

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

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

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明(1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水平(8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思(15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳(21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远(27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋(34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨(39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜(DMSO)的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋(45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇(51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙(61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁(69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍(77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军(84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元(91)
湘江沉积物铜和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山(98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男(108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟(116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强(121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军(129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新(137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦(145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民(150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳(156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐(163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直(169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺(177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴(182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓(188)
污水厂微曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇(194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根(198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文(204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢(209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立楠,何宝燕,李跃鹏(217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳(226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南(231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛(237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福(244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	于志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏(251)
多效应残差法(MERA)表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾(257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远(263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文(271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林(277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国(283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博(288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇(293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,贾玉娟(302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少峰,黄永锋(308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲(315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎(321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志(328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易(336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强(347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文	
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛(357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正(364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强(373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维(379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新(385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌(395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌(401)
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)
信息(76,144,301,400)	专辑征稿通知(394)

黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估

张妍^{1,2}, 李发东^{1*}, 欧阳竹¹, 赵广帅^{1,2}, 李静¹, 柳强¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了解黄河下游引黄灌区地下水重金属污染水平, 在引黄灌区豫、鲁两省采集 59 个地下水样品, 定量分析了 11 种重金属元素 (Ba、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 的含量及空间分布特征, 应用健康风险评价模型评价了地下水中重金属污染所引起的健康风险。结果表明, 地下水中 Fe 和 Zn 的平均浓度较高, 分别为 $0.496 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.445 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。Fe、Mn、Se 和 Zn 出现超标现象, 超标率分别为: 27.12%、27.12%、15.25% 和 5.09%。采用 Inverse Distance Weighted 插值法得到了黄河下游引黄灌区地下水重金属含量的空间分布, 发现地下水中超标的重金属主要分布在武城县、范县、东阿县、禹城市和冠县等区域。健康风险评价表明, 非致癌物质通过饮水途径引起的健康风险高于皮肤暴露, 但致癌物质的皮肤暴露致癌风险高于饮水途径。饮水和皮肤暴露途径中, 致癌物质的个人年风险均以 Cr 最大, 分别是 Cd 的 7 倍和 28 倍, 但二者均低于最大可接受风险水平 ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$)。非致癌物质 (Ba、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 的饮用水健康风险集中在 $1.13 \times 10^{-9} \sim 6.06 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 皮肤接触健康风险集中在 $1.73 \times 10^{-13} \sim 3.46 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, 均小于最大可接受风险水平。

关键词: 地下水; 重金属; 引黄灌区; 黄河下游; 风险评估

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0121-08

Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River

ZHANG Yan^{1,2}, LI Fa-dong¹, OUYANG Zhu¹, ZHAO Guang-shuai^{1,2}, LI Jing¹, LIU Qiang¹

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to investigate the contamination levels of groundwater in the irrigation districts of the lower reaches of Yellow River, fifty-nine groundwater samples collected from the irrigation districts of Henan and Shandong provinces, were analyzed. Health risks associated with eleven metals (Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se and Zn) were assessed using water pollution index and USEPA health risk assessment model. The average concentrations of Fe with $0.496 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and Zn with $0.445 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ were higher than the concentrations of other heavy metals. Concentrations of Fe, Mn, Se and Zn exceeded the relevant standards and the over-standard rates by 27.12%, 27.12%, 15.25% and 5.09%, respectively. Inverse distance weighted method was applied to estimate the unobserved points and their distribution maps were obtained, which indicated that areas of over-standard heavy metals were Wucheng country, Fan country, Dong'e country, Yucheng city and Guan country. Health risks of ingestion of water for all non-carcinogenic metals are higher than those of dermal absorption, while health risks of ingestion of water for carcinogenic metals is lower than those of dermal absorption. Among the health risks caused by the carcinogenic metals in drinking water and dermal absorption, the highest risks associated with Cr, are seven times and twenty-eight times as that of Cd, respectively, but both were significantly lower than the maximum allowance levels recommended by ICRP ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$). The non-carcinogenic metal risks (Ba, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Se and Zn), ranging from 1.73×10^{-13} to $3.46 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$ in dermal absorption and from 1.13×10^{-9} to $6.06 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$ in drinking water, were much lower than the maximum allowance levels.

Key words: groundwater; heavy metal; irrigation district; lower reaches of Yellow River; risk assessment

黄河下游引黄灌区跨黄河、淮河、海河三大流域, 在黄河两岸沿河道走向呈带状分布, 涉及豫鲁两省沿黄的 18 个市(地) 80 个县(区), 土地总面积为 6.65 万 km^2 ^[1], 灌溉面积达 209.5 万 km^2 ^[2]。灌区水资源主要包括降水、当地地表水、地下水和引黄水。引黄水是黄河下游引黄灌区的重要水资源, 由于黄河水量减少和社会经济发展需水增加, 造成水资源短缺^[3,4]。当地地下水资源的开发缓解了这一问题。据统计, 1990~1995 年全灌区机电井总眼

数由 59 万眼增加到 69 万眼, 河南和山东机电井灌溉面积占总灌溉面积的比例分别为 80.4% 和 37.4%^[5]。地下水不仅是生态和地质环境不可缺少的要素, 也是对农作物生长和人类生活有直接影响的水资源的组成部分^[6,7]。因此, 掌握黄河下游引黄

收稿日期: 2012-03-08; 修订日期: 2012-06-11

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目

作者简介: 张妍(1986~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为生态水文与水环境, E-mail: zhangyan-jingjiayi@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lifadong@igsrr.ac.cn

灌区地下水质量分布特征和环境质量,是保障灌区农业安全生产和居民健康的重要依据. 目前已有关于黄河下游引黄灌区地下水的监测多集中于 NO_3^- -N 污染^[8~13],对该灌区地下水重金属分布及健康风险至今还未见报道. 近年来工农业的快速发展导致大量的污染物进入河流^[14],生活污水和未经处理的工矿废水含有大量重金属污染物,是目前黄河污染的主要来源之一^[15],各种重金属会随灌溉进入地下水而形成地下水环境污染^[16]. 由于重金属具有不可降解和生物积累的特性^[17],重金属污染会对人体健康和生态安全造成威胁^[18,19]. 如重金属 Cd 元素是致癌物质,进入人体后能够长时间滞留,研究表明,在生物体类的半衰期长达 20 ~ 40 a^[20]. Cu 和 Zn 是人体必须的微量元素,但是过量的摄入会对人体器官产生不良影响,干扰肝、肾和大脑等器

官的正常功能^[21].

本研究通过调查黄河下游引黄灌区地下水中 11 种重金属 (Ba、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 的含量和分布特征,采用健康风险评估模型评估黄河下游引黄灌区地下水潜在的健康风险,旨在为保障黄河下游人类健康和加强引黄灌区水资源环境保护提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为黄河下游引黄灌区(图 1),本研究区横跨黄淮海平原,西起沁河入黄口,东至黄河入海口,包括南北两侧直接引用黄河水灌溉的豫、鲁两省 17 市(地),60 多个县(市、区),涉及总土地面积 500.2 万 hm^2 ,其中灌溉面积 343 万 hm^2 ,有效灌溉

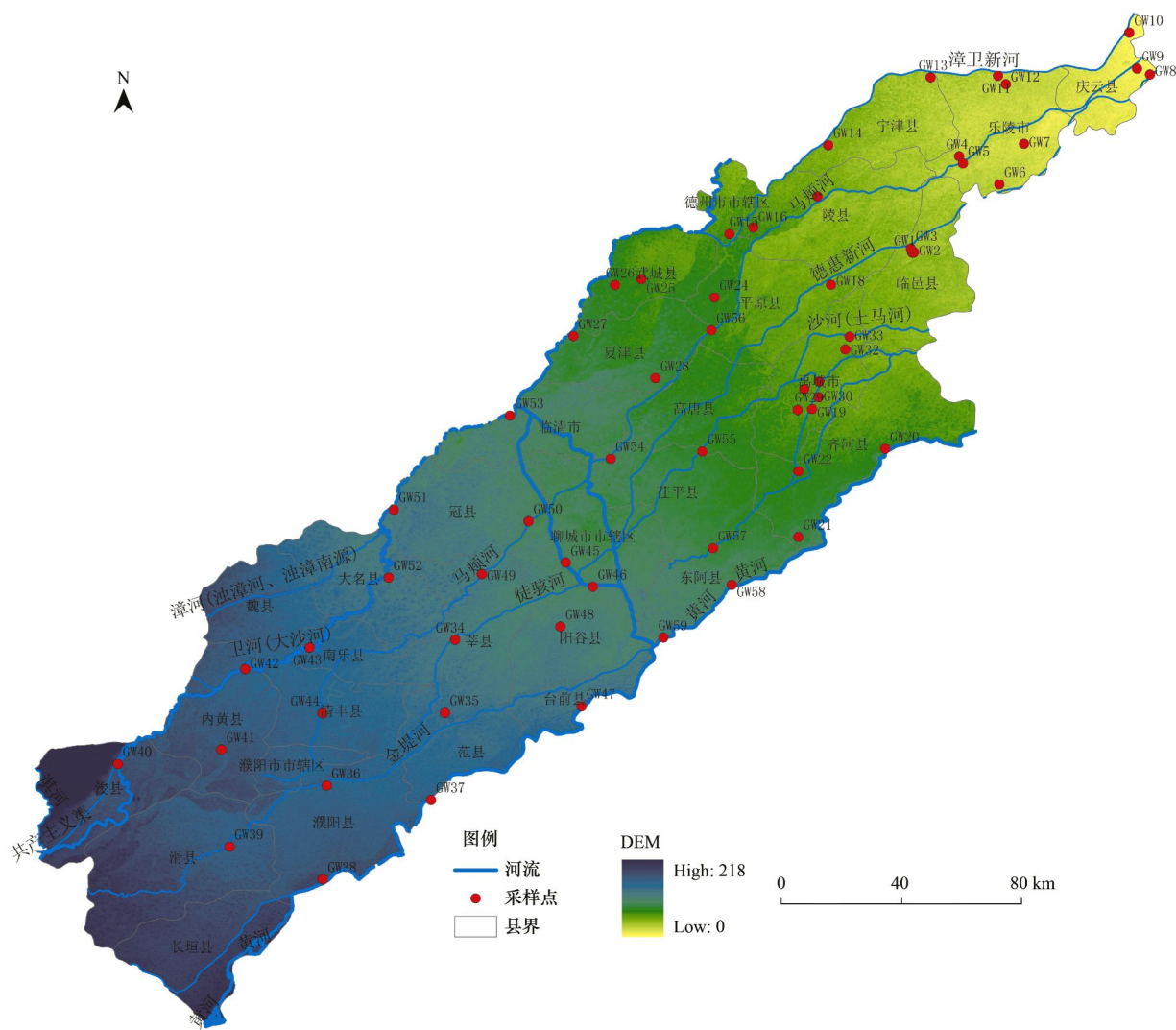


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

面积 223.4 万 hm^2 , 受益人口 5 271 万人^[22]. 灌区属暖温带半湿润大陆性季风气候区, 年平均气温 14°C , 全年无霜期 215 d, 日照时数年平均 2 260 h, 灌区年平均降雨量 639 mm, 因受季风的影响, 降雨量分布不均: 冬季雨雪稀少, 夏季降雨集中, 且多以暴雨出现, 使灌区表现易涝易旱, 旱涝交替、春旱夏涝又旱的气候特征^[3,23]. 研究区土地利用类型主要为农业区、居民区以及工业区, 引黄灌溉改善当地工农业生产条件、促进工农业生产、保证黄河下游地区粮食安全和沿黄城乡人民生活用水, 同时在构建和谐粮食安全生产体系中, 产生了巨大的社会效益和生态环境效益.

2000~2007 年, 灌区多年平均引水量 4.51 亿 m^3 , 引沙量 238.5 万 t, 引水含沙量 $5.29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[2]. 人均拥有水量 593 m^3 , 约为全国人均拥有量的 23%, 耕地面积拥有水量只占全国平均水平的 18%^[24]. 根据地矿部门提供的地下水研究成果, 黄河下游引黄灌区地下水可开采资源总量为 109.2 亿 m^3 . 河南引黄灌区和山东引黄灌区地下水可开采资源量分别为 41.1 亿 m^3 和 68.1 亿 m^3 , 平均可开采模数分别为 $18.5 \text{ 万 m}^3\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $17.9 \text{ 万 m}^3\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ^[5]. 河南全区地下水总开采量 32.5 亿 m^3 , 其中灌溉 25.8 亿 m^3 , 用于工业和生活为 4.64 亿 m^3 ; 山东全区地下水总开采量 28.6 亿 m^3 , 其中灌溉 24.8 亿 m^3 , 用于工业和生活为 3.8 亿 m^3 ^[5]. 本研究区地下水条件较好, 浅水层埋藏浅, 厚度大, 水量丰富, 浅层地下水随气候条件和人类活动而变化, 主要靠大气降雨入渗、黄河侧渗补给和渠道渗漏补给^[25,26].

1.2 样品的采集与分析

2010 年 4 月在黄河下游引黄灌区采集 59 个样点的地下水样品, 地下水均取自民用井, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 现场测定 pH 和 EC. 每个样点包括一个原水样(2.5 L) 和一个加 HNO_3 (1:1) 酸化的水样(1 L 的塑料瓶), 样品送于中国科学院地理科学与资源研究所测定, 用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-OES) 检测 Ba、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn 共 11 种重金属含量, 执行标准为 GB/T 8538-95 和 DZ/T 0064-93.

1.3 数据处理

实验数据采用 ArcGIS 9.0 制作样点分布图和进行空间插值, 其余采用 SPSS 16.0 做描述性统计分析.

1.4 健康风险评估

1.4.1 暴露剂量的确定

水中重金属暴露途径主要有两种, 即饮水和皮肤接触^[27]. 暴露剂量的计算公式如式(1)和式(2):

$$\text{ADD}_{\text{ingestion}} = \frac{\text{CW} \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

式中, $\text{ADD}_{\text{ingestion}}$ 为经饮用水暴露剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; CW 为水中污染物的平均浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); IR 为摄入率 ($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$); EF 为暴露频率 ($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$); ED 为暴露持续时间 (a); BW 为人体质量 (kg); AT 为平均时间 (d).

$$\text{ADD}_{\text{dermal}} = \frac{\text{CW} \times \text{SA} \times \text{PC} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

式中, $\text{ADD}_{\text{dermal}}$ 为经皮肤暴露剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; SA 为皮肤接触表面积 (cm^2); PC 为化学物质皮肤渗透常数 ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$); ET 为暴露频率 ($\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$); CF 为体积转换因子 ($\text{mL}\cdot\text{cm}^{-3}$).

1.4.2 健康风险评估

将地下水中检测到的污染物分为非致癌性物质 (Ba、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 和致癌性物质 (Cd 和 Cr) 两类, 健康风险评价模型计算公式分别为式(3)和式(4):

$$R = \frac{\text{ADD}}{\text{RfD}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中, R 为发生某种特定有害健康效应而造成等效死亡的终身危险度; ADD 为非致癌污染物的日均暴露剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; RfD 为化学污染物的某种暴露途径下的参考剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; 10^{-6} 为与 RfD 相对应的假设可接受的危险度水平.

$$R = q \times \text{LADD} \quad (4)$$

式中, q 为致癌强度系数 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]; LADD 为致癌物质的日均暴露剂量 [$\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$].

本研究中化学物质皮肤渗透常数, 污染物致癌强度系数和各种暴露途径的参考剂量见美国 EPA 资料^[28,29], 详见表 1.

2 结果与讨论

2.1 地下水中 11 种重金属元素含量及其数理统计结果

引黄灌区地下水中 11 种重金属浓度统计结果见表 2. 其中 Zn 的浓度范围跨度较大, 为 $0 \sim 22.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最大值是地下水 Zn 标准值的 22 倍. 地下水中各种重金属平均浓度顺序为: $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ba} > \text{Mn} > \text{Mo} > \text{Se} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd}$, 其中 Fe 和 Zn 的浓度

表 1 健康风险评价模型参数 PC、q 和 RfD_i 值

Table 1 Values of PC, q _i and RfD _i of the health risk assessment model parameters						
致癌物质	PC /cm·h ⁻¹	q /mg·(kg·d) ⁻¹	非致癌物质	PC /cm·h ⁻¹	皮肤暴露 RfD _i × 10 ⁻³ /mg·(kg·d) ⁻¹	饮用水暴露 RfD _i × 10 ⁻³ /mg·(kg·d) ⁻¹
Cd	0.001	6.1	Ba	0.000 004	14	200
Cr	0.002	41	Cu	0.000 6	12	40
			Fe	0.000 1	45	300
			Mn	0.000 1	0.8	46
			Mo	0.002	1.9	5
			Ni	0.000 1	5.4	20
			Pb	0.000 004	0.42	1.4
			Se	0.000 6	2.2	5
			Zn	0.000 6	60	300

表 2 引黄灌区地下水中重金属含量统计表

Table 2 Heavy metal concentrations of groundwater							
元素	最大值 /mg·L ⁻¹	最小值 /mg·L ⁻¹	平均值 /mg·L ⁻¹	标准差 /mg·L ⁻¹	变异系数	标准值 ¹⁾ /mg·L ⁻¹	超标率 /%
Ba	0.738	0.001	0.150	0.108	71.7	1	0.00
Cd	0.002	0.000	0.001	0.001	92.3	0.01	0.00
Cr	0.018	0.000	0.001	0.003	448.3	0.05	0.00
Cu	0.016	0.000	0.001	0.003	231.2	1	0.00
Fe	8.239	0.000	0.496	1.502	303.1	0.3	27.12
Mn	0.872	0.000	0.099	0.177	179.5	0.1	27.12
Mo	0.025	0.000	0.006	0.005	84.2	0.1	0.00
Ni	0.021	0.000	0.002	0.003	147.2	0.05	0.00
Pb	0.008	0.000	0.001	0.002	250.3	0.05	0.00
Se	0.018	0.000	0.005	0.005	94.7	0.01	15.25
Zn	22.21	0.000	0.445	2.893	650.2	1	5.09

1) 中国地下水环境质量Ⅲ类标准 (GB/T 14848-9) 以人体健康基准值为依据, 主要适用于生活饮用水水源及工、农业用水

分别为:0.496 mg·L⁻¹和 0.445 mg·L⁻¹. 地下水中 Fe 元素平均浓度高于相应的标准值 (0.3 mg·L⁻¹), 而其他重金属元素的平均浓度均低于相应的标准值. 从变异系数来看, 地下水中各种重金属质量浓度 Cr、Cu、Fe、Mn、Ni、Pb 和 Zn 含量变异系数超过 100%, 重金属测定方法本身的变异系数在 10% 以内, 说明各采样点重金属含量存在较大差异.

对比中国地下水环境质量Ⅲ类标准, Ba、Cd、Cr、Cu、Mo、Ni 和 Pb 无超标现象, 而 Zn、Se、Fe、Mn 出现超标现象, Zn 和 Se 有少部分样点超标, 超标率分别为 5.09% 和 15.25%; Fe 和 Mn 的超标率最高, 均为 27.12%. 说明黄河下游引黄灌溉区 Fe 和 Mn 是主要污染物, 应引起重视. 原因主要有两个方面, 一是调查区第四纪沉积物中含有大量的铁锰结核, 经淋滤作用使其不断的溶解进入地下水, 导致部分地区地下水中铁锰含量较高. 另一方面是由于一些生产、生活污水进入地下水, 增强了土中的铁锰和地下水中一些组分的离子交换作用而使地下水中铁含量升高^[26].

2.2 重金属空间分布特征

从图 2 可以看出, 与地下水中 Fe 元素的国家标准值(0.3 mg·L⁻¹) 调查相比, 本研究区约有 1/3 灌区地下水 Fe 污染超标. 从空间分布来看, 西南灌区 Fe 含量未超过国家标准值, 而东北灌区地下水 Fe 污染严重. 长期以来的大引大排灌溉方式, 极易导致农田退水携带大量污染物质进入水体环境. 青贮饲料废液也是造成地下水污染的另一种农业污染, 青贮饲料废液酸性很高, 会溶解土层中的 Fe 和 Mn, 进而进入地下水^[30]. Fe 含量超标的另一个原因是由于本身的地质条件造成的, 含水层介质组分、径流条件、上覆土层性质等因素对当地地下水铁含量也都起到了一定的作用^[31]. 长期摄入过多的铁, 或因不能及时排出体外而沉积于肝脏胰脏、心脏和皮肤, 可引起血色病、肝功能异常、心肌损伤, 糖尿病脉粥样硬化、冠心病发生^[32].

本研究区 Mn 含量高的区域主要分布在宜惠河, 马颊河, 德惠新河, 黄河等流经的区域, 是由于农民引用宜惠河, 马夹河和德惠新河, 黄河的污水进行灌溉所致^[33].

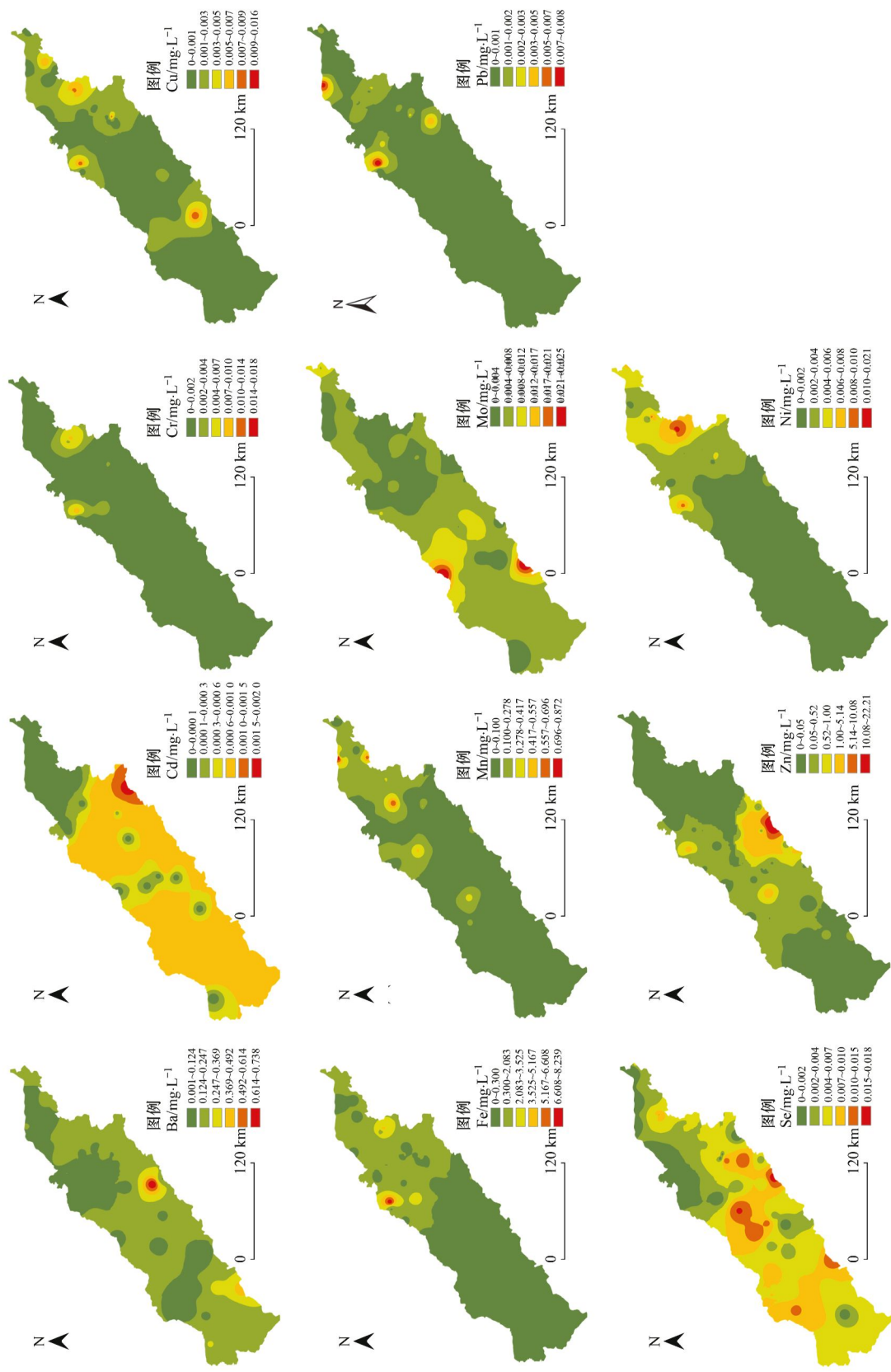


图 2 黄河下游引黄灌区地下水重金属含量空间分布示意

Fig. 2 Distribution of the heavy metal contents in groundwaters in the irrigation districts of the downstream of Yellow River

地下水中 Zn 元素的国家标准值是 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 从 Zn 元素的空间分布特征可以看出, Zn 元素超标的地区主要集中在东阿县, 武城县和莘县. 其中东阿县污染最为严重. 这与前人的研究结果一致, 黄河口及其近岸水域水中 Zn 污染严重^[34]. 随着灌区农业产业结构的调整, 灌区畜牧业养殖规模逐渐发展, 畜禽养殖量成倍增长, 在一些地区已经形成一定的畜牧养殖规模^[30]. 规模化畜禽养殖中 Zn 广泛应用于饲料添加剂, 导致畜禽粪便含大量的 Zn, 施用畜禽粪便作为有机肥施于土壤中, 植物并不能完全吸收 Zn^[35], 过多的 Zn 在降水的带动下进入水体, 造成地下水污染.

地下水中 Se 元素的国家标准值是 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 调查区域污染严重的区域主要集中在范县, 内黄县, 茌平县, 东阿县, 齐河县, 禹城市和冠县这几个区域. 其中禹城市安仁镇 G308 引黄干渠周边有大型工厂排放富含重金属的污水, 导致周边地下水中重金属 Se 含量较高. 东阿县, 齐河县, 范县和茌平县主要是引用黄河水灌溉, 可能是本区域黄河上游 Se 污染源的存在, 导致下游地区地下水中 Se 含量超标. 内黄县和冠县引用卫河含大量 Se 的污水灌溉引起地下水中 Se 超标.

地下水中 Cr、Ni 和 Pb 的含量分布规律比较相似, 都没有超标样点. 表现为从西南向东北方向增加的趋势. 其最高含量区主要位于武城县和临邑县. 这两个区域的灌溉水基本上都是来源于宜惠河和德惠新河的水. 其中采样点 GW2 处于临邑县林子镇林子街长安汽车修理厂排放的大量含重金属的污水进入地下水. 所以这两个区域 Cr、Ni 和 Pb 重金属元素含量均高于其他调查区域. 地下水中 Mo 元素的最大含量值远小于标准值(最大值为 $0.025\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 标准值为 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 从空间分布来看, 最大值分布在冠县(GW51)和范县(GW37), 可能是受引黄河水和宜惠河水灌溉影响. 地下水中 Cd 元

素的最大含量值远小于标准值(最大值为 $0.002\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 标准值为 $0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 从空间分布来看, 最大值分布在齐河县(GW20), 可能也是受引黄河水灌溉影响其含量. 地下水中 Ba 含量高的地区主要集中在东阿县, 可能与引黄水灌溉有关. 地下水中 Cu 元素的最大含量值远小于标准值(最大值为 $0.016\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 标准值为 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 属于安全的范围, 是由于黄河水中 Cu 主要以残渣态吸附在沉积物中, 水中可利用态的浓度低, 对水体影响不大. 因此引黄灌溉对地下水中 Cu 元素含量影响很小^[36], Cu 的最大值出现在临邑县(GW2), 可能是受周边修理厂污水排放的影响.

2.3 健康风险评价

根据健康风险评价模型和模型参数, 计算出黄河下游引黄灌区地下水中重金属通过饮水途径(表 3)和皮肤暴露(表 4)所引起的平均个人年风险. 本研究中致癌物质 Cr 和 Cd 含量均未超过国家地下水标准值(表 2). 通过饮水途径所引起的各种非致癌物质健康危害均高于皮肤暴露引起的健康风险, 但饮水途径引起的致癌物质的致癌风险低于皮肤暴露. 就饮水途径而言, 非致癌物质风险暴露中, Fe 暴露风险最大, 达到 $6.06 \times 10^{-8}\text{ a}^{-1}$, Cu 风险最小, 为 $1.13 \times 10^{-9}\text{ a}^{-1}$. 非致癌物质的饮水途径健康危害的平均个人年风险顺序如下: $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Mo} > \text{Se} > \text{Ba} > \text{Pb} > \text{Cu}$. 通过皮肤接触, 非致癌物质风险暴露中, Mn 的暴露风险最大, 达到 $3.46 \times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$, Cu 的暴露风险最小, 仅为 $1.73 \times 10^{-13}\text{ a}^{-1}$, 各种重金属皮肤接触暴露风险顺序为: $\text{Mn} > \text{Mo} > \text{Zn} > \text{Se} > \text{Fe} > \text{Ni} > \text{Ba} > \text{Pb} > \text{Cu}$.

饮水和皮肤暴露途径中, 致癌物质的个人年风险均以 Cr 最大, 分别是 Cd 的 7 倍和 28 倍; 但这两种重金属的致癌风险水平均低于 ICRP 推荐的最大可接受风险水平($5 \times 10^{-5}\text{ a}^{-1}$). 迄今为止, 中国虽有地下水环境质量标准, 但对于水中致癌物质的健

表 3 致癌物质和非致癌物质的饮水途径健康危害的平均个人年风险/ a^{-1}

致癌物质		非致癌物质								
Cd	Cr	Ba	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
7.60×10^{-9}	5.26×10^{-8}	2.75×10^{-8}	1.13×10^{-9}	6.06×10^{-8}	7.88×10^{-8}	4.23×10^{-8}	4.35×10^{-8}	1.86×10^{-8}	3.60×10^{-8}	5.44×10^{-8}

表 4 致癌物质和非致癌物质的皮肤暴露健康危害的平均个人年风险/ a^{-1}

致癌物质		非致癌物质								
Cd	Cr	Ba	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
9.84×10^{-8}	2.72×10^{-6}	1.20×10^{-12}	1.73×10^{-13}	3.47×10^{-11}	3.46×10^{-10}	1.70×10^{-10}	1.23×10^{-12}	1.90×10^{-13}	3.75×10^{-11}	1.25×10^{-10}

康风险评价模式仍然需要套用 EPA 推荐的评价模型, 该类评价模型受不同地区、居民的身高体重、饮水摄入率以及人均寿命等因素的影响。因此, 本研究只是对黄河下游引黄灌区地下水做了初步的健康风险评估。未来的工作应该针对这些具体问题来改进中国各个区域内水环境健康风险。

根据表 3, 通过饮水途径引起的非致癌物质 (Ba、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 的致癌风险均小于最大可接受风险水平。9 种非致癌物质所引起的健康危害的个人年风险集中在 $1.13 \times 10^{-9} \sim 7.88 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 每万人口中因饮用水水质的非致癌污染物而受到健康危害 (或死亡) 的人数不到 1 人, 这表明在黄河下游引黄灌区井水中, 非致癌物质 (Ba、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 通过饮水途径所引起的健康风险较小, 不会对暴露人群构成明显的危害。对比两种暴露途径下, 非致癌物质的健康风险发现, 皮肤暴露的平均个人年风险比饮水暴露小 2~4 个数量级, 也是非常安全的。

值得注意的是, 本研究所测定的重金属污染物中, 尽管通过饮水途径致癌物质和非致癌物质的健康风险系数近似, 但通过皮肤暴露致癌物 (Cd 和 Cr) 对人体健康危害的个人年风险 ($2.72 \times 10^{-6} \sim 9.84 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$) 远超过非致癌物质的年风险 ($1.73 \times 10^{-13} \sim 3.46 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$), 其风险水平要高出 2~7 个数量级。另外, 各种重金属对人体健康的危害并不是独立作用的, 而是存在一定的内在关联, 同时各种风险因子、环境、个人基因和生活方式之间的相互作用共同决定了健康风险的高低^[37], 而目前尚没有统一的方法来对各种混合风险因子造成的健康风险进行评估。这也将是进一步研究的重点。

3 结论

(1) 地下水中各种重金属平均浓度顺序为: Fe > Zn > Ba > Mn > Mo > Se > Cu > Pb > Cr > Cd, 其中 Fe 和 Zn 的浓度分别为: $0.496 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.445 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。地下水中 Fe 元素平均浓度高于相应的标准值 ($0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而其他重金属元素的平均浓度均低于相应的标准值。

(2) 根据中国地下水质量标准, 只有 Zn、Se、Fe、Mn 出现超标现象, 超标率分别为: 5.09%、15.25%、27.12%、27.12%。地下水中超标的重金属主要分布在武城县, 范县, 东阿县, 禹城市和冠县等区域。

(3) 健康风险评价表明, 非致癌物质通过饮水

途径引起的健康风险高于皮肤暴露, 但致癌物质的皮肤暴露致癌风险高于饮水途径。饮水和皮肤暴露途径中, 致癌物质的个人年风险均以 Cr 最大, 分别是 Cd 的 7 倍和 28 倍, 但二者均低于最大可接受风险水平 ($5 \times 10^{-5} \text{ a}^{-1}$)。非致癌物质 (Ba、Cu、Fe、Mn、Mo、Ni、Pb、Se 和 Zn) 的饮用水健康风险集中在 $1.13 \times 10^{-9} \sim 6.06 \times 10^{-8} \text{ a}^{-1}$, 皮肤接触健康风险集中在 $1.73 \times 10^{-13} \sim 3.46 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$, 均小于最大可接受风险水平。

致谢: 感谢吴向东、呼剑峰、张芳和蔡文静等在采样和实验方面提供的帮助, 感谢郭庆军老师课题组 Mark 对本文英文摘要的润色。

参考文献:

- [1] 刘蕾, 罗毅. 不同灌溉条件对黄河下游引黄灌区作物水分关系的影响[J]. 灌溉排水学报, 2011, **30**(1): 5-10.
- [2] 胡健, 孙蓬蓬, 戴清, 等. 小浪底水库运用对下游引黄灌区的影响[J]. 节水灌溉, 2010, (3): 26-29.
- [3] Li F D, Pan G Y, Tang C Y, *et al.* Recharge source and hydrogeochemical evolution of shallow groundwater in a complex alluvial fan system, southwest of North China Plain [J]. *Environmental Geology*, 2008, **55**(5): 1109-1122.
- [4] Fu G B, Chen S L, Liu C M, *et al.* Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years [J]. *Climatic Change*, 2004, **65**(1): 149-178.
- [5] 侯传河, 肖素君, 侯玉玲. 黄河下游引黄灌区水资源及利用特点分析[J]. 灌溉排水, 2000, **19**(3): 62-65.
- [6] Kalf F R P, Woolley D R. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems [J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, **13**(1): 295-312.
- [7] Zhang L, Kennedy C. Determination of sustainable yield in urban groundwater systems: Beijing, China [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2006, **11**(1): 21-29.
- [8] Xia X H, Zhou J S, Yang Z F. Nitrogen contamination in the Yellow River basin of China [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(3): 917-925.
- [9] Chen J Y, Tang C Y, Sakura Y, *et al.* Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain [J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, **13**(3): 481-492.
- [10] Chen J Y, Taniguchi M, Liu G Q, *et al.* Nitrate pollution of groundwater in the Yellow River delta, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2007, **15**(8): 1605-1614.
- [11] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, *et al.* Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **143**(1): 117-125.
- [12] Tao Y, Wei M, Ongley E, *et al.* Long-term variations and causal factors in nitrogen and phosphorus transport in the Yellow River, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, **86**(3): 345-351.

- [13] 吴向东, 李发东, 郭建青, 等. 黄河下游引黄灌区主要河系硝态氮及铵态氮安全评价[J]. 水资源与水工程学报, 2011, **22**(4): 114-117.
- [14] Kaushik A, Kansal A, Meena S, *et al.* Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164**(1): 265-270.
- [15] 周海红, 张志杰. 关中清灌区农田生态系统污染现状研究[J]. 环境污染与防治, 2001, **23**(6): 309-328.
- [16] Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, *et al.* Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2005, **109**(3-4): 310-322.
- [17] Diagonanolin V, Farhang M, Ghazi-Khansari M, *et al.* Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the Karoon waterway river, Iran[J]. Toxicology Letter, 2004, **151**(1): 63-67.
- [18] Rai P K. Heavy metal pollution in aquatic ecosystems and its phytoremediation using wetland plants: an ecosustainable approach[J]. International Journal of Phytoremediation, 2008, **10**(2): 133-160.
- [19] Azevedo J S, Serafim A, Company R, *et al.* Biomarkers of exposure to metal contamination and lipid peroxidation in the benthic fish *Cathorops spixii* from two estuaries in South America, Brazil[J]. Ecotoxicology, 2009, **18**(8): 1001-1010.
- [20] 滕德智, 何作顺. 锌镉毒性研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2012, **29**(1): 51-53.
- [21] López-Alonso M, Benedito J L, Miranda M, *et al.* The effect of pig farming on copper and zinc accumulation in cattle in Galicia (north-western Spain) [J]. The Veterinary Journal, 2000, **160**(3): 259-266.
- [22] 周振民. 黄河下游引黄灌区农业生态环境脆弱性评价及对策[J]. 云南农业大学学报, 2007, **22**(1): 127-137.
- [23] Li F D, Tang C Y, Zhang Q Y, *et al.* Surface water-groundwater interactions in a Yellow River alluvial fan [J]. IAHS-AISH Publication, 2008, **321**(3-4): 189-196.
- [24] 潘延红, 张重阳, 李庆朝. 黄河下游引黄灌区节水灌溉必要性研究[J]. 人民黄河, 2010, **32**(5): 64-65.
- [25] Liu J, Cao G L, Zheng C M. Sustainability of groundwater resources in the North China Plain [A]. In: Jones J A A. Sustaining groundwater resources: international year of planet earth [C]. Netherlands: Springer, 2011. 69-87.
- [26] 张岩, 董维红, 李满洲, 等. 河南平原浅层地下水水化学分布特征及其污染成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(5): 148-153.
- [27] Wu B, Zhao D Y, Jia H Y, *et al.* Preliminary risk assessment of trace metal pollution in surface water from Yangtze River in Nanjing section, China [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **82**(4): 400-409.
- [28] States Environmental Protection Agency (EPA). Available information on assessment exposure from pesticides in food—A user's guide [S]. U. S. Environmental Protection Agency, Office of Pesticide Programs, 2000.
- [29] EPA, Risk-based concentration table [S]. <http://www.epa.gov/reg3hwmd/risk/human/rbc/rbc1006.pdf>. 2006.
- [30] 孙娟, 李强坤, 胡亚伟. 农业非点源污染的现状与控制措施——以宁夏引黄灌区为例[J]. 农业环境与发展, 2009, **26**(4): 54-58.
- [31] 黄冠星, 孙继朝, 荆继红, 等. 珠江三角洲地区地下水铁的分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2008, **35**(3): 532-538.
- [32] 徐素萍. 微量元素铁与人体健康的关系[J]. 中国食物与营养, 2007, (12): 51-54.
- [33] Liu C B, Xu J, Liu C G, *et al.* Heavy metals in the surface sediments in Lanzhou reach of Yellow river, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, **82**(1): 26-30.
- [34] 刘成, 何耘, 王兆印. 黄河口的水质、底质污染及其变化[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(3): 58-61.
- [35] 张妍, 崔骁勇, 罗维, 等. 小白菜对猪粪中高 Cu 和 Zn 的富集与转运[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1482-1488.
- [36] 杨宏伟, 焦小宝, 王小丽. 黄河(清水河段)沉积物中重金属的存在形式[J]. 环境科学与技术, 2002, **25**(3): 24-26.
- [37] Krishnan K, Paterson J, Williams D T. Health risk assessment of drinking water contaminants in Canada: the applicability of mixture risk assessment methods[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1997, **26**(2): 179-187.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allelochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinoloprop-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 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

国内外公开发刊