

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娟 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全克隆及雌雄经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究

白利平¹, 王业耀², 郭永丽³, 周友亚¹, 刘俐¹, 颜增光¹, 李发生¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国环境监测总站, 北京 100012; 3. 北京师范大学地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 地下水是我国重要的水资源, 当前我国面临的地下水污染防治形势较为严峻. 开展地下水污染风险评价及预警是预防地下水污染的有效措施, 目前国内外有关地下水污染预警方面研究尚处于探索阶段, 未形成一套完善的、可供借鉴的技术方法. 本研究在分析不同尺度地区地下水污染预警工作需求的基础上, 筛选出区域(流域)尺度地下水污染预警指标, 包括地质介质防护性能、污染源特征、地下水动态及地下水价值因素四项指标, 并利用指标叠置法建立了地下水污染预警模型. 以包头平原区为例, 开展了地下水污染预警研究, 利用建立的模型划分了不同等级的地下水污染预警分区, 研究成果可为当地地下水资源管理部门提供科技支撑.

关键词: 地下水; 风险管理; 区域(流域)预警系统; 地下水污染预警; 模型; 包头平原区

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-2903-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.08.010

Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management

BAI Li-ping¹, WANG Ye-yao², GUO Yong-li³, ZHOU You-ya¹, LIU Li¹, YAN Zeng-guang¹, Li Fa-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. China National Environmental Monitoring Station, Beijing 100012, China; 3. Engineering Research Center for Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Groundwater is the main source of water supply in China, and China's overall situation of groundwater pollution is not optimistic at present. Groundwater pollution risk evaluation and early-warning are the effective measures to prevent groundwater pollution. At present, research of groundwater early-warning method at home and abroad is still at the exploratory stage, and the sophisticated technology has not been developed for reference. This paper briefly described the data and technological demand of the early-warning method in different scales, and the main factors influencing the early-warning results of groundwater pollution were classified as protection performance of geological medium, characteristics of pollution sources, groundwater dynamics and groundwater value. Then the main early-warning indexes of groundwater pollution were screened to establish the early-warning model of regional or watershed scale by the index overlay method. At last, the established early-warning model was used in Baotou plain, and the different early-warning grades were zoned by the model. The research results could provide scientific support for the local management department to protect the groundwater resources.

Key words: groundwater; risk management; early-warning system of regional or watershed scale; groundwater pollution early-warning; model; Baotou plain

地下水是我国重要的水资源,也是许多城市供水的主要水源,全国 657 个城市中,有 400 多个以地下水为饮用水源;北方地区 65% 的生活用水、50% 的工业用水和 33% 的农业灌溉用水来自地下水^[1]. 随着我国城市化与工业化进程加快,如果对地下水的开发利用不当将产生系列地质环境问题^[2~4]. 地下水污染是我国水资源开发利用过程中出现的主要问题之一,当前我国面临的地下水污染形势较为严峻,部分地区地下水污染问题日益突出. 据 2012 年《中国环境状况公报》^[5],全国 198 个地市级行政区 4 929 个地下水监测点中,水质呈较差与极差级的监测点分别占 40.6% 和 16.8%.

在过去近 10 年间我国实施了大批不同精度的

地下水环境调查与评价项目,基本摸清了近 55 万 km² 范围内的地下水水质状况,基本掌握了地下水污染的分布范围和污染特征^[6]. 为加强我国地下水环境保护与污染控制工作力度,2011 年 10 月环境保护部、国土资源部与水利部发布了《全国地下水污染防治规划(2011-2020 年)》,提出要建立地下水污染风险防范体系,建立预警预报标准库,构建地下水污染预报、应急信息发布和综合信息社会化服务系统^[1].

收稿日期: 2013-12-23; 修订日期: 2014-03-24

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201009016,201009009)

作者简介: 白利平(1979~),男,博士,副研究员,主要研究方向为环境数值模拟, E-mail: bclp@163.com

污染土壤和地下水的修复治理资金需求巨大,为此,发达国家一般采取基于风险的管理模式,优先处置高风险的污染场地. 根据土地利用规划情况开展风险评估,基于风险管理的思路制定不同对策,将风险控制在可接受范围内. 随着我国经济社会快速发展对水资源需求的不断增加,因地下水污染而引发的相关问题正受到越来越多的关注,有关地下水污染风险管理及预警的工作需要加强. 开展地下水污染预警是保护水资源的一个有效措施,目前国内外地下水污染预警方面的工作尚处于探索阶段,我国对水环境预警的研究目前处于起步阶段,关于预警的概念、理论及模型选取等均未形成一个完善的体系.

国内外现有的地下水污染预警方法一般可归纳为水质状态预警和水质趋势预警两类^[7~11]. 水质状态预警方法是根据地下水水质现状监测数据的评价结果进行的,其本质仍属于水质现状评价的范畴,该方法无法实现预先警告的功能. 水质趋势预警是在水质变化趋势预测基础上进行的,地下水水质预测的方法主要包括确定性和非确定性方法. 确定性方法的优点是考虑了实际水文地质条件,水质预测结果较为准确,缺点是建立地下水数值模型需要大量的基础数据作为支撑;非确定性方法的缺陷主要是未考虑实际的地质、水文地质条件与地下水系统的动力学机制.

在我国如何开展地下水预警还是一个全新的探索性工作^[12],白利平等^[7]提出了基于数值模型的地下水污染预警方法,并以我国北方某铬污染场地为例,构建了污染物迁移转化的数值模型,探索研究了地下水污染预警方法. 基于数值模型的预警方法主要针对特定污染源或突发环境事故对特定保护对象的影响,开展预警的空间范围相对较小,而小尺度地区基础资料一般较丰富,模型精度要求高,因此,宜采用基于数值模型的地下水污染预警方法;而数值法对于资料相对缺乏、含水层结构复杂、地表污染源类型多样的大、中尺度地区则难以推广应用. 区域(流域)尺度研究中主要针对大区域地下水污染防治,资料丰富程度相对较差,模型精度要求较低,因此宜选择定性或半定量评价方法.

地下水污染风险评价是地下水污染防治的重要手段^[13~16],本研究综合考虑当前我国不同地区地下水资源管理工作需求,基于地下水风险管理的思路,选取地质介质防护性能、污染源特征、地下水动态及地下水价值指标建立了地下水污染预警模型及指

标体系,提出区域或流域(大、中尺度)地下水污染预警技术方法,利用 GIS 技术进行预警分区表征,并将该预警技术应用与包头平原区,研究成果对于区域或流域地下水环境监管具有较重要的理论与现实意义.

1 区域(流域)地下水污染预警模型

1.1 预警指标选取

地下水污染受污染源、地质介质、地下水动态等多种因素影响,如果不存在污染源,无论其余因素如何变化均不会导致地下水污染;即使存在污染源,在不同的地质介质及地下水动态状况下,地下水污染的可能性及污染程度也不尽相同. 只有综合考虑影响地下水污染的关键因素,才能得出较为准确的预警结果. 本文将地下水污染预警的主要影响因素分为地质介质防护性能、污染源特征、地下水动态及地下水价值因素. 地质介质防护性能主要包括地质及水文地质条件,地下水动态因素包括水位和水质动态,特征污染源因素包括污染源类型及污染物性质,地下水价值主要考虑环境、经济和社会价值.

1.2 预警指标的评价方法

1.2.1 地质介质防护性能

地质介质防护性能主要指地下水系统抵御污染的能力,其主要影响因素包括地形地貌、地质构造、岩层产状、包气带岩性及厚度、含水层岩性及厚度、隔水层岩性及厚度等. 地质介质防护性能评价时应重点分析包气带介质及含水层介质的结构特征,查清区域地下水补给、径流和排泄条件,评估水文地质系统抵御外界污染的能力.

本研究以地下水脆弱性(防污性能)反映地质介质抵御污染的能力,地下水脆弱性研究是目前国内外学者关注的热门课题,国内外现有的地下水脆弱性评价方法主要有叠置指数法、过程数学模拟法、统计方法和模糊数学方法^[17~21]. 以上方法中,叠置指数法是应用最广泛的评价方法,典型模型有 DRASTIC、GOD、SINTACS 等. DRASTIC 模型是地下水脆弱性评价应用最广泛的模型,本研究采用该模型进行地下水脆弱性评价. DRASTIC 中选择了 7 个因子:地下水埋深 D、净补给量 R、含水层介质 A、土壤介质 S、地形坡度 T、包气带影响 I、水力传导系数 C;根据各因子对地下水脆弱性的影响大小赋权重值,影响最大的权重为 5,最小的权重为 1;根据各因子的类别进行评分,分值范围为 1~10.

DRASTIC 方法表达式为^[22]：

$$\text{DRASTIC Index} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

式中, D_r 、 R_r 、 A_r 、 S_r 、 T_r 、 I_r 、 C_r 分别为各因子的分级值; D_w 、 R_w 、 A_w 、 S_w 、 T_w 、 I_w 、 C_w 分别为各因子的权重值。

本研究根据 DRASTIC 模型评价结果将脆弱性等级分为 5 级,由低到高分别赋值 1~5。

1.2.2 污染源特征

按污染物的成因可将污染源分为自然污染源和人为污染源两类,地下水污染预警中主要针对人为污染源。污染物从地表到含水层的输移过程一般较长,影响污染源中污染物释放及其在土壤和地下水中迁移转化的主要因素包括污染源的分布、污染源类型、污染防治措施、污染物性质等。污染源的分布包括空间位置、污染物的排放或储存量,污染物

的种类包括有机物、无机物、放射性物质和病原微生物等,污染物的性质包括持久性、迁移性、溶解性、挥发性等。本研究选取污染源类型、污染物的量、污染防治措施、污染持续时间、污染物毒性、污染物迁移性和污染物持久性七项指标,利用叠置指数法建立污染源评价模型：

$$W_j = \sum_{i=1}^m a_i b_i (j = 1, 2, \cdots n; i = 1, 2, \cdots m) \quad (2)$$

式中, W_j 为第 j 个单元的污染源指数; i 为评价因子; a_i 为第 i 个评价参数在第 j 个评价单元中的赋值; b_i 为第 i 个评价参数的权重; n 为单元数; m 为因子数。

污染源评价参数及评价内容见表 1,各参数权重系数的确定采用层次分析法(表 2)。将各评价参数按照由低到高分别赋值 1~5,利用式(2)计算出污染源等级并由低到高赋值 1~5。

表 1 污染源评价参数及评价内容

Table 1 Description of the evaluation parameters of groundwater pollution sources

评价参数选取	评价项目
污染源类型	主要关注工业、农业、生活污染源,包括点源、线源、面源
污染物排放量	关注污染物的排放量
污染防治措施	针对污染源、污染途径和受体的防护措施
污染持续时间	污染的时间段
污染物毒性	污染物对人体健康影响
污染物迁移性	污染物在土壤及地下水中的迁移性和降解性
污染物持久性	

表 2 污染源评价参数判断矩阵及权重计算结果

Table 2 Judgment matrix and weights calculation of the evaluation parameters

评价参数选取	污染源类型	污染物的量	污染防治措施	污染持续时间	污染物毒性	污染物迁移性	污染物持久性	权重
污染源类型	1	2	1	2	1/3	1/4	1/2	0.09
污染物的量	1/2	1	1/2	1	1/6	1/8	1/4	0.04
污染防治措施	1	2	1	2	1/3	1/4	1/2	0.08
污染持续时间	1/2	1	1/2	1	1/6	1/8	1/4	0.04
污染物毒性	3	6	3	6	1	1	2	0.27
污染物迁移性	4	8	4	8	1	1	2	0.32
污染物持久性	2	4	2	4	1/2	1/2	1	0.16

用层次分析法计算各参数权重的过程包括计算判断矩阵每一行元素的乘积、计算平方根、求各因素的权重、检验权重。一致性检验结果: $\lambda_{\max} = 7.01$, $CI = 0.002\ 3$, $RI = 1.32$, $CR = 0.001\ 7$ 。 $CR < 0.1$, 因此排序结果具有满意的一致性。

1.2.3 地下水动态因素

地下水动态因素包括水位和水质的动态变化,本研究认为地下水动态因素实质上反映了地下水系统对于外界因素影响下的一种响应,对地下水污染

预警而言,主要考虑地下水水质的动态变化。
地下水水质动态变化的预测方法可归类为确定性和非确定性方法两类,确定性方法包括解析法、数值法和物理模拟法;非确定性方法有回归分析法、时间序列法、随机微分方程、灰色系统理论、模糊理论、神经网络理论等。在基础资料丰富的地区宜采用确定性方法,在资料相对缺乏地区可采用非确定性方法。地下水污染预警中需要根据水质监测数据分析、预测水质变化,根据水质变化速率确

定地下水动态等级,本研究提出给定时间段内水质变化速率计算公式为:

$$q_i = \frac{c_t - c_{t0}}{c_{t0} \Delta t} \tag{3}$$

式中, q_i 为某指标的变化速率指数; c_t 为某时间该指标的浓度值; c_{t0} 为现状水质浓度值; Δt 为时间(本研究以 3 a 为一个时段).

地下水水质指标赋值需要考虑地下水现状水质、预测水质及水质变化速率,结合地下水质量标准(GB/T 14848-9)^[23],将水质指标分别赋值 1~5(表 3). 当现状或预测水质达到地下水质量标准中Ⅳ类、Ⅴ类标准时,地下水水质指标以某项指标浓度升高 0.75 倍、1 倍和大于 1 倍为阈值进行等级划分.

表 3 地下水水质指标赋值
Table 3 Assignment of groundwater quality index

地下水水质类别	预测水质			
	I 类、II 类标准	III 类标准	IV 类标准	V 类标准
现状水质	I 类、II 类、III 类标准	1	2	3(0 < q_i ≤ 0.25) 4(0.25 < q_i ≤ 0.33) 5(q_i > 0.33)
	IV 类标准	1	2(q_i ≤ 0) 3(q_i > 0)	4(0 < q_i ≤ 0.25) 5(q_i > 0.25)
	V 类标准	1	2	3(q_i ≤ 0) 4(0 < q_i ≤ 0.25) 5(q_i > 0.25)

1.2.4 地下水价值因素

地下水价值包括环境、经济和社会价值,地下水动态因素中已考虑了地下水水质特征,因此,地下水价值因素主要考虑地下水资源量. 地下水资源量评价方法主要包括水量均衡法、解析法、电模拟法、数值法、比拟法、水文分析法以及其它以观测

资料统计理论为基础的方法,区域或流域地下水污染预警研究中建议采取水量均衡法. 本研究以地下水可采资源模数表征地下水价值因素,参照国土资源部 2010 年发布的新一轮全国地下水资源评价成果^[24],提出地下水价值因素级别划分标准,按可采资源模数由小至大分别赋值为 1~5(表 4).

表 4 地下水价值因素指标赋值
Table 4 Assignment of groundwater value index

可采资源模数 /万 m ³ · (km ² · a) ⁻¹	< 2	2 ~ 6	6 ~ 10	10 ~ 20	> 20
赋值	1	2	3	4	5

1.3 预警模型

1.3.1 预警模型构建

地下水污染预警考虑了地下水污染源、地质介质防护性能、地下水水质和价值因素,各评价因素分别赋值为 1、2、3、4、5. 利用指标叠置法建立区域(流域)地下水污染预警模型为:

$$GI = PI_r PI_w + DI_r DI_w + QI_r QI_w + SI_r SI_w \tag{4}$$

式中,GI 为地下水污染预警指数; PI_r 、 DI_r 、 QI_r 、 SI_r 分别为污染源、地质介质防护性能、地下水水质和

价值因子的分级值, PI_w 、 DI_w 、 QI_w 、 SI_w 为各因子的权重值.

1.3.2 各指标权重的确定

对地下水污染源、地质介质防护性能、地下水水质和价值指标进行分析比较,构建判断矩阵(表 5). 根据层次分析法计算得到地下水污染源、地质介质防护性能、地下水水质与价值指标权重分别为 0.28、0.18、0.48、0.06. 一致性检验: $\lambda_{max} = 4.046$, $CI = 0.015$, $CR = 0.017$. 层次排序的计算结果具

表 5 地下水污染预警参数判断矩阵及权重计算结果
Table 5 Judgment matrix and weights calculation of the early-warning parameters

预警指标	地下水污染源	地质介质防护性能	地下水水质	地下水可采资源量	权重
地下水污染源	1	2	1/2	5	0.28
地质介质防护性能	1/2	1	1/3	4	0.18
地下水水质	2	3	1	7	0.48
地下水可采资源量	1/5	1/4	1/7	1	0.06

有满意的一致性,因此,可用该权重来进行计算.

1.3.3 预警等级划分

参照《国家突发环境事件应急预案》^[25]的要求,将地下水污染预警等级确定为五级,由低到高分别

为零级、一级、二级、三级、四级(表6).其中,零级表示不需要发布预警,一级、二级、三级、四级与《国家突发环境事件应急预案》中的四级、三级、二级、一级相对应.

表6 地下水污染预警等级划分及特征说明

Table 6 Description of the early-warning grades of groundwater pollution		
预警指数	预警等级	特征
0~1	0(零级)	地下水脆弱性低(防污性能高),地表基本无污染源分布,地下水受污染的风险小;地下水质量满足 I、II、III 类标准,地下水水质变化稳定;地下水开采价值小(开发利用程度低)
1~2	I(一级)	地下水脆弱性较低(防污性能较高),地表有零星污染源分布,地下水有一定的污染风险;地下水质量属 III~IV 类之间,地下水水质有轻微恶化趋势;地下水有一定开采价值(开发利用程度较低)
2~3	II(二级)	地下水脆弱性中等(防污性能中等),地表有部分污染源分布,地下水受污染风险中等;地下水质量属 IV 类~V 类之间,地下水水质恶化趋势中等;地下水开采价值中等(开发利用程度中等)
3~4	III(三级)	地下水脆弱性较高(防污性能较差),地表有大量污染源分布,地下水受污染风险较高;地下水质量属 V 类,地下水水质恶化趋势较严重;地下水开采价值较高(开发利用程度较高)
4~5	IV(四级)	地下水脆弱性高(防污性能差),地表存在大量污染源,地下水受污染风险很高;地下水质量属 V 类,地下水恶化趋势非常严重;地下水开采价值很高(开发利用程度高)

2 包头平原区地下水污染预警研究

2.1 研究区概况

包头是我国北方的重工业基地,也是内蒙古自治区最大的工业城市,经济发达,人口集中.研究区位于包头市西南部,北至大青山山前断裂、南至黄河,西起西河沿地区,东到下古城湾地区,总面积约 900 km².包头属半干旱中温带大陆性季风气候,其特点是干燥、多风、少雨、温差大.多年平均降水量为 306.5 mm,多年平均蒸发量 2 273.8 mm.

本区地层主要包括太古界变质岩、中生界侏罗系砂岩、砾岩及新生界第四系松散沉积物.第四系地层在研究区分布最广,且与地下水环境关系密切.除下更新统外,从中更新统到全新统均有分布,尤以中更新统及上更新统地层分布最广、厚度较大.研究区属河套平原水文地质单元的一部分,区内主要含水层包括潜水与承压水.潜水含水层主要由上更新统至全新统砂卵石组成,厚 20~30 m;承压水含水层主要由中下更新统砂砾石组成,厚一般 10~50 m^[26,27].

2.2 各预警因素的评价结果

根据研究区气象、水文、地层岩性、地质构造、土地利用、水文地质条件及污染源分布情况等,开展各预警因素的评价研究.

2.2.1 地下水脆弱性评价

首先将研究区域进行网格剖分,依据不同比例尺的地形图、地质图、水文地质图、土壤类型图等图件,利用 GIS 软件进行地下水埋深、净补给量、含

水层介质、土壤介质、地形坡度、包气带影响、水力传导系数等指标赋值.其中,地下水埋深、含水层介质、包气带影响及水力传导系数数据从地质图、水文地质图中获取;净补给量由研究区降雨量、灌溉水量及地表水体水量,根据不同地区的入渗补给系数计算得出;地形坡度根据本地区地形图,利用 GIS 软件分析获取.地下水脆弱性评价结果见图 1.

根据 DRASTIC 模型脆弱性评价结果^[26],研究区地下水脆弱性最高区(DRASTIC 评价值为 155~175,赋值为 5)主要分布于研究区中部及北部,包含山前倾斜平原冲洪积扇的顶部及兰阿断裂两侧的山前冲洪积平原的下部及黄河冲积平原北部的地区;脆弱性较高的地区(DRASTIC 评价值为 135~155,赋值为 4)主要分布于脆弱性最高地区的周边,包括山前倾斜平原北部、黄河冲积平原北部及黄河冲积平原西部的局部地区;脆弱性中等的地区(DRASTIC 评价值为 115~135,赋值为 3)主要分布于山前倾斜平原中西部及黄河冲积平原南部,基本上位于脆弱性较高地区的周边;脆弱性较低的地区(DRASTIC 评价值为 95~115,赋值为 2)主要分布于研究区西侧、东南侧,包括山前倾斜平原西部、黄河冲积平原西部及东南部部分地区;脆弱性很低的地区(DRASTIC 评价值为 75~95,赋值为 1)仅零星分布于八拜扇和阿扇中上部的局部地区.总体上,研究区地下水脆弱性主要可划分为四级,即地下水脆弱性最高区、脆弱性较高区、脆弱性中等区和

脆弱性较低区。

2.2.2 污染源评价

包头是全国十大钢铁工业基地之一,也是华北地区联结西北地区的交通枢纽,在内蒙古国民经济和社会发展中具有重要的地位。随着资源开发和工业的发展,当前区域性和流域性的环境问题已成为制约包头经济发展的重要因素之一。在造成环境污染的各项人类活动中,工业企业排污是造成环境污染的主要因素。

本研究调查了包头平原区主要的排污企业,依据调查获取的污染源资料,首先将研究区域进行网格剖分,利用 GIS 软件进行污染源、污染物的量、污染防治措施、污染持续时间、污染物毒性、迁移性、持久性等指标赋值,依据本研究提出的评价方法确定各项污染源参数赋值,获取地下水污染源评价结果。根据计算得出的污染源指数,按等间距划分方法将研究区地下水污染源级别分为五级,分别赋值 1、2、3、4、5,评价结果见图 1。

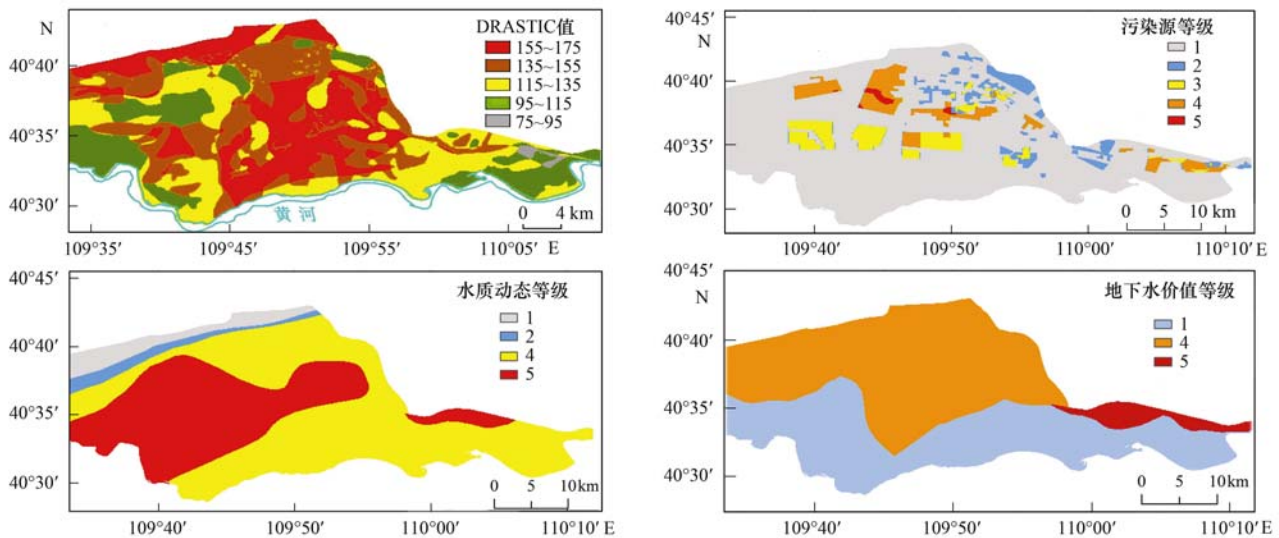


图 1 研究区各地下水污染预警因素评价结果

Fig. 1 Demonstration map of the groundwater pollution early-warning method in the study area

2.2.3 地下水动态评价

根据 1.2.3 节中提出的地下水水质动态评价方法,确定研究区地下水水质动态评价等级,评价结果见图 1。

2.2.4 地下水价值评价

地下水可开采资源量是指通过技术经济合理的取水方案,在整个开采期内出水量不会减少,动水位不超过设计要求,水质和水温变化在允许范围内,不影响已建成水源地正常开采,不发生危害性的环境地质现象的前提下,单位时间内从水文地质单元或取水地段中能够取得的水量^[28]。本研究利用均衡法计算地下水可开采资源量,从总体上把握地下水系统的均衡状况。根据水均衡法,由地下水总补给量、地下水向河道排泄量和地下水蒸发排泄量计算可开采资源量。可开采资源量计算公式为:

$$Q_{\text{可采资源}} = Q_{\text{总补}} - Q_{\text{排}} = Q_{\text{降水}} + Q_{\text{地表}} + Q_{\text{灌溉}} + Q_{\text{侧补}} + Q_{\text{黄河侧补}} - Q_{\text{蒸发}} - Q_{\text{开采}} \quad (5)$$

式中, $Q_{\text{可采资源}}$ 为地下水可开采资源量, $Q_{\text{总补}}$ 为地下水年总补给资源量, $Q_{\text{排}}$ 为除地下水开采量外的其余排泄

量, $Q_{\text{降水}}$ 为降水入渗补给量, $Q_{\text{地表}}$ 为地表水渗漏补给量, $Q_{\text{灌溉}}$ 为灌溉水渗漏补给量, $Q_{\text{侧补}}$ 为山前侧向径流补给量, $Q_{\text{黄河侧补}}$ 为黄河侧渗补给量, $Q_{\text{蒸发}}$ 为浅层地下水蒸发量, $Q_{\text{开采}}$ 为地下水年均开采量,单位均为 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。

根据 1.2.4 节中提出的地下水可开采资源量等级划分标准确定该指标赋值,评价结果见图 1。

2.3 地下水污染预警结果

根据研究区地下水污染源、地下水脆弱性(地质介质防护性能)、地下水动态及可开采资源量(地下水价值)指标的评价结果,按提出的区域地下水污染综合预警方法确定研究区地下水污染预警分级(图 2)。

根据预警模型的计算结果,预警区可分为一级、二级、三级和四级,具体预警分区结果如下。

(1) 四级预警区

主要分布于研究区中部的工业企业集中分布区,需发布红色预警。该区地下水脆弱性等级主要为高、较高,地下水防污性能较差;地表存在大量

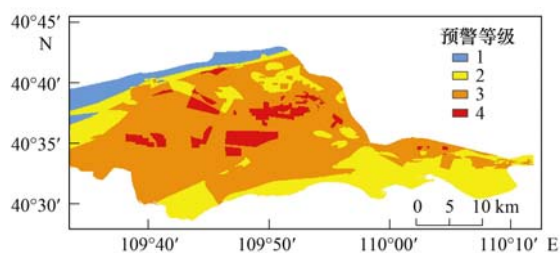


图2 研究区地下水污染预警结果

Fig. 2 Demonstration map of the groundwater pollution early-warning method in the study area

污染源,污染源等级为中等~高;地下水水质为差、较差,地下水恶化趋势严重;地下水开采价值高。本区地下水面临污染的风险极大,且污染程度严重,需要发布红色预警。该区地下水水质具有明显的恶化趋势,针对已受污染的地下水,管理部门应及时分析地下水污染的主要原因,采取相应防治措施(以工程控制措施为主)。

(2) 三级预警区

研究区大部分地区属于三级预警区,需发布橙色预警。该区地下水脆弱性等级为较低~高,污染源等级为低~高,地下水水质为差、较差,地下水恶化趋势较严重。本区地下水面临污染的风险较大,污染程度较严重,需要发布橙色预警。地下水资源管理部门应及时分析地下水污染的主要原因,并采取相应防治措施(以工程控制措施为主)。

(3) 二级预警区

主要分布于研究区北部及南部地区,需发布黄色预警。该区地下水脆弱性等级主要为低~较高;地表污染源较少,污染源等级低;地下水水质为较好~较差,地下水恶化趋势中等。本区地下水面临污染的风险中等,污染程度中等。地下水资源管理部门应及时采取相应预防和治理措施(以制度控制措施为主,结合一定工程措施)。

(4) 一级预警区

主要分布于研究区北部局部地区,需发布蓝色预警。该区地下水脆弱性高,地表污染源少,地下水水质较好,地下水开采价值较高。由于本区地下水脆弱性高,地下水面临一定的污染风险,地下水资源管理部门应及时采取预防措施(主要为制度控制措施)。

3 结论

(1)开展地下水污染风险评价、地下水污染监测和预警工作是预防地下水污染的有效措施,污染

土壤和地下水的修复治理资金需求巨大,参考国外地下水污染治理的经验与教训,我国的地下水环境监管宜采用基于风险的管理模式。

(2)目前国内外地下水污染预警方面研究尚处于探索阶段,有关预警指标及评价模型选取、预警阈值确定等未形成完善的体系。尤其是针对基础资料相对缺乏、含水层结构复杂、地表污染源类型多样的区域和流域,目前仍缺少成熟的预警模型可供借鉴。

(3)本研究将地下水污染预警的主要影响因素分为地质介质防护性能、污染源特征、地下水动态及地下水价值因素,基于地下水风险管理的思路建立了预警指标体系,提出了不同指标的评价方法,并利用指标叠置法建立了区域(流域)地下水污染预警模型。以我国内蒙古包头市平原区为例,开展了地下水污染预警模型的案例研究,划分了不同等级的地下水污染预警分区,并给出相应分区的警戒信息。

参考文献:

- [1] 环境保护部. 全国地下水污染防治规划(2011-2020年)[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201111/W020111109376922920938.pdf>, 2011-10-28.
- [2] 白利平,王业耀,王金生. 基于数值模型的地下水水位预警体系研究——以临汾盆地为例[J]. 中国地质, 2009, 36(1): 246-253.
- [3] 杨庆,陈忠荣,张伟红,等. 典型水源地下地下水污染风险评价[J]. 中国环境监测, 2013, 29(5): 22-25.
- [4] 杨彦,于云江,王宗庆,等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 653-661.
- [5] 环境保护部. 2012 中国环境状况公报[EB/OL]. <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/zkgh>, 2013-06-06.
- [6] 郭高轩,李宇,许亮,等. 北京平原区第四系地下水污染风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 562-568.
- [7] 白利平,王业耀,王金生,等. 基于数值模型的地下水污染预警方法研究[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1652-1659.
- [8] 洪梅,赵勇胜,张博. 地下水水质预警信息系统研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(4): 364-368, 377.
- [9] 李宏卿,吴琼,张福林,等. Visual Modflow 在建立长春市地下水开采预警系统中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 319-322.
- [10] 王凯军,曹剑峰,徐蕾,等. 地下水资源管理预警系统的建立及应用研究——以长春城区为例[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 238-243.
- [11] 谢洪波,钱壮志,尹国勋,等. 基于 GIS 的焦作市地下水污染预警系统[J]. 地球科学与环境学报, 2008, 30(1): 94-96, 106.
- [12] 李文鹏,郑跃军,郝爱兵. 北京平原区地下水位预警初步研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 166-173.
- [13] 邵托娅,王金生,王业耀,等. 我国地下水污染风险评价方

- 法研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, **48**(6): 648-655.
- [14] 王俊杰, 何江涛, 陆燕, 等. 地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 771-776.
- [15] 于勇, 翟远征, 郭永丽, 等. 基于不确定性的地下水污染风险评价研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2013, **40**(1): 115-123.
- [16] Dimitriou E, Karaouzas I, Sarantakos K, *et al.* Groundwater risk assessment at a heavily industrialised catchment and the associated impacts on a peri-urban wetland [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(3): 526-538.
- [17] 白利平, 王业耀. 地下水脆弱性评价研究综述[J]. 工程勘察, 2009, **37**(4): 43-48.
- [18] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, **27**(10): 1140-1147.
- [19] Antonakos A K, Lambrakis N J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **333**(2-4): 288-304.
- [20] Almasri M N. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine [J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **88**(4): 577-593.
- [21] Nobre R C M, Filho O C R, Mansur W J, *et al.* Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, **94**(3-4): 277-292.
- [22] Aller L, Bennett T, Lehr J H, *et al.* DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings [M]. Oklahoma; U. S. Environmental Research Laboratory, 1985. 7-13.
- [23] GB/T 14848-9, 地下水质量标准[S].
- [24] 国土资源部. 新一轮全国地下水资源评价成果[EB/OL]. http://www.mlr.gov.cn/dzhj/201003/t20100326_142814.htm, 2010-03-26.
- [25] 中国国务院. 国家突发环境事件应急预案[EB/OL]. http://www.gov.cn/yjgl/2006-01/24/content_170449.htm, 2006-01-24.
- [26] Bai L P, Wang Y Y, Meng F S. Application of DRASTIC and extension theory in the groundwater vulnerability evaluation [J]. *Water and Environment Journal*, 2012, **26**(3): 381-391.
- [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 & Technology: Water Supply*, 2013, **13**(2): 368-375.
- [28] GB 50027-2001, 供水水文地质勘察规范[S].

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行