

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期

Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)

新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM_{2.5} 的影响 逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)

基于网格的长三角 PM_{2.5} 分布影响因素及交互效应 黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)

ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)

中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 丁志健, 王格慧 (3127)

四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)

河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用 邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)

九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 黄亚玲, 黄金良 (3156)

滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)

白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)

镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)

洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)

苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)

武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)

升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)

青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)

三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)

哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)

湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)

补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海淼, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)

蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)

长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例 马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)

长江下游居民区降水地表径流的污染特征 郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)

潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)

基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估 秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)

蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸥 (3348)

污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)

基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)

石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)

一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)

外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 唐义, 马邕文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)

臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)

间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 王敬鑫, 张富国, 张杰 (3405)

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)

矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)

2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)

麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)

水肥管理对热带地区双季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)

耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)

铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)

农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 陈莹, 刘汉燧, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)

亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例 刘旭, 王训, 王定勇 (3507)

深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)

同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)

两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)

青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)

成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)

土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)

《环境科学》征订启事(3315) 《环境科学》征稿简则(3357) 信息(3391, 3441, 3564)

基于概率方法的中国居民饮水途径砷暴露健康风险评估

秦宁^{1,2}, 刘运伟¹, 侯荣¹, 王彩云², 王贝贝¹, 段小丽¹

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083; 2. 北京市城市排水监测总站有限公司, 北京 100012)

摘要: 通过文献调研收集我国3类主要饮用水类型的总砷浓度. 通过回归模型获得不同年龄段人群饮水暴露参数分布模式. 基于概率方法评价不同水体和不同人群由于砷暴露造成的致癌风险和非致癌风险. 结果发现, 全国各类水体的总砷浓度几何均值为 $(13.0 \pm 38.1) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 其中饮用水中的最高砷浓度出现在内蒙古, 广西和山西饮用水中也有较高总砷检出. 与相关标准中的砷浓度标准相比, 未经处理的井水和未经处理的地表水源水超标的概率分别为23.2%和18.4%. 非致癌风险评估发现, 井水和地表水源水饮用人群超过单日暴露剂量阈值的概率分别为24.0%和19.5%. 致癌风险评估发现, 我国全人群终生饮水砷摄入导致的致癌风险(LCR)中位数为 3.22×10^{-5} , 处于可接受水平. 其中18~45岁人群有最大的风险贡献, LCR中位数为 1.37×10^{-5} . 井水和地表水源水饮用人群LCR仍有一定概率超过美国环保署(US EPA)规定的严重风险水平. 综上所述, 我国居民存在潜在的饮用水砷暴露健康风险, 需要进一步加强饮用水砷污染控制以降低砷引发的健康风险和保障饮水安全. 同时建议加强风险阈值研究以期真实反映砷暴露风险, 为保护居民健康提供科学依据.

关键词: 砷; 饮用水; 暴露参数; 健康风险评估; 风险阈值

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3338-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202010116

Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents

QIN Ning^{1,2}, LIU Yun-wei¹, HOU Rong¹, WANG Cai-yun², WANG Bei-bei¹, DUAN Xiao-li¹

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Urban Drainage Monitoring Center Co., Ltd., Beijing 100012, China)

Abstract: The total arsenic concentrations of the three main drinking water types in China were determined through a systematic literature review. The distribution models of drinking water exposure parameters for different age groups were obtained using the regression method. The carcinogenic and non-carcinogenic risks of different population groups caused by arsenic exposure through different drinking water types were evaluated by a probabilistic risk assessment. The results showed that the geometric mean of total arsenic content in all the drinking water samples in China was $(13.0 \pm 38.1) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. The highest arsenic content was found in the Inner Mongolia Autonomous Region, followed by Guangxi and Shanxi. Based on the relevant standards for drinking water quality, the probability exceeding the threshold value of groundwater and source water is 23.2% and 18.4%, respectively. According to the results of non-carcinogenic risk assessment, the probability of the residents drinking well water and surface water from the water source area exceeding the daily average exposure dose threshold was 24.0% and 19.5%, respectively. According to the carcinogenic risk assessment, the median of carcinogenic risk caused by arsenic in drinking water in China was 3.22×10^{-5} , which is acceptable. The population group of 18-45 years old had the highest risk, and the median LCR was 1.37×10^{-5} . There was still a certain probability that the LCR of drinking well water and surface water would exceed the acceptable risk level recommended by the US EPA. In conclusion, the potential health risks caused by arsenic exposure through drinking water intake exist among Chinese residents. Further control of the arsenic concentration in drinking water is required to reduce the health risk and improve the safety of drinking water. Meanwhile, it is suggested to strengthen the research on risk threshold to provide a scientific basis for the residents' health protection.

Key words: arsenic; drinking water; exposure parameters; health risk assessment; threshold value

砷是一种自然界中广泛存在的类金属元素, 长期摄入过量的砷会导致严重的健康危害. 低剂量的砷暴露可以引发色素沉着、角化病和可能的血管并发症等症候^[1]. 长期暴露于高砷环境中导致人群出现的一系列慢性砷中毒症状称为地方性砷中毒. 流行病学证据表明, 砷通过呼吸和消化道的摄入可以导致包括肺癌、膀胱癌和皮肤癌在内的多种癌症^[2]. 因此砷已被世界卫生组织和美国环保署(US EPA)列为第I类致癌物质.

饮水是砷暴露的重要途径. 水中的砷有多种来源, 水中原有的矿物质、农药的渗入以及其他含砷物

质的使用等都会造成水体的砷浓度增高. 饮水引起的砷暴露在美国、印度和孟加拉国等国家造成了严重的健康影响^[3]. 目前在亚洲受到饮水型地砷病威胁的人口约5千万. 中国是受饮水砷污染危害比较严重的国家之一, 我国大陆于20世纪80年代发现饮水型地砷病^[4]. 目前中国的砷中毒的流行区域涉及8省37个县^[5]. 砷中毒患者超过万人. 其中内蒙

收稿日期: 2020-10-19; 修订日期: 2021-02-27

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(FRF-TP-18-071A1, FRF-TP-19-047A1)

作者简介: 秦宁(1984~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境健康, E-mail: qinning@ustb.edu.cn

古和山西为我国饮水型地方性砷中毒重病区^[6]。

鉴于饮用水砷中毒的发生频率高且波及范围大,已有大量的研究致力于砷在天然水体和饮用水中的浓度水平、致毒机制、健康风险和疾病负担等方面的研究^[6-8],并在此基础上制定了浓度阈值和暴露剂量阈值,从环境浓度水平和人体暴露剂量两个方面对饮水砷暴露进行控制。然而现有研究对于饮水类型、饮水量和饮水砷暴露的年龄分布等因素尚缺乏系统的研究。基于此,本研究通过文献调研系统分析中国不同类型饮用水的浓度水平和分布特征;结合中国不同年龄段人群饮水暴露参数,估计各群体的健康风险;在此基础上探讨造成风险评估不确定性的来源,以期为我国饮用水砷污染控制提供参考,同时为饮用水水质标准的合理性修订提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中饮水总砷浓度数据来自于文献统计。文献统计方法主要以“砷、重金属、类金属和饮用水”等为检索词通过中国知网、万方和维普三大中文数据库进行联合检索;英文文献以 arsenic、metal、drinking water 和 China 等检索词通过 Web of Science 和 PubMed 等英文检索平台进行检索。各数据库检索时间范围均为从该数据库最早收录的文献到 2020 年 10 月 1 日。为了保证所收集数据的准确性与有效性,采用以下 4 点为依据进行文献的筛选:①收集采纳一次原始采样数据,二次利用的数据样品如来自综述、Meta 分析、建模推理等相关文献,所得的样品浓度数据不纳入分析;②根据水类型的不同将纳入研究的水源数据分为 3 类进行合并,分别是饮用自来水(自来水)、不经处理饮用井水(井水)、不经处理饮用地表水(地表水)。其中地表水主要包括作为饮用水源地的湖泊和水库等地表水;③测定暴露浓度为总砷浓度,单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。低于检出限的,录入数据记为二分之一检出限。文献值为浓度范围的,录入数据记为中位数;④重金属测定方法为国家标准方法或 US EPA 标准方法。经过筛选,共获得目标文献 68 篇,文献涵盖了 20 个省、自治区和直辖市饮用水中总砷浓度。

1.2 暴露评估和风险表征

砷暴露包含多个健康终点,其中既包括致癌风险也包括非致癌风险。本研究通过不同的风险表征方法对饮用水的砷暴露进行评估。一般认为生物体对非致癌物的反应有剂量阈值,低于阈值则认为不产生不利于健康的影响,风险大小用风险商(hazard quotient, HQ)来表示:

$$\text{HQ} = \text{ADD}/\text{RfD} \quad (1)$$

式中,ADD(average daily dose)为日均摄入剂量,RfD 为污染物的参考剂量 $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}]$ 。其中,非致癌风险的致病终点为皮肤的色素沉着、角化病和可能的血管并发症。US EPA 推荐的 RfD 值为 $3 \times 10^{-4} \text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 。当 $\text{HQ} < 1$ 时,认为有害健康影响不太可能发生,而当 $\text{HQ} > 1$ 时,可能存在潜在的非致癌健康风险。与非致癌风险不同,通常认为致癌风险没有剂量阈值。只要有暴露存在,即会对人体产生不利影响。致癌风险定义为长期日摄入量与致癌斜率因子的乘积,表示暴露于该物质而导致的一生中超过正常水平的癌症发病率。致癌风险 LCR (lifetime cancer incidence risks) 的定义为:

$$\text{LCR} = \text{CDI} \times \text{SF} \quad (2)$$

式中,SF 为化学致癌物的致癌斜率系数,CDI (chronic daily intake) 为长期日摄入量。

其中,ADD 和 CDI 的计算方法为:

$$\text{ADD} = c \times \text{IR}/\text{BW} \quad (3)$$

$$\text{CDI} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (4)$$

式中, c 为饮用水中砷浓度 $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$,IR 为日饮水量 $(\text{mL}\cdot\text{d}^{-1})$,BW 为平均体重(kg);EF 为暴露频率,取值 $365 \text{d}\cdot\text{a}^{-1}$,ED 为暴露历时,本研究取 70 a,AT 为总平均暴露时间 $(70 \text{a} \times 365 \text{d}\cdot\text{a}^{-1})$;其中, c 、IR 和 BW 在本研究中作为变量处理。通过蒙特卡洛(Monte Carlo)方法模拟推算得到不同人群和饮水类型的致癌和非致癌风险。

1.3 中国人饮水暴露参数

居民饮水量和体重是影响饮水风险的重要暴露参数,本研究目标人群为年龄范围是 6~70 岁的各中国人群。根据人群生理参数的差异分为 6~9、9~12、12~15、15~18、18~45、45~60 和 60~70 岁年龄段 7 个亚组。各个人群亚组的暴露参数 5 分位数、25 分位数、中位数、75 分位数和 95 分位数从文献^[9]获得。通过对各人群体重和饮水量的各分位数进行统计检验和分布估计发现,各人群体重符合正态分布,饮水量符合对数正态分布。通过正态分布和累积正态分布回归的方式进行拟合。正态模型和对数正态模型公式如下,并对参数的拟合结果运用最小二乘法 R^2 进行评价。

正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 概率累积函数为:

$$Y = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (5)$$

对数正态分布 $\text{LN}(\mu, \sigma)$ 累积函数为:

$$Y = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf} \left(\frac{\ln x - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right] \quad (6)$$

正态分布条件下, μ 为均值, σ 为标准差, 对数正态分布条件下, μ 为取自然对数后的均值, σ 为取自然对数后的标准差. erf 函数表达为:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi} \int_0^z e^{-t^2} dt \quad (7)$$

得到暴露参数饮水量和体重的分布如表 1 所示.

表 1 各亚组人群暴露参数分布

Table 1 Exposure parameters of sub-population groups

| 项目 | 年龄段 / 岁 | 分布类型 | 参数 a | 参数 b | R^2 |
|-------|------------------------|------|--------|--------|-------|
| 体重/kg | 6~9 | 正态 | 26.96 | 7.10 | 0.955 |
| | 9~12 | 正态 | 37.32 | 11.64 | 0.968 |
| | 12~15 | 正态 | 47.18 | 12.56 | 0.984 |
| | 15~18 | 正态 | 55.16 | 10.86 | 0.979 |
| | 18~45 | 正态 | 62.24 | 14.82 | 0.982 |
| | 45~60 | 正态 | 63.62 | 13.82 | 0.988 |
| | 60~70 | 正态 | 60.48 | 14.13 | 0.990 |
| | 18~70 | 正态 | 62.20 | 14.45 | 0.987 |
| | 饮水量/mL·d ⁻¹ | 6~9 | 对数正态 | 6.98 | 0.53 |
| 9~12 | | 对数正态 | 7.07 | 0.52 | 0.988 |
| 12~15 | | 对数正态 | 7.14 | 0.58 | 0.993 |
| 15~18 | | 对数正态 | 7.15 | 0.66 | 0.983 |
| 18~45 | | 对数正态 | 7.53 | 0.79 | 0.991 |
| 45~60 | | 对数正态 | 7.53 | 0.80 | 0.991 |
| 60~70 | | 对数正态 | 7.46 | 0.80 | 0.993 |
| 18~70 | | 对数正态 | 7.51 | 0.80 | 0.992 |

1.4 统计分析方法

使用 SPSS21 软件对饮用水砷浓度数据进行 Shapiro-Wilk 正态检验和 Kruskal-Wallis 检验; 使用 Origin2018 软件绘制环境浓度与风险数据概率分布曲线; 使用 Monte Carlo 方法模拟人群的日均暴露

剂量(ADD)和致癌风险(LCR)并对参数的敏感度进行定量分析. 模拟及灵敏度分析均使用 Crystal Ball 软件完成.

2 结果与分析

2.1 饮用水砷浓度水平

经过文献筛选, 共获得 20 个省级行政区的 75 个饮用水体样本砷浓度数据, 如表 2 所示. 全部水体的均值 ρ (总砷) 为 $(13.0 \pm 38.1) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 3 类水体相比较, 自来水样本的均值最低, 为 $(0.63 \pm 0.50) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 井水和水源水总砷浓度水平相对接近, 分别为 $(17.6 \pm 38.1) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(16.4 \pm 43.3) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 通过 Kruskal-Wallis 检验发现, 井水与地表水源水的浓度水平在 $P < 0.05$ 水平下存在显著差异. 井水总砷浓度高于地表水源水的总砷均值. 除不同类型饮水的砷浓度差异外, 通过表 2 中数据可以发现, 大多数省市饮水砷浓度较低, 个别省市的样本则存在严重的砷中毒风险. 最高砷浓度出现在内蒙古. 4 个内蒙古井水样本的均值为 $305 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 广西和山西的饮用水也有较高的总砷检出, 均值分别为 $134 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $45.3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 与国外的研究相比, 饮用水最高砷浓度与国际上高污染地区处于同一水平. 其中内蒙古的饮水砷浓度接近于孟加拉国^[59] 地下水砷浓度水平 ($328 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), 略低于巴基斯坦的高砷井水样本的中值 ($420 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)^[60]. 广西饮水砷浓度水平与越南^[61] 井水的 $159 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 相接近, 高于伊朗饮用水中的报道 ($3.11 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)^[62].

表 2 1992~2020 年中国居民饮用水中总砷浓度统计数据¹⁾

Table 2 Total arsenic concentration in drinking water of Chinese residents during 1992-2020

| 省份 | 年份 | 饮用水类型 | 均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ | 文献 |
|-----|-----------------------|-----------|---------------------------------------|------------|
| 安徽 | 2005 | C | 0.01 | [10] |
| 北京 | 2003、2005、2011 和 2015 | A、B 和 C | 1.11 | [11~14] |
| 福建 | 2012 | C | 4.50 | [15] |
| 甘肃 | 2015 | A | 1.14 | [16] |
| 广东 | 2010、2012 和 2018 | A、B 和 C | 0.41 | [17~19] |
| 广西 | 2015 和 2017 | C | 134 | [20,21] |
| 贵州 | 2018 | B | 0.44 | [22] |
| 河北 | 2012、2014、2006 和 2020 | A 和 B | 1.15 | [23~27] |
| 湖北 | 2012 和 2017 | B | 11.5 | [3,28] |
| 湖南 | 2008、2012、2013 和 2019 | A、B 和 C | 1.03 | [29~33] |
| 江苏 | 2013~2017 | A、B 和 C | 7.70 | [34~38] |
| 辽宁 | 2012 | B | 0.04 | [39] |
| 内蒙古 | 1992、2001 和 2017 | B | 305 | [5,40~42] |
| 山东 | 2011、2016 和 2020 | A、B 和 C | 1.16 | [26,43,44] |
| 山西 | 1997~2019 | B | 45.3 | [45,46] |
| 陕西 | 2004 和 2016~2018 | A 和 B | 6.70 | [42,47~49] |
| 上海 | 2003 和 2008~2010 | A 和 C | 0.57 | [50,51] |
| 西藏 | 2008 和 2012 | B 和 C | 29.1 | [52,53] |
| 新疆 | 2010、2015 和 2018 | A、B、C 和 D | 0.79 | [54~57] |
| 宁夏 | 2015 | B | 10.0 | [58] |

1) A 表示饮用自来水, B 表示不经处理饮用井水, C 表示不经处理饮用地表水, D 表示新疆特殊饮用水类型, 储藏水

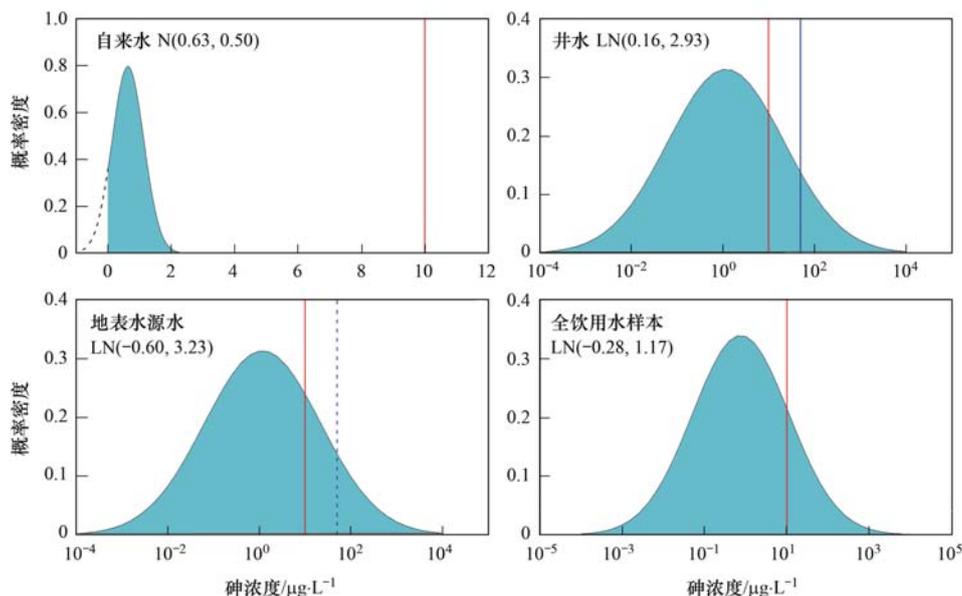
饮用水文献调研结果与大量流行病学调查结果相一致. 饮水型地方砷中毒在中国由来已久, 在 20 世纪 80 年代的新疆就发现井水砷超标造成的地方性砷中毒人群, 之后随着调查的深入, 在各个省市发现大量砷中毒病区. 新疆、山西、内蒙古、宁夏、吉林、青海、安徽、北京和四川都曾发现过饮水型地砷病的病区. 其中内蒙古河套地区是砷中毒的最主要流行区域之一. 1992 年一项针对内蒙古河套地区的 15 个村的调查发现 473 个饮用井水样本中砷超标率高达 69.1%, 并发现砷致皮肤病患者 1 774 人^[5]. 此外, 山西省高砷区 52% 井水含砷高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[63], 也是饮水砷中毒的高发地区.

2.2 基于概率方法的饮水砷浓度超标率

污染浓度与环境标准的比较是最为直接的风险表征方法. 由于饮用水暴露频率高, 因此由饮水导致的砷中毒的毒性危害大, 分布范围广. 饮用水砷的水质限值也一直受到各国和卫生、环境组织的关注. 美国公共卫生署早在 1942 年就制定了 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的饮用水标准, 此后又经历多次修改与补充. 世界卫生组织 (WHO) 建议饮用水中砷的阈值为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[64]. 我国也制定了多项标准对不同水体的砷浓度进行控制. 国家环境保护总局于 2002 年《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中按照水体用途不同规定了 5 类地表水的环境标准, 其中第 III 类, 主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区的水质标准限值为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 《地下水质量标准》(GB/T 14848-9) 同样根据不同类型用水需求将地下水分为

5 类, 其中第 III 类以人体健康为依据, 适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水的水质标准限值同样为 $50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 此外, 我国卫生部颁布的《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 规定饮用水中砷浓度限值为 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 通过比较水样分布和浓度阈值, 可以获得全水样的超标率. 使用 Shapiro-Wilk 对各类型饮用水正态性进行检验, 结果发现中国居民自来水分布模式符合正态分布 ($P = 0.11$), 井水 ($P = 0.76$)、水源水 ($P = 0.90$) 和全部水体样本 ($P = 0.18$) 符合对数正态分布. 各类水体的分布函数和基于概率的超标情况如图 1 所示.

从图 1 中可以发现, 自来水砷浓度分布曲线远离红色实线, 表明砷浓度远远低于卫生标准中提出的砷浓度阈值. 在自来水厂水处理过程中, 砷质量浓度是重要的控制参数, 除砷是自来水生产过程中重要的工艺环节. 因此自来水样本中砷浓度均得到了很好地控制, 可认为是安全饮用水水源. 与自来水相比, 未处理的井水和地表饮用水都有一定的总砷超标概率, 两者超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 中的砷浓度标准的概率分别为 23.2% 和 18.4%. 井水超过《地下水质量标准》(GB/T 14848-9) 总砷浓度标准的概率为 10.0%, 地表水源水超过《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 III 类水标准的概率为 8.1%. 此外, 全部水样超过《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 水体的砷浓度标准概率为 17.1%. 尽管全部水体的超标估计并未考虑 3 类水体的权重, 但是仍然可以发现, 我国



红色实线表示《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 中的砷浓度标准阈值, 蓝色实线和虚线分别表示《地下水质量标准》(GB/T 14848-9) 和《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) 中 III 类水体的砷浓度标准阈值; N 和 LN 分别表示正态分布和对数正态分布

图 1 不同饮水类型的砷浓度分布和超标情况

Fig. 1 Distribution of total arsenic content in different drinking water types and comparison with environmental standards

居民存在通过饮水造成砷暴露超标的可能。

2.3 中国居民饮用水砷暴露风险

风险评估过程中存在诸多不确定性,既包括水样浓度在采集与分析中产生的误差也包括模型参数的不确定性.通过概率方法能够考虑不确定性造成的估计偏差,获得比较全面的分析结果.本研究以暴露浓度、人群体重和饮水量为变量.用正态分布和对数正态分布进行拟合,其参数分布形式如图1和表1所示.使用 Monte Carlo 方法分别模拟不同年龄段人群的不同饮水类型的日均暴露剂量(ADD)和致癌风险(LCR).分别使用水晶球软件进行3 000、5 000、10 000和20 000次模拟并对结果进行比较,结果表明10 000次模拟可以得到收敛的结果.

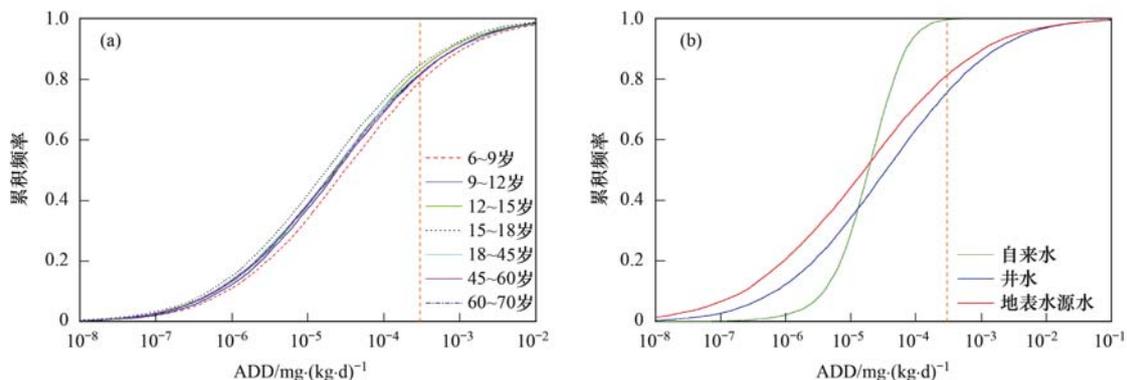
以全水样的浓度为暴露变量,以各个年龄段的体重和饮水量为暴露参数变量进行10 000次 Monte Carlo 模拟得到各个年龄段的非致癌风险分布如图2(a).为了比较不同水体的暴露风险,以各个类型水体浓度分布为暴露变量,以全体18~70岁成年人的体重和饮水量为暴露参数变量进行模拟得到不同饮水类型的非致癌风险分布如图2(b). Monte Carlo 模拟结果见表3.曲线越贴近纵轴,则表明该暴露人

群或暴露途径风险越小,反之则风险越大.由于不考虑饮水类型的影响,不同年龄段的暴露水平差异主要与饮水量和体重参数的比值有关.尽管摄入量最少,6~9岁的儿童单位体重的饮水量大,导致该年龄段的 ADD 较高.与之相比,15~18岁年龄组人群由于生长发育期,单位体重的饮水量反而降低,暴露风险也最低.其他人群分布曲线则比较接近.从风险值上来看,各年龄组的饮水 HQ 中位数均小于1,但是受到分布类型的影响,不同人群 HQ 算术均值高于1,标准差偏大.与 RfD 值相比较可以发现,各个年龄段都存在非致癌风险超标可能.比较不同饮水类型可以发现,自来水曲线位于最左侧表明致癌风险要明显小于其他两类水体.饮用自来水和水源水的短期 ADD 中值为比较接近,而井水的 ADD 中值为 $3.52 \times 10^{-5} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$,日均暴露量约是饮用其他两种水源的2倍.3类水体中值的非致癌风险 HQ 中位数都小于1.但是结合图2(b)和 Monte Carlo 模拟的结果可以发现,井水饮用人群和地表水饮用人群超过单日暴露剂量阈值的概率分别为24.0%和19.5%,存在较高砷摄入导致的皮肤疾病风险.

表3 不同饮水类型和不同年龄段人群的健康风险蒙特卡洛模拟结果¹⁾

Table 3 Health risks from different drinking water types and of different age groups based on the Monte Carlo simulation results

| 项目 | 非致癌风险(HQ)/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ | | | 致癌风险(LCR) | | |
|--------|--|------|------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | 算数均值 | 中位数 | 标准差 | 算数均值 $\times 10^{-3}$ | 中位数 $\times 10^{-5}$ | 标准差 $\times 10^{-2}$ |
| 6~9岁 | 4.85 | 0.10 | 94.3 | 0.08 | 0.20 | 0.08 |
| 9~12岁 | 4.03 | 0.08 | 88.9 | 0.09 | 0.17 | 0.17 |
| 12~15岁 | 2.79 | 0.08 | 31.1 | 0.05 | 0.14 | 0.05 |
| 15~18岁 | 2.29 | 0.06 | 20.7 | 0.07 | 0.12 | 0.13 |
| 18~45岁 | 5.18 | 0.07 | 94.6 | 0.79 | 1.37 | 1.59 |
| 45~60岁 | 4.77 | 0.08 | 147 | 0.41 | 0.72 | 0.49 |
| 60~70岁 | 3.11 | 0.08 | 33.4 | 0.21 | 0.49 | 0.23 |
| 井水 | 13.3 | 0.12 | 344 | 3.68 | 4.92 | 3.72 |
| 地表饮用水 | 14.6 | 0.05 | 369 | 6.10 | 2.60 | 15.1 |
| 自来水 | 0.11 | 0.06 | 0.15 | 0.05 | 2.80 | 0.01 |



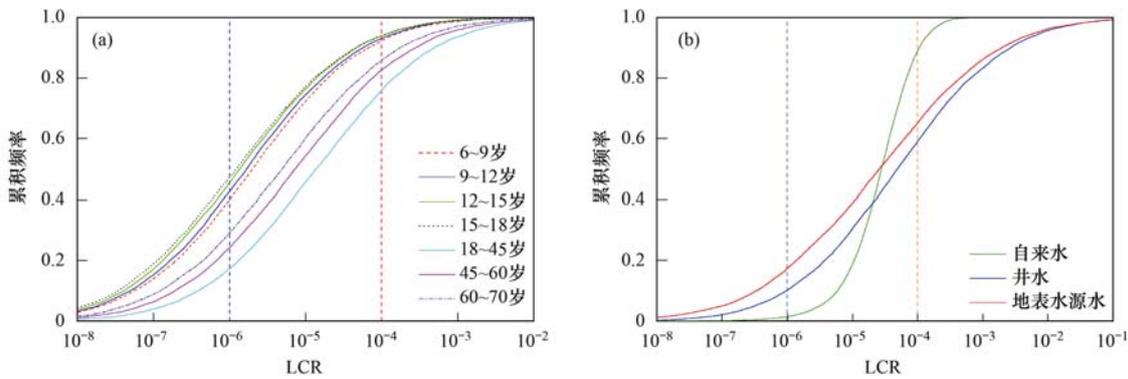
橙色垂直虚线为 US EPA 推荐的 RfD 阈值 $3 \times 10^{-4} \text{ mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, RfD 与 ADD 的关系见式(1)

图2 不同年龄组和不同饮水类型的非致癌风险

Fig. 2 Non-carcinogenic risk of population from different age groups and drinking different water types

致癌风险方面,各年龄段人群和不同饮水类型的致癌风险如图 3 所示. 通过加和得到全人群的终生 LCR 为 3.22×10^{-5} . 各年龄段由于暴露年限的不同,对终生致癌风险的贡献也存在差异. 其中, 18~45 岁人群有最大的风险贡献, LCR 中位数为 1.37×10^{-5} . 而 15~18 岁人群由于单位体重暴露量较低, 年龄段内的暴露历时短, 因而贡献最低为 1.20×10^{-6} . 18~45 岁人群有最大的 LCR 贡献为 42.7%. 而 6~9 岁人群有最大的单位暴露历时贡献, 3 年间的 LCR 贡献为 6.2%. 与推荐风险值比较, 终生 LCR 高于 US EPA 可接受风险水

平 (1.0×10^{-6}), 低于危险风险水平 (1.0×10^{-4}), 表明存在致癌隐患. 比较不同类型饮用水的成年人 LCR 风险发现, 井水饮用的致癌风险最高, 中位数为 4.92×10^{-5} . 从分布状态可以看出, 井水和地表饮用水 LCR 有较大比率超过了 US EPA 规定的危险风险水平, 两者超标概率分别为 41.4% 和 33.5%. 以上表明, 根据现行 US EPA 风险标准, 我国有一定比例的居民存在饮用水砷超标导致癌症和皮肤疾病发生的风险. 不同水体相比, 井水砷超标带来的危害最大, 甚至超过了未经处理的地表水源水砷暴露风险.



蓝色和红色垂直虚线分别为 US EPA 推荐可接受致癌风险限值 (1×10^{-6}) 和高危致癌风险限值 (1×10^{-4})

图 3 不同年龄组人群和不同饮用水类型的致癌风险

Fig. 3 Carcinogenic risk of population from different age groups and drinking different water types

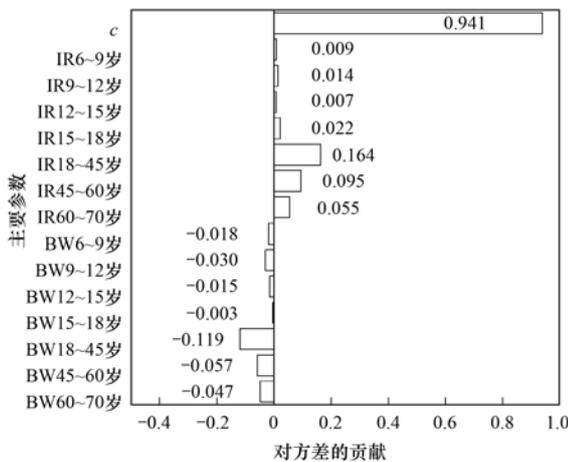
各年龄段阶段各参数对总致癌风险贡献的灵敏度分析结果如图 4 所示. 从中可以看出, 饮用水中的砷浓度对结果方差的贡献率最大, 约占总方差的 94.1%. 暴露参数的影响方面, 18~45 岁由于历时较长, 因此该年龄区间的参数具有较高的灵敏度. 其中 18~45 岁居民的饮水量具有第二大方差贡献为

16.4%, 体重也有 11.9% 的反向方差贡献. 随着年龄的增长, 居民 45 岁之后的饮水量相对稳定, 参数敏感度有所降低. 儿童时期由于暴露历时较短, 暴露参数敏感度相对较低, 对终生的 LCR 影响不大. 参数敏感度分析的结果表明, 尽管暴露参数对最终风险有一定的影响, 水体的砷浓度是影响致癌风险的决定性因素. 准确获得饮用水砷的浓度数据是提高评估准确性的关键因素.

3 讨论

3.1 饮用水砷浓度阈值制定存在的问题

风险评估的结果表明, 各饮水途径的砷摄入量均存在一定概率的非致癌风险和致癌风险, 某些地区和饮水类型甚至处于较高的风险水平. 本研究中的高风险结果的产生与多种因素有关, 其中现行的参考阈值也是影响评估结果的重要因素. US EPA 推荐非致癌暴露剂量阈值主要理论依据来自于 Tseng 等^[1,2]于 1968 年和 1977 年在我国台湾地区基于 40 000 名居民在含砷的地下水暴露和黑脚病关系的横断面流行病学研究. 其中, 文献[1]发现黑脚病的发病率随着砷的暴露剂量增加而增加. US EPA 选择研究文献[1]中发病率最低人群的饮用水总砷浓度



c 为水体总砷浓度, IR 为各年龄段人群日饮水量, BW 为各年龄段人群体重

图 4 饮水砷暴露致癌风险参数敏感度

Fig. 4 Parameter sensitivity for lifetime cancer risk related to arsenic in drinking water

作为砷暴露的最小可见损害浓度 (LOAEL, $170 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),同时选择文献[2]对照组中无皮肤损伤效应的人群饮用水的浓度 (NOAEL, $9 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),换算得到未观察到损害作用剂量 [NOAEL, $0.8 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$],进而得到风险阈值 (RfD). 在致癌风险评价中,砷导致皮肤癌的斜率因子同样依据这两项流行病学调查数据推导获得. 尽管同一时期和此后有很多类似的研究用于阈值的推导,如文献[65~67],但这些研究都存在一些设计缺陷,很长时间内文献[1,2]一直是推算阈值的相对最充分的理论依据,然而该阈值的实验设计和计算方法同样需要完善.

首先,已有研究中的 NOAEL 组^[2]和 LOAEL 组^[1]暴露水平差异较大. LOAEL 的砷浓度几何均值为 $170 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,是 NOAEL 组浓度的近 20 倍. 由于暴露浓度梯度的数据不足,没有建立剂量效应关系能够导致阈值的不准确. 其次,文献[1,2]在研究设计上并未获得当地食物暴露和其他接触途径的影响. US EPA 在浓度换算为剂量阈值时,统一假设居民通过食物摄入的砷剂量为 $0.002 \text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$. 由于没有做食物样本测定和暴露参数的研究,这一摄入量也存在较大不确定性. 此外呼吸皮肤渗透等其他暴露途径也并未考虑,因此得到的饮水的浓度阈值有存在偏差的可能.

致癌斜率的研究方面, Tseng 等^[1,2]的研究以通常不致死的皮肤癌为致病终点. 然而当时黑脚病的盛行导致病例死亡,会对皮肤癌发病率的统计造成较大影响,导致发病率的低估,这些干扰都会影响最终斜率的准确性. 另外,由于不同区域研究背景的不同, Tseng 等^[1,2]的研究能否应用于中国其他大部分地区同样存在疑问,例如,其研究中非致癌阈值 ($10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 以皮肤损伤为效应终点,而在山西的一项 277 人的饮用水暴露水平与皮肤损伤的研究中,饮水总砷浓度暴露小于 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的暴露组仍有 19% 的受访者存在掌跖角化,并有 13% 和 21% 受访者存在色素沉着和色素脱失现象^[68]. 以上研究一方面表明不同地区人群皮肤损伤对砷暴露灵敏度存在差异,另一方面说明仍需要更多的本土流病资料来推断适合我国的饮用水砷阈值. 综上所述,饮水砷的阈值研究仍然还有很大的改进空间,需要系统整理中国的饮水砷暴露和各种效应终点的发病率数据对基准进行完善.

3.2 中国饮水砷污染现状和控制

基于概率方法的分析结果表明,在各种饮水类型中,中国居民的井水砷暴露危害尤为严重. 而从地下采集饮用水在我国广大农村地区仍然是主要的供

水方式. 我国农村人口约占全国总人口的 70%^[69]. 全国爱国卫生运动委员会和中华人民共和国卫生部于 2006~2007 年联合组织的全国农村饮用水与环境卫生调查结果发现,尽管与 1988 年相比,农村集中式供水覆盖率增加了 34.32%^[70],但是,仍有 75% 的农村人口生活饮用水以井水为主,45% 的农村人口采用分散式供水,并基本直接饮用原水^[71]. 从治理方法来看,停止高砷水的饮用,阻断砷摄入是降低砷中毒和砷致癌的唯一途径. 我国采用了改水干预的对策进行井水砷暴露控制. 文献[72]通过统计数据表明,截至 2017 年,我国已完成对 2 491 个村的供水改造. 改善饮水的受益人数达到 130.5 万人. 水型地方性砷中毒危险人口减少了 42.3 万人^[72]. 但根据 2018 年的统计数据,砷中毒高危区仍然包括 117 个病区县,病区的总人口达 4 731 万人^[73]. 尽管通过改水干预进行饮用水砷暴露控制已经取得初步的成果,饮用水砷控制仍然任重道远.

4 结论

(1) 本研究通过文献筛选,共获得 20 个省级行政区的 75 个饮用水体总砷浓度数据. Kruskal-Wallis 检验发现,不同水体类型总砷浓度有较大的差异. 3 种饮用水概率密度分布与《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 相比较,未经处理的井水和未经处理的地表水总砷浓度有较高的超标概率,自来水的超标率较低.

(2) 非致癌风险方面,各年龄组的饮水 HQ 中位数均小于 1,但是受到分布类型的影响. 井水饮用人群和地表水源水饮用人群超过了单日暴露剂量阈值的概率分别为 24.0% 和 19.5%. 致癌风险方面,全人群的终生 LCR 为 3.22×10^{-5} . 各年龄段由于暴露年限的不同,对终生致癌风险的贡献也存在差异. 其中,18~45 岁有最大的风险贡献,LCR 中位数为 1.37×10^{-5} .

(3) Monte Carlo 参数灵敏度分析发现,水体砷浓度、18~45 岁的人群饮水量和 18~45 岁的人群体重是不确定性贡献的前 3 位的参数.

(4) 饮用水砷阈值的制定是影响砷暴露风险评估的重要因素. 建议大力推行系统的饮用水砷阈值方面的研究,建立剂量效应关系模型,推导合理的饮用水砷浓度阈值和剂量阈值,为风险控制提供理论依据.

参考文献:

- [1] Tseng W P. Effects and dose-response relationships of skin cancer and blackfoot disease with arsenic [J]. *Environmental Health Perspectives*, 1977, **19**: 109-119.
- [2] Tseng W P, Chu H M, How S W, et al. Prevalence of skin

- cancer in an endemic area of chronic arsenicism in Taiwan[J]. *Journal of the National Cancer Institute*, 1968, **40**(3): 453-463.
- [3] Li R, Kuo Y M, Liu W W, *et al.* Potential health risk assessment through ingestion and dermal contact arsenic-contaminated groundwater in Jiangnan Plain, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, **40**(4): 1585-1599.
- [4] 马焯, 王立英, 赵新华, 等. 2002 年中国大陆饮水型地方性砷中毒防治状况与防治工作思路[J]. *中国地方病学杂志*, 2003, **22**(4): 330-332.
- Ma Y, Wang L Y, Zhao X H, *et al.* State and work thinking on controlling water-born endemic arsenicism in China in 2002 [J]. *Chinese Journal of Endemiology*, 2003, **22**(4): 330-332.
- [5] Guo J X, Hu L, Yand P Z, *et al.* Chronic arsenic poisoning in drinking water in Inner Mongolia and its associated health effects [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2007, **42**(12): 1853-1858.
- [6] 邓安琪, 董兆敏, 高群, 等. 中国地下水砷健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(9): 3556-3565.
- Deng A Q, Dong Z M, Gao Q, *et al.* Health risk assessment of arsenic in groundwater across China [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3556-3565.
- [7] 何佳, 时迪, 王贝贝, 等. 10 种典型重金属在八大流域的生态风险及水质标准评价[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2970-2982.
- He J, Shi D, Wang B B, *et al.* Ecological risk assessment and water quality standard evaluation of 10 typical metals in eight basins in China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2970-2982.
- [8] 张秋秋, 潘申岭, 刘伟, 等. 我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1835-1841.
- Zhang Q Q, Pan S L, Liu W, *et al.* Accumulated health risk assessment of arsenic in drinking water of major cities of China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1835-1841.
- [9] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection. Exposure factors handbook of Chinese population (adults) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [10] 汪万芬, 钱东升, 黄润, 六安市城区饮用水源水重金属健康风险评估[J]. *皖西学院学报*, 2010, **26**(2): 140-142.
- Wang W F, Qian D S, Huang R. The health risk assessment of heavy metals in drinking water in Lu'an [J]. *Journal of West Anhui University*, 2010, **26**(2): 140-142.
- [11] 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.
- Gao J J, Zhang L P, Huang S B, *et al.* Preliminary Health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(2): 47-50.
- [12] 杨静. 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)与石墨炉原子吸收光谱法测定饮用水中重金属元素的比较[J]. *中国无机分析化学*, 2015, **5**(4): 16-19.
- Yang J. Comparison of Determination methods for heavy metal elements in the drinking water by ICP-OES and GF-AAS [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2015, **5**(4): 16-19.
- [13] Dou X M, Zhang Y, Yang M, *et al.* Occurrence of arsenic in groundwater in the suburbs of Beijing and its removal using an iron-cerium bimetal oxide adsorbent [J]. *Water Quality Research Journal*, 2006, **41**(2): 140-146.
- [14] Huang S B, Xu P, Lagos G E, *et al.* Winter exposure assessment of copper, zinc and arsenic in drinking water of inhabitants in Beijing, China [J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2011, **45**(1-3): 197-214.
- [15] 郑莺. 福州市某湖库型水源地水环境重金属健康风险评估[J]. *能源与环境*, 2016, (3): 64-65, 67.
- [16] 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 等. 兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露与健康风险精细化评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 262-272.
- Chen Y F, Sun S W, Duan X L, *et al.* Refined assessment of exposure and health risks of heavy metals in water for the children in Xigu District, Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 262-272.
- [17] 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估[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- Wang R S, Xu Q J, Zhang X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in typical township water sources in Dongjiang River basin [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3083-3088.
- [18] 郭杏妹, 李宁, 康园, 等. 佛山市农村饮用水中重金属的健康风险评估[J]. *暨南大学学报(自然科学与医学版)*, 2014, **35**(1): 21-25.
- Guo X M, Li N, Kang Y, *et al.* The health risk evaluation of heavy metals via rural surface water source in Foshan [J]. *Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition)*, 2014, **35**(1): 21-25.
- [19] Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, *et al.* Distributions of arsenic and other heavy metals, and health risk assessments for groundwater in the Guanzhong Plain region of China [J]. *Environmental Research*, 2020, **181**, doi: 10.1016/j.envres.2019.108957.
- [20] 黄睿智, 班美玲, 苏相琴, 等. 广西某城市饮用水水源地重金属健康风险评估[J]. *工业安全与环保*, 2015, **41**(6): 21-24.
- Huang R Z, Ban M L, Su X Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in one city of Guangxi [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2015, **41**(6): 21-24.
- [21] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评估[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- Zhang Q H, Wei Y Z, Cao J H, *et al.* Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River basin, and related health risk assessments [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1598-1607.
- [22] 张思强, 徐承香, 杨惠瑛, 等. 铜仁矿区农村地下水饮用水重金属含量与健康风险评估[J]. *中国农村水利水电*, 2019, (3): 41-49.
- Zhang S Q, Xu C X, Yang H Y, *et al.* Heavy metal content and health risk assessment of underground drinking water in rural areas of Tongren mining area [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019, (3): 41-49.
- [23] 郭占景, 范尉尉, 陈风格, 等. 石家庄市农村饮用水重金属健康风险评估[J]. *环境卫生学杂志*, 2014, **4**(1): 17-21.
- Guo Z J, Fan W W, Chen F G, *et al.* Health risk assessment for heavy metals in rural drinking water in Shijiazhuang City [J]. *Journal of Environmental Hygiene*, 2014, **4**(1): 17-21.
- [24] 杨阳, 许策, 程高峰, 等. 保定市生活饮用水中重金属污染物健康风险初步评价[J]. *环境化学*, 2014, **33**(2): 292-297.

- Yang Y, Xu C, Cheng G F, *et al.* Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Baoding City [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(2): 292-297.
- [25] 侯秀娟, 王玉姣, 周琴, 等. 廊坊市各县区生活饮用水中重金属污染物健康风险评估[J]. *饮料工业*, 2019, **22**(4): 70-73.
- Hou X J, Wang Y J, Zhou Q, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in drinking water in Langfang, Hebei[J]. *Beverage Industry*, 2019, **22**(4): 70-73.
- [26] Long J, Luo K L. Elements in surface and well water from the central north China plain: enrichment patterns, origins, and health risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **258**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113725.
- [27] Cai K, Song Z F. Cycling and total risks of multiple as fractions in the Beijing-Tianjin-Hebei area on the agricultural plain, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **190**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.110097.
- [28] Zhang Y, Xu B, Guo Z F, *et al.* Human health risk assessment of groundwater arsenic contamination in Jinghui irrigation district, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **237**: 163-169.
- [29] 李春画, 司士辉, 鸡蛋壳废料和磷酸改性粉末活性炭及去除生活饮用水中的重金属[J]. *化工时刊*, 2012, **26**(7): 11-14.
- Li C H, Si S H. Improving the adsorption of heavy metals from drinking water using powdered carbons modified with egg shell wastes and phosphoric acid[J]. *Chemical Industry Times*, 2012, **26**(7): 11-14.
- [30] Huang Z H, Xiang W H, Ma Y E, *et al.* Growth and heavy metal accumulation of *Koelreuteria paniculata* seedlings and their potential for restoring manganese mine wastelands in Hunan, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(2): 1726-1744.
- [31] Wang Y K, Sheng D, Wang D, *et al.* Non-carcinogenic baseline risk assessment of heavy metals in the Taihu Lake basin, China [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2011, **17**(1): 212-218.
- [32] 胡仲怡. ASE-ICP/MS 法同时监测饮用水中的 7 种重金属残留[J]. *食品工业*, 2019, **40**(3): 300-302.
- Hu Z Y. ASE-ICP/MS Method for determination of 7 kinds of heavy metals residue in drinking water[J]. *The Food Industry*, 2019, **40**(3): 300-302.
- [33] 谷传玲, 王俊平, 王硕. 饮用水中重金属的暴露评估[J]. *食品工业科技*, 2011, **32**(11): 374-376, 423.
- Gu C L, Wand J P, Wang S. Exposure assessment for heavy metals in drinking water [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2011, **32**(11): 374-376, 423.
- [34] 张涛, 范清华, 吉贵祥, 等. 典型乡镇饮用水和农作物的污染调查及健康风险评估[J]. *环境科技*, 2015, **28**(1): 54-56.
- Zhang T, Fan Q H, Ji G X, *et al.* Pollution survey and health risk assessment of typical towns drinking water and Crops[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, **28**(1): 54-56.
- [35] 赵敏娟, 刘强, 杨海兵, 等. 2017 年苏州市生活饮用水重金属污染物的健康风险评估[J]. *职业与健康*, 2018, **34**(14): 1957-1960.
- Zhao M X, Liu Q, Yang H B, *et al.* Health risk assessment of heavy metal pollutants in drinking water in Suzhou City in 2017 [J]. *Occupation and Health*, 2018, **34**(14): 1957-1960.
- [36] 周睿婧, 陈敏健, 夏彦恺. 南京市某区中小学生饮用水重金属含量及健康风险评估[J]. *南京医科大学学报(自然科学版)*, 2016, **36**(7): 886-892.
- Zhou R J, Chen M J, Xia Y K. Heavy metal contamination and human health risk assessment in drinking water in primary and middle school students from a District of Nanjing City[J]. *Acta Universitatis Medicinalis Nanjing (Natural Science)*, 2016, **36**(7): 886-892.
- [37] Xiang Q Y, Wang Y J, Yang M L, *et al.* Level of fluoride and arsenic in household shallow well water in Wamiao and Xinhui villages in Jiangsu Province, China [J]. *Fluoride*, 2013, **46**(4): 192-197.
- [38] Wang Y M, Zhu G C, Engel B, *et al.* Probabilistic human health risk assessment of arsenic under uncertainty in drinking water sources in Jiangsu Province, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, **42**(7): 2023-2037.
- [39] 温海威, 吕聪, 王天野, 等. 沈阳地区农村地下饮用水中重金属健康风险评估[J]. *中国农学通报*, 2012, **28**(23): 242-247.
- Wen H W, Lv C, Wang T Y, *et al.* Health risk assessment of heavy metal in rural drinking groundwater in Shenyang, China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, **28**(23): 242-247.
- [40] Chen L Z, Ma T, Wang Y X, *et al.* Health risks associated with multiple metal (loid)s in groundwater: a case study at Hetao Plain, northern China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114562.
- [41] Zhang H. Heavy-metal pollution and arseniasis in Hetao region, China[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2004, **33**(3): 138-140.
- [42] Wei B G, Yu J P, Kong C, *et al.* An investigation of the health effects caused by exposure to arsenic from drinking water and coal combustion: arsenic exposure and metabolism [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(33): 25947-25954.
- [43] 孟晓琦, 孔伟威, 宣肇菲. 青岛市饮用水源地重金属污染物健康风险初步评价[J]. *干旱环境监测*, 2012, **26**(1): 14-16.
- Meng X Q, Kong W W, Xuan Z F. Preliminary evaluation on drinking water source heavy metals pollutant health risks in Qingdao City [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2012, **26**(1): 14-16.
- [44] 周宇, 范耀龙, 张丹丹, 等. ICP-MS 检测济宁某高校师生可饮用水中铬·铅·汞·砷·镉的含量[J]. *安徽农业科学*, 2018, **46**(30): 199-201.
- Zhou Y, Fan Y L, Zhang D D, *et al.* Determination of heavy metals (Cr, Pb, Hg, As, Cd) in potable water for a college in Jining with ICP-MS[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, **46**(30): 199-201.
- [45] He X D, Li P Y, Wu J H, *et al.* Poor groundwater quality and high potential health risks in the Datong basin, northern China: research from published data [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021, **43**(2): 791-812.
- [46] Wang S X, Wang Z H, Cheng X T, *et al.* Arsenic and fluoride exposure in drinking water: children's IQ and growth in Shanyin County, Shanxi Province, China [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, **115**(4): 643-647.
- [47] 蒋缠文, 王晓艳. 沈河水库周边地下水重金属含量及风险评估[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(3): 100-105.
- Jiang C W, Wang X Y. Contents of heavy metals in groundwater surrounding Youhe reservoir and the risk evaluation[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(3): 100-105.

- [48] Gao Y Y, Qian H, Wang H K, *et al.* Assessment of background levels and pollution sources for arsenic and fluoride in the phreatic and confined groundwater of Xi'an city, Shaanxi, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020, **27**(28): 34702-34714.
- [49] Luo K L, Zhang S X, Tian Y, *et al.* Arsenic distribution pattern in different sources of drinking water and their geological background in Guanzhong basin, Shaanxi, China [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2014, **88**(3): 984-994.
- [50] 陆凤娟. 以嘉定区为例对上海市郊区饮用水源水重金属进行健康风险评估[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(2): 5-8.
Lu F J. Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai city suburb for Jiading district as an example [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(2): 5-8.
- [51] Xu P, Huang S B, Wang Z J, *et al.* Daily intakes of copper, zinc and arsenic in drinking water by population of Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **362**(1-3): 50-55.
- [52] Li S H, Wang M G, Yang Q, *et al.* Enrichment of arsenic in surface water, stream sediments and soils in Tibet [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, **135**: 104-116.
- [53] 许川, 陈济安, 舒为群. 川藏沿线兵站饮用水源水中重金属污染物健康风险评估[J]. *解放军预防医学杂志*, 2008, **26**(5): 321-324.
Xu C, Chen J A, Shu W Q. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking water from affiliated army service stations along Sichuan-Tibet highway [J]. *Journal of Preventive Medicine of Chinese People's Liberation Army*, 2008, **26**(5): 321-324.
- [54] 田华, 马永红, 张建江, 等. 新疆部队饮用水中重金属污染物砷的健康风险评估[J]. *疾病预防控制通报*, 2011, **26**(2): 70-72.
Tian H, Ma Y H, Zhang J J, *et al.* Assessment of health risk of arsenic in drinking water in Xinjiang army [J]. *Bulletin of Disease Control & Prevention*, 2011, **26**(2): 70-72.
- [55] Tudi M, Phung D T, Ruan H D, *et al.* Difference of trace element exposed routes and their health risks between agriculture and pastoral areas in Bay County Xinjiang, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(14): 14073-14086.
- [56] Zeng Y Y, Zhou Y Z, Zhou J L, *et al.* Distribution and enrichment factors of high-arsenic groundwater in inland arid area of P. R. China; a case study of the Shihezi area, Xinjiang [J]. *Exposure and Health*, 2018, **10**(1): 1-13.
- [57] 袁新龙, 胡锋. 伊犁河流域城镇饮用水中重金属健康风险评估[J]. *干旱环境监测*, 2018, **32**(2): 62-65, 87.
Yuan X L, Hu F. Health risk assessment of heavy metals for urban drinking water in Yili River basin [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2018, **32**(2): 62-65, 87.
- [58] Zhu L, Yang M N, Chen X, *et al.* Health risk assessment and risk control: drinking groundwater in Yinchuan plain, China [J]. *Exposure and Health*, 2019, **11**(1): 59-72.
- [59] Rahman M M, Asaduzzaman M, Naidu R. Consumption of arsenic and other elements from vegetables and drinking water from an arsenic-contaminated area of Bangladesh [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**: 1056-1063.
- [60] Rasool A, Farooqi A, Masood S, *et al.* Arsenic in groundwater and its health risk assessment in drinking water of Mailsi, Punjab, Pakistan [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2016, **22**(1): 187-202.
- [61] Berg M, Tran H C, Nguyen T C, *et al.* Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam; a human health threat [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(13): 2621-2626.
- [62] Radfard M, Yunesian M, Nabizadeh R, *et al.* Drinking water quality and arsenic health risk assessment in Sistan and Baluchestan, Southeastern Province, Iran [J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, **25**(4): 949-965.
- [63] 史志诚, 白广禄. 中国地方性砷中毒 [A]. 见: 毒理学史研究文集(第十一集)-全国第四届毒理学史与毒物管理研讨会论文集 [C]. 西安: 西北大学生态毒理研究所, 2012.
- [64] WHO. *Guidelines for drinking-water quality, 3rd edition: volume 1-Recommendations; incorporating first and second addenda* [R]. Geneva: World Health Organization, 2008.
- [65] Hindmarsh J T, Mclethle O R, Heffernan L P M, *et al.* Electromyographic abnormalities in chronic environmental arsenicalism [J]. *Journal of Analytical Toxicology*, 1977, **1**(6): 270-276.
- [66] Cebrian M E, Albores A, Aguilar M, *et al.* Chronic Arsenic poisoning in the north of Mexico [J]. *Human & Experimental Toxicology*, 1983, **2**(1): 121-133.
- [67] Southwick J W, Western A E, Beck M M, *et al.* An epidemiological study of arsenic in drinking water in Millard County, Utah [A]. In: Lederer W H, Fensterheim R J (Eds.). *Arsenic: Industrial, Biomedical, Environmental Perspectives* [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1983. 210-225.
- [68] 刘建. 山西省饮水型砷中毒病区砷暴露水平与皮肤病变关系的研究 [D]. 苏州: 苏州大学, 2012. 20-25.
- [69] 刘琰, 郑丙辉, 谢琼, 等. 中国饮用水源水中砷风险评估与管理 [A]. 见: 饮用水安全控制会议暨中国土木工程学会水工业分会给水专业委员会第 14 届年会论文集 [C]. 泰安: 《净水技术》杂志社, 2015.
- [70] 陶勇. 中国农村饮用水与环境卫生现状调查 [J]. *环境与健康杂志*, 2009, **26**(1): 1-2.
- [71] 梁福庆. 中国农村饮用水安全问题研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2009, **19**(S1): 607-610.
Liang F Q. Study on drinking water safety in rural China, China population [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2009, **19**(S1): 607-610.
- [72] 国家卫生健康委员会. 2018 中国卫生健康统计年鉴 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2018.
- [73] 国家卫生健康委员会. 2019 中国卫生健康统计年鉴 [M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2019.

CONTENTS

| | |
|---|--|
| Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission | LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091) |
| Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period | LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099) |
| Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids | HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107) |
| Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration | LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118) |
| Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China | ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127) |
| Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China | LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136) |
| Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides | XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147) |
| Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed | HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156) |
| Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake | YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166) |
| Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer | ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176) |
| Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City | YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186) |
| Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland | LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198) |
| Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou | BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206) |
| Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan | ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215) |
| Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface | CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223) |
| Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao | KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232) |
| Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir | HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242) |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season | LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253) |
| Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments | JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263) |
| Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland | ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272) |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay | LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281) |
| Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment | MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291) |
| Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China | GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304) |
| Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed | BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316) |
| Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles | SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328) |
| Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents | QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338) |
| Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants | LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348) |
| Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant | WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358) |
| Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge | DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366) |
| Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants | TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375) |
| Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR | LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385) |
| Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source | TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392) |
| Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System | LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400) |
| First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration | ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405) |
| Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors | GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413) |
| Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure | QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422) |
| Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent | ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430) |
| Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 | WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442) |
| Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields | HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451) |
| Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions | LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458) |
| Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil | YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472) |
| Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands | ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482) |
| Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil | CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494) |
| Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province | LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507) |
| Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen | LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518) |
| Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil | ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527) |
| Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials | YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535) |
| Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau | LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549) |
| Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain | LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555) |
| Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost | XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565) |