

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与砷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟苏琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟苏琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

基于 GIS 的天津市饮用水水质健康风险评估

符刚¹, 曾强¹, 赵亮¹, 张玥², 冯宝佳¹, 王睿¹, 张磊¹, 王洋¹, 侯常春^{1*}

(1. 天津市疾病预防控制中心环境与健康所, 天津 300011; 2. 天津中医药大学第一附属医院, 天津 300381)

摘要: 为评价天津市饮用水水质对人体健康的潜在危害, 探索地理信息系统 (GIS) 在饮用水安全保障方面的应用, 本研究采用美国环境保护署 (US EPA) 推荐的健康风险评估模型对天津市 401 个饮用水监测点的 850 份水样的水质检测结果进行健康风险评估, 同时结合 GIS 进行信息可视化展示和风险因子探索。结果表明, 天津市饮用水水质致癌物健康风险、非致癌物健康风险和总健康风险分别为 3.83×10^{-5} 、 5.62×10^{-9} 和 3.83×10^{-5} 。按健康风险排序: 致癌物 > 非致癌物, 致癌物的健康风险为市区 > 新区 > 郊区, 铬 (六价) > 镉 > 砷 > 三氯甲烷 > 四氯化碳, 非致癌物的健康风险为郊区 > 新区 > 市区, 氟化物 > 氰化物 > 铅 > 硝酸盐。天津市饮用水个人年健康总风险小于国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的最大可接受风险水平 (5.0×10^{-5}), 但处于在 US EPA 推荐的可接受风险限值 ($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$) 之间, 初步认为该市饮用水健康风险处于可接受水平, 不会对人体产生明显的健康危害。主要健康风险来源于致癌物。致癌物应优先控制铬 (六价), 非致癌物应优先控制氟化物。GIS 能较好地应用于饮用水健康风险评估信息的可视化和进一步的风险因子探索。

关键词: 饮用水; 健康; 风险评估; 地理信息系统; 空间分布

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4553-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.030

Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS

FU Gang¹, ZENG Qiang¹, ZHAO Liang¹, ZHANG Yue², FENG Bao-jia¹, WANG Rui¹, ZHANG Lei¹, WANG Yang¹, HOU Chang-chun^{1*}

(1. Institute of Environment and Health, Tianjin Centers for Disease Control and Prevention, Tianjin 300011, China; 2. First Teaching Hospital of Tianjin University of TCM, Tianjin 300381, China)

Abstract: This study intends to assess the potential health hazards of drinking water quality and explore the application of geographic information system (GIS) in drinking water safety in Tianjin. Eight hundred and fifty water samples from 401 sampling points in Tianjin were measured according to the national drinking water standards. The risk assessment was conducted using the environmental health risk assessment model recommended by US EPA, and GIS was combined to explore the information visualization and risk factors simultaneously. The results showed that the health risks of carcinogens, non-carcinogens were 3.83×10^{-5} , 5.62×10^{-9} and 3.83×10^{-5} for total health risk respectively. The rank of health risk was carcinogen > non-carcinogen. The rank of carcinogens health risk was urban > new area > rural area, chromium (VI) > cadmium > arsenic > trichloromethane > carbon tetrachloride. The rank of non-carcinogens health risk was rural area > new area > urban, fluoride > cyanide > lead > nitrate. The total health risk level of drinking water in Tianjin was lower than that of ICRP recommended level (5.0×10^{-5}), while was between US EPA recommended level ($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$). It was at an acceptable level and would not cause obvious health hazards. The main health risks of drinking water came from carcinogens. More attentions should be paid to chromium (VI) for carcinogens and fluoride for non-carcinogens. GIS can accomplish information visualization of drinking water risk assessment and further explore of risk factors.

Key words: drinking water; health; risk assessment; geographic information system; spatial distribution

水是生命之源, 健康之本。饮用水水质关系到广大居民的身体健康和生命安全。近年来, 由于水源环境恶化、输配水管网老化、二次供水污染等多种原因, 导致水质污染物浓度增加, 引发一系列水污染突发公共卫生事件^[1], 给人们的身心健康带来一定的危害。

健康风险评估 (health risk assessment, HRA) 是通过估算有害因子对人体不良影响发生的概率来评价暴露于该有害因子的人体健康受到影响的危险。它以风险度作为评价指标, 把环境污染与人体健康联系起来, 定量描述污染对人体产生健康危害的风

险。健康风险评估广泛应用于食品^[2, 3]、医疗^[4]、职业暴露^[5, 6]和环境^[7, 8]等方面, 在健康风险因子识别和排序方面发挥着重要的作用, 为政府部门决策和进一步风险管理提供科学依据。在饮用水安全保障方面风险评估可以应用于常规的水质监测研

收稿日期: 2015-04-17; 修订日期: 2015-07-10

基金项目: 天津市卫生局科技基金项目 (2013KY18, 2013KY19); 天津市应用基础与前沿技术研究计划项目 (14JCQNJC11900); 天津市卫生计生委科技基金项目 (2014KY22); 天津市疾病预防控制中心科技基金项目 (CDCKY1301)

作者简介: 符刚 (1979 ~), 男, 硕士, 主管医师, 主要研究方向为环境卫生研究与管理, E-mail: fuganggangxx@163.com

* 通讯联系人, E-mail: 13323361505@163.com

究^[9]和突发水污染事件^[10]. 目前国内外在饮用水健康风险评价方面的研究聚焦于水源^[11~13], 对水质指标的健康风险评价工作则集中在重金属^[14~16], 而对直接饮用的末梢水健康风险评价研究较少, 特别是针对现行的国家生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)^[17]要求的监测指标综合全面的风险评价很少. 少数饮用水健康风险评价研究^[18]仅针对饮用水水质合格率, 未考虑长期低、中浓度水质指标的暴露可能产生健康影响. 本研究对天津市 401 个监测点 850 份城市饮用水水样的国家生活饮用水卫生标准中常规水质指标(除放射性指标)和氨氮进行了调查研究, 并采用美国环保署(US EPA)推荐的健康风险评价模型对其产生的健康风险进行评价, 同时结合 GIS 进行信息的空间可视化表达和进一步的风险因子探索.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

天津市位于北纬 38°34′~40°15′, 东经 116°43′~118°4′之间, 地处华北平原的东北部, 海河流域下游, 东临渤海, 北依燕山, 西靠北京, 是海河五大支流南运河、子牙河、大清河、永定河、北运河的汇合处和入海口, 素有“九河下梢”、“河海要冲”之称. 其土地面积 11 916.85 km², 2014 年末全市常住人口 1 516.81 万人. 本研究采样调查期间, 其主要水源为引滦入津工程和地下水.

1.2 样品采集

2014 年 10~12 月采集天津市 401 个饮用水监测点的 850 份水样, 严格按照国家生活饮用水卫生标准检验方法(GB/T 5750-2006)^[19]进行样品的采集、保存、运输和实验室检测. 采样点按照代表性原则覆盖全市所有乡镇(街道), 见图 1.

1.3 质量控制

每次采样时打开水龙头放水 3 min 以消除滞留水对检测结果的影响, 添加相应的保存试剂以保证检测结果的准确性, 采集的水样进行冷藏保存并在 4 h 内运输至实验室进行检测. 每批样品增加 1 份空白样、1 份平行样和 1 份加标样, 空白样采用蒸馏水作为采样全过程的运输空白, 平行样采用随机抽取的采样点的双份样品作为现场平行, 加标样采用加入待检水质指标的化学物质作为实验室加标. 同时自国家环境保护部标准样品研究所购买标准样品对实验室进行质量控制考核.

质量控制结果显示, 运输空白样均未检测出相



图 1 天津市饮用水采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sample points for drinking water in Tianjin

应的水质指标, 现场平行样相对误差在 5% 以内, 实验室加标样回收率在 93%~105% 之间. 实验室标准样品质量控制考核合格率为 94.74% (108/114).

1.4 健康风险评价模型

1.4.1 化学致癌物所致健康危害的风险

化学致癌物所致健康危害的风险模式为:

$$R^c = \sum_{i=1}^k R_{ig}^c \quad (1)$$

$$R_{ig}^c = [1 - \exp(-D_{ig}q_{ig})]/70 \quad (2)$$

式中, R_{ig}^c 为化学致癌物(共 k 种化学致癌物)经食入途径的平均个人致癌年风险(a^{-1}); D_{ig} 为化学致癌物 i 经食入途径的单位体重日均暴露剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$]; q_{ig} 为化学致癌物经食入途径的致癌强度系数($kg \cdot d \cdot mg^{-1}$); 70 为人类平均寿命(a).

饮水途径的单位体重日均暴露剂量 D_{ig} 为:

$$D_{ig} = 2.2 \times c_i / 70 \quad (3)$$

式中, 2.2 为成人平均每日饮水量(L); c_i 为化学致癌物或躯体毒物的浓度($mg \cdot L^{-1}$); 70 为人体重(kg).

1.4.2 非致癌污染物所致健康危害的风险

非致癌污染物所致健康危害的风险模式为:

$$R^n = \sum_{i=1}^k R_{ig}^n \quad (4)$$

$$R_{ig}^n = (D_{ig}/RfD_{ig} \cdot 70) \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

式中, R_{ig}^n 为非致癌物 i 经食入途径的平均个人致癌年风险(a^{-1}), RfD_{ig} 为非致癌物经食入途径的参考剂量 [$mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$].

1.4.3 总健康危害的风险

$$R^T = R^c + R^n \quad (6)$$

式中, R^T 为总健康风险.

1.4.4 健康风险评价参数选择

根据世界卫生组织 (WHO) 和国际癌症研究机

构 (IARC) 通过全面评价化学有毒物质致癌性的可靠程度而编制的分类系统, 将化学物质划分为基因毒物质 (包括致癌物质和放射性物质) 和身体毒物质 (非致癌物). 毒理学参数包括化学致癌物的致癌强度系数 (q_{ig}) 和非化学致癌物的参考剂量 (RfD_{ig}), 该参数均来源于 US EPA 和 IRIS 数据库 (表 1、表 2). 风险水平限值按照国际放射性辐射防护委员会 (ICRP) 和 US EPA 推荐的最大可接受风险水平和可接受风险范围^[11, 20].

表 1 模型参数 q_{ig}

Table 1 Values of q_{ig} of model parameters

化学致癌物	铬 (六价)	砷	镉	三氯甲烷	四氯化碳
饮水途径 $q_{ig}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	4.1E+001	1.5E000	6.1E000	4.6E-002	7.0E-002

表 2 模型参数 RfD_{ig}

Table 2 Values of RfD_{ig} of model parameters

非化学致癌物	氟化物	氰化物	汞	铅	硒	氨氮
饮水途径 $RfD_{ig}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	6.0E-002	6.0E-004	3.0E-004	1.4E-003	5.0E-003	9.7E-001
非化学致癌物	锰	挥发酚类	硝酸盐	锌	铁	
饮水途径 $RfD_{ig}/mg \cdot (kg \cdot d)^{-1}$	1.4E-001	3.0E-001	1.6E000	3.0E-001	3.0E-001	

1.5 数据统计与分析

数据统计应用 SPSS 20.0 完成, 空间分布可视化展示应用 ArcGIS 10.1 完成.

2 结果与分析

2.1 水质分析

本研究的饮用水水质指标包括国家生活饮用水卫生标准 (GB 5749-2006)^[17] 中全部常规水质指标 (除放射性指标) 和氨氮. 水质监测结果取多个监测点、多种水样类型水质检测结果的中位数 (或平均值). 除新区的部分水质指标外, 其余均呈偏态分布, 采用检测结果的中位数进行风险评价.

表 3 为部分水质指标的浓度及分布. 水质指标如下: 铬 (六价) (x_1)、砷 (x_2)、镉 (x_3)、三氯甲烷 (x_4)、四氯化碳 (x_5)、氰化物 (x_6)、氟化物 (x_7)、硝酸盐 (x_8)、铅 (x_9)、汞 (x_{10})、硒 (x_{11})、挥发酚类 (x_{12})、铁 (x_{13})、锰 (x_{14})、锌 (x_{15})、氨氮 (x_{16})、色度 (x_{17})、浊度 (x_{18})、臭和味 (x_{19})、肉眼可见物 (x_{20})、氯化物 (x_{21})、硫酸盐 (x_{22})、溶解性总固体 (x_{23})、总硬度 (x_{24})、耗氧量 (x_{25})、pH (x_{26})、铝 (x_{27})、铜 (x_{28})、阴离子合成洗涤剂 (x_{29}) 等. 由表 3 可以看出, 市区的镉、硝酸盐、铁、氨氮、铜等指标较其他两区域高, 而郊区和新区的砷、氟化物、硒等指标较高.

表 3 饮用水水质指标浓度¹⁾/ $mg \cdot L^{-1}$

Table 3 Concentrations of drinking water quality indexes/ $mg \cdot L^{-1}$

区域	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
市区	2.00E-003	8.50E-004	1.30E-003	2.00E-003	5.00E-005	1.00E-003	4.40E-001	1.20E000	1.00E-003	1.00E-004	5.00E-004	1.00E-003
郊区	2.00E-003	1.00E-003	3.00E-004	4.00E-004	1.00E-004	1.00E-003	7.00E-001	7.70E-001	1.30E-003	1.00E-004	1.27E-003	2.00E-004
新区	2.00E-003	1.00E-003	3.00E-004	1.11E-002	5.00E-005	1.00E-003	4.92E-001 *	7.99E-001 *	1.00E-003	1.00E-004	1.00E-003	1.00E-003
全市	2.00E-003	1.00E-003	3.00E-004	1.70E-003	1.00E-004	1.00E-003	5.00E-001	1.08E000	1.30E-003	1.00E-004	2.00E-004	1.00E-003
区域	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}
市区	1.50E-001	3.00E-002	3.00E-002	1.00E-001	5.58E+001	1.02E+002	3.10E+002	2.01E+002	1.75E000	7.24E000	5.00E-003	1.00E-001
郊区	5.00E-002	3.00E-002	3.00E-002	1.00E-002	4.70E+001	7.29E+001	3.68E+002	1.87E+002	1.52E000	7.94E000	4.00E-003	5.00E-002
新区	3.00E-002	3.00E-002	3.00E-002	2.00E-002	4.85E+001	8.70E+001	3.16E+002 *	1.99E+002	1.70E000	7.76E000 *	8.00E-003	3.00E-002
全市	6.10E-002	3.00E-002	3.00E-002	1.00E-002	5.00E+001	9.30E+001	3.55E+002	1.94E+002	1.69E000	7.75E000	4.00E-003	5.00E-002

1) * 为均数, 其余均为中位数

2.2 健康风险评价

依据表3水质浓度数据,按照US EPA 风险评价模型和参数计算得到各区域通过饮水途径所引起的平均个人年致癌健康风险(表4)、非致癌健康风险(表5)和总健康风险(表6)。

从表4可以看出,市区、郊区和新区的致癌物健康风险分别为 4.09×10^{-5} 、 3.83×10^{-5} 和 3.85×10^{-5} ,区域间的健康风险排序市区>新区>郊区。

表4 化学致癌物质饮水途径健康危害的平均个人年风险 R^c/a^{-1}

区域	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	R^c
市区	3.68E-005	5.72E-007	3.56E-006	4.13E-008	1.57E-009	4.09E-005
郊区	3.68E-005	6.73E-007	8.22E-007	8.26E-009	3.14E-009	3.83E-005
新区	3.68E-005	6.73E-007	8.22E-007	2.29E-007	1.57E-009	3.85E-005
全市	3.68E-005	6.73E-007	8.22E-007	3.51E-008	3.14E-009	3.83E-005

表5 非致癌物质饮水途径健康危害的平均个人年风险 R^n/a^{-1}

区域	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	R^n
市区	7.48E-010	3.29E-009	3.37E-010	3.21E-010	1.50E-010	4.49E-011	1.50E-012	2.24E-010	9.62E-011	4.49E-011	4.63E-011	5.31E-009
郊区	7.48E-010	5.24E-009	2.16E-010	4.17E-010	1.50E-010	1.14E-010	2.99E-013	7.48E-011	9.62E-011	4.49E-011	4.63E-012	7.10E-009
新区	7.48E-010	3.68E-009	2.24E-010	3.21E-010	1.50E-010	8.98E-011	1.50E-012	4.49E-011	9.62E-011	4.49E-011	9.26E-012	5.41E-009
全市	7.48E-010	3.74E-009	3.03E-010	4.17E-010	1.50E-010	1.80E-011	1.50E-012	9.13E-011	9.62E-011	4.49E-011	4.63E-012	5.62E-009

从表5可以看出,市区、郊区和新区的非致癌物健康风险分别为 5.31×10^{-9} 、 7.10×10^{-9} 和 5.41×10^{-9} ,非致癌物的健康风险的区域顺序为郊区>新区>市区。主要非致癌物的健康风险顺序为氟化物>氰化物>铅>硝酸盐氮,其中氟化物单项的风险值最高,占非致癌物健康风险比例的68.5%。每个区域和每种非致癌物的健康风险远小于ICRP 推荐的经饮水途径所致的健康危害个人的风险最大可接受水平(5.0×10^{-5})和US EPA 推荐的经饮水途径所致的健康危害个人的风险最大可接受水平(1.0×10^{-6})。

表6 饮水途径致健康危害的平均个人年总风险 R^T/a^{-1}

Table 6 Total health risk caused by the chemicals by the drinking water pathway/ a^{-1}			
区域	R^c	R^n	R^T
市区	4.09E-005	5.31E-009	4.09E-005
郊区	3.83E-005	7.10E-009	3.83E-005
新区	3.85E-005	5.41E-009	3.85E-005
全市	3.83E-005	5.62E-009	3.83E-005

表6结果显示:全市总健康风险为 3.83×10^{-5} ,市区、郊区和新区的总健康风险分别为 4.09×10^{-5} 、 3.83×10^{-5} 和 3.85×10^{-5} ,排序为市区>郊区>新区。主要饮用水健康风险来源于致癌物且相差4个数量级。全市总健康风险略低于ICRP 的

致癌物的健康风险顺序为铬(六价)>镉>砷>三氯甲烷>四氯化碳。每个区域和每种致癌物的健康风险均未超过ICRP 推荐的化学致癌物经饮水途径的最大可接受风险水平(5.0×10^{-5} ,即每年每千万人口中因饮水中各类污染物而受到健康危害甚至死亡的人数不能超过500人)且处于US EPA 推荐的经饮水途径所致的健康危害个人的风险可接受范围($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$)。

最大可接受风险水平且处于US EPA 推荐的经饮水途径所致的健康危害个人的风险可接受范围。

2.3 基于GIS的健康风险可视化

GIS是对整个或部分地球表面与空间地理分布有关的数据信息进行采集、存储、管理、分析、描述和应用的计算机系统。它结合空间信息和属性信息,提供了对空间数据分析和空间可视化展示的手段。绘制风险评价信息专题图进行空间可视化展示(图2和图3)。由图2可以直观地看出健康风险在市区、郊区和新区的空间分布。总健康风险主要归因为致癌物的健康风险,市区致癌物镉的健康风险明显高于郊区和新区,而郊区的非致癌物氟化物的健康风险明显高于其他两区域。

2.4 基于GIS的健康风险因子探索

由表6可以看出,市区的致癌物健康风险和郊区的非致癌物健康风险较高,通过GIS绘制的致癌物和非致癌物健康风险空间分布专题图可以看出,市区致癌物健康风险偏高的主要原因为水质指标镉健康风险偏高,而郊区非致癌物健康风险偏高主要归因于水质指标氟化物健康风险偏高。进一步绘制市区致癌物镉和郊区非致癌物氟化物空间分布专题图以深入探索其具体空间分布及产生的原因(图3)。

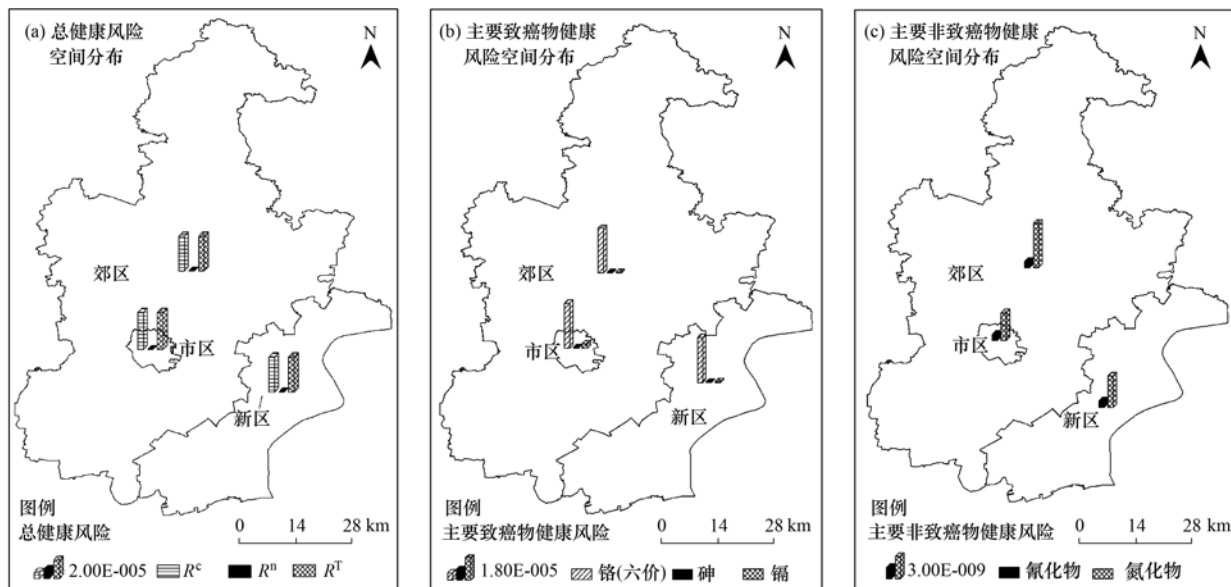


图2 天津市饮用水健康风险空间分布

Fig. 2 Health risk spatial distributions of drinking water in Tianjin

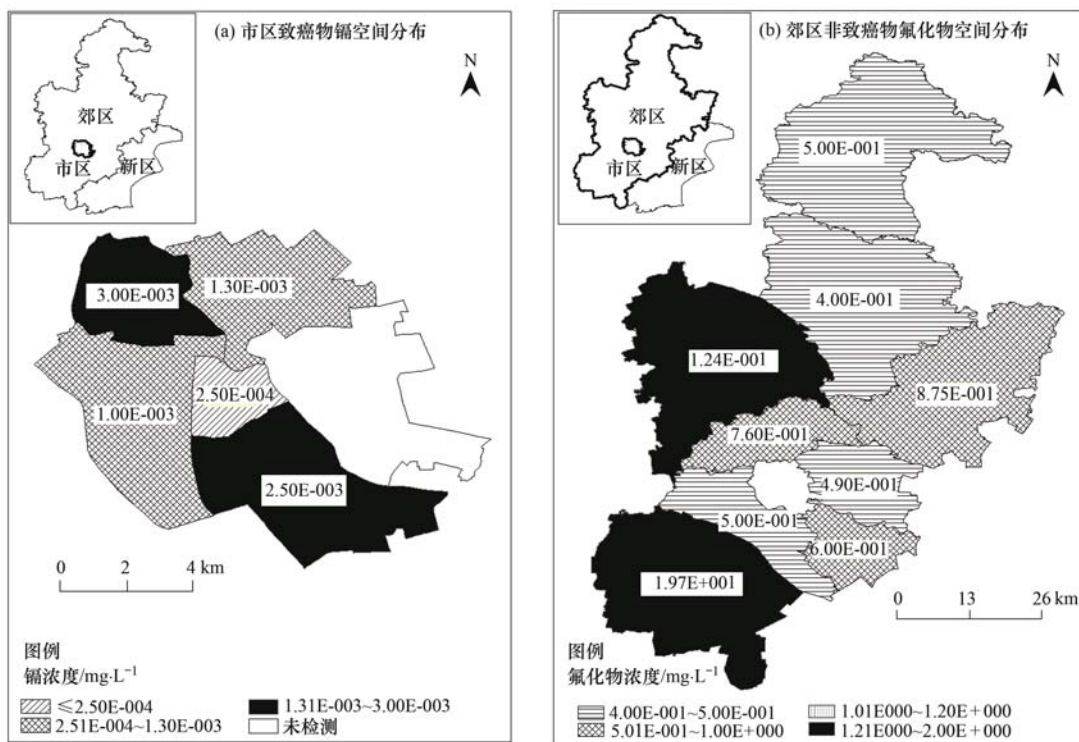


图3 市区和郊区饮用水风险因子空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of risk factors of drinking water in urban and rural areas

由图3(a)可以看出,市区中的2/5的水样镉浓度偏高。市区存在统一的供水水源、相近或相同的水质处理工艺、输配水管网和监管机制,究竟是何原因导致了镉浓度空间分布的差异?本研究利用GIS对风险因子镉浓度出现较大空间差异进行可视化展示,清晰地展示出市区东南和西北方位的两区县镉浓度偏高。进一步采用现场调查、对比分析的

方法对样品采集监测点位、供水水厂和样品的实验检测等各环节进行了调查,以深入探索差异产生的原因。

调查发现原因在于信息系统的录入规则,规则要求当小于检出限值(未检出)时,录入检出限值的一半。在国家生活饮用水标准检验方法(GB/T 5750-2006)^[19]中水质指标镉存在多种国家标准推

荐的检测方法,其中包括质谱法、无火焰原子吸收光度法、火焰原子吸收光度法和双硫脲分光光度法等,但其检测的灵敏度大小不一,检测的限值不尽相同,基于信息系统录入规则要求录入检测限值一半产生的结果也就产生了差异. 本研究中镉浓度偏高的市区 2 区在水质指标镉的检测上均采用了最低检出限值为 $5.0 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的火焰原子吸收分光光度法(直接法),其最低检测限较火焰原子吸收分光光度法(萃取法)的最低检出限值($2.5 \times 10^{-1} \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)高 20 倍. 当检测结果均为小于检测限值时,根据信息系统录入的规则将最低检出限值的一半录入系统,其结果直接导致水质镉浓度较采用火焰原子吸收分光光度法(萃取法)的镉浓度高 20 倍. 因此市区风险因子镉的浓度由于检测方法和系统录入规则可能被拔高,其健康风险结果可能被夸大,在对待此项风险因子的评价结果和结论时需谨慎. 调查还发现实验检测人员和信息填报人员关注水质是否达到国家标准,并未关注检测结果与相应限值的距离. 这可能导致对长期饮用少量污染物(水质指标达到国家标准)带来的潜在健康危害的忽略.

由图 3(b)可以看出,郊区的氟化物浓度较高且分布不均,2/9 区县的水氟浓度超过了国家小型集中式供水氟化物 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的限值,3/9 区县的水氟浓度已接近集中式供水氟化物 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的限值. 本研究结果表明天津市郊区仍然存在着高氟地区,这与该市存在饮水型氟中毒地区且氟中毒病情较严重的现状相吻合^[21]. 因此,饮用水中氟化物产生的健康危害应予以重点关注.

水质指标浓度在市区、郊区和新区这 3 个不同区域的分布上存在着一定的差异,其原因可能与饮用水水源的选择、水质的净化工艺和输配水管网的材质、服役时间和输送距离等多方面存在差异有关. 进一步调查研究发现,在水源选择方面,市区全部以引滦入津工程为水源,郊区的水源水以地下水为主,新区的水源则是两者兼而用之. 相对引滦入津工程,天津市地下水水氟浓度偏高,这是郊区水氟浓度偏高的主要原因之一. 即使均采用地下水作为水源,不同区域的地下水水质也可能存在地域差异;在饮用水水质净化处理方面,市区全部由大型集中式供水水厂供应,郊区则存在着一定数量的小型集中式供水和分散式供水,饮用水水质处理措施缺失或不足;在输配水管网方面,天津市输配水管网的材质存在着多种材质并存(铸铁管、镀锌管、铅管、

黑皮管和聚氯乙烯管等),新老管并用(服役 $> 50 \text{ a}$ 、 $40 \sim 50 \text{ a}$ 、 $30 \sim 40 \text{ a}$ 和 $< 30 \text{ a}$)的局面,且在地域分布上存在一定的差异^[22]. 再加上区域面积差异较大,郊区面积最大,新区次之,市区最小. 因此在输配水管网输送距离、监测检验和监督管理覆盖程度等方面均存在差别.

3 讨论

选择部分国内外不同地区风险评价研究结果进行比较(表 7). 本研究的致癌物健康风险与江苏省^[20]和南昌市^[23]饮用水致癌物健康风险水平接近,均为铬(六价)的致癌风险最高,但其中镉与砷的致癌风险顺序相反. 与天津本地^[24]和地域接近的北京市^[15]水源水健康风险水平接近,但较阿根廷^[25]、湖北某市^[26]、黑龙江省^[27]和辽宁大连^[28]风险低,较济南农村^[29]和浙江 J 市^[9]风险高. 非致癌物健康风险与浙江 J 市接近,较其他区域低. González 等^[30]根据男性、女性和 2~3 岁儿童人群的不同参考剂量对西班牙特内里费岛末梢水的单一水质指标氟化物进行风险评价,评价对象更具体,评价结论更准确,但采用单一指标进行健康风险评价存在只见局部不见整体的弊端. 本研究的总健康风险略低于 ICRP 的最大可接受风险水平,与江苏省^[20]和南昌市^[23]饮用水风险水平接近,与大连水源水^[28]的风险评价结论一致,均得出了致癌物风险大于非致癌物,致癌物应优先控制六价铬,非致癌物应优先控制氟化物的结论. 由于采样时间、水样类型和水质指标数量等方面的差异,不同地区间风险评价结果的可比性值得商榷.

根据 US EPA 的健康风险评价方法,评价结果由水质指标的浓度决定. 由于水文、地域、气候、净化工艺、输配水管网和检测方法等多种因素的影响,各地水源水和饮用水中水质指标浓度可能出现相同、相近和差异等多种情况.

基于 GIS 的风险评价研究多针对水源^[31]、空气^[32]、土壤^[33]等研究对象. 有研究基于 ArcGIS 采用反距离权重空间插值分析分别对水源水^[34]、地下水^[35]的水质开展健康风险评价,将已知采样点的水质监测结果扩展到未知无监测点区域,估算整个研究区域内评价指标的值,并通过 GIS 实现了各指标的空间可视化,清晰地展示了整个研究区域水质指标的空间分布. 插值可以将已知监测点数据通过最优无偏估计扩展成相应区域的面数据,但其前提是数据在空间分布呈现一定的规律性. 本研究的对象为饮用

水,其供应的区域范围由输配水管网的布设决定,其水质的分布受供水构筑物 and 输配水管网的分布、材质和使用年限等因素的影响,故本研究在未获得以上相关信息时未能进行水质的空间插值分析。

表 7 国内外不同地区健康风险评价结果比较¹⁾

Table 7 Comparison of health risk worldwide

地点	年份	水样类型	水质指标	致癌物健康风险	非致癌物健康风险	总健康风险	文献
阿根廷	2010 ~ 2011	饮用水	As	2.10E-002	—	2.10E-002	[25]
江苏省	2004	出厂水	Cr、As、Cd、Pb、Hg、Zn	4.83E-005	6.28E-007	5.47E-005	[20]
湖北某市	1993 ~ 2001	出厂水	22 种致癌物和 77 种非致癌物	4.78E-003	6.78E-007	4.78E-003	[26]
南昌市	2011	出厂水	Cr、As、Cd 和 8 种非致癌物	9.17E-005	1.37E-006	9.31E-005	[23]
黑龙江	2004 ~ 2005	饮用水	As、F、NO ₃ ⁻ -N	6.57E-004	7.55E-008	6.57E-004	[27]
济南农村	2011 ~ 2012	末梢水	As、Fe、Mn、F、NO ₃ ⁻ -N、NH ₄ ⁺ -N	3.29E-006	1.90E-007	3.48E-006	[29]
浙江 J 市	2012 ~ 2013	饮用水	氯化消毒副产物	7.30E-006	3.40E-009	7.30E-006	[9]
辽宁大连	2007 ~ 2011	水源水	Cr、As、Cd 和 7 种非致癌物	2.15E-004	2.08E-008	2.15E-004	[28]
北京	—	水源水	Cu、Hg、Cr、As	2.16E-005	2.80E-008	2.16E-005	[15]
天津市	2003 ~ 2007	水源水	Cr、As、Cd、F、NH ₄ ⁺ -N、酚、CN、Hg、Pb、Cu	1.60E-005	5.20E-010	1.60E-005	[24]
天津市	2014	饮用水	饮用水常规水质指标(除放射性指标)和 NH ₄ ⁺ -N	3.83E-005	5.62E-009	3.83E-005	本研究

1) 当有多个地区多个年份风险结果时优选取均值,文中未出现均值时取较高风险值;“—”表示文中无相关数据

目前大多数的水质风险评价研究集中在水源水^[11~14, 20, 34],笔者认为饮用水的健康风险评价应聚焦于末梢水。其原因 US EPA 的健康风险评价模型是建立在每天饮水量为 2.2 L 的基础上,而水源水很少被直接饮用,故人群暴露的可能性极小,因此饮用水安全风险更应侧重对末梢水进行健康风险评价,其结果更加真实准确。水源水的健康风险评价结果因与实际暴露水平的差异应仅作为水厂水质净化处理和水源环境保护等方面的参考。

需要指出的是,本研究采用 US EPA 推荐的模型对该市饮用水健康风险进行定量评价,其他的风险评价方法^[36]可能得出不完全一致的风险结果和结论。评价主要针对饮用水常规水质指标,相对系统全面^[37],但还存在着一定的局限:应用 US EPA 的公式,均引用国际通用系数,可能与该市的实际情况并不完全一致^[38],未涉及到微生物^[39, 40]和放射性^[41]水质指标的健康风险;未涉及摄入食物、吸入空气和经皮接触等其他途径^[42]带来的健康风险;未考虑非常规水质指标等其他化学物质^[43, 44]的健康风险及其相互作用的影响;还未考虑饮水习惯(烧开、净化等)对水质产生的影响^[9]。以上情况均可能导致风险评价的结果和结论出现偏差;综上所述,此次饮用水健康风险较实际风险可能存在一定的偏差,风险评价有待进一步完善。

4 结论

(1) 天津市饮用水个人年健康总风险小于 ICRP 最大可接受风险水平(5.0×10^{-5}),但处于 US

EPA 可以接受的风险范围($1.0 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-6}$),初步认为该市饮用水健康风险处于可接受水平,不会对人体产生明显的健康危害。

(2) 天津市饮用水区域间健康风险排序:总健康风险为市区 > 新区 > 郊区,致癌物健康风险为市区 > 新区 > 郊区,非致癌物健康风险为郊区 > 市区 > 新区。

(3) 天津市饮用水水质健康风险排序为致癌物 > 非致癌物,二者相差 4 个数量级,该市的饮用水主要健康风险来源于致癌物,占 99.99%,非致癌物仅占 0.01%。致癌物健康风险顺序为铬(六价) > 镉 > 砷 > 三氯甲烷 > 四氯化碳,非致癌物的健康风险顺序为氟化物 > 氰化物 > 铅 > 硝酸盐氮。

(4) 降低饮用水中铬(六价)、镉和砷的浓度能有效控制饮水途径致癌物健康风险和总健康风险且应优先控制铬(六价),降低饮用水中氟化物和氰化物的浓度能有效控制饮水途径非致癌物健康风险且应优先控制氟化物。

(5) GIS 能较好地应用于饮用水健康风险评价信息的空间可视化和进一步的风险因子探索。

参考文献:

[1] 王强,赵月朝,屈卫东,等. 1996-2006 年我国饮用水污染突发公共卫生事件分析[J]. 环境与健康杂志, 2010, 27(4): 328-331.

[2] 程柳,王海邻,索乾善. 小浪底水库库鱼体内重金属的富集及健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(5): 454-455.

[3] 谢文平,朱新平,郑光明,等. 广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4663-4670.

- [4] 王鑫,徐路平,杨云龙. 3 种心脏手术风险评估系统的应用研究[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2013, **14**(3): 305-308.
- [5] 冷朋波,边国林,王爱红,等. 美国 EPA 吸入风险模型在木质家具制造企业职业健康风险评估中的应用[J]. 环境与职业医学, 2014, **31**(11): 858-862.
- [6] 武珊珊,张岩,马岩,等. 某大型芳烃装置低水平苯职业性接触致癌风险评估[J]. 中国职业医学, 2015, **42**(2): 205-207.
- [7] 董婷,李天昕,赵秀阁,等. 某焦化厂周边大气 PM₁₀ 重金属来源及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1238-1244.
- [8] 陈星,马建华,李新宁,等. 基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1068-1074.
- [9] 李晓玲,刘锐,兰亚琼,等. J 市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3474-3479.
- [10] Hou D B, Ge X F, Huang P J, *et al.* A real-time, dynamic early-warning model based on uncertainty analysis and risk assessment for sudden water pollution accidents [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(14): 8878-8892.
- [11] 王若师,许秋瑾,张娴,等. 东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [12] 倪彬,王洪波,李旭东,等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(1): 74-79.
- [13] Giri S, Singh A K. Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(3): 63.
- [14] 李永丽,刘静玲. 滦河流域不同时空水环境重金属污染健康风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(6): 1177-1184.
- [15] 高继军,张力平,黄圣彪,等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学, 2004, **25**(2): 47-50.
- [16] 乔敏敏,季宏兵,朱先芳,等. 密云水库入库河流沉积物中重金属形态分析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(12): 3324-3333.
- [17] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [18] 郭占景,苏振军,范尉尉,等. 石家庄市农村饮用水中氟化物健康风险评估[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(3): 72-73.
- [19] GB/T 5750-2006, 生活饮用水标准检验方法[S].
- [20] 郑浩,于洋,丁震,等. 江苏省饮用水重金属污染物健康风险评价[J]. 江苏预防医学, 2012, **23**(4): 5-7.
- [21] 王向会. 天津市输配水管网水质变化的研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. 10-12.
- [22] 刘洪亮,韩树清,侯常春,等. 天津市地氟病病区流行病学特征分析[J]. 中国公共卫生, 2010, **26**(3): 346-347.
- [23] 章英,谢许情,熊文艳. 南昌市生活饮水健康风险评价[J]. 现代预防医学, 2014, **41**(13): 2327-2329.
- [24] 王秋莲,张震,刘伟. 天津市饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(5): 187-190.
- [25] Navoni J A, De Pietri D, Olmos V, *et al.* Human health risk assessment with spatial analysis: study of a population chronically exposed to arsenic through drinking water from Argentina[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **499**: 166-174.
- [26] 张辉. 某市水源水和出厂水化学污染物健康风险评价与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012. 9-50.
- [27] 唐行鹏,李二平,刘宝玲. 黑龙江省农村饮用水水质健康风险评价[J]. 现代生物医学进展, 2012, **12**(11): 2182-2185.
- [28] 魏金波,郑怀军,刘欣. 大连市水环境健康风险评价[J]. 环境科学导刊, 2012, **31**(5): 71-73.
- [29] 李新伟,刘仲,张扬. 济南市农村集中式供水水质健康风险评价[J]. 卫生研究, 2014, **43**(2): 309-310.
- [30] González S N, Rubio A C, Gutiérrez F á, *et al.* Tap water as a dietary source of exposure to fluoride in Tenerife; risk assessment [J]. *Nutrición Hospitalaria*, 2015, **31**(4): 1787-1794.
- [31] 黄金良,黄亚玲,李青生,等. 流域水质时空分布特征及其影响因素初析[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1098-1107.
- [32] 张宝春,陈彦军,李伟铿,等. 基于 GIS 的珠三角区域空气质量时空特征研究[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(4): 600-605.
- [33] 谢正苗,李静,王碧玲,等. 基于地统计学和 GIS 的土壤和蔬菜重金属的环境质量评价[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 2110-2116.
- [34] 叶剑,冯坤,倪福全. 基于 ArcGIS 的水源地水质健康风险研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(4): 10-15.
- [35] 张士俊,李瑞丽,武鹏林. 基于 ArcGIS 的辛安泉地下水水质评价研究[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(5): 9-12.
- [36] 许海萍,张建英,张志剑,等. 致癌和非致癌环境健康风险的预期寿命损失评价法[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 2148-2152.
- [37] Amjad H, Hashmi I, Rehman M S U, *et al.* Cancer and non-cancer risk assessment of trihalomethanes in urban drinking water supplies of Pakistan [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **91**: 25-31.
- [38] 段小丽,王宗爽,王贝贝,等. 我国北方某地区居民饮水暴露参数研究[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(9): 1216-1220.
- [39] Burnet J B, Penny C, Ogorzaly L, *et al.* Spatial and temporal distribution of *Cryptosporidium* and *Giardia* in a drinking water resource: implications for monitoring and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 1023-1035.
- [40] Balderrama-Carmona A P, Gortáres-Moroyoqui P, Álvarez-Valencia L H, *et al.* Quantitative microbial risk assessment of *Cryptosporidium* and *Giardia* in well water from a native community of Mexico[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2014, **10**: 1-13.
- [41] 郑孝俊,梁静静. 城市饮用水放射性污染风险评估[J]. 水利水电快报, 2010, **31**(8): 9-13.
- [42] 郝汉舟,陈同斌,吴基良,等. 武汉市儿童多途径铅暴露风险评估[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 2075-2082.
- [43] 李昆,赵高峰,周怀东,等. 枯、平、丰水期长江 3 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2574-2579.
- [44] 唐访良,张明,徐建芬,等. 千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1735-1741.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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