0	1	0	1	1.60
18	碘化物	0.922	16	0.059	5	0	1	0.020	2	0	1	1.50
18	钡	0.824	11	0.176	11	0	1	0	1	0	1	1.50
19	亚硝氮	0.843	12	0.157	10	0	1	0	1	0	1	1.45
20	铜	0.882	14	0.118	8	0	1	0	1	0	1	1.35
21	氨氮	0.902	15	0.098	7	0	1	0	1	0	1	1.35
22	锰	0.941	17	0.059	5	0	1	0	1	0	1	1.20
23	铅	0.980	20	0	1	0.020	2	0	1	0	1	1.15
24	砷	0.961	18	0.039	3	0	1	0	1	0	1	1.1
25	蒎	0.974	19	0.026	2	0	1	0	1	0	1	1.05
26	汞	1	20	0	1	0	1	0	1	0	1	1

1) * 表示排序在前 15% 的污染物为优控污染物；未列出指标均为未污染，评分为 1

染物检出状况,将排序前 15% 的污染物确定为格尔木地区地下水中优控污染物,包括 TDS、总硬度、氯离子、硫酸根、钠、氟、总铁、砷、菲、铝共 3 类 10 种。

2.3 结果验证

现有的基于风险评价的地下水中优控污染物筛选体系[图 1(a)],运用较为丰富的污染源资料和包气带介质资料,通过地表污染源量化、包气带介质分区概化及折减系数计算,最终将计算得到的进入地下水中的污染物总量、中位数与毒性参数评分叠加,按照评分大小进行污染物排序。本研究将该方法应用于格尔木研究区,用以验证基于污染评价的优控污染物筛选体系的科学性和可靠性,并以 TDS、总铁、氨氮、砷为例进行说明。

2.3.1 地表污染源量化

研究区主要污染源有生活污染源、工业污染源、农业污染源 3 类,进入地下水中的每一种污染

物是这 3 类污染源共同作用的结果。利用 17 组污染源水样测试结果,根据各类污染源中的每一种污染物实测浓度,结合各类污染源的调查资料进行污染物量化计算^[22],利用 ArcGIS 9.3 软件分别对每一种污染物在 3 类污染源中的排放量进行矢量图绘制,并利用软件中的栅格叠加功能将该种污染物在每一类型污染源中的排放量进行叠加,最终得到研究区每种污染物排放量的地表分布,结果如图 5 所示。

2.3.2 包气带介质分区概化

根据格尔木研究区剖面及地下水位埋深,结合实地踏勘资料,对研究区包气带介质进行分区概化,共概化为 7 个不同类型包气带介质分区[图 6(b)],对于包气带每个分区岩性剖面参考相应区域整体包气带属性来代替整个水文地质区的岩性。岩性剖面用典型的钻孔岩性来代替整个水文地质区的岩性,各个包气带分区岩性概括如图 6(c)所示。

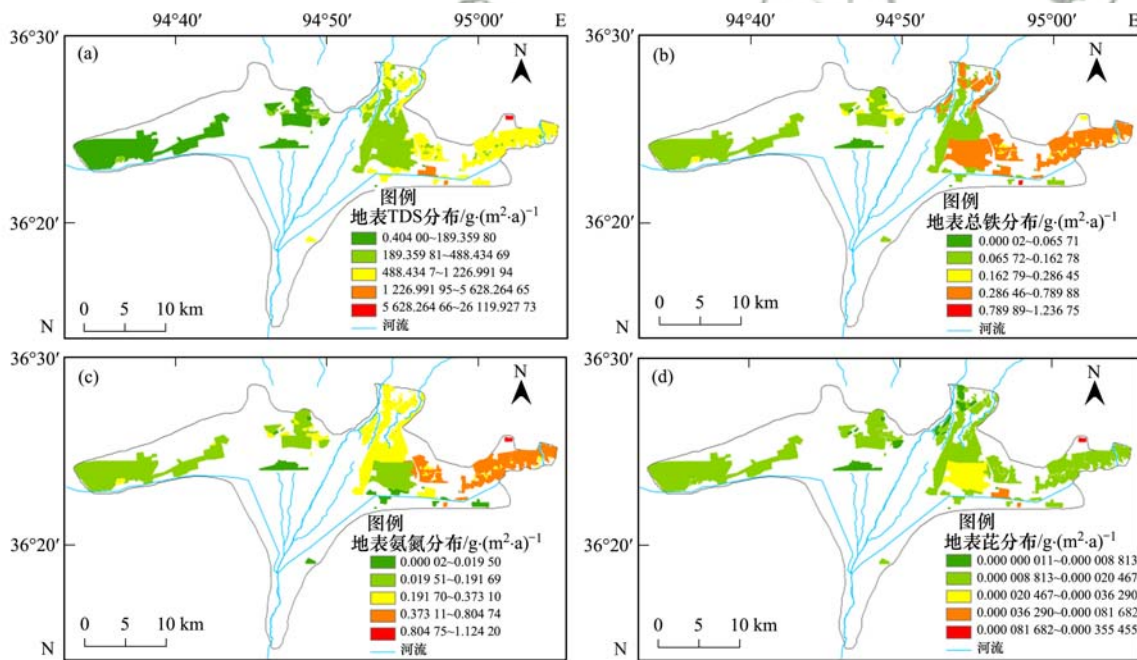


图5 地表污染物量化分布

Fig. 5 Distribution of contamination sources

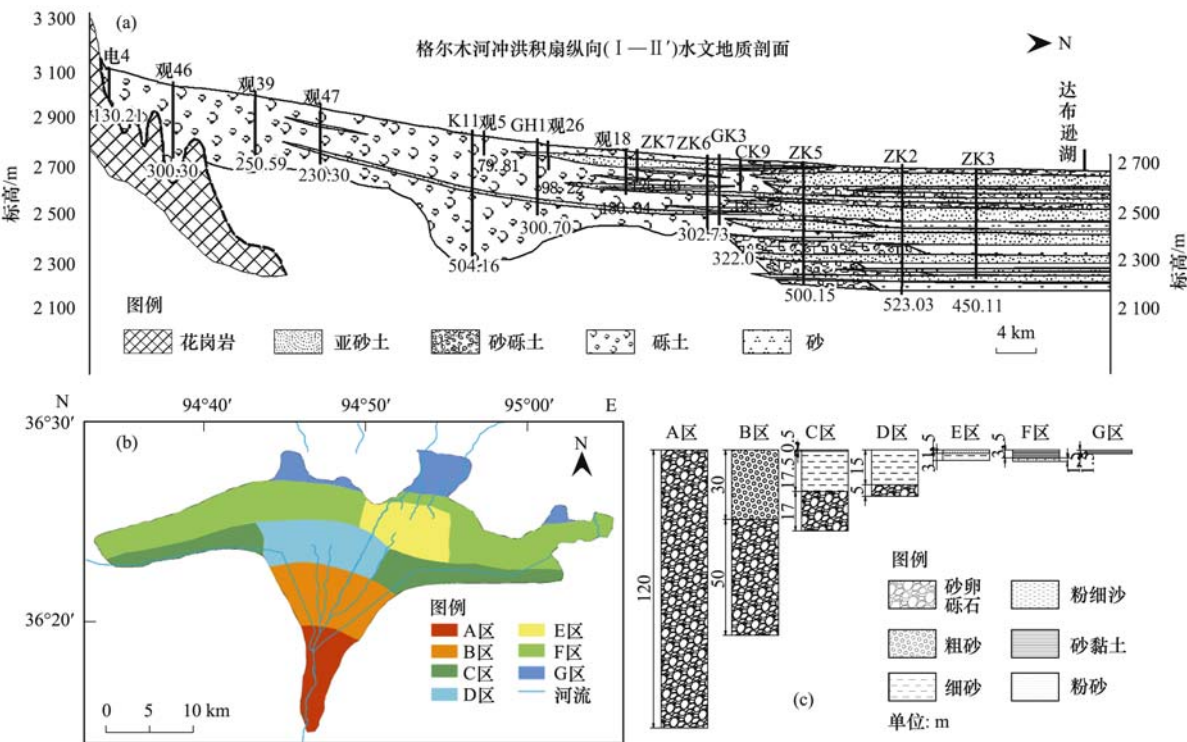
根据包气带介质参数和污染物理化性质,运用文献[22]中的方法计算每种污染物在各包气带分区的折减系数。

2.3.3 污染物排序

运用 ArcGis 9.3 栅格计算器模块将地表污染物的量化结果与污染物的折减系数相乘并归一化处理,得到地表污染物穿透包气带进入地下水中的量,进一步分级得到每种污染物进入地下水中的分

布情况,如图 7 所示。

根据计算得到的每种污染物进入地下水中的含量及其分布,运用 ArcGis 9.3 的栅格统计功能得到每种污染物在所有污染源栅格单元上的总量、中位数,耦合污染物毒性运用分级评分赋值叠加计算每种污染物的综合评分值。其中总量、中位数、毒性的权重由计算得到分别为 0.4、0.2、0.4,最终的得分排序结果如表 5 所示。



(a) 格尔木地区剖面(由青海省环境地质勘查局提供的底图绘制); (b) 包气带介质分区; (c) 包气带介质岩性

图 6 格尔木研究区包气带介质分区

Fig. 6 Subregion of aeration in the Golmud region

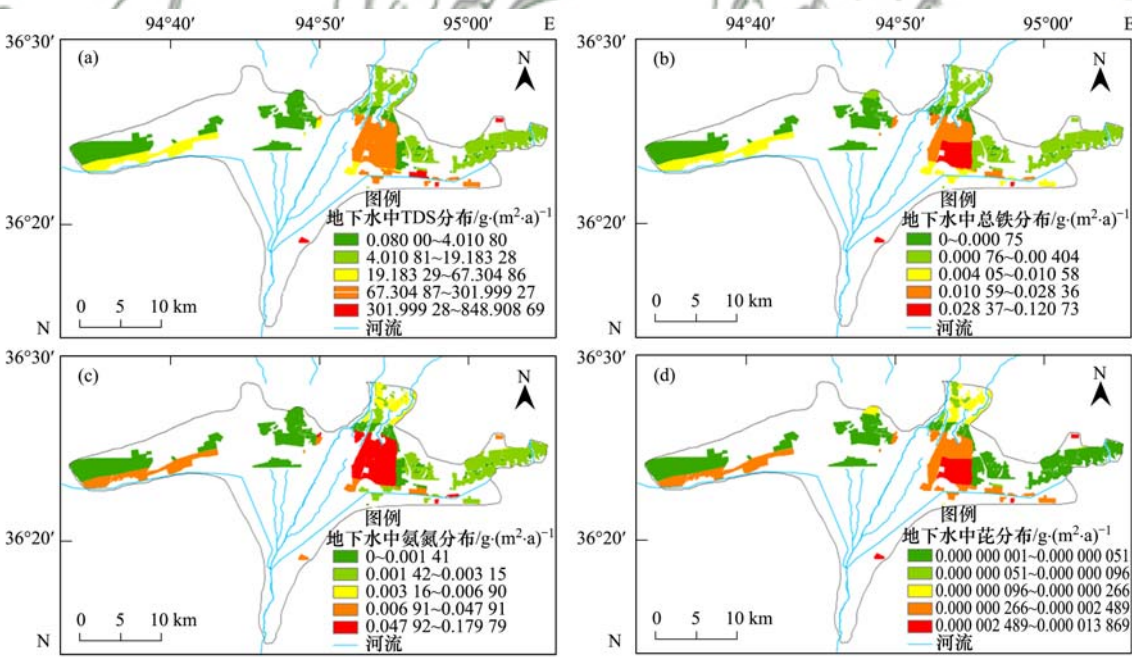


图 7 地下水中污染物量化结果分布

Fig. 7 Distribution of pollutant quantification results in the groundwater

基于风险评价方法筛选出的格尔木地下水中前 10 种优控污染物为 TDS、总硬度、铝、氯离子、总铁、氨氮、硫酸根、氟、钠、COD, 有 8 种污染物与污染评价体系的筛选结果相同. 而 COD、氨氮在风险评价法筛选结果中属于优控污染物, 是由于基于

风险评价体系得到的是污染物从地表进入地下水中的预估量, 结果具有一定的前瞻性, 从而在现状水平下有些污染物还未能进入到地下水中, 导致从地下水污染评价的角度排序结果较靠后; 地下水中的 砷、菲含量虽然较低, 但依据检出限和标准限值很

表 5 基于风险评价体系污染物排序结果¹⁾

Table 5 Screening results of the method based on risk assessment								
序号	指标名称	总量 / $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	总量 赋值	中位数 / $\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	中位数赋值	毒性 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	毒性 赋值	评分
1	TDS *	2.62E+06	49	7.14E+00	33	1000	1	26.6
2	总硬度 *	7.20E+05	48	1.98E+00	32	450	2	26.4
3	铝 *	2.34E+02	39	4.60E-07	17	0.2	18	26.2
4	氯离子 *	6.10E+05	47	1.96E+00	31	250	3	26.2
5	总铁 *	5.42E+02	40	8.90E-06	20	0.3	15	26
6	氨氮 *	7.41E+03	42	2.33E-03	23	0.5	11	25.8
7	硫酸根 *	3.70E+05	46	5.76E-01	30	250	3	25.6
8	氟 *	1.14E+03	41	2.46E-02	27	1	9	25.4
9	钠 *	1.98E+05	45	3.24E-01	29	200	4	25.4
10	COD *	2.58E+04	44	2.12E-02	26	3	6	25.2
11	硝氮	7.76E+03	43	5.65E-02	28	20	5	24.8
12	碘	3.82E+00	33	1.40E-07	12	0.08	22	24.4
13	锰	3.35E+01	36	1.20E-07	10	0.1	20	24.4
14	镍	7.67E-01	29	0.00E+00	1	0.02	31	24.2
15	1,2-二氯乙烷	5.74E-01	28	8.00E-08	7	0.03	29	24.2
16	氯乙烯	3.67E-01	24	5.00E-08	4	0.005	34	24
17	1,1,2-三氯乙烷	2.29E-01	19	1.80E-07	14	0.005	34	24
18	1,2-二氯丙烷	3.08E-01	21	1.20E-07	10	0.005	34	24
19	亚硝氮	1.82E+02	38	5.80E-03	25	1	9	23.8
20	砷	4.32E-01	26	0.00E+00	1	0.01	33	23.8
21	苯	2.29E-01	19	1.80E-07	14	0.01	33	23.6
22	二氯甲烷	4.89E-01	27	3.10E-08	2	0.02	31	23.6
23	四氯化碳	1.53E-01	15	1.30E-07	11	0.002	38	23.4
24	钡	3.51E+01	37	3.47E-05	22	0.7	10	23.2
25	镉	3.60E-01	23	0.00E+00	1	0.005	34	23

1) *表示排序在前15%的污染物为优控污染物;本研究仅列出排序前25的污染物

容易识别出其污染程度,而计算所得进入地下水中的砷、菲总量分别为 $4.71 \times 10^{-2} \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $2.08 \times 10^{-1} \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 中位数分别为 $4.6 \times 10^{-8} \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $1.1 \times 10^{-7} \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 均趋于 0, 从而使污染物中位数评分偏低导致风险评价方法排序结果较靠后. 同时,已有调查研究表明该区沿线输油管道泄漏^[35,36]以及石化工业影响、基础资料不充分等都会导致风险评价方法的污染物排序结果产生误差.

比较这两种方法的筛选结果,两种方法筛选出的优控污染物的种类一致性较好,仅在排序上有所差别,从而验证了基于污染评价的地下水中优控污染物筛选体系的科学性和可靠性.

3 讨论

运用基于风险评价体系对本研究中的方法体系进行可靠性验证结果表明,两种方法最终确定的优控污染物种类基本一致,但污染物的排序存在较大差异. 为探讨产生排序差异的原因,本文即从两种体系的特点(原理、参数要求、优缺点)和适用性方

面进行对比讨论.

3.1 体系对比

基于风险评价的地下水中优控污染物筛选体系是结合 Multi-Cell 模型和推流原理,建立地表污染物垂向穿过包气带进入地下水的一维模型^[22],通过地表污染源量化计算、包气带分区概化,计算地表污染物进入地下水中的量,并与污染物毒性叠加实现污染物排序. 该体系综合考虑了水文地质条件、地表污染源特征、污染物毒性等因素,科学性较高. 基于污染评价的地下水中优控污染物筛选体系则是直接从地下水角度出发,在水质监测数据的基础上运用地下水污染评价方法,通过指标污染程度叠加得到综合污染指数实现污染物排序. 该体系在污染评价中隐含了水文地质条件、污染物毒性等因素,同样具有一定的科学性.

3.2 差异性分析

两种体系对格尔木研究区地下水中优控污染物筛选结果表明,污染物的排序存在较大差异,产生差异的主要原因在于对参数需求的差异性. 风险评价体系对污染源参数需求较多,其最大的优点在于

评价结果的前瞻性,但过程复杂且需要大量基础资料,对包气带的概化可能会导致评价结果产生误差. 污染评价体系仅需要水质数据及各类标准值进行污染评价,最大优点在于过程简便且对资料要求较少,但评价结果易受数据量的大小及背景值的影响.

3.3 适用性分析

基于风险评价和基于污染评价的优控污染物筛选体系都能实现地下水中优控污染物的筛选,但区域性差异对方法的适用性有重要影响. 有些地区以往的研究程度较高,获取的基础资料精度较高且足够丰富,则优先选择基于风险的优控污染物筛选方法;而有些地区以往研究程度较低,基础资料不足且难以获取,基于风险评价的方法很难实现,则应该选择基于污染评价的优控污染物筛选体系. 因此,基于风险评价的优控污染物筛选体系适用于基础资料丰富的地区,对于基础资料不足且难以获取的地区就会有一定的局限性;而基于污染评价的优控污染物筛选体系适用于基础资料薄弱的研究区地下水中优控污染物的筛选.

4 结论

(1)结合指标分类污染评价方法,建立了基于污染评价的地下水中优控污染物筛选体系,并运用于格尔木研究区. 结果表明,格尔木地区地下水中优控污染物为TDS、总硬度、氯离子、硫酸根、钠、氟、总铁、砷、菲、铝共3类10种.

(2)用基于风险评价的优控污染物筛选体系对污染评价体系筛选结果验证表明,两种体系分别筛选得出的排序前10种优控污染物中,有8种污染物相同,且均以天然组分为主. 因此,基于污染评价的优控污染物筛选体系具有一定的可靠性.

(3)基于污染评价和基于风险评价的地下水中优控污染物筛选体系差异性分析表明,区域性差异对方法的适用性有重要影响. 基于污染评价的优控污染物筛选体系更为简便,工作量小,可操作性较强,且适用于污染源基础资料不足的地区优控污染物的筛选.

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与中国环境科学研究院刘琰副研究员团队对本研究的大力支持.

参考文献:

[1] Kong L X, Kadokami K, Duong H T, *et al.* Screening of 1300 organic micro-pollutants in groundwater from Beijing and Tianjin,

North China[J]. *Chemosphere*, 2016, **165**: 221-230.

- [2] Arnot J A, Mackay D, Webster E. Screening level risk assessment model for chemical fate and effects in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (7): 2316-2323.
- [3] 许秋瑾,李丽,梁存珍,等. 淮安某县农村饮用水源中优控污染物的筛选研究[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 631-638.
- Xu Q J, Li L, Liang C Z, *et al.* Screening of priority control pollutants from the rural drinking water sources in Huai'an City [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 631-638.
- [4] 崔建升,徐富春,刘定,等. 优先污染物筛选方法进展[A]. 见:中国环境科学学会. 中国环境科学学会2009年学术年会论文集(第四卷)[C]. 武汉:中国环境科学学会,2009. 831-834.
- [5] 赵晓丽,赵天慧,李会仙,等. 中国环境基准研究重点方向探讨[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(1): 18-30.
- Zhao X L, Zhao T H, Li H X, *et al.* Investigation on important directions of China environmental quality criteria [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(1): 18-30.
- [6] 叶旌,霍立彬,章为静,等. 美国饮用水化学候选污染物的筛选过程[J]. *环境工程技术学报*, 2014, **4**(4): 346-352.
- Ye J, Huo L B, Zhang W J, *et al.* Screening procedure of drinking water contaminant candidate in US [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2014, **4** (4): 346-352.
- [7] NEPC (National Environment Protection Council). National environment protection (Assessment of site contamination) measure review[R]. Canberra: NEPC, 2005.
- [8] U.S. EPA. Guidelines for carcinogen risk assessment (EPA 2005/630/P-03/001F) [R]. Washington DC: U. S. EPA, 2005.
- [9] 裴淑玮,周俊丽,刘征涛. 环境优控污染物筛选研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2013, **3**(4): 363-368.
- Pei S W, Zhou J L, Liu Z T. Research progress on screening of environment priority pollutants [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2013, **3**(4): 363-368.
- [10] Swanson M B, Davis G A, Kincaid L E, *et al.* A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1997, **16**(2): 372-383.
- [11] 杨友明,柳庸行,王维国,等. 潜在有毒化学品优先控制名单筛选方法研究[J]. *环境科学研究*, 1993, **6**(1): 1-9.
- Yang Y M, Liu Y X, Wang W G, *et al.* Study on the priority controlled method of potentially toxic chemicals[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1993, **6**(1): 1-9.
- [12] 全燮,孙英,杨凤林,等. 海域有机污染物优先排序和风险分类模糊评判系统[J]. *海洋环境科学*, 1996, **15**(1): 1-7.
- Quan X, Sun Y, Yang F L, *et al.* Fuzzy system for assessment of the prior order and the risk classification of the marine organic pollutants[J]. *Marine Environmental Science*, 1996, **15**(1): 1-7.
- [13] 王莉,王玉平,卢迎红,等. 辽河流域浑河沈阳段地表水重点控制有机污染物的筛选[J]. *中国环境监测*, 2005, **21** (6): 59-62.
- Wang L, Wang Y P, Lu Y H, *et al.* The sifting of priority control organic pollutants in Hunhe river of Liaohé Basin in

- Shenyang city[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2005, **21**(6): 59-62.
- [14] 刘存, 韩寒, 周雯, 等. 应用 Hasse 图解法筛选优先污染物[J]. *环境化学*, 2003, **22**(5): 499-502.
- Liu C, Han H, Zhou W, *et al.* Applying Hasse diagrams to select priority pollutants[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, **22**(5): 499-502.
- [15] Lerche D, Matsuzaki S Y, Sørensen P B, *et al.* Ranking of chemical substances based on the Japanese pollutant release and transfer register using partial order theory and random linear extensions[J]. *Chemosphere*, 2004, **55**(7): 1005-1025.
- [16] Snyder E M, Snyder S A, Giesy J P, *et al.* SCRAM: a scoring and ranking system for persistent, bioaccumulative, and toxic substances for the North American great lakes[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2000, **7**(1): 51.
- [17] van Haelst A G, Hansen B G. Priority setting for existing chemicals: automated data selection routine[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2000, **19**(9): 2372-2377.
- [18] 叶珍, 马云, 宋利臣, 等. 流域水环境优先控制污染物筛选方法研究[J]. *环境科学与管理*, 2010, **35**(10): 17-19, 55.
- Ye Z, Ma Y, Song L C, *et al.* Screen priority pollutants were selected in the water environment[J]. *Environmental Science and Management*, 2010, **35**(10): 17-19, 55.
- [19] 曾颖, 何江涛, 马文洁. 地下水中潜在危害有机物识别与筛选方法[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(4): 2132-2138.
- Zeng Y, He J T, Ma W J. Identification and screening of potential hazards organic pollutants in groundwater[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(4): 2132-2138.
- [20] 王红娜, 何江涛, 马文洁, 等. 两种不同的地下水污染风险评估体系对比分析: 以北京市平原区为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 186-193.
- Wang H N, He J T, Ma W J, *et al.* Comparative analysis of two different methods for risk assessment of groundwater pollution: a case study in Beijing Plain[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 186-193.
- [21] 崔亚丰, 何江涛, 王曼丽, 等. 岩溶地区地下水污染风险评估方法探究——以地苏地下河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2016, **35**(4): 372-383.
- Cui Y F, He J T, Wang M L, *et al.* Exploration of risk assessment method towards groundwater contamination in Karst region: a case study in Disu underground river system basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, **35**(4): 372-383.
- [22] 王曼丽, 何江涛, 崔亚丰, 等. 基于折减系数的地下水污染风险评估方法探究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(12): 4510-4519.
- Wang M L, He J T, Cui Y F, *et al.* Study on groundwater contamination risk assessment method based on reduced coefficient[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(12): 4510-4519.
- [23] DZ/T 0290-2015, 地下水水质标准[S].
- [24] 曾颖, 何江涛, 马文洁, 等. 中国地下水水源饮水健康基准值的建立[J]. *水文地质工程地质*, 2015, **42**(2): 44-51.
- Zeng Y, He J T, Ma W J, *et al.* The establishment of Chinese health-based levels of drinking water for groundwater source[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, **42**(2): 44-51.
- [25] 陈艳卿, 孟伟, 武雪芳, 等. 美国水环境质量基准体系[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(4): 467-474.
- Chen Y Q, Meng W, Wu X F, *et al.* Ambient water quality criteria system in the United States [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(4): 467-474.
- [26] Toccalino P L, Norman J E. Health-based screening levels to evaluate U. S. geological survey ground water quality data[J]. *Risk Analysis*, 2006, **26**(5): 1339-1348.
- [27] Bai L P, Wang Y Y, Fang H N, *et al.* Research on the evaluation method of groundwater quantity and pollution vulnerability[J]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2013, **13**(2): 368-375.
- [28] 张新钰, 辛宝东, 王晓红, 等. 我国地下水污染研究进展[J]. *地球与环境*, 2011, **39**(3): 415-422.
- Zhang X Y, Xin B D, Wang X H, *et al.* Progress in research on groundwater pollution in our country [J]. *Earth and Environment*, 2011, **39**(3): 415-422.
- [29] 许真, 何江涛, 马文洁, 等. 地下水污染指标分类综合评价方法研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(1): 342-347.
- Xu Z, He J T, Ma W J, *et al.* A renovated comprehensive evaluation method for groundwater pollution index classification [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(1): 342-347.
- [30] Basheer C, Obbard J P, Lee H K. Persistent organic pollutants in Singapore's coastal marine environment: Part I, seawater[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2003, **149**(1-4): 295-313.
- [31] 文冬光, 何江涛, 孙继朝, 等. DZ/T 0290-2015《地下水水质标准》解读[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [32] Gałuszka A. A review of geochemical background concepts and an example using data from Poland[J]. *Environmental Geology*, 2007, **52**(5): 861-870.
- [33] 郭高轩, 辛宝东, 刘文臣, 等. 我国地下水环境背景值研究综述[J]. *水文地质工程地质*, 2010, **37**(2): 95-98.
- Guo G X, Xin B D, Liu W C, *et al.* Review on the study of the environment background values of groundwater in China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2010, **37**(2): 95-98.
- [34] 刘文波, 冯翠娥, 高存荣. 河套平原地下水环境背景值[J]. *地质前缘*, 2014, **21**(4): 147-157.
- Liu W B, Feng C E, Gao C R. Background value of groundwater environment in Hetao Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, **21**(4): 147-157.
- [35] 汪珊, 孙继朝, 李政红. 西北地区地下水质量评价[J]. *水文地质工程地质*, 2004, **31**(4): 96-100.
- Wang S, Sun J C, Li Z H. Groundwater quality evaluation in Northwest China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, **31**(4): 96-100.
- [36] 谢宗英. 青海省水质污染现状及危害浅析[A]. 见: 中国地质矿产经济学会. 资源·环境·和谐社会——中国地质矿产经济学会2007年学术年会论文集[C]. 乌鲁木齐: 中国地质矿产经济学会, 2007. 691-695.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)