

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
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	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林允静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

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

王红娜¹, 何江涛^{1*}, 马文洁², 许真¹

(1. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 南昌 330013)

摘要: 地下水污染风险评价对地下水的污染防治区划及合理开采利用地下水资源具有重要意义。目前国际上最具代表性的评价体系包括 UN 体系和 WP 体系。两种体系基础要素均包括地下水固有防污性能、含水层富水性、地下水水质、地下水源保护区和污染负荷, 但是 5 个基础要素的组合方式不同。为探讨两种体系评价结果的差异性及造成差异性的原因, 对北京市平原区地下水分别采用 UN 体系和 WP 体系进行污染风险评价, 将评价结果进行对比分析。结果表明, UN 体系和 WP 体系存在明显差异, 2 种体系的评价等级空间分布趋势相似, 均符合实际情况, 但是同等级覆盖范围差异较大; 并且评价体系构成的层次问题、评价要素的叠加规则及评价过程中运用的分级方法都可能对 UN 体系和 WP 体系的地下水污染风险评价结果造成影响。UN 体系和 WP 体系评价方法都适用于平原区的地下水污染风险评价, 但是 2 种评价体系考虑的侧重点不同。

关键词: 地下水污染风险评价; 地下水保护紧迫性; 污染负荷; 地下水价值

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0186-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.01.024

Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain

WANG Hong-na¹, HE Jiang-tao^{1*}, MA Wen-jie², XU Zhen¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Groundwater contamination risk assessment has important meaning to groundwater contamination prevention planning and groundwater exploitation potentiality. Recently, UN assessment system and WP assessment system have become the focuses of international research. In both systems, the assessment framework and indices were drawn from five aspects: intrinsic vulnerability, aquifer storage, groundwater quality, groundwater resource protection zone and contamination load. But, the five factors were built up in different ways. In order to expound the difference between the UN and WP assessment systems, and explain the main reasons, the UN and WP assessment systems were applied to Beijing Plain, China. The maps constructed from the UN and WP risk assessment systems were compared. The results showed that both kinds of groundwater contamination risk assessment maps were in accordance with the actual conditions and were similar in spatial distribution trends. However, there was quite significant different in the coverage area at the same level. It also revealed that during the system construction process, the structural hierarchy, relevant overlaying principles and classification method might have effects on the groundwater contamination risk assessment map. UN assessment system and WP assessment system were both suitable for groundwater contamination risk assessment of the plain, however, their emphasis was different.

Key words: groundwater contamination risk assessment; groundwater protection urgency; contamination load; groundwater value

地下水污染风险评价对地下水资源合理开采利用及保护管理具有重要意义。Brian 等^[1]指出: 地下水污染风险是指含水层中的地下水由于其上的人类活动而遭受污染到不可接受的水平的可能性。从定义可以看出, 地下水污染风险包含 3 个层次: 一是表征含水层固有特性的含水层本质脆弱性评价, 以反映地下水系统消纳污染物的自净能力, 部分反映污染物达到含水层的速度和质量; 二是表征人类活动和污染源对地下水中污染负荷影响的含水层特殊脆弱性评价, 以反映地下水系统中污染物的数量; 三是表征风险受体可接受水平的受体风险评价, 以

反映地下水污染系统的预期损害性, 即地下水系统价值功能(包括社会服务功能、生态功能等)的变化对地下水污染受体的影响^[2,3]。

目前对地下水防污性能、污染负荷、地下水价值这 3 个方面不同组合方式的研究主要存在两种观点, 一种观点出自于 2002 年联合国教科文组织

收稿日期: 2014-06-17; 修订日期: 2014-08-01

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: 王红娜(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地下水及土壤污染评价、控制与治理, E-mail: WHN061615@163.com

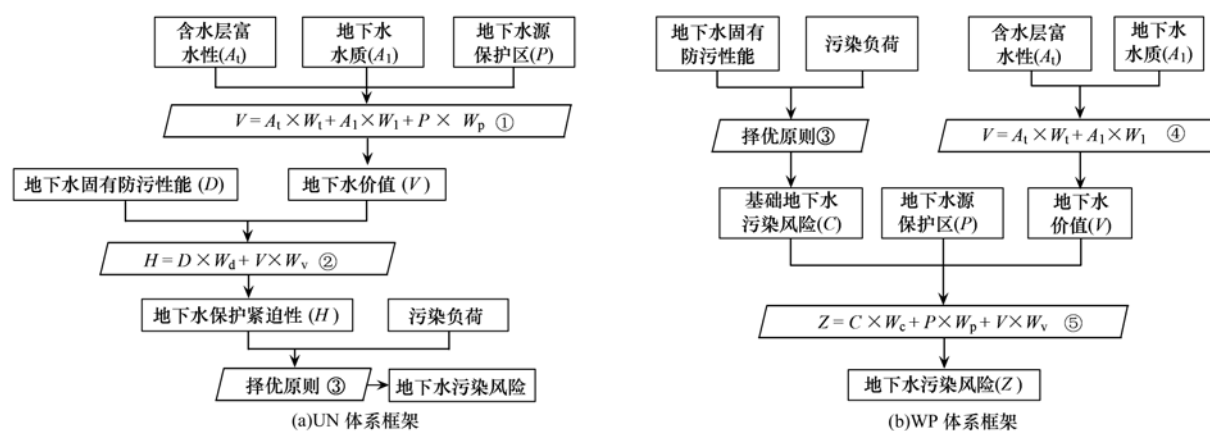
* 通讯联系人, E-mail: jthe@cugb.edu.cn

(UNESCO)发布的导则,该导则指出污染源风险评价由地下水保护紧迫性和污染源耦合得到,而地下水紧迫性是由地下水脆弱性和地下水价值所决定^[4],即地下水污染源的灾害分级代替地下水污染的概率,合并地下水脆弱性图与地下水价值图可取代地下水污染后果^[5~9],本研究将该地下水污染风险评价体系简称为UN体系。另一种观点出自于1988年世界卫生组织(WHO)和泛美卫生组织(PAHO)联合发布的《地下水污染风险评估》,这种观点将地下水防污性能评价同地表污染源负荷耦合在一起用于地下水污染风险评估^[10],即认为污染源负荷风险和含水层固有脆弱性决定了地下水被污染的概率,地下水价值功能决定了地下水一旦被污染,其预期损害的严重性^[11~13],该体系简称为WP体系。

为了研究2种观点对地下水污染风险评价结果的差异及其原因,UN体系与WP体系运用同一套基础数据,分别对北京市平原区地下水污染风险进行评价,将风险评价结果进行对比分析,探讨两种评价体系的差异性,并对造成差异的原因进行分析。

1 两种评价体系框架对比

2种评价体系构成框架如图1所示,UN体系



A_1 : 含水层富水性评价参数, A_1 : 地下水水质评价参数, P : 地下水源保护区评价参数, V : 地下水价值评价参数, D : 地下水固有防污性能评价参数, H : 地下水保护紧迫性评价参数, C : 基础地下水污染风险评价参数, Z : 地下水污染风险评价参数, W_1 、 W_1 、 W_p 、 W_d 、 W_v 分别为 A_1 、 A_1 、 P 、 D 、 V 的权重值, ①②③④⑤为叠加规则

图1 评价体系框架示意

Fig. 1 Framework of the risk assessment system

2 北京市平原区地下水污染风险评价

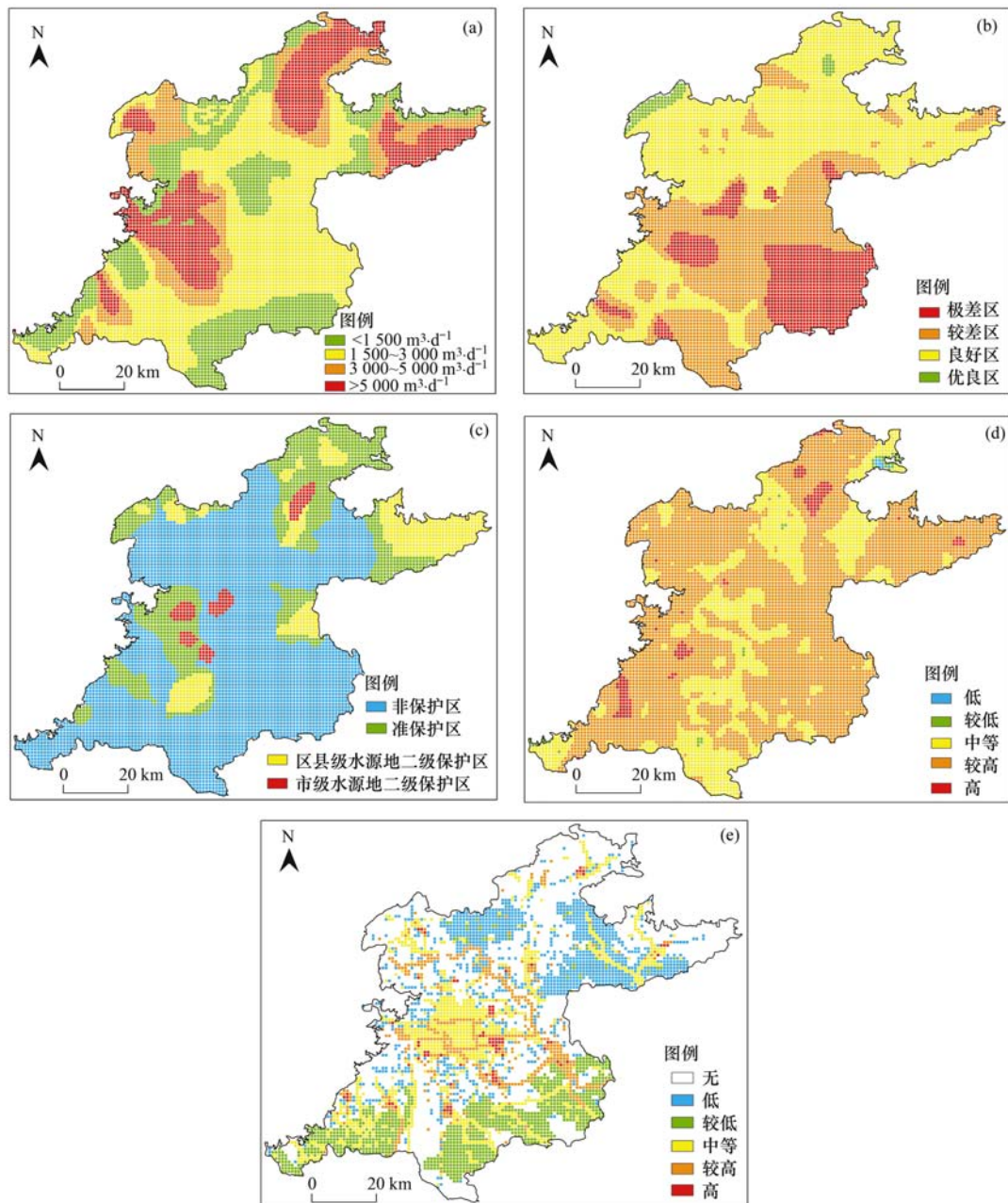
UN体系和WP体系评价过程中借助ArcGIS 9.3软件的Spatial Analyst模块,将北京市平原区(不含延庆)剖分成 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格,并以此为单元,对体系构建要素进行空间运算。北京市平原

由3个层次构成。首先,地下水价值由含水层富水性、地下水水质及地下水源保护区叠加而成^[7,9]。地下水价值主要体现为含水层富水性及地下水水质^[7,11,14],并且地下水源保护区的划分,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^[15~17]。其次,由地下水价值和地下水固有防污性能叠加得到地下水保护紧迫性;最后,将地下水保护紧迫性与人为活动产生的污染负荷叠加得到地下水污染风险。UN体系是将污染物自顶层含水层以上某一位置到达地下含水层系统中某一特定位置的过程和污染负荷结合,是从自然因素和人为因素考虑的。WP体系的地下水污染风险评价由2个层次构成。首先,污染负荷与地下水固有防污性能叠加得到基础地下水污染风险(a basic risk map)^[18],含水层富水性与地下水水质叠加得到地下水价值;其次,基础地下水污染风险、地下水价值和地下水源保护区叠加得到地下水污染风险^[19,20]。WP体系是将污染物由地表入渗穿过包气带这一过程和地下含水层系统结合,是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和地下水自身蕴含价值的社会经济层面考虑的。

区地下水污染风险评价基础要素,主要包括含水层富水性、地下水水质、地下水源保护区、地下水固有防污性能和污染负荷共5个方面,如图2所示。其中,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;地下水源保护区划分是依据饮用水源保护区来划

分^[21]; 利用 DRASTIC 方法评价得到的北京市平原区潜水含水层固有防污性能评价结果^[22]; 对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 类污染源, 基于地下水污

染源解析的定量评价方法, 对 6 类地下水污染源所属的特征污染物属性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负荷的分级^[23,24].



(a) 北京市平原区含水层富水性分级; (b) 北京市平原区浅层地下水水质分级; (c) 北京市平原区地下水水源保护区等级划分; (d) 北京市平原区地下水固有防污性能分级; (e) 北京市平原区污染负荷分级

图 2 北京市平原区基础要素分级^[19]

Fig. 2 Classification of groundwater basic elements in Beijing Plain

2.1 UN 体系风险评价

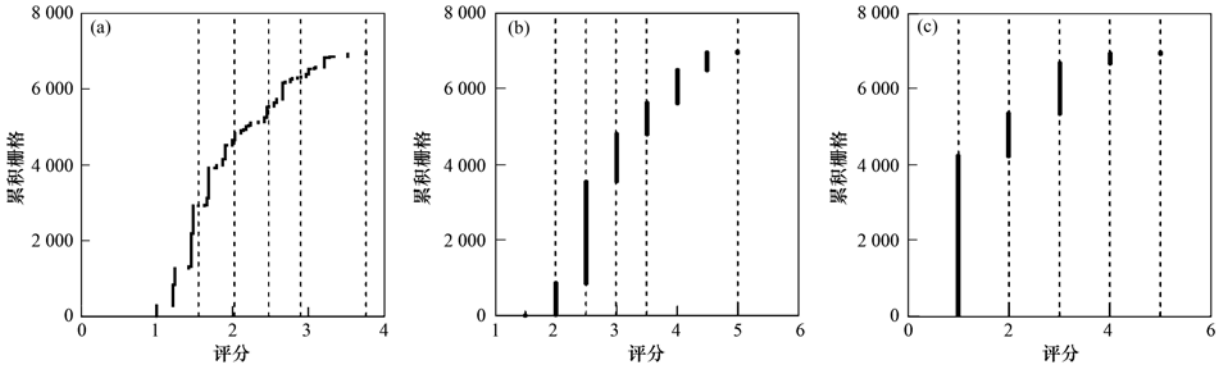
将 UN 体系应用于北京市平原区地下水污染风险评价. 北京市平原区含水层富水性、地下水水质和水源保护区依据公式 $V = A_i \times W_i + A_j \times W_j + P \times W_p$ 进行叠加运算, 利用层次分析法^[25~27]计算权重,

认为水源保护区比地下水水质微小重要, 比含水层富水性稍微重要; 地下水水质与含水层富水性同等重要, 计算得到 W_i 、 W_j 、 W_p 分别为 0.209 8、0.240 2、0.549 9. 在得到北京市平原区地下水价值分值的基础上, 利用 ArcGIS 9.3 软件中的 Natural

Breaks 方法实现等级划分,地下水价值分值分布规律及分界线如图 3(a)所示,进而得到北京市平原区地下水价值分级[图 4(a)]。

北京市平原区地下水固有防污性能与地下水价值依据公式 $H = D \times W_d + V \times W_v$ 进行叠加运算,认为地下水固有防污性能与地下水价值同等重要,计

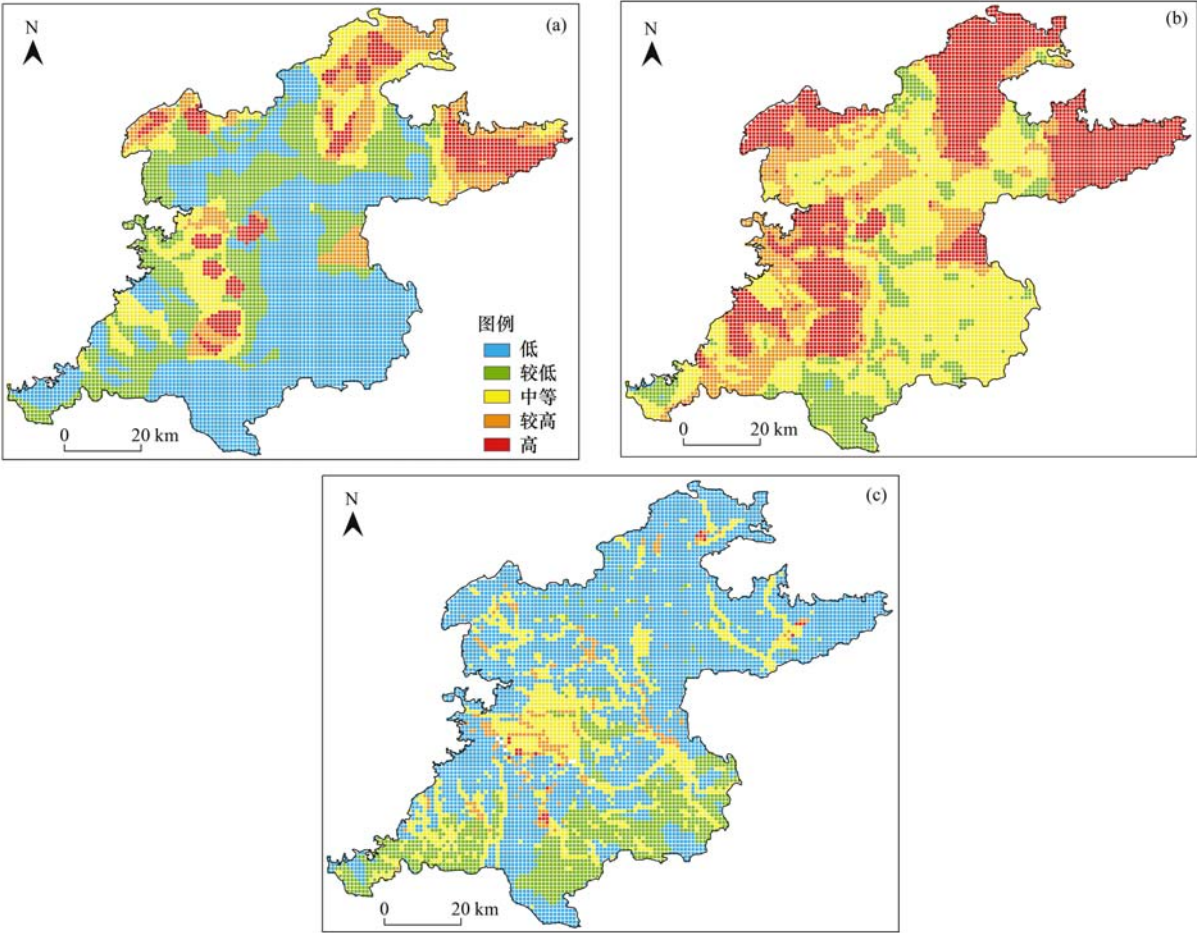
算得到 W_d 、 W_v 值为 0.5、0.5。在得到北京市平原区地下水保护紧迫性分值的基础上,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分,地下水保护紧迫性分值分布规律及分界线如图 3(b)所示,进而得到北京市平原区地下水保护紧迫性分级[图 4(b)]。地下水保护紧迫性分级图表明北京市平原区西部、北部和



(a) 北京市平原区地下水价值; (b) 北京市平原区地下水保护紧迫性; (c) 北京市平原区地下水污染风险

图 3 北京市平原区 UN 体系数据分布

Fig. 3 UN system data distribution of Beijing Plain



(a) 北京市平原区地下水价值分级; (b) 北京市平原区地下水保护紧迫性分级; (c) 北京市平原区地下水污染风险分级

图 4 北京市平原区 UN 体系分级

Fig. 4 UN system maps of Beijing Plain

东北部地下水保护紧迫性高,这些区域地下水价值等级和地下水固有防污性能等级均处于较高级别。

将北京市平原区的地下水保护紧迫性与污染负荷均分为5级,二者依据“择优原则”^[19]进行叠加运算,在得到北京市平原区地下水污染风险分值的基础上,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分,地下水污染风险分值分布规律及分界线如图3(c)所示,进而得到北京市平原区地下水污染风险分级[图4(c)]。

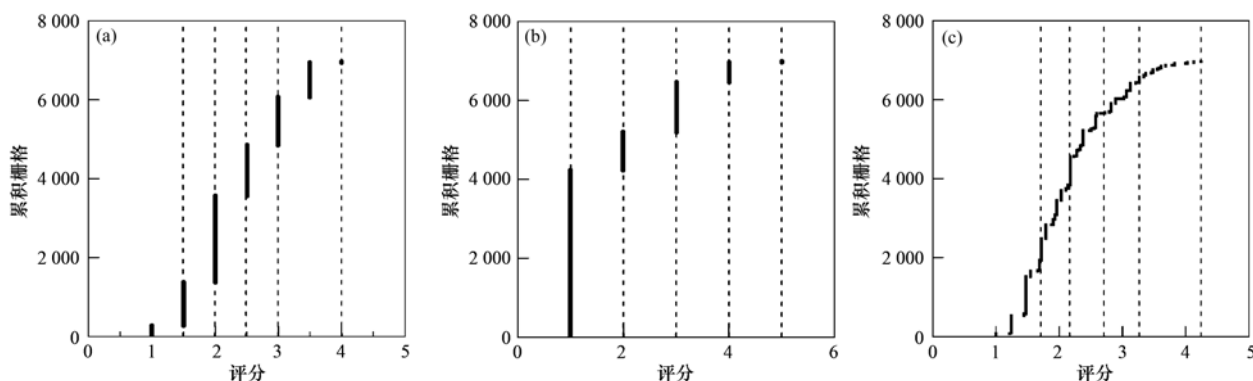
2.2 WP 体系风险评价

将 WP 体系应用于北京市平原区地下水污染风险评价。北京市平原区含水层富水性与地下水水质依据公式 $V = A_1 \times W_1 + A_2 \times W_2$ 进行叠加运算,认为含水层富水性与地下水水质同等重要,计算得到 W_1 、 W_2 值为0.5、0.5。在得到北京市平原区地下水价值分值的基础上,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分,地下水价值分值分布规律及分界线如图5(a)所示,进而得到北京市平原区地下水价值分级

[图6(a)]。

地下水固有防污性能与污染负荷叠加过程采用“择优原则”,在得到北京市平原区基础地下水污染风险分值的基础上,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分,基础地下水污染风险分值分布规律及分界线如图5(b)所示,进而得到北京市平原区基础地下水污染风险分级[图6(b)]。

地下水价值、基础地下水污染风险与地下水水源保护区依据公式 $Z = C \times W_c + P \times W_p + V \times W_v$ 进行叠加,认为基础地下水污染风险比地下水价值微小重要,比地下水水源保护区稍微重要;地下水价值与地下水水源保护区同等重要,计算得到 W_p 、 W_v 、 W_c 分别为0.209 8、0.240 2、0.549 9。在得到北京市平原区地下水污染风险分值的基础上,利用 Natural Breaks 方法实现等级划分,地下水污染风险分值分布规律及分界线如图5(c)所示,进而得到北京市平原区地下水污染风险分级[图6(c)]。



(a) 北京市平原区地下水价值; (b) 北京市平原区基础地下水污染风险; (c) 北京市平原区地下水污染风险

图5 北京市平原区 WP 体系数据分布

Fig. 5 WP system data distribution of Beijing Plain

3 分析与讨论

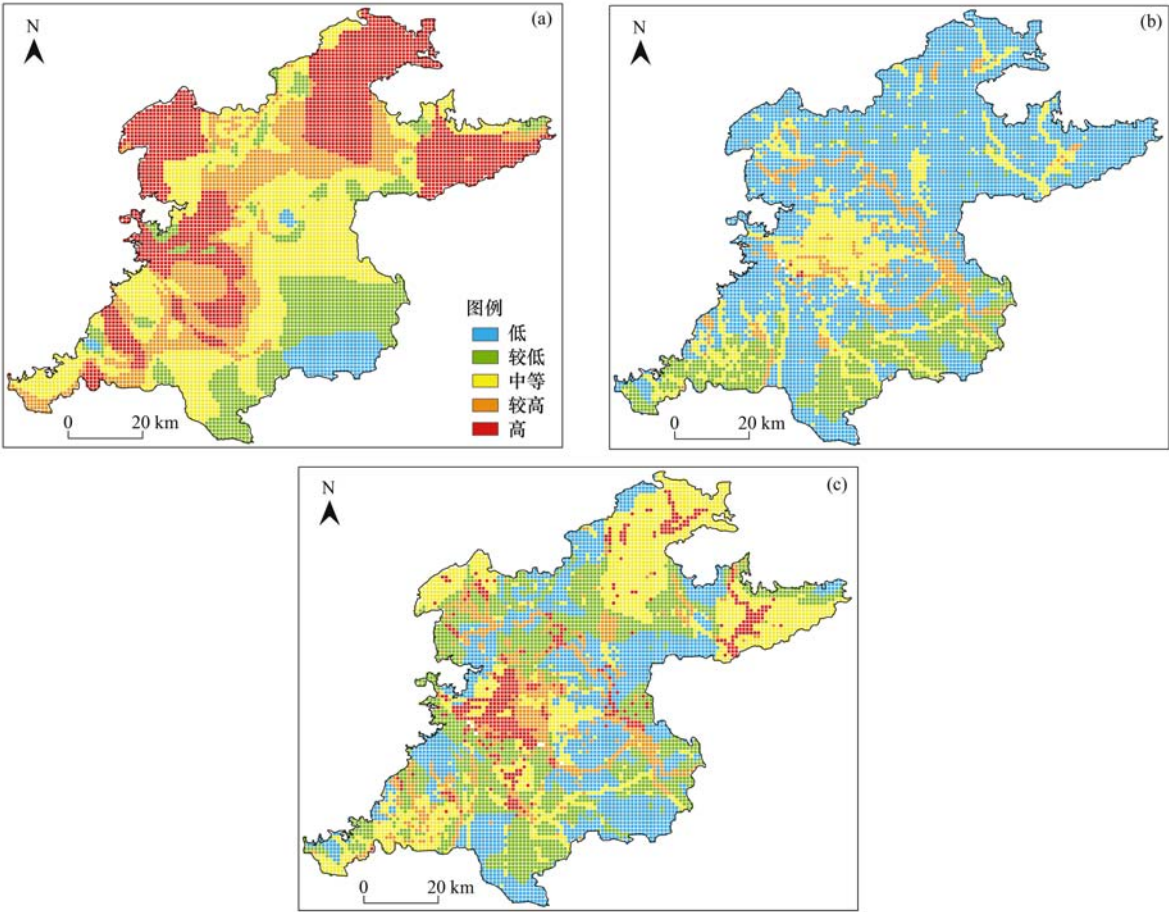
3.1 风险结果对比

UN 体系与 WP 体系分别对北京市平原区地下水进行了污染风险评价,评价结果表明:地下水污染风险最高的区域位于城八区西南近郊的丰台和平原区北部的密云、东北部的平谷以及南部的大兴,因为丰台位于永定河出山口冲洪积扇顶部,其他区县位于山前冲洪积扇,防污性能都很差。而且,这些区域还是北京市重要的工业区,所以这些区域的地下水污染风险级别最高;北京市平原区主要的排污河温榆河、凉水河所流经区域污染风险级别较高;污染风险中等的大部分区域位于北京城八区;因为北京市南部的农业区主要是历史污灌区及再生水灌

区,北部则是清灌区,所以南部平原区污染风险等级高于北部大部分区域。将图4(c)与图6(c)对比表明:UN 体系和 WP 体系的风险评价结果中低级别和较低的区域趋势较为一致,但等级覆盖范围不同,且在平原区北部及东北部部分地区存在着较大差异。

由于2种体系分别对北京市平原区的6964个栅格进行了赋值,并按照分值大小对栅格进行级别划分。因此,根据2种体系对同一个栅格赋予的地下水污染风险级别,将栅格分类并对同一类别的栅格数进行统计,统计结果见表1。

UN 体系中风险级别低的栅格数占总数的60.7%;风险级别较低与中等的栅格数相差不大,分别占总数的16.3%、18.8%;风险级别较高与高



(a)北京市平原区地下水价值分级；(b)北京市平原区基础地下水污染风险分级^[19]；(c)北京市平原区地下水污染风险分级

图 6 北京市平原区 WP 体系分级

Fig. 6 WP system maps of Beijing Plain

表 1 栅格分类统计

Table 1 Statistical table of grid classification

栅格数/个		UN 体系风险级别				
		高(5)	较高(4)	中等(3)	较低(2)	低(1)
WP 体系风险级别	高(5)	23	251	251	— ¹⁾	—
	较高(4)	2	17	750	7	—
	中等(3)	—	—	281	377	1 176
	较低(2)	—	—	28	600	1 265
	低(1)	—	—	—	147	1 789

1) “—”表示文章中没有相关数据

的栅格数之和仅占总数的 4.2%；而 WP 体系中风险级别低、较低、中等的栅格数相差不大,分别占总数的 27.8%、27.2% 和 26.3%；风险级别较高、高的栅格数之和占总数的 18.7%。

由此发现,UN 体系评价结果中随着风险级别的升高,级别的比例几乎呈递减,而 WP 体系评价结果中没有 UN 体系中较为明显的递减现象,而是级别低、较低和中等比例差别不大。

对 2 种体系得到的风险评价结果在空间分布上

进行比较,基于表 1 的统计结果,进一步对栅格数进行统计得出：在同一个栅格中,2 种体系评价结果为同一级别的栅格数占总数的 38.9%,说明很大部分评价结果存在越级现象,与图 4(c),图 6(c)在评价结果显示上出现较大差异的现象吻合。其中,UN 体系评价级别较 WP 体系小一个级别的栅格数占总数的 38.0%,小两个级别的栅格数占总数的 20.6%；UN 体系评价级别较 WP 体系大一个级别的栅格数占总数的 2.5%。从级别差的程度来看,各

程度级别差的比例各有不同. 等级相差 1 级的比例为 40.5%, 这是除等级完全相同外比例最大的, 说明在北京市平原区上, 2 种体系得到的评价结果大部分都处在了相同或相近的区域.

在基础数据相同的条件下, UN 体系与 WP 体系的评价等级空间分布趋势较为相似, 只是等级覆盖范围有差异. 尽管从西北部至东南部, 北京市平原区沉积物的厚度逐渐增大, 岩性结构也由最初的单一砂、卵砾石层过渡至顶部有薄层黏性土覆盖的砂、卵砾石层, 最后演变成黏性土夹杂着多层砂卵砾石层, 固有防污性能逐渐变好, 但是, 由于地下水污染风险评价是综合指标考虑的, 不是仅由地下水固有防污性能决定的. 导致地下水污染风险差异最主要的原因在于污染负荷的大小^[28].

3.2 差异性分析

北京市平原区地下水污染风险评价结果表明 UN 体系和 WP 体系存在明显差异, 造成差异性的原因分析如下.

(1) 层次问题 陆燕等^[29]对地下水污染风险评价体系进行敏感性分析表明, 评价方法构建的层次特征以及确定最高层指标的权重对评价结果均会产生影响, 随着层次的由低到高, 其对评价结果的影响也由小到大, 评价体系的最高层对评价结果起到了关键作用.

经过对 UN 体系和 WP 体系的层次对比得出: 2 种评价体系包含的基础要素相同, 但是由于其位于评价过程中的最底层, 对评价结果影响较小, 且 2 种体系中对评价结果影响较大的最高层的要素互不相同, 致使 UN 体系和 WP 体系最终的评价结果差异较大.

(2) 叠加规则 UN 体系和 WP 体系中的叠加方法均包括 2 种, 一种是“择优原则”, 即: 假设污染负荷与地下水固有防污性能均分为 1~5 个等级, 数值越小代表污染物危害性越低或者地下水防污性能越好, 二者叠加, 地下水污染风险由数值小(级别低)的一方决定. 该叠加规则必然导致评价结果中级别高的比例远低于级别低的比例. 另一种是计点评分指数模型^[22], 即: 第一, 选择影响最明显的指标作为评价因子; 第二, 对各因子按照一定的规则赋予不同的分值; 第三, 根据各种因子影响的大小赋予不同的权重值, 影响大的权重大, 反之则小; 最后把各因子的评分值通过某种数学方式变为量纲为 1 的指数, 并以该指数的大小表示好与差.

UN 体系在最高层运用“择优原则”, 这就决定

了风险分值分布较为离散, 评价结果中级别高的比例远小于级别低的比例的特征. WP 体系在最高层运用计点评分指数模型, 则不存在“择优原则”数据分布的特点, 得到的风险分值分布较均匀, 最终的评价结果级别分布也较均匀.

(3) 分级方法 Natural Breaks 方法分级原则是基于数据固有的特征, 将相似值归类, 并最大化类间的差异, 使得类边界设置有相对大的跳跃数值. 分级效果的好与差不仅依赖于数据的分布特征, 而且依赖于分级方法. 相同的数据, 用不同分级方法, 所表现的效果是截然不同的, 特别是偏度很大或很小的数据.

2 种风险评分数据都运用 Natural Breaks 方法进行分级, UN 体系的风险评分数据[图 3(c)]呈阶梯式分布, 且随着评分的增大, 比例越来越小; WP 体系的风险评分数据[图 5(c)]呈连续式分布, 随着评分的增大, 比例差别不大. 虽然 2 种体系的风险评分数据分布形式不同但是数据增长趋势相同, 致使最终得到的风险评价结果空间分布情况相似, 同一风险级别分布的面积差异较大. 并且 WP 体系的风险分级图展示度较 UN 体系的好. 但是, UN 体系中独有的地下水保护紧迫性图, 在地下水污染源不明确的情况下, 可以对地下水资源的保护紧迫程度做出准确判断. 由于本文只探讨了 Natural Breaks 分级方法, 未涉及其他分级方法, 对适合 UN 体系的分级方法还有待研究.

4 结论

(1) UN 体系和 WP 体系都适用于平原区的地下水污染风险评价. 北京平原区实例对比表明, 2 种体系得到的地下水污染风险评价结果存在明显差别. UN 体系评价结果中风险级别低的区域占主要, 风险级别高的区域极少, 而 WP 体系评价结果中风险级别低、较低、中等所占区域面积较均匀, 但评价等级趋势上较为相似. 2 种体系风险评价结果都具有一定的合理性.

(2) 评价体系构成的层次、评价要素的叠加规则都可能对 UN 体系和 WP 体系的地下水污染风险评价结果造成影响. 评价体系的最高层对评价结果起到了关键作用, 最高层运用的叠加规则不同, 对评价结果的数据分布产生不同的影响.

(3) 分级方法对评价结果的分级成图有重要影响, 分级时需要综合考虑基础数据分布特征及评价结果分级图的展示度来确定具体方法. 而 Natural

Breaks 分级方法对 UN 体系和 WP 体系的适用性存在差异,使得 2 种体系的风险分级图效果不一,且该分级方法更适用于 WP 体系。

参考文献:

- [1] Brian M, Stephen F. Assessment of Groundwater Pollution risk [M/OL]. <http://www.lnweb18.worldbank.org/essd/essd.nsf>, 2006-05-06.
- [2] 梁婕. 基于不确定理论的地下水溶质运移及污染风险研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [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.
- [4] Zaporozec A, Conrad J E, Hirata R, *et al.* Groundwater contamination inventory: a methodological guide [M]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2002. 23-37.
- [5] 李玲玲. 龙口市平原区地下水污染风险评价研究[D]. 济南: 济南大学, 2010.
- [6] 刘海娇, 张保祥, 孙清山, 等. 黄水河流域地下水污染风险评价研究[A]. 见: 中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集(第三卷)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. 3149-3155.
- [7] 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.
- [8] 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, **35**(1): 1-11.
- [9] 周磊, 王翊虹, 林健, 等. 北京平原区地下水水质监测网优化设计[J]. 水文地质工程地质, 2008, **35**(2): 1-9.
- [10] Foster S S D, Hirata R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data [R]. Peru, Lima: Pan American Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences(CEPIS), 1988. 1-10.
- [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] Ducci D. GIS techniques for mapping groundwater contamination risk [J]. Natural Hazards, 1999, **20**(2-3): 279-294.
- [13] 滕彦国, 苏洁, 翟远征, 等. 地下水污染风险评价的迭置指数法研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, **27**(10): 1140-1147.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 张保祥. 黄水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, 2006.
- [17] Expósito 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.
- [18] Wang J J, He J T, Chen H H. Assessment of groundwater contamination risk using hazard quantification, a modified DRASTIC model and groundwater value, Beijing Plain, China [J]. Science of the Total Environment, 2012, **432**: 216-226.
- [19] 王俊杰, 何江涛, 陆燕, 等. 地下水污染防治区划体系构建研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3110-3116.
- [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.
- [21] HJ/T 338-2007, 饮用水水源保护区划分技术规范[S].
- [22] 何江涛, 马文洁, 张昕. 基于过程单元模型参数替代防污性能评价方法研究——以北京市平原区为例[M]. 北京: 地质出版社, 2012. 7.
- [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] 杨彦, 于云江, 王宗庆, 等. 区域地下水污染风险评价方法研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 653-661.
- [25] 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.
- [26] Saaty R W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used [J]. Mathematical Modelling, 1987, **9**(3-5): 161-176.
- [27] 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.
- [28] 郭高轩, 李宇, 许亮, 等. 北京市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.
- [29] 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.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行