

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

区域地下水污染风险评价方法研究

杨彦¹, 于云江², 王宗庆¹, 李定龙^{1*}, 孙宏伟¹

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164; 2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655)

摘要: 依据系统风险评价的边界要素, 初步建立了区域地下水污染风险评价指标体系: 区域地下水特殊脆弱性评价、区域污染源特性评价和区域特征污染物健康风险评价。采用多指标综合方法, 对3个评价体系进行耦合, 并运用 ArcMap 的 Spatial Analysis 功能制图对其进行风险表征, 从而建立了对不同地区不同自然条件、不同污染类型的区域地下水污染风险评价的新方法。以常州市为例, 利用该方法对其浅层地下水进行污染风险评价, 研究表明该市地下水脆弱性指数较高, 且分布不均; 污染源分布较为集中, 对地下水污染风险影响较大; 受污染物及污染源影响, 常州市区人群健康风险值较高。全市浅层地下水污染风险高且分布不均, 污染风险较高区域分布在安家-薛家-郑陆一线以北和城区及其东南部一带。

关键词: 地下水污染; 风险评价; 脆弱性; 污染源; 健康风险; 常州市

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0653-09

Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution

YANG Yan¹, YU Yun-jiang², WANG Zong-qing¹, LI Ding-long¹, SUN Hong-wei¹

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China)

Abstract: Based on the boundary elements of system risk assessment, the regional groundwater pollution risk assessment index system was preliminarily established, which included: regional groundwater specific vulnerability assessment, the regional pollution sources characteristics assessment and the health risk assessment of regional featured pollutants. The three sub-evaluation systems were coupled with the multi-index comprehensive method, the risk was characterized with the Spatial Analysis of ArcMap, and a new method to evaluate regional groundwater pollution risk that suitable for different parts of natural conditions, different types of pollution was established. Take Changzhou as an example, the risk of shallow groundwater pollution was studied with the new method, and found that the vulnerability index of groundwater in Changzhou is high and distributes unevenly; The distribution of pollution sources is concentrated and has a great impact on groundwater pollution risks; Influenced by the pollutants and pollution sources, the values of health risks are high in the urban area of Changzhou. The pollution risk of shallow groundwater is high and distributes unevenly, and distributes in the north of the line of Anjia-Xuejia-Zhenglu, the center of the city and the southeast, where the human activities are more intense and the pollution sources are intensive.

Key words: groundwater pollution; risk assessment; vulnerability; pollution sources; health risk; Changzhou

地下水是水循环的重要组成部分, 是我国城市供水的重要水源, 也是重要的饮用水源之一^[1]。随着地下水资源的日益开发, 其污染日益严峻。如遭到农业面源和城市雨污水径流的污染; 城市化和工业化产生的污水和固体垃圾的直接排放污染; 采矿和废气矿坑污染; 超量开采地下水引发的咸水入侵和自然有害物质的溶解导致地下水水质恶化等^[2]。据对我国195个城市监测结果表明, 97%的城市地下水受到不同程度污染, 其中40%污染不断加剧^[3-5]。由于地下水交替程度较弱, 自净能力较低, 对其污染风险评价就显得尤为重要。目前, 国内外主要采用了DRASTIC评价法^[6-17]研究地下水脆弱性, 并结合污染源风险进行地下水污染风险模糊评价。但该方法因其指标固定, 未考虑具体评价区域特殊性(区域特征污染物、评价区特殊的水文地质条件、人口密集情况等)^[18,19], 因此会影响评价结果

的准确性和精准度。地下水污染风险评价包含各种复杂的问题, 不仅与评价区水文地质条件有关, 而且与区域特征污染物及其对人群的健康影响等诸多因素有关^[20,21]。

本研究综合地下水特殊脆弱性、区域污染源特性及区域特征污染物健康风险评价等方法, 构建针对区域特征污染的地下水污染风险评价模型, 利用GIS平台进行构图表征, 建立了就某种或某几种污染物的多指标耦合评价方法, 对不同地区不同自然条件、不同污染类型的区域风险的识别和防控具有重要的理论和现实意义。

收稿日期: 2012-05-03; 修订日期: 2012-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177119); 环境保护公益性行业科研专项(200909101, 201109009); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418205)

作者简介: 杨彦(1984~), 女, 硕士, 助教, 主要研究方向为环境与健康、环境风险评价, E-mail: yy129129@163.com

* 通讯联系人, E-mail: hjaq@cczu.edu.cn

1 方法的构建

1.1 地下水污染风险影响因素分析

通常在考虑评价区域地下水风险时,多采用过程分析法确定影响因素,认为地下水的易污性、污染源为污染风险的主要决定要素^[2,22].在环境风险评价中,从评价范围划归等级,区域地下水污染风险评价属于系统风险评价^[23,24],其边界要素是:空间范围、时间长度、风险种类(污染源、特征污染物)、人群健康风险,初步认为区域地下水污染风险评价由3个子评价体系构成,分别为:地下水特殊脆弱性评价、区域污染源特性评价和区域特征污染物健康风险评价.

1.2 多因素耦合综合评价方法

多因素耦合的地下水污染风险评价方法的前提是不考虑污染物在包气带中的水平扩散,其核心是通过分析地下水污染过程及其对人群的健康风险,提取主要的影响因素(易污性、污染源分析^[25]、健康风险),采用对应的方法对区域污染,尤其是区域特征污染物的风险进行评价.通过建立各因素的空间图层,进行图层叠加,表征区域地下水污染风险.

1.3 评价步骤

1.3.1 区域地下水脆弱性评价

地下水脆弱性是指地下水在自然状态下容易遭受外界污染的程度.采用 DRASTIC 指标法评价,其中,D:地下水埋深;R:净补给量;A:含水层介质;S:土壤介质;T:地形;I:非饱和带的影响;C:含水层渗透系数的计算如公式(1):

$$\text{DRASTIC Index} = \text{DrDw} + \text{RrRw} + \text{ArAw} + \text{SrSw} + \text{TrTw} + \text{IrIw} + \text{CrCw} \quad (1)$$

式中,Dr、Rr、Ar、Sr、Tr、Ir、Cr 分别为各因子的分级值;Dw、Rw、Aw、Sw、Tw、Iw、Cw 分别为各因子的权重值.

含水层脆弱性是一个相对模糊的概念,因此用考虑指标连续变化计算得到的样本指标的相对隶属度 r_{ij} 取代 DRASTIC 模型中的指标定额.将各个参数评分划分出 10 个级别的指标标准特征值进行识别,则有 7×10 阶指标标准特征值矩阵^[26]:

$$Y = y_{ih} \quad (2)$$

式中 y_{ih} 为级别 h 指标 i 的标准特征值, $i = 1, 2, \dots, 7$; $h = 1, 2, \dots, 10$.

设有 n 个待评价的样本,每个样本有 m 个评价指标,则根据实测数据构造评价指标特征值矩阵:

$$X = x_{ij} \quad (3)$$

利用各指标对极难污染的相对隶属度公式^[27~29]:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{i10} \text{ 或 } x_{ij} < y_{i10} \\ \frac{x_{ij} - y_{i10}}{y_{i1} - y_{i10}} & y_{i1} > x_{ij} > y_{i10} \text{ 或 } y_{i1} < x_{ij} < y_{i10} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{i1} \text{ 或 } x_{ij} > y_{i1} \end{cases} \quad (4)$$

将矩阵 X 转化为指标相对隶属度矩阵 R , $R = r_{ij}$

基于相对隶属度,计算第 i 个评价指标下第 j 个待评价样本的评价指标特征值比重:

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad (5)$$

和第 i 个评价指标的熵为:

$$e_i = - \frac{1}{\ln m} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (6)$$

得到相应的第 i 个评价指标的权重为:

$$w_i = (1 - e_i) / \sum_{j=1}^m (1 - e_i) \quad (7)$$

便可构造基于 DRASTIC 的地下水脆弱性模糊综合评价模型,即脆弱性的相对隶属度向量:

$$u_i = \sum_{j=1}^n w_i r_{ij} \quad (8)$$

式中, u_i 为地下水脆弱性指数; r_{ij} 为相对隶属度; w_i 为权重.

DRASTIC 评价法中的指标因素是固定不变的,而在不同地区地下水脆弱性的影响因素之间的相对重要程度有差异,评价指标体系也应有所不同.前人的研究报道及项目组在前期研究中发现影响地下水脆弱性的实际水文地质因素复杂,各评价区重点监控的特征污染物不同,对生态环境的风险也有差异.在具体评价时应根据实况,选取合适的区域评价指标,建立区域评价指标体系,结合模糊商榷理论,根据上述公式(2)~(8)确定指标权重,进行区域地下水特殊脆弱性评价,并通过绘制地下水脆弱性分级图进行表征.

1.3.2 区域污染源特性评价

通过综合考虑特征污染物的污染程度、迁移性、毒性、降解能力,结合我国水中优先控制污染物黑名单和美国 EPA 重点控制的水环境污染物名单,筛选出反映区域污染源特点的 m 种目标污染物,构建污染物多指标综合评价方法.采用公式(9)^[22]对其进行评价,得出污染物评价指数 S_i ; 然后利用公式(12)^[22],计算 n 个污染源的综合评价指数 S ,并建立污染源综合评价图层.

$$S_i = \sum_{j=1}^m k_{ij} k_{wj} \quad (9)$$

式中, m 为目标污染物参数个数; k_{ij} 为目标污染物参数分级值; k_{wj} 为目标污染物参数权重。

确定污染物参数权重 k_{wj} 采用模糊层次分析法。首先根据选取研究区的 n 个污染源及 x 个污染源特性(如污染物的污染程度、迁移性、毒性等), 确定优先关系矩阵 $F = f_{ij}$, 并根据公式(10)确定模糊一致矩阵 $Q = q_{ij}$, 继而根据公式(11)计算出权重。

$$q_{ij} = \frac{q_i - q_j}{2x} + 0.5, \text{ 其中: } q_i = \sum_{j=1}^x f_{ij} \quad (10)$$

$$k_{wj} = \frac{s_i}{\sum_{i=1}^x s_i}, \text{ 其中: } s_i = \left(\prod_{j=1}^x q_{ij} \right)^{\frac{1}{x}} \quad (11)$$

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{n} \quad (12)$$

1.3.3 区域特征污染物健康风险评价

运用 US EPA 推荐的健康风险评价模型, 结合毒理学知识对区域特征污染物进行危害识别, 确定区域特征污染物是否具有致癌或非致癌风险; 通过剂量-反应评估对有害因子暴露水平与暴露人群健康效应发生率间的关系进行定量估算; 并对区域内人群不同暴露途径下暴露于特征污染物的程度进行暴露评价, 通过定量权重, 给出评价图。

对于健康风险评价, 通常考虑终身日平均暴露剂量。暴露量用公式(13)^[30]计算得:

$$\text{终生日平均暴露剂量} = \frac{\text{总剂量}}{\text{体重} \times \text{终生时间}} \quad (13)$$

$$\text{总剂量} = \text{污染物浓度} \times \text{暴露频率} \times \text{暴露持续时间} \times \text{吸收因子} \quad (14)$$

在暴露评价的基础上进行风险表征, 估算不同条件下可能产生的健康危害的强度和某种健康效应发生概率, 非致癌污染物健康风险评价模型公式(15):

$$P = \frac{D}{\text{RfD}} \times 10^{-6} \quad (15)$$

式中, D 为非致癌污染物的单位体重日均暴露剂量; P 为发生特定健康危害的终身风险。

致癌污染物的健康风险评价模型如公式(16):

$$p = 1 - \exp(-qD) \quad (16)$$

式中, p 为患癌风险增值; D 为化学致癌物单位体重日均暴露剂量; q 为致癌强度系数。

运用模糊化原理, 根据专家意见将风险评价标准进行分级并赋值, 生成区域特征污染物健康风险等级图。

综上所述, 对研究区地下水主要影响因素(易污性、污染源分析、健康风险), 采用对应的方法进行区域特征污染物的风险评价, 生成地下水脆弱性分级图、污染源综合评价图和健康风险等级图, 并叠加生成地下水污染风险图(如图1)。

2 应用实例

本研究以常州市为例(图2), 该市位于长江三角洲太湖平原西北缘, 多为平坦广阔的冲湖积平原。第四系松散物厚度较大(一般在150 m以上), 以河流相粗颗粒沉积为主, 自上而下沉积物颗粒由细至粗。含水砂层极为发育, 蕴藏的地下水资源极为丰富。含水层岩性主要为上更新统冲积、冲湖积相灰-灰黄色粉砂、细砂、粉土组成。北部沿江带岩性多为粉细砂、中细砂, 砂层厚度较大, 一般在15~30 m之间。南部平原区砂层的连续性较差, 多呈透镜体分布, 岩性以粉土、粉砂为主, 砂层厚度一般小于10 m。该市工业发达, 其中电镀行业、冶金行业、机械加工业较为密集, 由于以前企业的粗放型经济发展模式, 周边土壤、地下水受到历史污染严重, 对区域人群健康构成威胁。根据前期研究对区内污染源的调查筛选, 土壤和区域地下水的主要特征污染物为 Pb、Cd、Fe 和 Cu^[31]。

2.1 区域地下水脆弱性评价

2.1.1 研究区 DPASLIC 模型的确定

常州市地形坡度在1/500~1/200之间, 地形对脆弱性的影响较小, 可忽略不计; 考虑数据的可得性, 用降雨入渗补给量 P 代替影响地下水脆弱性的净补给量 R ; 因人为因素(人口密度 L)对地下水特殊脆弱性影响较大, 将其考虑在指标体系内, 建立常州市特殊脆弱性评价指标 DPASLIC, 其中 D : 地下水埋深, P : 降雨入渗补给量, A : 含水层介质, S : 土壤介质, L : 人口密度, I : 不饱和介质的影响, C : 含水层渗透系数。通过查阅大量文献, 了解不同指标对地下水脆弱性不同的影响程度, 针对研究区现状和 DRASTIC 指标选取定性、定量指标, 初步确定评价指标及其特征值, 并根据对地下水脆弱性影响的大小进行分级, 级别越高, 影响越大。通过集中讨论, 向水文地质学、环境土壤学、环境化学、气象学等多领域专家咨询, 论证, 确定各评价指标及其特征值, 见表1和表2。

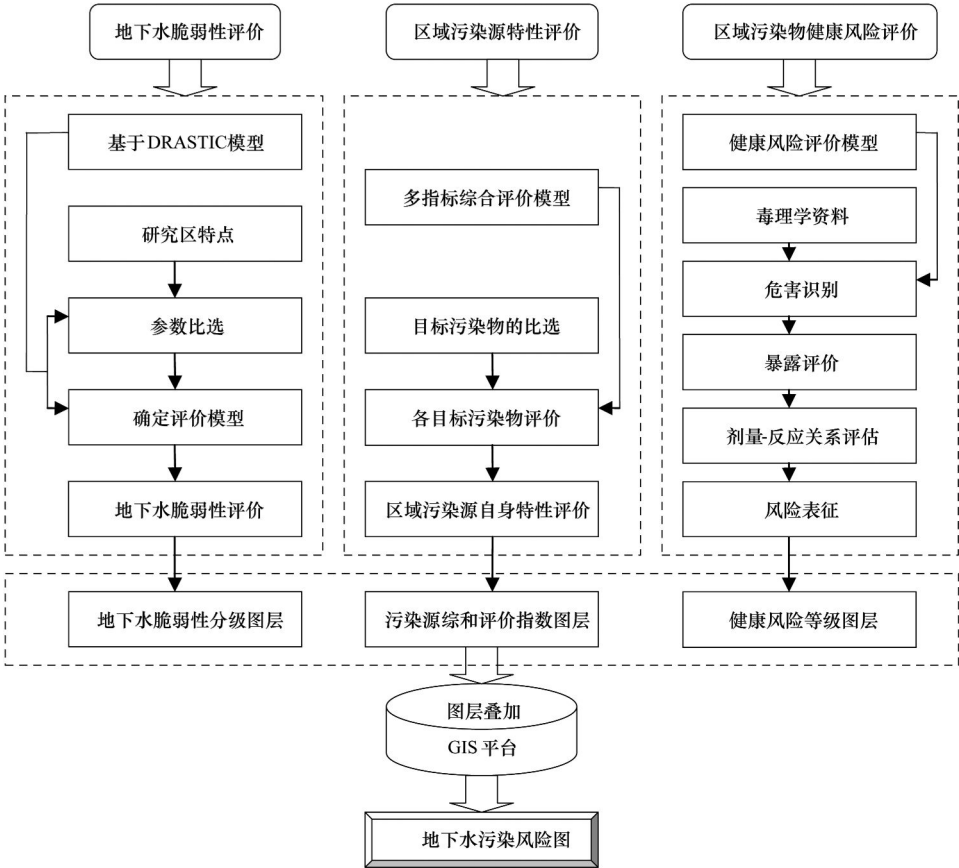


图 1 地下水污染风险评价流程示意

Fig. 1 Flow chart of the groundwater pollution risk assessment

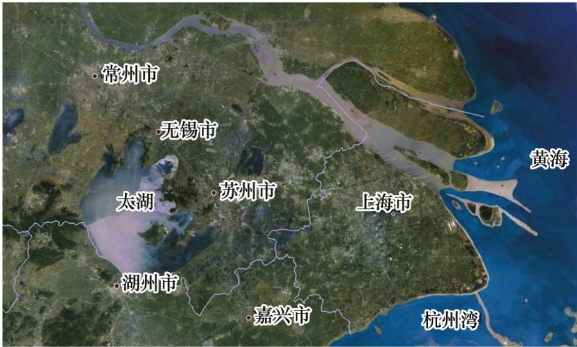


图 2 常州市区位示意

Fig. 2 Changzhou location map

2.1.2 特征污染物影响分级

通过污染物的有效形态来评价其对生态系统的风险,在其他的环境风险评价中运用较为广泛^[32~34].土壤的理化性质可间接影响地下水中重金属的有效形态.本研究拟通过重金属的有效形态来反映重金属污染对地下水脆弱性的影响.根据对常州市区土壤进行采样监测,分析各种重金属的有效形态含量(见表3),进行区域特征污染物对地下水脆弱性影响的研究.

表 1 含水层岩性、土壤类型和非饱和带介质的级别与特征值

Table 1 Aquifer lithology, soil type, level of unsaturation zone media and characteristic value

级别	特征值	含水层介质	土壤类型	非饱和带介质
1	10	页岩	压实/团聚黏土	承压层
2	9	变质岩火成岩	垃圾	页岩
3	8	风化岩火成岩	黏土质亚黏土	粉砂或黏土
4	7	冰渍	粉砂质亚黏土	石灰岩
5	6	层状砂岩及页岩	亚黏土	砂岩
6	5	块状砂岩	砂质亚黏土	板状石灰岩、砂岩、页岩
7	4	块状石灰岩	未压实/团聚土	含粉砂、黏土的砾石
8	3	砂砾岩	泥炭	砂砾
9	2	玄武岩	砂	玄武岩
10	1	岩溶灰岩	砾	岩溶石灰岩

2.1.3 常州市地下水脆弱性图

利用新建的 DPASLIC 模型对研究区进行地下水脆弱性分析,基于 ArcMap 9.3 的图层赋值功能,生成脆弱性指数图,通过对脆弱性指数图进行分级,得到地下水脆弱性分级图;同样的方法得到各种重金属有效形态含量及分布图,与脆弱性分级图叠加后得到常州市地下水脆弱性图,如图3所示.

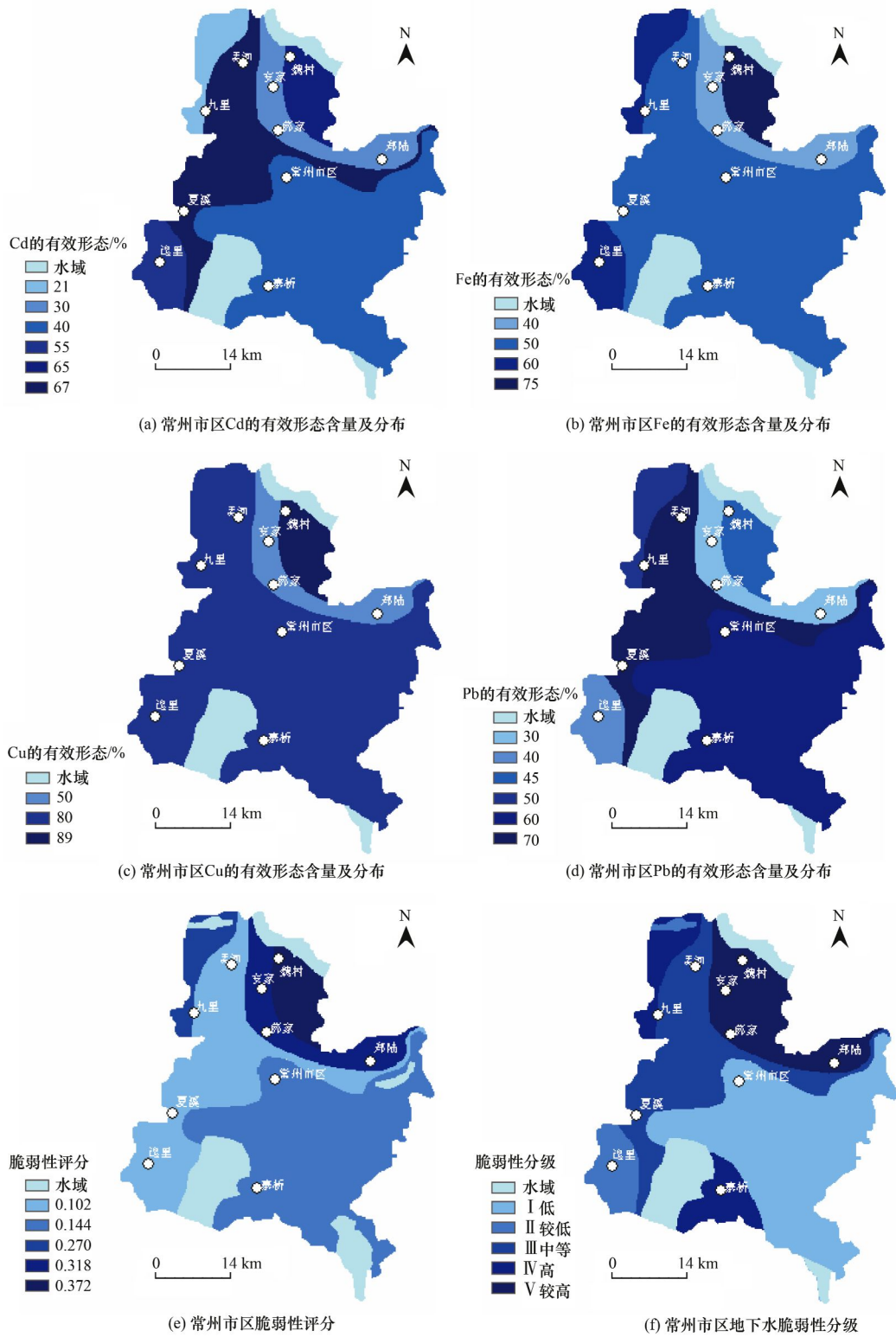


图3 常州市地下水脆弱性评价

Fig. 3 Groundwater vulnerability assessment map of Changzhou

2.2 区域污染源特性评价

选取对地下水污染风险影响较大的5个污染源性质参数,分别为存在形式、衰减特征、污染物的

量、迁移性及毒理性等. 污染源参数设计的分值范围为1~10,对地下水威胁最大的评分为10,威胁最小的评分为1,各参数的评分结果见表4.

采用模糊层次分析法对污染源参数的权重进行计算. 设目标污染物的存在形式、目标污染物的衰减特征、污染负荷、毒性及迁移特征分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 , 确立优先关系矩阵 F . 并计算模糊一致矩阵 Q . 计算污染源参数权重值见表 5.

$$F = \begin{vmatrix} 0.5 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.5 & 0 \\ 1 & 1 & 0.5 & 1 & 0.5 \end{vmatrix}$$

$$Q = \begin{vmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.2 & 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.5 & -0.1 & 0.5 & -0.1 \\ 0.8 & 1.1 & 0.5 & 1.1 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 & -0.1 & 0.5 & -0.1 \\ 0.8 & 1.1 & 0.5 & 1.1 & 0.5 \end{vmatrix}$$

以毒理学为依据, 参考污染物的毒性参数, 进行危害鉴定. 选取土壤中污染物超标率高、检出率高, 且具有一定毒性效应的 Cd、Pb、Fe、Cu 为区域特征污染物. 采用多指标评价方法确定研究区地下水污染源综合指数, 如图 4 所示.

表 2 地下水埋深、降雨入渗补给量、坡度和渗透系数的级别与特征值

Table 2 Depth of water, rainfall infiltration recharge, gradient, level of osmotic coefficient and characteristic value

级别	特征值			
	地下水埋深 /m	降雨入渗补给量 /mm·a ⁻¹	人口密度 /人·km ⁻²	渗透系数 /m·d ⁻¹
1	20	0	300	0
2	17.5	30	400	25
3	15	65	600	50
4	10	100	800	75
5	7.5	115	1 000	100
6	5	135	1 400	150
7	3.5	150	1 800	200
8	2	165	2 000	250
9	1	180	4 000	300
10	0	200	6 000	400

表 3 常州市区包气带土壤重金属有效形态含量

Table 3 Effective form content of heavy metals in vadose zone soil of urban area in Changzhou

分区	有效形态/%			
	Cd	Pb	Fe	Cu
龙虎塘以北春江镇等地	65	45	76	89
安家-薛家-郑陆一线	30	30	40	50
孟河-九里及湟里以东、安家-城区-夏溪-寨桥以西大部分地区	67	70	50	80
孟河-九里以西	21	50	60	80
湟里	55	40	60	80
城区及其东南部一带	40	60	50	30

表 4 地下水污染源参数的评分

Table 4 Scores of the parameters of pollution source in groundwater

存在形式	半衰期/d	污染物的量	油水分配系数	毒性
密封(1) 部分密封(5) 暴露(10)	15(1)	低(1)	< 50(10)	弱(1)
	16 ~ 60(3)		< 100(8)	
	60 ~ 180(7)	较低(3)	100 ~ 500(7)	较弱(3)
	180 ~ 360(8)	中等(5)	500 ~ 1 000(5)	中等(5)
	360 ~ 720(9)	较高(8)	1 000 ~ 1 500(3)	较强(8)
	> 720(10)	高(10)	5 000 ~ 10 000(2)	强(10)
			> 10 000(1)	

表 5 地下水污染源参数的权重

Table 5 Weights of the parameters of pollution source in groundwater

污染性质指标	存在形式	衰减特征	污染物的量	迁移特征	毒性
权重	0.2	0.05	0.35	0.35	0.05

2.3 地下水污染物健康风险评价

2.3.1 水质监测

在常州市区全区内共设置 150 个采样点, 针对特征污染物于 2011 年 7 月 ~ 2012 年 4 月进行 4 次取样, 丰水期、枯水期各 2 次. 各指标的检测值范围、超标率见表 6.

2.3.2 健康风险评价参数分析

根据国际癌症研究机构(IARC) 和世界卫生组织(WHO)编制的权衡化学物质致癌性可靠程度体系, 选取美国环保署(US EPA) 综合风险信息系统(IRIS)所列致癌强度系数及非致癌 RfD 值作为健康风险评价的依据, 见表 7.

2.3.3 基于区间数的健康风险评价

本研究运用模糊化原理, 采用专家咨询法, 将风

表 6 常州市地下水水质监测
Table 6 Water quality monitoring of groundwater in Changzhou

分区	$c \times 10^{-2}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				超标率/%			
	Cd	Pb	Fe	Cu	Cd	Pb	Fe	Cu
龙虎塘以北春江镇等地	[1,4]	[1,4]	[0,5]	[21,54]	90	98	80	100
安家-薛家-郑陆一线	[1,5]	[1,5]	[0,4.7]	[70,110]	100	100	98	90
孟河-九里及溇里以东、安家-城区-夏溪-寨桥以西大部分地区	[1,2]	[1,2]	[0,5.4]	[80,116]	100	100	100	100
孟河-九里以西	[1,3]	[1,3]	[1,6]	[97,126]	86	100	100	90
溇里	[0.8,3]	[0.8,3]	[3,6]	[49,121]	97	100	85	98
城区及其东南部一带	[0.2,3]	[0.2,3]	[4,7]	[90,126]	100	100	97	100

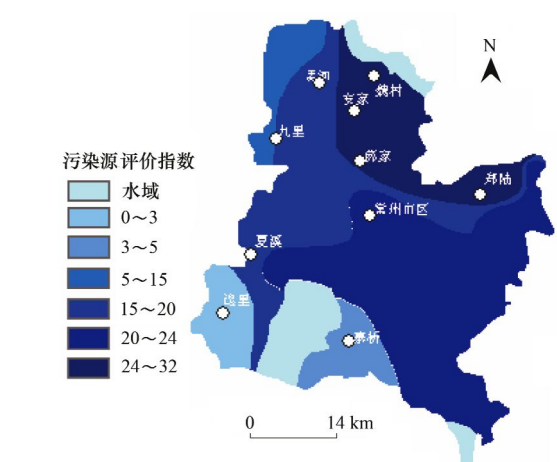


图 4 常州市污染源特性评价分级
Fig. 4 Classification map of pollution source characteristics assessment in Changzhou

表 7 化学致癌物致癌强度系数和非致癌物参考剂量
Table 7 Carcinogenic intensity coefficients of chemical carcinogen and the reference dose of non-carcinogens

化学物质	$Q_i/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	$\text{RfD}/\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$	来源
Cd	6.1	—	US EPA
Pb	0.008 5	—	US EPA
Fe	—	0.3	US EPA
Cu	—	3.7×10^{-2}	US EPA

险评价标准区间分为 6 个等级: $C_1 = \{ \text{I} \mid \text{低风险} \}$; $C_2 = \{ \text{II} \mid \text{低-中风险} \}$; $C_3 = \{ \text{III} \mid \text{中风险} \}$; $C_4 = \{ \text{IV} \mid \text{中-高风险} \}$; $C_5 = \{ \text{V} \mid \text{高风险} \}$; $C_6 = \{ \text{VI} \mid \text{极高风险} \}$, 并对各等级进行赋值(表 8). 运用健康风险评价模型, 计算得出化学有毒污染物通过饮水途径的人均年风险总值和区域不同风险水平对各个评价标准等级的隶属度值, 从而得到区域污染物健康风险水平等级(表 9), 并对各个区域进行区域污染物健康风险水平等级赋值, 得到健康风险等级图(图 5).

2.4 常州市地下水污染风险表征

运用 ArcGIS 9.3 软件 Spatial Analysis 功能将图 3(f)、图 4 和图 5 进行叠加, 生成常州市区地下水污染风险表征图, 对常州市区基于区域水文地质

表 8 评价标准的分级与分值
Table 8 Grading and scores of the evaluation criteria

风险级别	评级标准区间	评价分值
I 级风险	$[1.0 \times 10^{-6}, 1.0 \times 10^{-5}]$	1
II 级风险	$[1.0 \times 10^{-5}, 5.0 \times 10^{-5}]$	2
III 级风险	$[5.0 \times 10^{-5}, 1.0 \times 10^{-4}]$	3
IV 级风险	$[1.0 \times 10^{-4}, 5.0 \times 10^{-4}]$	4
V 级风险	$[5.0 \times 10^{-4}, 1.0 \times 10^{-3}]$	5
VI 级风险	$[1.0 \times 10^{-3}, 5.0 \times 10^{-3}]$	6

表 9 有毒污染物所致健康危害的总风险值及其相对隶属度
Table 9 Total risk of health hazards for toxic pollutants and their relative membership degree

分区	年风险值	隶属度	总风险值
1	$[2.6\text{E}-04, 7.5\text{E}-04]$	0.49 ± 0.51	4.51
2	$[8.5\text{E}-04, 1.4\text{E}-03]$	0.273 ± 0.727	5.727
3	$[9.8\text{E}-04, 1.5\text{E}-03]$	0.038 ± 0.962	5.962
4	$[1.2\text{E}-03, 1.6\text{E}-03]$	1	6
5	$[6.0\text{E}-04, 1.6\text{E}-03]$	0.4 ± 0.6	5.6
6	$[1.1\text{E}-03, 1.7\text{E}-03]$	1	6

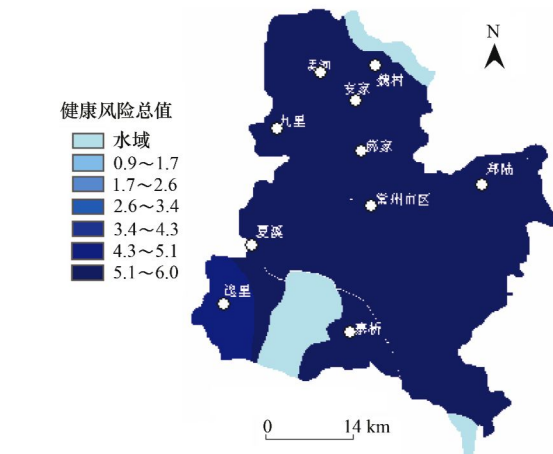


图 5 常州市地下水健康风险总值
Fig. 5 Health risk level map of groundwater in Changzhou

条件、区域污染源现状及区域人群健康风险的地下水污染风险进行表征, 结果见图 6.

由图 6 可以看出, 常州市地下水污染风险总体水平较高, 污染风险较高区分布在安家-薛家-郑陆

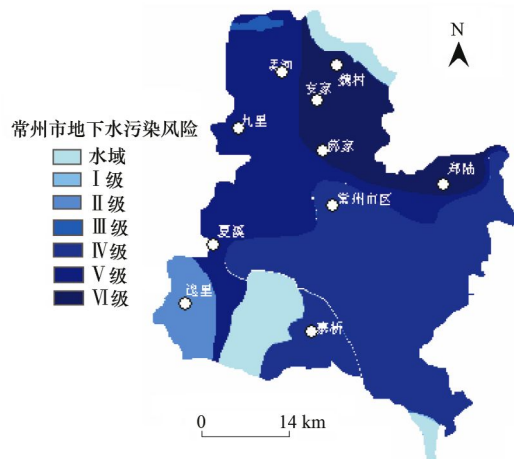


图6 常州市地下水污染风险表征

Fig. 6 Pollution risk characterization map of groundwater in Changzhou

一线以北和城区及其东南部一带。

3 结论

(1)建立区域地下水脆弱性评价、区域污染源评价和区域污染物健康风险评价耦合的地下水污染风险评价的方法及技术流程,构建了基于3个层次的地下水污染风险评价体系。

(2)基于GIS平台,使用ArcMap 9.3的图层赋值功能生成:地下水脆弱性分级图、污染源综合评价图和健康风险等级图,运用叠加功能对区域地下水污染风险进行表征。

(3)采用构建的区域地下水污染风险评价方法对常州市进行了地下水污染风险评价,结果显示该市地下水污染风险总体水平较高,污染风险较高区分布在安家-薛家-郑陆一线以北和城区及其东南部一带,说明所建立的区域地下水脆弱性评价有一定的合理性、实用性。

参考文献:

- [1] 钟佐荣. 地下水防污性能评价方法探讨[J]. 地学前缘, 2005, 12(S1): 3-11.
- [2] 周仰效, 李文鹏. 地下水水质监测与评价[J]. 水文地质工程地质, 2008, (1): 1-11.
- [3] 付素蓉, 王焰新, 蔡鹤生, 等. 城市地下水污染敏感性分析[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2000, 25(5): 482-486.
- [4] 罗兰. 我国地下水污染现状与防治对策研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2008, 8(2): 73-75.
- [5] 陈冬琴. 杭嘉湖地区地下水流域模拟及污染物迁移规律分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2007. 5-12.
- [6] 吴登定, 谢振华, 林健, 等. 地下水污染脆弱性评价方法[J]. 地质通报, 2005, 24(10-11): 1043-1047.
- [7] Zwahlen F. Vulnerability and risk mapping for the protection of Carbonate (Karst) aquifers[R]. European Approach, COST Action 620, Final Report, 2003. 74-125.
- [8] Rahman A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India[J]. Applied Geography, 2008, 28(1): 32-53.
- [9] 杨庆, 栾茂田, 崇金著, 等. DRASTIC 指标体系法在大连市地下水易污性评价中的应用[J]. 大连理工大学学报, 1999, 39(5): 684-688.
- [10] Babiker I S, Mohamed M A A, Hiyama T, et al. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara heights, Gifu Prefecture, Central Japan[J]. Science of the Total Environment, 2005, 345(1-3): 127-140.
- [11] 张保祥, 万力, 余成, 等. 基于熵权与GIS耦合的DRASTIC地下水脆弱性模糊优选评价[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 150-156.
- [12] Kukuric N, Zhou Y, Hall M. An integrated knowledge-based tool for groundwater vulnerability assessment[M]. Exeter, United Kingdom: Proceedings of Hydrology in a Changing Environment, 1998. 291-305.
- [13] 刘立才, 张霓, 郭敏丽, 等. 北京市平原区地下水污染源调查分析[R]. 北京: 北京市水利科学研究所, 2008. 15-18.
- [14] 贺新春, 郡东国, 陈南阳, 等. 几种评价地下水环境脆弱性方法之比较[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 17-20.
- [15] Fritch T G, McKnight C L, Yelderman Jr J C, et al. An aquifer vulnerability assessment of the paluxy aquifer, central Texas, USA using GIS and modified DRASTIC approach[J]. Environmental Management, 2000, 25(3): 337-345.
- [16] Al-Zabet T. Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method[J]. Environmental Geology, 2002, 43(1-2): 203-208.
- [17] Zaporozec A. Groundwater contamination inventory: a methodological guide[M]. IHP-VI, UNESCO, 2004. 10-18.
- [18] 王国利, 周惠成, 张文国. 含水层易污染性评价的模糊优选方法[J]. 水利学报, 2000, (12): 72-76.
- [19] 贝娜里·迪克森, 李大秋, 朱丽·艾尔思, 等. 地下水脆弱性评价方法研究[J]. 环境保护科学, 2007, 33(5): 64-67.
- [20] 姜桂华, 王文科, 乔小英, 等. 关中盆地地下水特殊脆弱性及其评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1106-1110, 1116.
- [21] 孙爱荣, 周爱国, 梁合诚, 等. 九江市地下水易污性评价——基于DPASTIC指标的模糊综合评价模型[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(4): 499-503.
- [22] 申利娜, 李广贺. 地下水污染风险区划方法研究[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 918-923.
- [23] 白世彪, 闫国年, 盛业华. GIS技术在三峡库区滑坡灾害研究中的应用[J]. 长江流域资源与研究, 2005, 14(3): 386-391.
- [24] 赵高峰, 王子健. 典型电子垃圾拆解区居民多卤代芳烃的膳食暴露及其癌症风险评估[J]. 环境科学, 2009, 30(8): 2414-2418.
- [25] 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.
- [26] 于会彬, 刘晓宇, 席北斗, 等. 基于模糊权重下的多层评价地下水资源模型的构建及应用[J]. 环境科学研究, 2009, **22**(2): 145-149.
- [27] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2729-2735.
- [28] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994. 45-49.
- [29] 雷静, 张思聪. 唐山市平原区地下水脆弱性评价研究[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(1): 94-99.
- [30] 于云江. 环境污染的健康风险评估与管理技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011. 91-106.
- [31] 杨彦, 魏伟伟, 李定龙, 等. 常州市区地下水污染研究[J]. 地下水, 2012, **34**(1): 77-79.
- [32] 曾光明, 钟政林, 曾北危. 环境风险评价中的不确定性问题[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(3): 252-255.
- [33] 夏增禄, 孟维奇, 穆从如, 等. 北京东郊土壤中某些重金属的含量、形态、相互关系及其在环境质量评价中的意义[J]. 环境科学学报, 1983, **3**(2): 132-140.
- [34] 孙波, 孙华, 张桃林. 红壤重金属复合污染修复的生态环境效应与评价指标[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 104-110.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll-a Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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