

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钊 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析

赵鹏¹, 何江涛^{1*}, 王曼丽¹, 崔亚丰²

(1. 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; 2. 中煤科工集团唐山研究院有限公司矿山测量研究所, 唐山 063012)

摘要: 地下水污染风险评价是地下水资源保护和地下水污染防治区划的重要基础, 其评价体系通常由污染源荷载、地下水脆弱性和地下水价值 3 个要素构成。由于污染源荷载量化方法的差异, 必然存在对污染源基础信息的需求差异, 以及对最终评价结果的影响未知等问题。为探讨污染源荷载量化方法对地下水污染风险评价的影响, 本文选择具有代表性的评分指数法和定量指数法, 以滹沱河冲洪积扇中尺度研究区为例, 分别进行污染源荷载量化, 耦合叠加相同的地下水脆弱性、地下水价值要素, 进行地下水污染风险评价, 并作对比分析。结果表明, 两种方法得出的污染源荷载量化结果存在较大差异, 风险评价的最终结果在风险数值特征及风险级别的空间分布上差异也比较显著, 说明污染源荷载量化方法的选择对风险评价结果有重要影响; 评分指数法适用于基础信息精度较低的大尺度评价区, 方法简单, 评价结果可靠性程度略低, 定量指数法适用于基础信息精度高的中小尺度评价区, 方法略复杂, 但评价结果可靠性更高, 反映出评价区的尺度效应对方法的选择有重要影响。

关键词: 地下水污染风险评价; 污染源荷载; 尺度效应; DRASTIC; 滹沱河

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2754-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612048

Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment

ZHAO Peng¹, HE Jiang-tao^{1*}, WANG Man-li¹, CUI Ya-feng²

(1. Beijing Key Laboratory of Water Resources and Environment Engineering, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Mine Surveying Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Tangshan Research Institute Co., Ltd., Tangshan 063012, China)

Abstract: Groundwater contamination risk assessment is an important basis for the protection of groundwater resources and the prevention and control of groundwater pollution. Its evaluation system is usually composed of three elements, which is vulnerability, pollutant source load and groundwater value. The pollutant source load plays an important role in risk assessment. Because of the difference among methods for pollutant sources load quantification, there will inevitably be different demand for the basic information survey on pollutant sources, as well as unknown impact on the final assessment results. In order to explore the impact of quantitative methods for pollutant sources load on groundwater contamination risk assessment, a case study was conducted in the mesoscale region of alluvial fan in Hutuo River, China. The two representative methods of grading index and quantitative index assessment systems were applied to quantify the pollutant sources load, in combination with the same vulnerability and groundwater value. The results constructed from different risk assessment systems were compared. The results showed that there were great differences between the two methods of quantification for pollutant sources load, and the result of contamination risk assessment also revealed significant differences in the feature of risk value and the spatial distribution of the risk levels. The results of contamination risk assessment were strongly influenced by the choice of quantification for pollutant sources load methods. The grading index method was suitable for large scale region with lower precision of basic information and was simple, and the results of assessment had relatively lower reliability. The quantitative index method was suitable for the mesoscale and micro-scale region with higher precision of basic information and was relatively complicated, and the results of assessment had relatively higher reliability. It was shown that the scale effect of evaluation region had an important influence on the choice of methods.

Key words: groundwater contamination risk assessment; pollutant sources load; scale effect; DRASTIC; Hutuo River

地下水污染风险评价是地下水资源保护和地下水污染防治区划的重要手段, 随着近来《全国地下水污染防治规划(2011~2020年)》的推行, 地下水污染防治工作也日益紧迫。Morris 等^[1,2]指出地下水污染风险是指含水层中地下水由于其上人类活动导致遭受污染达到不可接受水平的可能性, 是含水层污染脆弱性与人类活动造成的污染负荷之间相互

作用的结果。从定义可以看出, 地下水污染风险是在地下水脆弱性的基础上, 结合污染荷载、地下水功能价值进行叠加得到地下水污染风险评价结果。

收稿日期: 2016-12-06; 修订日期: 2017-01-17

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

也就是说,地下水污染风险评价需考虑 3 个方面:一是含水层固有脆弱性评价,以表征地下水系统消纳污染物的自净能力;二是含水层污染荷载风险评价,以反映人类活动和污染源引起的地下水系统污染负荷的影响;三是地下水系统的预期损害性,即地下水系统价值功能的变化对地下水系统的影响^[3,4]。

能够对地下水环境造成污染的地表污染源及相关地表人类活动极其复杂^[5],对于地下水脆弱性、污染源荷载、地下水功能价值这 3 方面来说,污染源荷载则体现了人类活动的影响程度。同时,由于不同空间尺度的研究区域有不同的特点,导致建立的地下水风险源识别方法也不尽相同^[6],从而引起污染源荷载量化结果的差异,而且,已有的评价体

系,基本都将“污染源”因子确定的权重最高^[7,8],因此,污染源荷载是影响污染风险评价的最主要因素。进行污染源荷载评价,则需要综合考虑到研究区的范围大小、环境因素的复杂度、资料覆盖度等要素,由于不同空间尺度区域上基础环境信息特点存在差别(表 1),所用的评价方法也就不同,这必然导致不同尺度下评价结果的差异性;而方法的尺度效应涉及基础数据精度、模型的概化程度等方面,运用不同精度要求的污染源荷载量化方法进行同一尺度下的污染源荷载评价,评价结果也必然体现出不同方法的尺度效应及差异性。为此,进行污染源荷载量化方法的尺度效应研究对于不同尺度区域评价方法的选择以及地下水污染防控区划有着重要意义。

表 1 不同空间尺度的环境信息特点

Table 1 Characteristics of environmental information at different spatial scales			
尺度	范围	环境因素	资料覆盖度
大尺度区域	较大,一般达数万平方千米	环境因素众多、复杂	较差
中尺度区域	一般为数千平方千米	环境因素众多、较复杂	相对较低
小尺度区域	较小,一般为几百到数千平方千米	环境因素相对较少、明确	精度较高,数据较完善

为进一步探讨污染源荷载量化方法的尺度效应及差异性对风险评价结果的影响,本文选择有代表性的两种方法进行对比研究。一种方法出自于 2014 年环境保护部发布的《地下水污染防治区划分工作指南》,在本研究中称为评分指数法,该方法对污染源的荷载评估定性因素较多。另一种方法是王俊杰等^[9]提出的,在本研究中称为定量指数法,该方法侧重于定量地表征污染荷载风险大小,但参数概化较多。将这两种方法运用同一套基础数据,分别应用于滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价体系中,并分别将荷载评价和风险评价结果进行对比分析,探讨两种污染荷载量化方法的差异性,并分析其原因。

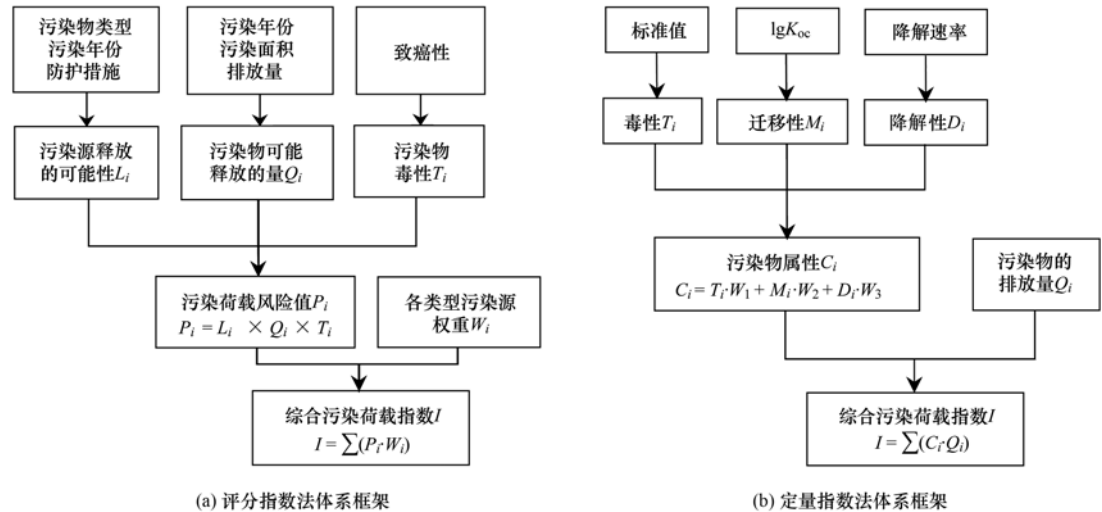
1 两种污染源荷载量化体系对比

两种污染源荷载量化方法体系框架如图 1 所示,两种方法都由两个层次构成。

评分指数法是建立在污染物释放和危害性的基础上来量化污染荷载的,首先对污染调查和资料进行分析整理,对污染源分类,针对各类污染源分别用污染物类型、污染年份、防护措施的评分来表征污染物释放的可能性 L ,用污染年份、污染面积、排放量的评分来表征污染物可能释放的量 Q ,用致癌性的评分来表征污染物的毒性 T ,然后,将 3 个因子值通过乘积叠加得到每一类污染源污染荷载风险值。

最后,再结合各类型污染源的权重值 W 通过指数叠加得到综合污染荷载指数 I 。该方法的所有评价因子均通过评分得到,主要考虑了污染源中的人类活动的影响。定量指数法通过解析地表污染源构成,从特征污染物及其对应排放量角度出发,结合了污染物的自身属性来表征污染荷载风险。该体系包括两部分,首先,地下水污染源解析^[9,10],即明确污染源类型、分布,查明各类污染源的污染物种类,筛选出特征污染物,特征污染物对地下水环境的破坏是其在一定数量的基础上,通过其自身属性表现出来的^[9,10],这里用毒性 T_i 、迁移性 M_i 、降解性 D_i 来表征污染物的自身属性^[11~14],再结合以层次分析法^[15~18]确定的 3 种属性的权重值运用叠置指数法叠加得到特征污染物的属性值 C_i 。最后,与特征污染物的实测排放量^[9,19,20] Q_i 通过乘积叠加得到该特征污染物的荷载,所有特征污染物的荷载叠加就是综合污染荷载指数 I 。定量指数法既考虑了人类活动的影响,又结合了特征污染物的自身属性。

通过对比分析发现,由于尺度效应的存在,两种体系对污染源信息需求和精度要求上存在差异。结合表 1,由于评分指数法主要通过国土、环保等部门获取污染源的基本信息,个别信息只需要现场获取,对污染源信息精度要求较低,工作量相对较小;定量指数法需要更为详细的污染源信息,包括污染源的面积、污染物种类、污染物实测浓度等,需要通过



L_i :污染源释放的可能性评价参数, Q_i :污染物释放的量评价参数, T_i :污染物毒性评价参数, P_i :污染荷载风险值, I :综合污染荷载指数, M_i :迁移性评价参数, D_i :降解性评价参数, W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 T_i 、 M_i 、 D_i 的权重值

图1 污染源荷载量化体系框架

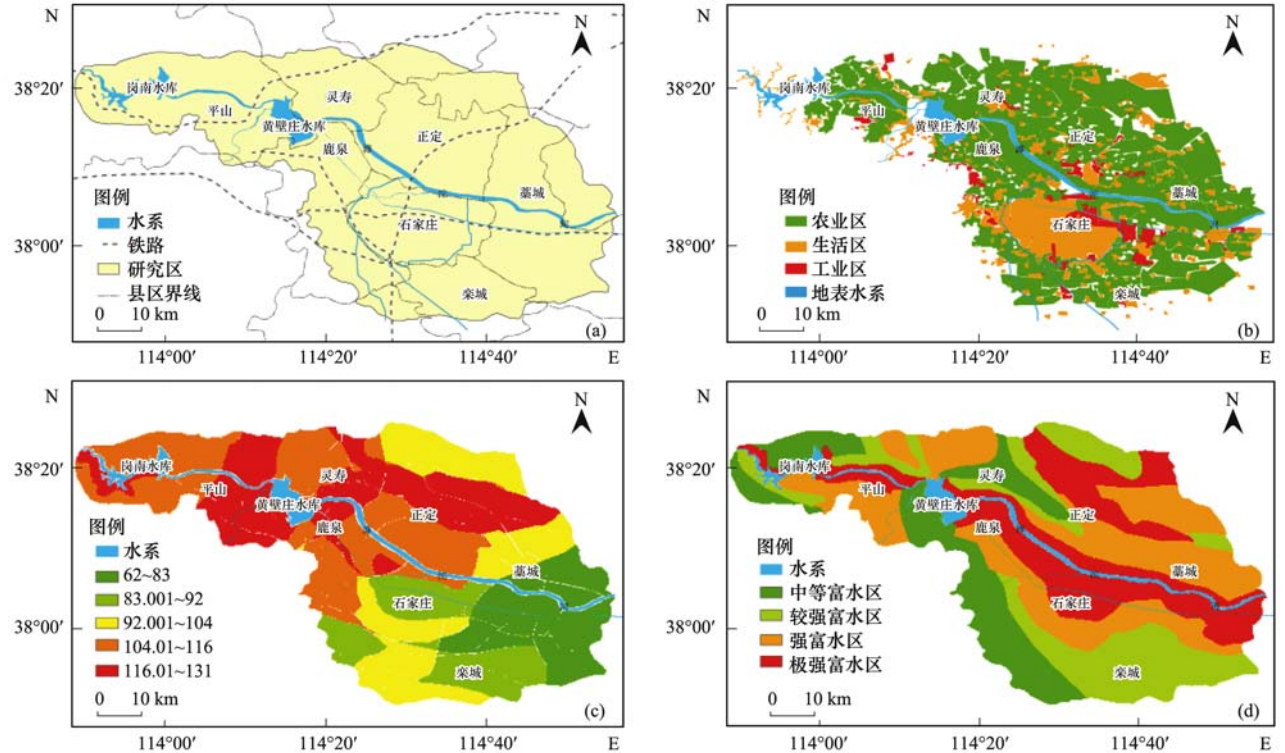
Fig. 1 Framework of quantification system for pollutant sources load

大量野外工作获得,对信息精度要求较高,工作量相对较大。

2 滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价

研究区位于滹沱河冲洪积扇,面积5 875.3 km²,为中尺度区域。为完成滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价,本研究将该区污染源分为生活区、

工业区、农业区、地表水系四类进行污染源解析^[21,22],选择特征污染物共15种,分别为:COD、TDS、氨氮、硝氮、氯离子、氟离子、硫酸根、铁、锰、苯并(a)芘、萘、茈萸、二氯甲烷、三氯甲烷、1,2-二氯苯,评价所需的基础要素包括综合污染荷载指数 I 、地下水脆弱性 D 、地下水价值 V 共3方面 [图2(b)~图2(d)]。其中,分别用评分指数法和



(a) 研究区概况;(b) 污染源分布;(c) 脆弱性指数分级;(d) 富水性分区^[23]

图2 研究区基础要素

Fig. 2 Basic elements of the study area

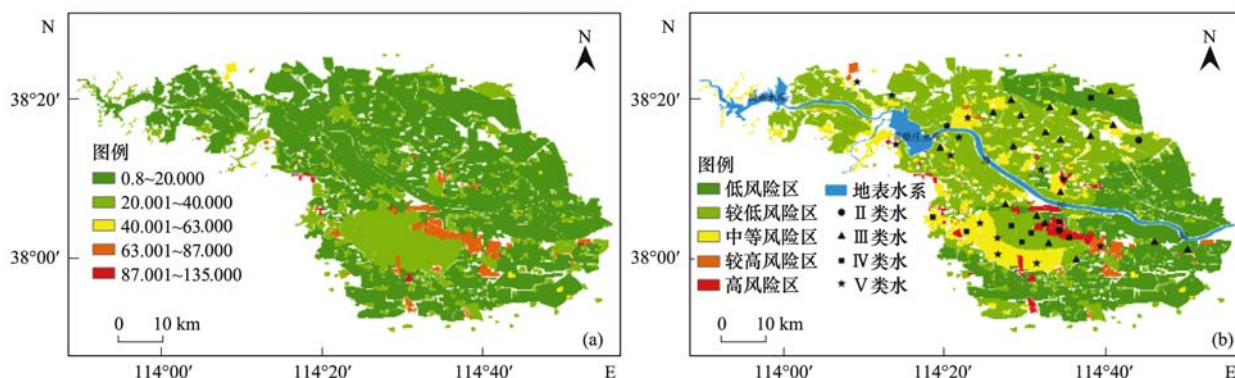
定量指数法评价计算污染荷载指数 I ; 用 DRASTI 模型评价得到滹沱河冲洪积扇潜水含水层固有脆弱性^[22~24]分布, DRASTI 模型去掉了 DRASTIC 模型中的水力传导系数(C), 用含水层厚度^[25,26](A)取代原模型中的含水介质(A); 对于地下水价值(V)由于资料缺少, 本研究中仅用研究区富水性强弱来表示地下水价值大小^[22]; 最终这 3 方面因子依据公式 $R = I \times W_i + D \times W_d + V \times W_v$ 耦合叠加得到地下水污染风险值, 计算得到各因子的权重 W_i 、 W_d 、 W_v 分别为 0.5、0.3、0.2。整个评价过程中, 借助 Arcgis 9.3 软件的 Spatial Analyst 模块完成各个要素图层的叠加, 再通过 Natural Breaks 方法实现等级划分^[27~30], 最终得到石家庄平原区地下水污染风险分级图。

2.1 评分指数法荷载量化的污染风险评价

将评分指数法应用于滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价中的污染荷载量化。滹沱河冲洪积扇 i 污染源对应的污染源释放的可能性 L_i 、污染物可能

释放的量 Q_i 、污染物毒性 T_i 依据公式 $P_i = L_i \times Q_i \times T_i$ 进行叠加计算得到该污染源的污染荷载风险值 P_i , 各类污染源计算完成后, 再结合各类污染源的权重 W_i 依据公式 $I = \sum (P_i \cdot W_i)$ 运用叠置指数法在 Arcgis 9.3 软件中的 Spatial Analyst 模块下的 Raster Calculator 功能中进行叠加得到综合污染荷载指数 I_E 值的分布如图 3(a) 所示, 用 Natural Breaks 方法实现等级划分, 一般分为 5 级, 其中各个计算因子的值通过分级评分得到, 评分值及权重值的确定方法见文献[31]。

滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价将综合污染荷载指数 I_E 、地下水脆弱性 D 、地下水价值 V 依据公式 $R = I_E \times W_i + D \times W_d + V \times W_v$ 在 Arcgis 9.3 软件中的 Spatial Analyst 模块下的 Raster Calculator 功能中进行叠加得到地下水污染风险值分级图, 再利用 Natural Breaks 方法进行等级划分, 进而得到滹沱河冲洪积扇最终地下水污染风险评价分级图[图 3(b)]。



(a) 综合污染荷载指数分区; (b) 地下水污染风险分级及采样点水质分级

图3 滹沱河冲洪积扇评分指数法评价结果分级

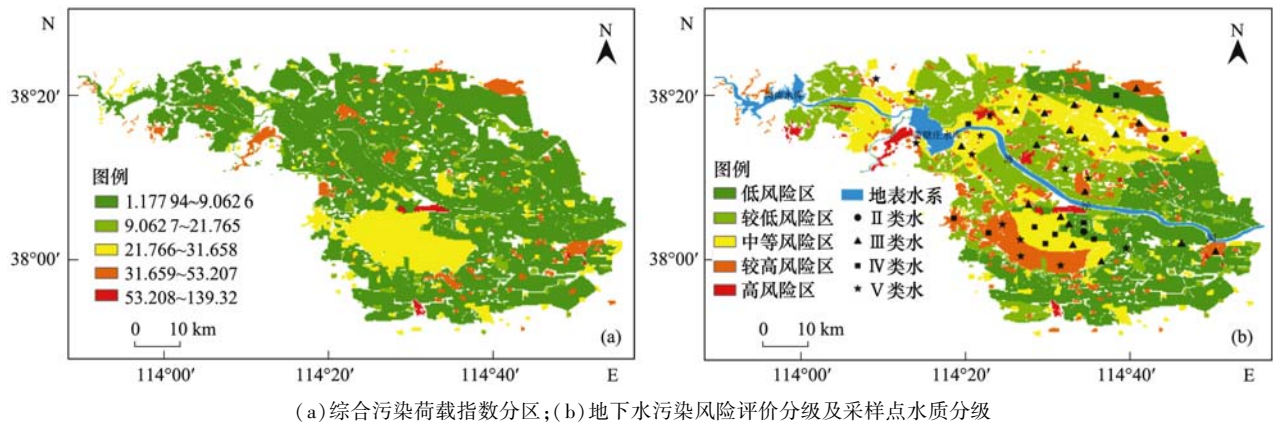
Fig. 3 Classification of grading index method assessment results in alluvial fan of Hutuo River

2.2 定量指数法荷载量化的污染风险评价

将定量指数法应用于滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价中的污染荷载量化。在污染源解析的基础上, 首先对 15 种特征污染物的属性值(C_i)进行量化, 用标准限值^[9,10]来表征污染物的毒性(T_i)且进行排序, 限值越小越靠后; 无机特征污染物用迁移系数来表征其迁移性, 且无机污染物的迁移性普遍强于有机特征污染物, 用有机碳分配系数($\lg K_{oc}$)表征有机特征污染物迁移性并进行排序, 迁移性(M_i)越强越靠后^[9]; 用降解速率来表征特征污染物的降解性(D_i)并进行排序, 值越小越靠后^[9]。用层次分析法^[15~18]计算权重值 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为: 0.6、

0.2、0.2, 依据公式 $C_i = T_i \cdot W_1 + M_i \cdot W_2 + D_i \cdot W_3$ 叠加计算特征污染物属性值 C_i , 再结合该特征污染物的排放量 Q_i 依据公式 $I = \sum (C_i \cdot Q)$ 计算得出各类污染源的综合污染荷载指数 I_w , 最后运用 Arcgis 9.3 平台上完成叠加得到综合污染荷载指数 I_w 分区如图 4(a) 所示, 一般分为 5 级, 其中特征污染物的排放量 Q_i 用单位面积上的排放量来表示。

滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价将综合污染荷载指数 I_w 、地下水脆弱性 D 、地下水价值 V 依据公式 $R = I_w \times W_i + D \times W_d + V \times W_v$ 在 Arcgis 9.3 软件中的 Spatial Analyst 模块下的 Raster Calculator 功能中进行叠加得到地下水污染风险值分级图, 再



(a)综合污染荷载指数分区;(b)地下水污染风险评价分级及采样点水质分级

图4 滹沱河冲洪积扇定量指数法评价结果分级

Fig. 4 Classification of quantitative index method assessment results in alluvial fan of Hutuo River

利用 Natural Breaks 方法实现等级划分,进而得到滹沱河冲洪积扇最终地下水污染风险评价分级图[图4(b)]。

3 结果与讨论

3.1 污染源荷载量化结果对比

用评分指数法和定量指数法分别对滹沱河冲洪积扇污染源荷载进行量化,两种结果差异明显。各类污染源荷载指数大小在两种评价结果中基本符合工业区>生活区>农业区>地表水系,且分布趋势大致与污染源分布相似,但从污染荷载指数的级别来看,生活区在评分指数法中为较低污染荷载区,在定量指数法中则为中等污染荷载区,尤其以石家庄市最为典型,对于以研究区北部及中部为代表的部分工业区在评分指数法中为较低污染荷载区,在定量指数法中则为中等污染荷载区。整体来看,用评分指数法得到的污染荷载数值整体上较定量指数法得到的污染荷载数值要高,但定量指数法的荷载评价结果较为精细。

两种方法分别对研究区的51 940个栅格进行了赋值,并按照数值大小对栅格级别进行划分,为了统计不同污染荷载级别的空间分布,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分并进行栅格数目统计,统计结果见图5(a)。

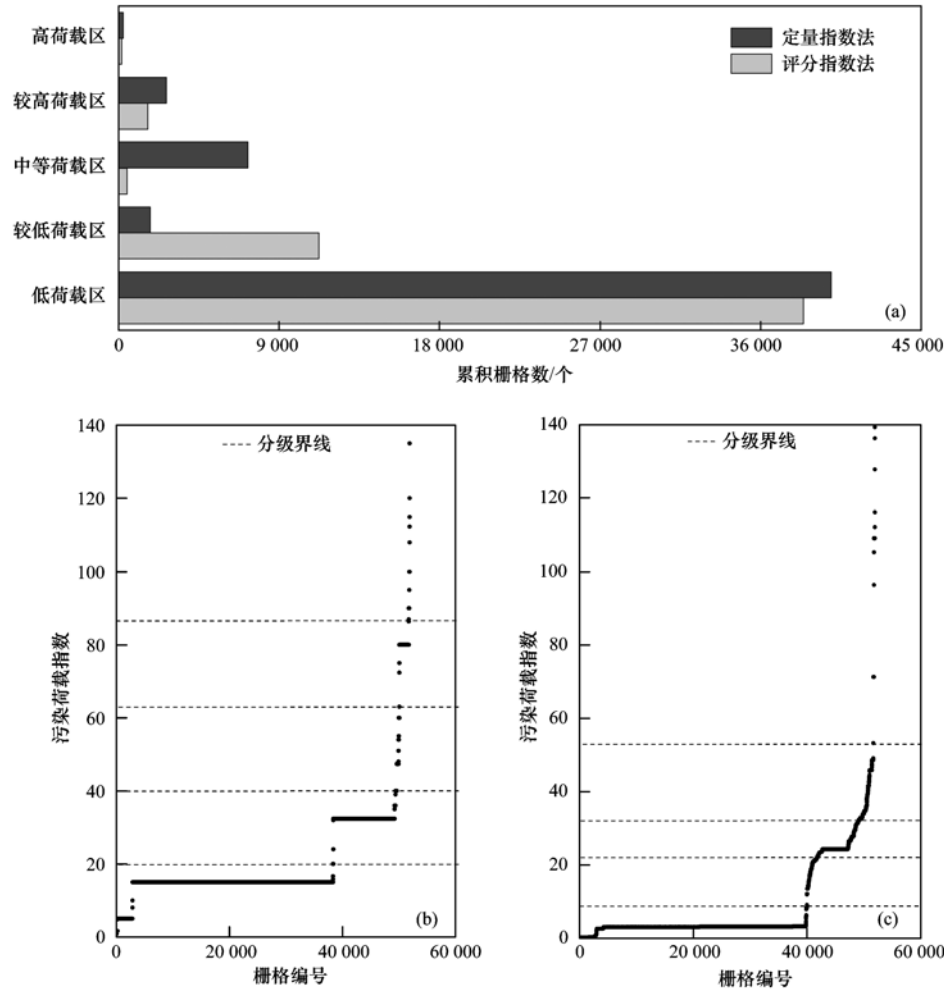
统计结果表明,在各级别空间分布上,评分指数法中污染荷载级别低的栅格数占总数的73.9%,该级别空间分布范围较大;污染荷载级别高、较高、中等的栅格数差别不大,分别占总数的0.4%、3.2%、0.9%,空间分布范围较小;污染荷载级别低的栅格数占总数的21.6%,空间分布范围处于中等。定量指数法中污染荷载级别低的栅格数占总

的76.9%,该级别空间分布范围较大;污染荷载级别较低、较高、高的栅格数差别不大,分别占总数的3.4%、5.2%、0.5%,空间分布范围较小;污染荷载级别中等的栅格数占总数的14%,该级别空间分布范围处于中等水平;两种结果在较低、中等、较高级别的分布范围差异较大。

结合图5(b)和5(c),对两种方法得到的污染荷载指数在各级别所在栅格的数值分布进行对比。结果显示,两种方法的荷载指数数值分布范围基本相同,且随着荷载指数的增大数值的跳跃性也越来越大,但同一数值在定量指数法中所处级别比评分指数法中要高;两种结果在数值分布形式上存在明显差别,评分指数法的污染源荷载指数数值呈明显的阶梯式分布,定量指数法的污染源荷载指数数值则呈连续式分布,体现了两种方法的尺度效应;同时,两种体系均使用 Natural Breaks 方法进行分级,该方法的分级原则是基于数据固有特征,将相似值归类,并最大化类间的差异,使得边界设置有相对大的跳跃数值,在定量指数法中则突出了该分级方法的优越性。

3.2 地下水污染风险评价结果对比

在两种方法对研究区污染荷载量化结果的基础上,耦合地下水脆弱性、地下水价值完成石家庄平原区地下水污染风险评价,评价结果差异显著。虽然各级别分布均符合工业区>生活区>农业区>地表水系,且分布范围大致与污染源分布相同;但从同类污染源风险级别分布来看,农业区和地表水系风险级别及分布基本一致,而个别生活区和工业区风险级别分布出现越级现象,即:同一区域地下水污染风险在两种方法评价的结果中处于不同级别,以石家庄市北部和滹沱河中段以北最为典型。



(a) 栅格分类统计; (b) 评分指数法污染荷载数据分布; (c) 定量指数法污染荷载数据分布
图5 综合污染荷载指数数据分布

Fig. 5 Data distribution of the comprehensive pollutant load index

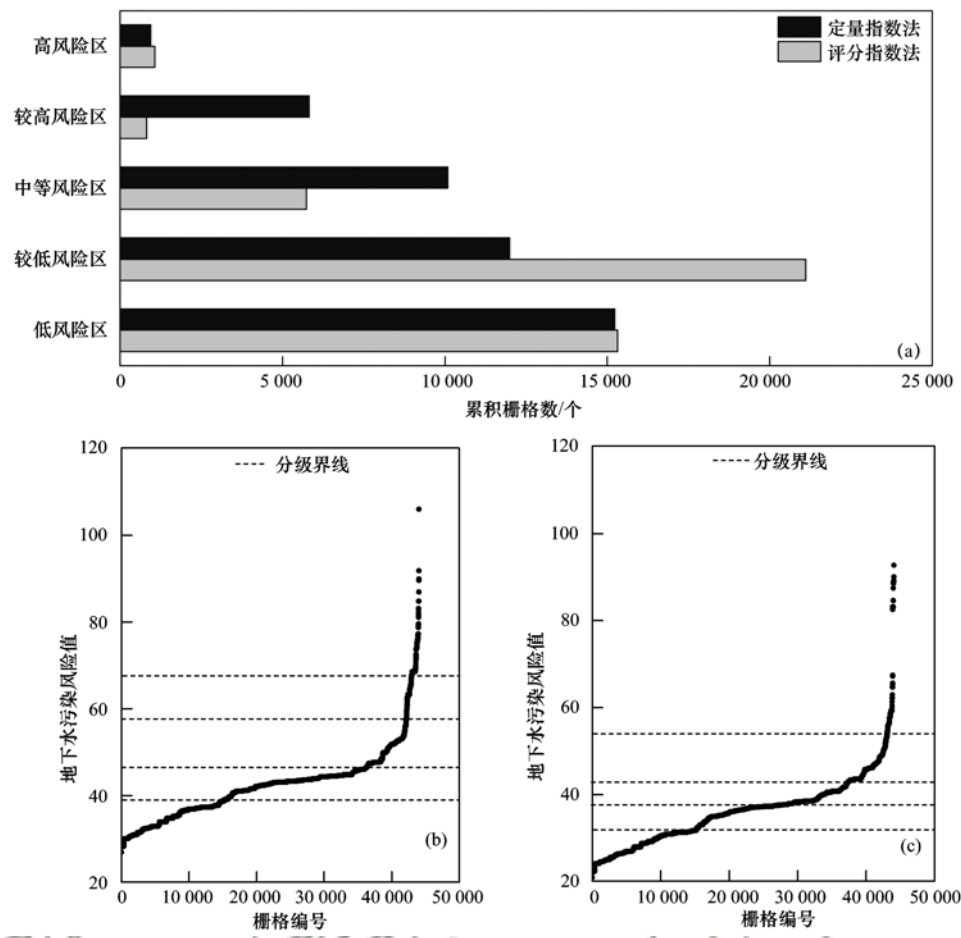
同样在地下水污染风险评价中,两种方法所在污染风险评价体系分别对研究区的44 047个栅格进行了赋值,并按照数值大小对栅格级别进行划分,为了统计不同污染风险级别的栅格分布,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分并进行栅格数目统计,统计结果见图 6(a)。

统计结果显示,在较低、中等、较高风险级别的分布范围差异较大,随着风险等级升高,定量指数法的各风险级别分布范围逐级递减;再结合图 6(b) 和 6(c),对两种方法所在的污染风险评价体系所得到的污染风险结果在各个级别栅格上的数值分布进行对比,结果发现,评分指数法污染风险值整体上较定量指数法风险值高,并且处在同一级别两种结果的数值分布区间差异较大,同一风险数值在定量指数法评价结果中所在风险级别要高。这说明在滹沱河冲洪积扇地区,将两种不同尺度的污染源荷载量化方法应用于地下水污染风险评价体系中,地下水

风险评价结果出现明显的差异,定量指数法的评价结果更能准确地刻画地下水污染风险的程度及范围。

3.3 风险结果可靠性分析

为探讨两种风险评价结果的可靠性,本研究用地下水水质评价结果进行分析验证。在风险结果差异性较大的区域根据采样点分布及浅层优先的原则选取了 44 个潜水地下水采样点,水井深度在 25 m ~150 m 之间。选择总硬度、TDS、硫酸盐、氯化物、氟化物、碘化物、硝氮、亚硝氮、氨氮、耗氧量、铁、锰、铜、锌、铝、铅、铬(六价)、汞、砷、硒、镉共 21 项无机常规指标进行地下水水质综合评价^[12],再将水质评价结果叠加到风险评价结果分级图中[图 3(b)和图 4(b)]。将地下水污染风险从低风险到高风险的 5 级分别对应于地下水水质的 I 类到 V 类,用两者的吻合程度来表征地下水污染风险评价的可靠性,认为地下水污染风险与地下水水



(a) 栅格分类统计; (b) 评分指数法污染风险数据分布; (c) 定量指数法污染风险数据分布

图 6 地下水污染风险评价数据分布

Fig. 6 Data distribution of the groundwater contamination risk assessment

质处于同一级别时两者的吻合程度最高,地下水污染风险评价的可靠性最优。

对比分析图 3(b) 和图 4(b) 两种结果表明,处于同一风险级别区域采样点的水质类型在两种结果中存在显著差异。为更加直观地展示其差异性,对各采样点的水质类别与所在风险级别进行比较并作分类统计(图 7),虚线左侧表示风险级别高于水质级别数,虚线右侧表示水质级别高于风险级别数,虚线上的点水质与风险处于同一级别可靠性最优。对比图 7 中两种结果发现,评分指数体系统计结果中采样点大多集中分布在图中虚线左侧区域,处在该区域的采样点风险级别高于水质类别,且位于可靠性最优位置处的采样点数较少;定量指数体系统计结果中采样点大多集中分布在图中虚线上及两侧较近区域,处在该区域的采样点水质类别略高或略低于风险级别,且处在可靠性最优位置的采样点数最多。由此表明,定量指数体系可靠性高于评分指数体系。

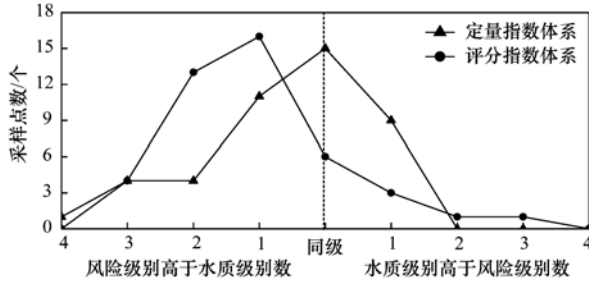


图 7 地下水采样点分类统计

Fig. 7 Statistical maps of groundwater sampling site classification

3.4 适用性分析

在滹沱河冲洪积扇地下水污染风险评价中,由于尺度效应的存在以及污染源荷载量化方法的差异,必然会对两种地下水污染风险评价体系的适用性产生影响,具体分析如下。

(1) 尺度效应 区域的规模尺度是一个十分关键的问题,不同空间尺度的研究区有不同的特点^[6],导致建立的地下水污染风险评价体系也就不同。大尺度区域范围较大,环境因素复杂,调查的基

础资料覆盖度较差,精度较低,宜选用低精度的评价方法;中、小尺度范围较小,基础信息的调查覆盖全面,数据完善,精度较高,宜选用高精度的评价方法。

(2)解析精度 污染源荷载量化结果的差异性的根本在于对污染源解析程度的不同。评分指数法从解析污染源类型出发,考虑了各类污染源释放污染物的能力及其释放污染物的量和危害性,源解析程度较低,宜用在大尺度区域;定量指数法在解析污染源类型的基础上进一步解析污染物,从特征污染物的角度出发,考虑了污染物的属性和排放量,源解析程度较高,宜用在中、小尺度区域。

(3)繁简程度 两种污染荷载量化方法体系都为二层结构,但是两种方法的繁简程度有较大差异,主要体现在特征污染物的量(Q)的计算,产生差异主要原因在于对污染源基础信息的要求不同。评分指数法中特征污染物的量根据污水排放量或化肥用量等指标分级评分,用较少的基础资料从定性角度表征特征污染物的量,过程简便,但精度较低,适用于大尺度区域;定量指数法中污染源特征污染物的量需要根据污染源的污水排放量、污染源分布面积、实测污染物浓度等资料来计算得到单位面积上的污染物的量,用更丰富的基础资料定量地表征特征污染物的量,计算过程较复杂,但精度高,适用于中、小尺度区域。因此,不同方法对基础资料要求不同,量化过程的繁简程度不同,方法的精度也不同,从而方法的适用性也就不同。

4 结论

(1)针对基于评分指数法和定量指数法的地下水污染风险评价结果对比表明,污染源荷载量化结果差异较大,最终的风险评价结果差异也比较显著,污染源荷载量化对地下水污染风险评价有重要影响。

(2)采用水质评价结果验证风险评价可靠性的结果表明,定量指数体系风险结果与水质评价结果的吻合程度高于评分指数体系,即定量指数法对污染源荷载评价结果的可靠性相对较高。

(3)对污染源荷载量化方法的适用性分析表明,大尺度区域范围大、资料获取难度高、基础数据精度较低,宜选用评分指数法;中、小尺度区域范围小、资料获取较容易、基础数据精度高,宜选用定量指数法,反映出评价区的尺度效应对方法的选择有重要影响。

参考文献:

[1] Morris B, Foster S. Assessment of groundwater pollution risk

[EB/OL]. <http://www.lnweb18.worldbank.org/essd/essd.Nsf>, 2006-05-06.

[2] 孙才志,陈相涛,陈雪姣,等. 地下水污染风险评价研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, **35**(5): 152-161.

Sun C Z, Chen X T, Chen X J, *et al.* Recent advances in groundwater contamination risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, **35**(5): 152-161.

[3] 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): 648-653.

Tai T Y, Wang J S, Wang Y Y, *et al.* Groundwater pollution risk assessments in China [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2012, **48**(6): 648-653.

[4] 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.

[5] Schwartz F W, Ibaraki M. Groundwater: a resource in decline [J]. *Elements*, 2011, **7**(3): 175-179.

[6] 李广贺,赵勇胜,何江涛,等. 地下水污染风险源识别与防控区划技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.

Li G H, Zhao Y S, He J T, *et al.* Distinguish the pollution risk sources for groundwater and the technology of regionalization on prevention and control [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.

[7] 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.

Guo G X, Li Y, Xu L, *et al.* Risk assessment of quaternary groundwater contamination in Beijing Plain [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 562-568.

[8] Martínez-Bastida J J, Arauzo M, Valladolid M. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution[J]. *Hydrogeology Journal*, 2010, **18**(3): 681-698.

[9] 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.

Wang J J, He J T, Lu Y, *et al.* Quantitative method of representative contaminants in groundwater pollution risk assessment [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 771-776.

[10] 陆燕,何江涛,王俊杰,等. 北京市平原区地下水污染防控区划不确定性分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3117-3123.

Lu Y, He J T, Wang J J, *et al.* Uncertainty analysis of groundwater protection and control zoning in Beijing Plain [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3117-3123.

[11] Huysmans M, Madarász T, Dassargues A. Risk assessment of groundwater pollution using sensitivity analysis and a worst-case scenario analysis [J]. *Environmental Geology*, 2006, **50**(2): 180-193.

[12] DZ/T 0290-2015, 地下水水质标准[S].

[13] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].

[14] 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.

Shen L N, Li G H. Groundwater pollution risk mapping method [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 918-923.

- [15] Chen Y, Yu J, Khan S. The spatial framework for weight sensitivity analysis in AHP-based multi-criteria decision making [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, **48**: 129-140.
- [16] Şener S, Sener E, Karagüzel R. Solid waste disposal site selection with GIS and AHP methodology: a case study in Senirkent-Uluborlu (Isparta) Basin, Turkey [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **173**(1-4): 533-554.
- [17] Saaty R W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used [J]. *Mathematical Modelling*, 1987, **9**(3-5): 161-176.
- [18] 江海浩, 周书葵, 陈朝猛, 等. 基于改进 DRASTIC 模型、GIS 和层次分析法 (AHP) 的地下水 U(VI) 污染风险评价 [J]. *监测与评价*, 2015, (3): 113-117, 130.
Jiang H H, Zhou S K, Chen Z M, *et al.* Risk assessment on U (VI) to groundwater based on a modified DRASTIC model, GIS and AHP method [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, (3): 113-117, 130.
- [19] Rupert M G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method [J]. *Ground Water*, 2001, **39**(4): 625-630.
- [20] 陆燕, 何江涛, 王俊杰, 等. 北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1526-1531.
Lu Y, He J T, Wang J J, *et al.* Groundwater pollution sources identification and grading in Beijing Plain [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1526-1531.
- [21] 叶浩, 刘长礼, 姜建梅, 等. 滹沱河石家庄段地下水污染风险评价 [J]. *地质通报*, 2008, **27**(7): 1065-1070.
Ye H, Liu C L, Jiang J M, *et al.* Risk assessments of groundwater pollution in the Shijiazhuang reach of the Hutuo River, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, **27**(7): 1065-1070.
- [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价方法探究 [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] 严明疆, 张光辉, 徐卫东. 石家庄市地下水脆弱性评价 [J]. *西北地质*, 2005, **38**(3): 105-110.
Yan M J, Zhang G H, Xu W D. Assessment on groundwater in Shijiazhuang [J]. *Northwestern Geology*, 2005, **38**(3): 105-110.
- [24] Gogu R C, Dassargues A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index Methods [J]. *Environmental Geology*, 2000, **39**(6): 549-559.
- [25] 钟佐荣. 地下水防污性能评价方法探讨 [J]. *地学前缘*, 2005, **12**(S1): 3-13.
Zhong Z S. A discussion of groundwater vulnerability assessment methods [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, **12**(S1): 3-13.
- [26] Roselló M J P, Martínez J M V, Navarro B A. Vulnerability of human environment to risk: case of groundwater contamination risk [J]. *Environment International*, 2009, **35**(2): 325-335.
- [27] 王红娜, 何江涛, 马文洁, 等. 两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 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.
- [28] 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.
- [29] Al-Adamat R A N, Foster I D L, Baban S M J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC [J]. *Applied Geography*, 2003, **23**(4): 303-324.
- [30] 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 a modified DRASTIC approach [J]. *Environmental Management*, 2000, **25**(3): 337-345.
- [31] 环境保护部. 地下水污染防治区划分工作指南 [S]. 北京: 环境保护部, 2014.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)