

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

**2012**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH<sub>4</sub>浓度及变化特征 ..... 方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳(2917)

我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源 ..... 李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙(2924)

2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析 ..... 李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海(2932)

厦门市冬春季灰霾期间大气PM<sub>10</sub>中多环芳烃的污染特征及来源分析 ..... 钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红(2939)

气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用 ..... 王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J(2946)

松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征 ..... 张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超(2953)

河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究 ..... 赵亚娟,龚巍巍,栾胜基(2960)

印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选 ..... 马英歌(2967)

烹调油烟中挥发性有机物的排放初探 ..... 何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,周爱佳(2973)

生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究 ..... 胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟(2979)

分期布液生物滴滤床净化H<sub>2</sub>S废气性能研究 ..... 刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪(2987)

粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究 ..... 孟阳,王书肖(2993)

太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价 ..... 刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁(3000)

巢湖水质与流域农业投入的关联性研究 ..... 张燕,高翔,张洪(3009)

巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性 ..... 李如忠,李峰,周爱佳(3014)

巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价 ..... 刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉(3024)

巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性 ..... 陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼(3031)

丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究 ..... 雷沛,张洪,单保庆(3038)

水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响 ..... 刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤(3046)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究 ..... 杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波(3051)

江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析 ..... 刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功(3057)

太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价 ..... 甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩(3064)

南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究 ..... 刘静,路风,杨延钊,徐娜,王田妮(3070)

珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系 ..... 何洪威,周达诚,王保强,梁艳红(3076)

东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价 ..... 王若师,许秋瑾,张娴,魏群山,颜昌宙(3083)

深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究 ..... 孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉(3089)

福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响 ..... 高文华,杜永芬,王丹丹,高抒(3097)

渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨 ..... 蔡文倩,刘录三,乔飞,林尚璇,周娟(3104)

地下水污染防治区划体系构建研究 ..... 王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(3110)

北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析 ..... 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(3117)

川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的存储和运移 ..... 杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风(3124)

改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 ..... 董锡臻,石宝友,解岳,王东升(3132)

水溶液中臭氧和溴离子的反应研究 ..... 俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇(3139)

HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布 ..... 张晗,董秉直(3144)

不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC<sub>s</sub>)产生机制研究 ..... 卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才(3152)

不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响 ..... 况焯,周琰,王清萍,陈祖亮(3160)

多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水 ..... 李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶(3167)

三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究 ..... 徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮(3172)

改性花生壳对水中镉的动态吸附研究 ..... 龙腾,易筱筠,党志(3177)

硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能 ..... 王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军(3182)

海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型 ..... 罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰(3189)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复 ..... 张著,高大文,袁向娟,勾倩倩(3197)

生物表面活性剂强化污泥水解的研究 ..... 易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平(3202)

厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定 ..... 刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波(3208)

阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究 ..... 李绍峰,朱静,李铁晶(3214)

农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究 ..... 任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明(3220)

糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定 ..... 李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云(3228)

餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析 ..... 刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕(3236)

共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究 ..... 吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳(3241)

*Geobacter sulfurreducens*对汞的甲基化及其影响因素研究 ..... 邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳(3247)

单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应 ..... 武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷(3253)

金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价 ..... 杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新(3261)

环境激素氧氟菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响 ..... 董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵(3266)

地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究 ..... 金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳(3272)

焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征 ..... 刘敬勇,孙水裕(3279)

城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例 ..... 于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞(3288)

NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析 ..... 连静,刘俊新(3295)

《环境科学》征订启事(3037) 《环境科学》征稿简则(3151) 信息(2999,3030,3096,3227)

# 地下水污染防治区划体系构建研究

王俊杰, 何江涛\*, 陆燕, 刘丽雅, 张小亮

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

**摘要:** 地下水污染防治区划是地下水污染地质调查评价工作的一项重要内容, 能够为制定和实施地下水污染防治规划提供依据. 本研究从与地下水污染源及含水层相关的本质角度及外在的社会经济角度、政策角度综合考虑, 将地下水污染风险评估、地下水价值、地下水源保护区划分利用层次分析法及相应的叠加原则进行耦合, 构建了一套地下水污染防控区划体系, 并借助 GIS 技术进行相关的数据处理及区划结果的可视化表达. 北京市平原区地下水防治区划实例应用研究结果表明, 最终的防治区划分级图能够较好地反映出研究区域地下水防治的轻重缓急, 符合实际情况, 对下一步实际预防、监管措施的制定与实施可以起到指导作用. 此外, 由于该体系构成因素的动态性特征, 建议开展关于区划更新频率的分析.

**关键词:** 地下水污染防治区划; 地下水污染风险; 地下水污染源危害性; 地下水固有脆弱性; 地下水价值; 地下水源保护区  
**中图分类号:** X523 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)09-3110-07

## Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System

WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, LIU Li-ya, ZHANG Xiao-liang

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

**Abstract:** Groundwater contamination prevention mapping is an important component of groundwater contamination geological survey and assessment work, which could provide the basis for making and implementing groundwater contamination prevention planning. A groundwater contamination prevention mapping system was constructed in view of the synthetic consideration on nature perspective derived from groundwater contamination sources and aquifer itself, social-economic perspective, policy perspective derived from outside. During the system construction process, analytic hierarchy process and relevant overlaying principles were used to couple groundwater contamination risk assessment, groundwater value as well as wellhead protection area zoning. Data processing and visualization of mapping results were achieved in the GIS environment. The research on groundwater contamination prevention mapping in Beijing Plain indicated that the final groundwater prevention map was in accordance with the actual conditions and well reflected the priorities of groundwater prevention, which could play a guidance role in designing and implementing further practical prevention and supervision measures. Besides, because of the dynamical properties of the system components, it was suggested to analyze the update frequency of the mapping.

**Key words:** groundwater contamination prevention; groundwater contamination risk; harmfulness of groundwater contamination source; intrinsic vulnerability of groundwater; groundwater value; wellhead protection area

地下水污染防治区划是地下水污染地质调查评价工作的一项重要内容, 其目的是保护地下水资源, 为制定和实施地下水污染防治规划提供依据<sup>[1]</sup>. 文献[2]明确提出“要抓紧开展地下水污染状况调查和评估, 划定地下水污染治理区、防控区和一般保护区”的要求. 实施有针对性的预防及监管措施有利于降低地下水污染概率. 作为先导, 构建有效的地下水污染防治区划, 对实际措施的制定与实施具有十分重要的意义<sup>[3-5]</sup>.

目前, 地下水污染防治区划并未形成明确概念. 王焰新等<sup>[6]</sup>认为地下水污染防治区划是基于一定的调查与原则, 在评价地下水现实和潜在利用价值、含水层遭受污染的脆弱性、土地利用和污染源类型、分布来确定污染荷载的风险性、以及根据地下水的不同使用功能来确定污染危害性的基础上开展

的区划. 其中地下水功能评价和地下水脆弱性评价是地下水污染防治区划的基础. 文献[1]指出, 地下水污染防治区划应在综合分析调查区地下水系统防污染性能, 地下水质量与污染现状、地下水资源可开采量及开发利用的基础上, 参考土地利用分区、污染源分布及社会经济发展规划, 完成地下水污染防治分区. 本研究认为地下水污染防治区划是针对地下水污染问题, 从污染事件发生的本质角度、地下水开采利用的社会经济角度及现阶段实施地下水保护措施的政策角度综合开展的地下水评价.

现阶段针对地下水污染相关问题开展的单项研

收稿日期: 2011-11-03; 修订日期: 2012-02-10

基金项目: 环保公益性行业科研项目(200909038-1)

作者简介: 王俊杰(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为地下水环境, E-mail: wjj198635@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: jtthe@cugb.edu.cn

研究工作较多,综合研究工作较少. 单项研究工作包括地下水脆弱性评价研究<sup>[7,8]</sup>、地下水污染源评价研究<sup>[9~11]</sup>、地下水价值研究<sup>[9, 11~13]</sup>、地下水水源保护区划分研究<sup>[14~16]</sup>等. 上述单项研究工作仅针对地下水污染问题的单一方面,存在各自的研究侧重点. 如地下水脆弱性研究(包括固有脆弱性及特殊脆弱性)侧重对研究区域自身水文地质条件抵御外来污染物能力的定性或定量描述,地下水污染源研究侧重地表污染源及人为活动造成地下水污染的危害性的定性或定量描述. 上述2种研究基于含水层及污染源的本质特征,均是针对地下水潜在污染发生过程的评价. 地下水价值的相关研究是从地下水开采利用的社会经济角度进行地下水评估. 作为现阶段必不可少的政策性研究,地下水水源保护区划分受限于水源尺度范围<sup>[17]</sup>及其保护区划分的目的,这对于开展城市尺度或者更大范围区域尺度的相关研究是不够的. 综合研究工作包括地下水脆弱性与地下水污染源相结合的地下水污染风险分析<sup>[11, 18, 19]</sup>、结合地下水脆弱性及地下水水源保护区划分的综合研究<sup>[15, 16]</sup>或将上述单项研究相结合开展的区划研究<sup>[9, 20]</sup>等. 大多数综合研究的出发角度不够全面,容易忽略地下水污染问题基于社会经济角度、政策角度的考虑.

地下水污染防治区划体系致力于上述问题的综合研究. 从本质角度(地下水固有脆弱性与地表污染源危害性)、社会经济角度(地下水价值)、政策角度(地下水水源保护区划分)这3个不同角度构建地下水污染防治区划体系,汇集单项研究取得的成果,并作为地下水污染相关的预防、监管措施制定与实施的依据.

## 1 体系构建

本研究提出的地下水污染防治区划要素构成如图1所示,由基础层(地表污染源危害性、地下水固有脆弱性、含水层富水性、地下水水质)、中间层(地下水污染风险、地下水水源保护区、地下水价值)、目标层(地下水污染防治区划)这3个评价层次组成.

### 1.1 体系构成要素解析

#### 1.1.1 地下水污染风险

地下水污染事件的发生是地表污染源与含水层二者相互作用的结果<sup>[18, 21, 22]</sup>. 地下水污染风险评价应从研究区域所包括的地表污染源及自身的水文地质条件着手.

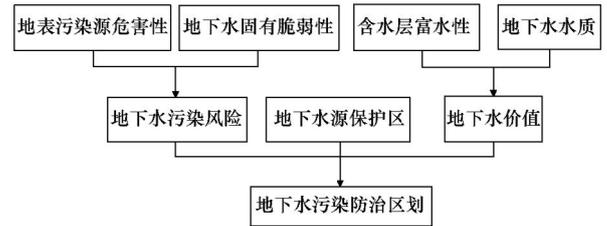


图1 地下水污染防治区划体系构成示意

Fig. 1 Sketch map of groundwater contamination prevention

地下水污染源危害性分级是较为常见的污染源评价方式. 早在20世纪60年代便有研究者开展了针对特定种类地下水污染源的分级评价工作<sup>[20]</sup>. 然而地表污染源种类极多,仅仅开展针对特定种类污染源的分级评价工作对于城市尺度或者范围更大的区域尺度是远远不够的,需要建立针对不同种类污染源的分级评价体系. 基于同一评价体系对不同种类污染源进行分级评价的研究源于20世纪70年代末. 受限于不同类型地下水污染风险源的规模、所属特征污染物及其排放方式等问题,以及实际开展评价工作所需巨大的信息量、不同污染源的信息丰富程度是否一致等问题,均增加了不同类型地下水污染源评价的难度<sup>[23]</sup>. 以往的地下水污染风险源评价以定性或者半定量方法为主,存在较大人为主观性,通用性较差<sup>[24]</sup>. 本研究使用基于地下水污染源解析的定量评价方法<sup>[24]</sup>. 该方法对地下水污染源所属的特征污染物及其对应排放量进行解析,计算出地下水污染源的危害性,在此基础上进行地下水污染源的分级.

地下水脆弱性是刻画特定水文地质条件自身抵抗外来污染能力的通用方法. 评价方法分为地下水固有脆弱性评价与特殊脆弱性评价两种. 具体评价方法分类包括迭置指数法、过程数学模拟法,统计方法、模糊数学方法等<sup>[7, 25, 26]</sup>. DRASTIC评价方法<sup>[27]</sup>属于迭置指数法的一种,尽管存在一定的主观性问题及参数设置问题,但仍是目前应用最为广泛的地下水固有脆弱性评价方法. 相较于其他评价方法,其优点在于较低的数据依赖性及方法的不确定性<sup>[11, 17, 28]</sup>. DRASTIC评价方法表征为:

$$V = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

式中 $D$ 、 $R$ 、 $A$ 、 $S$ 、 $T$ 、 $I$ 、 $C$ 这7个字母代表该方法的7个评价因素,分别为水位埋深、净补给量、含水层介质、土壤介质、地形坡度、包气带影响、含水层水力传导系数;下标 $r$ 、 $w$ 分别为各因素对应的评分

值及权重;  $V$  代表最终的地下水固有脆弱性评价结果。

本研究使用 DRASTIC 方法进行研究区域的地下水固有脆弱性评价。

需要注意的是,地表污染源危害性与地下水固有脆弱性存在动态性特征。地表污染源一直处在人类活动的影响下,特征污染物及其对应排放量随时会发生变化。而地下水固有脆弱性则会受到水位埋深、净补给量、包气带厚度等变化的影响。相较而言,地表污染源的动态特征更为明显。由于受控于污染源及一些水文地质参数的动态变化,地下水污染风险的评估需要在获取变化因素的基础上及时进行更新。而更新之前应确定参数的变化是否能够对地下水污染风险评价结果及整个区划的结果造成显著影响。因此,需要对体系构成要素进行敏感性分析并结合实际动态资料进行计算。然后在此基础上提出针对某区域区划评估的合理更新频率。

### 1.1.2 地下水价值

地下水价值是从社会经济层面对地下水的开采使用情况进行衡量。有研究指出认清地下水的价值极其重要<sup>[12, 20]</sup>。虽然没有形成具体的定量表征方法,但即使一个部分的或者不精确的衡量地下水价值的方法同样有利于决策者理解改变相应的政策及管理措施会对地下水价值造成的影响。地下水价值由开采价值及原位价值组成。其中开采价值源于市政、工商业、农业等对地下水的需求;原位价值是指含水层对周期性开采地下水引起一系列影响的缓

冲能力,如因开采地下水引起的地质灾害,污染物扩散、栖息地及生物多样性破坏等。

地下水价值体现为含水层的富水性及地下水的水质两方面<sup>[9, 11, 29]</sup>。因此,本研究从含水层富水性及地下水水质两方面展开地下水价值的评价。利用单井出水量来衡量含水层的富水性,通过地下水水质类别划分来区别地下水水质差异。

### 1.1.3 地下水水源保护区

地下水水源保护区划分是决策者实施地下水管理及保护措施的重要环节<sup>[30]</sup>。将其纳入本区划体系,用于表征当前的政策实施与管理。地下水水源保护区的划分,对防止地下水源地污染,保护水源地环境质量起到了重要作用<sup>[14~16]</sup>。纳入地下水水源保护区的区域,在地下水污染防治区划构建过程中赋予的级别值高于其他区域。

## 1.2 构成要素叠加方法解析

### 1.2.1 叠加原则

体系构建过程中需要进行 3 处构成要素的叠加耦合,包括中间层的地下水污染风险评价、地下水价值及目标层的地下水污染防治区划。

地表污染源危害性评价及地下水固有脆弱性评价的叠加构成地下水污染风险评价。叠加过程遵循“择优原则”,即:假设地表污染源危害性与地下水固有脆弱性均分为 1~5 五个等级(表 1),数值越小代表地表污染源危害性越低或者地下水固有防污性能越好。二者叠加,地下水污染风险由数值小(级别低)的一方决定。

表 1 地下水污染风险等级叠加规则

Table 1 Overlaying principles of groundwater contamination risk rating

地下水污染风险	地下水固有脆弱性分级					
	差(5)	较差(4)	中等(3)	较好(2)	好(1)	
地表污染源危害性分级	高(5)	高	较高	中等	较低	低
	较高(4)	较高	较高	中等	较低	低
	中等(3)	中等	中等	中等	较低	低
	较低(2)	较低	较低	较低	较低	低
	低(1)	低	低	低	低	低

地下水价值由含水层富水性及地下水水质叠加而成,叠加过程遵循如下公式:

$$E = A_1 \times W_1 + A_2 \times W_2 \quad (2)$$

式中, $E$  代表地下水价值, $A_1$  代表含水层富水性评价参数, $A_2$  代表地下水水质评价参数, $W_1$ 、 $W_2$  分别代表  $A_1$  及  $A_2$  的权重值。该权重值利用层次分析法计算<sup>[31~33]</sup>,认为  $A_1$  及  $A_2$  同等重要,并依此构建判断矩阵,计算结果显示  $W_1$ 、 $W_2$  均为 0.5。

地下水污染风险评价、地下水价值、地下水水源

保护区划分三者叠加构成地下水污染防治区划,叠加过程遵循如下公式:

$$Z = C \times W_C + V \times W_V + P \times W_P \quad (3)$$

式中, $Z$  代表最终的地下水污染风险防治区划值,值越大代表应该得到的防治级别越高; $C$ 、 $V$ 、 $P$  代表 3 个构成要素,分别为地下水污染风险评价、地下水价值、地下水水源保护区划分。 $W_C$ 、 $W_V$ 、 $W_P$  分别代表  $C$ 、 $V$ 、 $P$  的叠加权重值。 $W_C$ 、 $W_V$ 、 $W_P$  的值同样采用层次分析法确定。认为  $C$  比  $V$  微小重要, $C$

比  $P$  稍微重要, 而  $V$ 、 $P$  两者相比同等重要, 并依此构建判断矩阵(判断矩阵一致性值为 0.017 6, 通过一致性检验), 计算得到  $W_C$ 、 $W_V$ 、 $W_P$  值分别为 0.549 9、0.240 2、0.209 8。

### 1.2.2 可视化表达

体系构建过程中借助 GIS 技术实现构建体系的可视化表达<sup>[29, 34~36]</sup>。借助 Arcgis 9.3 软件的 Spatial Analysis 模块, 将研究区域剖分成  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的单位公里网格, 并以此为单位, 利用上述叠加原则对体系构建要素进行空间运算, 并最终实现防治区划体系的可视化表达。

## 2 案例分析

将本体系应用于北京市平原区(不含延庆)的地下水污染防治区划建设。首先利用北京市平原区地表污染源危害性分级(图 2)<sup>[24]</sup>与地下水固有脆弱性分级(图 3)进行北京市平原区地下水污染风险评估。地表污染源危害性与地下水固有脆弱性均分为 5 级, 遵循上述择优原则, 二者依据表 1 进行叠加运算, 得到地下水污染风险分级图(图 4)。其中, 图 2 进行量化表征的地表污染源种类包括北京市平原区的加油站及油库、垃圾场、工业区、居民区、农业区、地表排污河 6 类, 相关研究见文献[23]。图 3 是利用 DRASTIC 方法评价得到的北京市平原区潜水含水层固有脆弱性评价结果, 本文不做详述。图 4 显示北京市平原区污染风险最高的区域(图中方形圈中区域)位于北京市城区西南近郊。该区域位于永定河出山口冲洪积扇顶部, 防污性能很差。此外, 该区域是北京市的重要工业基地, 且非正规垃圾填埋场众多。这些因素的共同作用致使该区域地下水

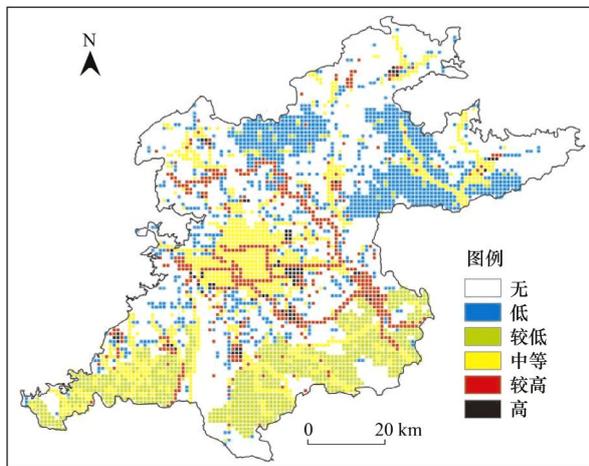


图 2 北京市平原区地下水污染源危害性分级

Fig. 2 Harmfulness map of groundwater contamination sources in Beijing Plain

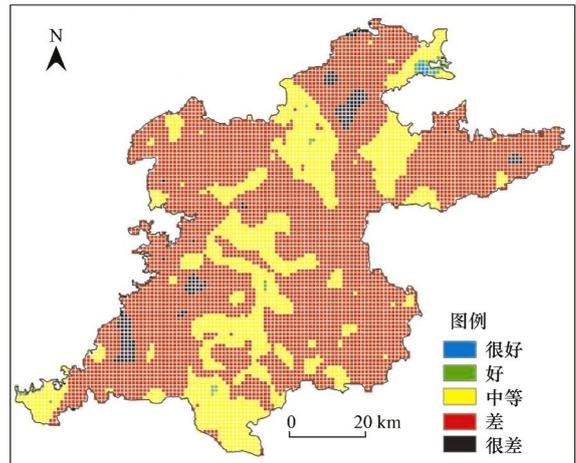


图 3 北京市平原区固有脆弱性分级

Fig. 3 Intrinsic vulnerability map of Beijing Plain

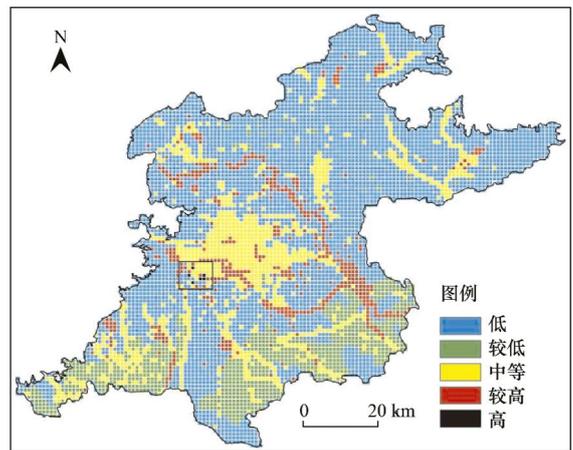


图 4 北京市平原区地下水污染风险分级

Fig. 4 Groundwater contamination risk map of Beijing Plain

污染风险最高。污染风险较高的大部分区域位于平原区温榆河、凉水河所流经区域, 这两条河是北京市主要排污河流。其余污染风险较高的区域所处位置为工业区、垃圾场等。污染风险中等的大部分区域位于北京城八区。南部平原区是主要的农业区, 污染风险级别高于北部大部分区域。

其次将北京市平原区含水层富水性分级(图 5)与地下水水质分级(图 6)<sup>[37]</sup>利用公式(2)进行叠加运算, 并依据表 2 进行分级, 得到北京市平原区地下水价值分级图(图 7)。图 7 表明北京市平原区西部较于东部, 北部较于南边, 地下水价值相对较高。这是由含水层富水性及地下水水质共同决定的。其中, 对含水层富水性进行分级时, 将富水性  $> 5000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  的区域赋值为 4,  $3000 \sim 5000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  的赋值为 3, 并依次降低到 1; 根据水质类别, 水质分级从优良到极差赋值依次为 4 ~ 1。

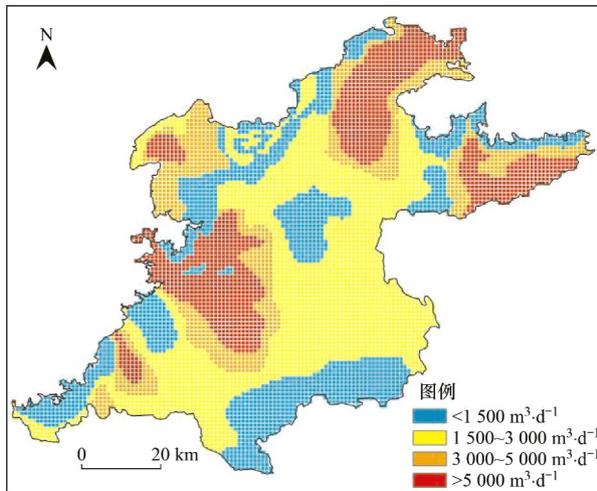


图 5 北京市平原区含水层富水性分级图

Fig. 5 Groundwater abundance map of Beijing Plain aquifer

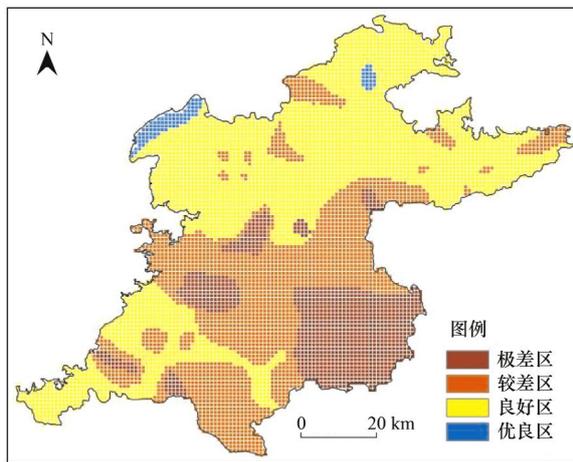


图 6 北京市平原区浅层地下水水质分级

Fig. 6 Shallow groundwater quality of Beijing Plain

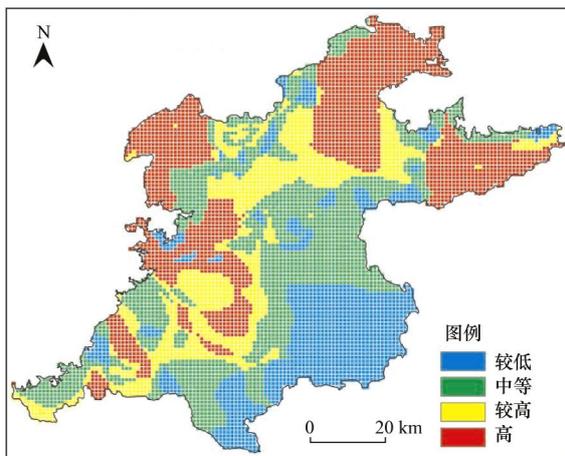


图 7 北京市平原区地下水价值分级

Fig. 7 Groundwater value of Beijing Plain

在对北京市平原区地下水污染风险及地下水价值完成分级评价之后,结合北京市平原区地下水源

表 2 地下水价值分级表

Table 2 Groundwater value rating				
综合指数值	4~2.5	2.5~2	2~1.5	1.5~1
级别	高	较高	中等	较低

保护区划分(图 8,北京市环境保护局于 2000 年完成),依据表 3 进行 3 种叠加要素分级的赋值,然后依据公式(3)进行叠加运算,在得到北京市平原区地下水污染防治区划评分值的基础上,依据表 4 进行分级,最终得到北京市平原区地下水污染防治区划图(图 9). 图 9 表明北京市平原区防治级别最高(三级)的大部分区域位于城八区西部、平原区北部及东北部,这些区域地下水污染风险等级(图 4)、地下水价值等级(图 7)及地下水源保护区等级(图 8)均处于较高级别;防治级别次之(二级)的大部

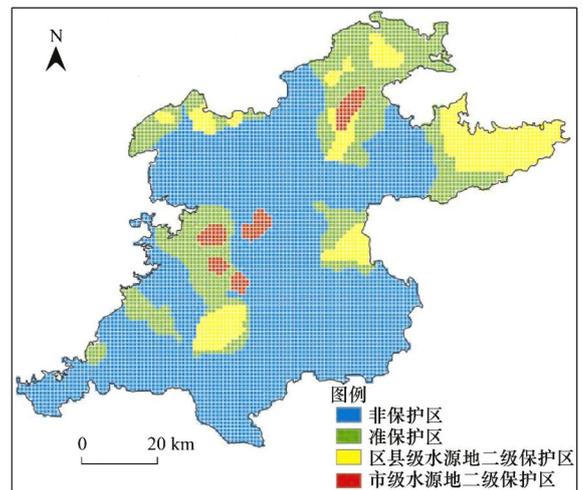


图 8 北京市平原区地下水源保护区等级划分

Fig. 8 Wellhead protection area map of Beijing Plain

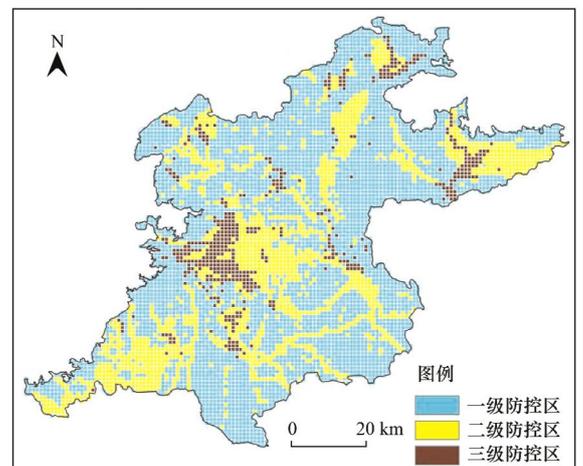


图 9 北京市平原区地下水污染防治区划

Fig. 9 Groundwater contamination prevention map of Beijing Plain

表 3 地下水污染防治区划要素分级量化表

Table 3 Element rating quantification of groundwater contamination prevention

地下水污染风险	分值	地下水价值	分值	水源保护区	分值
高,较高	4	高	4	市级水源地二级保护区	4
中等	3	较高	3	区县级水源地二级保护区	3
较低	2	中等	2	准保护区	2
低	1	较低	1	非保护区	1

表 4 北京市地下水防治区划分级表

Table 4 Rating of groundwater contamination prevention

综合指数值	1~2	2~3	3~4
防治级别	一级防治区	二级防治区	三级防治区

分区域位于平原区的中部、西南部、东北部,在图 4、7、8 中均能有所体现。总体上看,北京市平原区地下水污染防治区划图能够从本质角度、社会经济角度和政策角度综合反映出该区域目前的地下水状况,符合实际情况,能够为下一步实际相关工作的开展提供依据。

### 3 结论

地下水污染防治区划体系的构建应从污染源自身造成污染及含水层自身抵御污染的本质层面、地下水自身蕴含价值的社会经济层面及现阶段制定与实施的政策、法规等政策层面进行综合考虑。地下水污染风险评价、地下水价值及地下水源保护区划分则是上述三个层面的量化表征。体系构建过程中,借助 GIS 技术,以层次分析法确定权重及建立的相应叠加原则对构成要素的耦合起到了至关重要的作用。本体系在北京市平原区地下水的应用表明区划分级结果能够综合反映出北京市平原区地下水在上述本质层面、社会经济层面及政策层面的研究成果,符合现实情况,对下一步实际预防、监管措施的制定与实施可以起到指导作用。此外,由于构成要素的动态性特征,开展构成要素的敏感性分析并结合实际情况确定区划的更新频率,对本体系的完善及推广具有重要意义。

#### 参考文献:

[ 1 ] DD 2008-01, 地下水污染地质调查评价规范[S].  
 [ 2 ] 杨曦. 国务院通过地下水污染防治规划 5 年污水治理投万亿 [ EB/OL ]. [http://finance. people. com. cn/stock/GB/15503551. html](http://finance.people.com.cn/stock/GB/15503551.html), 2011. 8-25.  
 [ 3 ] Johansson P O, Scharp C, Alveteg T, *et al.* Framework for ground water protection-the managua ground water system as an example[J]. *Ground Water*, 1999, **37**(2): 204-213.  
 [ 4 ] Foster S S D, Hirata R, Gomes D, *et al.* Groundwater quality protection: A guide for water utilities, municipal authorities, and

environment agencies [ M ]. Washington D C: World Bank, 2002. 2-12.

- [ 5 ] Schmoll O, Howard G, Chilton J, *et al.* Protecting groundwater for health: Managing the quality of drinking-water sources [ M ]. London: IWA Publishing, 2006. 3-16.  
 [ 6 ] 王焰新. 地下水污染与防治 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 2007. 278-279.  
 [ 7 ] 张昕, 蒋晓东, 张龙. 地下水脆弱性评价方法与研究进展 [ J ]. *地质与资源*, 2010, **19**(3): 253-258.  
 [ 8 ] 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.  
 [ 9 ] 江剑, 董殿伟, 杨冠宁, 等. 北京市海淀区地下水污染风险性评价 [ J ]. *城市地质*, 2010, **5**(2): 14-18.  
 [ 10 ] Mimi Z A, Assi A. Intrinsic vulnerability, hazard and risk mapping for karst aquifers: A case study [ J ]. *Journal of Hydrology*, 2009, **364**(3-4): 298-310.  
 [ 11 ] Saidi S, Bouri S, Ben Dhia H, *et al.* Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to souassi aquifer, tunisian sahel [ J ]. *Agricultural Water Management*, 2011, **98**(10): 1671-1682.  
 [ 12 ] Committee on Valuing Ground Water, National Research Council. Valuing ground water: Economic concepts and approaches [ M ]. Washington, DC, USA: National Academy Press, 1997. 1-5.  
 [ 13 ] 姜文来. 水资源价值论 [ M ]. 北京: 科学出版社, 1998. 234-236.  
 [ 14 ] 张丽君, 曹红, 马颖. 地下水源保护区划分方法的探讨 [ J ]. *辽宁城乡环境科技*, 2006, **26**(2): 9-10.  
 [ 15 ] 张保祥. 黄河流域地下水脆弱性评价与水源保护区划分研究 [ D ]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006. 20-21.  
 [ 16 ] Exposito J L, Esteller M V, Paredes J, *et al.* Groundwater protection using vulnerability maps and wellhead protection area (whpa): a case study in mexico [ J ]. *Water Resources Management*, 2010, **24**(15): 4219-4236.  
 [ 17 ] Fadlilmawla A A, Fayad M, El-Gamily H, *et al.* A land surface zoning approach based on three-component risk criteria for groundwater quality protection [ J ]. *Water Resources Management*, 2011, **25**(6): 1677-1697.  
 [ 18 ] 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.  
 [ 19 ] Zwahlen F. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, final report (cost action 620) [ R ]. Brussel: European Commission Directorate-General XII Science Research and Development, 2003. 113-120.

- [20] Zaporozec A. Groundwater contamination inventory a methodological guide [R]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2002. 23-37.
- [21] Nobre R C M, Rotunno O C, 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] 张丽君. 地下水脆弱性和风险性评价研究进展综述 [J]. *水文地质工程地质*, 2006, **33**(6): 113-119.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展 [J]. *世界地质*, 2002, **21**(1): 33-38.
- [26] 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.
- [27] Aller L, Lehr J H, Petty R, *et al.* Drastic: A standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings [R]. Chicago: U. S. Environmental Protection Agency, 1987. 35-62.
- [28] 钟佐燊. 地下水防污性能评价方法探讨 [J]. *地学前缘*, 2005, **12**(S1): 3-11.
- [29] Saidi S, Bouri S, Ben Dhia H. Groundwater vulnerability and risk mapping of the hajeb-jelma aquifer (central tunisia) using a gis-based drastic model [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, **59**(7): 1579-1588.
- [30] HJ/T 338-2007, 饮用水水源保护区划分技术规范 [S].
- [31] Saaty R W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used [J]. *Mathematical Modelling*, 1987, **9**(3-5): 161-176.
- [32] 王玉华. 江苏省重要生态功能保护区区划研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2008. 5-6.
- [33] Sener 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.
- [34] 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.
- [35] Posen P, Lovett A, Hiscock K, *et al.* Incorporating variations in pesticide catabolic activity into a gis-based groundwater risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **367**(2-3): 641-652.
- [36] Boughriba M, Barkaoui A E, Zarhloule Y, *et al.* Groundwater vulnerability and risk mapping of the Angad transboundary aquifer using DRASTIC index method in GIS environment [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2010, **3**(2): 207-220.
- [37] 北京市地质调查研究院. 北京城市地质图集 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. 17-18, 37-38.

## CONTENTS

CH <sub>4</sub> Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China .....	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources .....	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games .....	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM <sub>10</sub> -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen .....	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split .....	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area .....	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households .....	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories .....	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils .....	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF .....	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Tricking Filter for H <sub>2</sub> S Gas Treatment .....	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization .....	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Chaohu and Assessment of Its Applicability .....	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin .....	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake .....	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification .....	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake .....	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir .....	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China .....	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province .....	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu .....	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin .....	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water .....	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin .....	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen .....	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast .....	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay .....	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System .....	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain .....	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan .....	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons .....	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O <sub>3</sub> with Bromide Ion in Aqueous Solution .....	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors .....	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds .....	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values .....	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor .....	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor .....	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells .....	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides .....	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter .....	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery .....	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant .....	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria .....	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium .....	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting .....	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash .....	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste .....	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes .....	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors .....	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress .....	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities .....	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i> .....	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash .....	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature .....	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen .....	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants .....	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

# 《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 9 Sep. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮局	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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人