

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分冬季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 师远哲, 林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒, 安俊琳, 王红磊, 张玉欣, 王俊秀, 施双双, 王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官, 张凯, 王体健, 陈志明, 耿红, 孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云, 邢新丽, 柯艳萍, 郑煌, 胡天鹏, 孙焰, 丁洋, 李绘, 张泽洲, 祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春, 周雪明, 张鹤丰, 谭吉华, 胡京南, 柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平, 张大伟, 林安国, 马召辉, 郭晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽, 郑国砥, 王元刚, 高定, 朱彦莉, 陈同斌, 聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英, 张迪, 郭海倩, 缪晶晶, 陈怡伶, 李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛, 李如梅, 彭林, 端允, 王海京, 李颖慧, 白慧玲, 牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险: 以常州市为例 姚静波, 王明新, 齐今笛, 孙向武, 张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳, 邓黄月, 张杰, 朱志鹏, 王琳, 郑祥民, 周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋, 潘申龄, 刘伟, 张昱, 安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳, 徐明芳, 耿梦梦, 黎明, 陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 赵晓辉, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣, 白莹, 苏荣国, 石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁, 何小松, 高如泰, 席北斗, 张慧, 黄彩红, 李丹, 袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青, 胡楠, 刘雨情, 涂声亮, 陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙, 高明, 倪九派, 谢德体, 邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和, 李瑶, 张莹, 张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓, 程思超, 方舟, 李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙, 付晶森, 郭雪峰, 柴建恬, 张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅, 张崇森, 王晓昌, 吉铮, 周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星, 林建伟, 詹艳慧, 张志斌, 邢云青, 姜博汇, 储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯, 聂广泽, 刘志英, 姚远, 徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖, 李大鹏, 于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛, 石烜, 张彤, 付博文, 金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军, 古文, 刘济宁, 石利利, 徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康, 杨珍瑞, 李蓉, 李岩, 周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛, 刘婷, 曾玉莲, 孙婷, 张瑶, 王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 王博, 姚倩, 卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉, 郝瑞霞, 朱晓霞, 万京京, 刘思远, 王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波, 徐辉, 冯修平, 李方, 田晴, 马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超, 吴翠平, 张玉秀, 张琪, 张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结, 薛芷筠, 张泽文, 何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 王斌, 胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平, 吴静, 左剑恶, 王晓璐, 王翀, 王广启, 王凯军, 钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红, 任庆水, 杨文航, 李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳, 朱波, 汪涛, 赵原, 董宏伟, 任光前, 胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正, 张苗苗, 秦红灵, 陈春兰, 王娟, 魏文学, 李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟, 胡学玉, 张阳阳, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛, 王龙昌, 杜娟, 赵琳璐, 周泉, 张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧, 郭治兴, 郭颖, 袁宇志, 柴敏, 毕如田, 杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩, 康国华, 庞博, 郭依, 何坚坚, 秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清, 蒋珍茂, 王俊, 魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言, 赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟, 毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤, 马江波, 曲东, 张晓媛, 郑纪勇, 张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧, 朱维琴, 潘晓慧, 沈旭阳, 陈思远, 陈可乐, 坎吉汗·木沙拉, 张杭君, 丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥, 周旻昀, 邹骏华, 史宇滨, 万先凯, 史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价

张秋秋^{1,2}, 潘申龄^{1,2}, 刘伟^{1,2}, 张昱^{1,2}, 安伟^{1,2*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于全国重点城市饮用水水质调查数据, 完善现有砷的疾病负担计算方法, 以伤残调整寿命年 (disability-adjusted life years, DALYs) 为评价终点, 对全国重点城市饮用水中砷污染水平进行健康风险评价. 结果表明, 我国重点城市供水的饮水砷浓度很低 ($0.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 远低于国家规定的上限值 ($10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$). 其导致的总的终身癌症发病率为 1.76×10^{-5} . 不同癌症的风险排序为: 皮肤癌 (1.53×10^{-5}) > 肺癌 (2.25×10^{-6}) > 肝癌 (2.30×10^{-8}) > 膀胱癌 (1.34×10^{-10}); 饮水砷导致的人均癌症疾病负担为 1.91×10^{-6} 人 $\cdot\text{a}^{-1}$. 其中, 皮肤癌和肺癌分别占 70.2% 和 29.0%, 膀胱癌和肝癌的疾病负担可忽略不计, 但其总体致癌风险仍高于 WHO 所推荐的 10^{-6} 人 $\cdot\text{a}^{-1}$ 的水平. 虽然我国饮水砷水平不高, 但致癌风险不容忽视, 未来需要采取更加有效可行的措施削减砷浓度, 保障人们的饮水安全.

关键词: 饮用水; 砷; 伤残调整寿命年; 健康风险; 风险评价

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1835-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201608151

Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China

ZHANG Qiu-qiu^{1,2}, PAN Shen-ling^{1,2}, LIU Wei^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}, AN Wei^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the drinking water quality survey data of China's major cities, the existing disease burden calculation method was improved and disability-adjusted life years (DALYs) was taken as the end of evaluation to assess the health risk of arsenic contamination level. The results showed that the concentration of arsenic in drinking water of major cities in China was very low ($0.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), far below the national limit ($10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) and the total lifetime cancer incidence was 1.76×10^{-5} . The order of risks of different kinds of cancers was; skin cancer (1.53×10^{-5}) > lung cancer (2.25×10^{-6}) > liver cancer (2.30×10^{-8}) > bladder cancer (1.34×10^{-10}) and the average disease burden was 1.91×10^{-6} per person-year. Among them, skin cancer and lung cancer accounted for 70.2% and 29.0% respectively, and the disease burdens of bladder cancer and liver cancer were negligible, but the overall cancer risk was still higher than the recommended level of 10^{-6} per person-year by WHO. Although the arsenic level of drinking water in China was not high, the risk of cancer could not be ignored. Thus more effective and feasible measures should be taken to reduce arsenic concentration to protect people's drinking water safety in the future.

Key words: drinking water; arsenic; disability-adjusted life years (DALYs); health risk; risk assessment

砷可导致诸多健康问题. 饮用水是砷摄入的重要途径^[1], 因此, 砷污染一直是我国供水行业所关注的问题. 砷最受到关注的危害是能够导致多种癌症^[2], 目前针对饮用水中的砷进行风险评价使用最多的是皮肤癌. 然而, 除了皮肤癌之外, 砷还可以导致人体其他脏器的癌症, 包括肺癌、肝癌和膀胱癌^[3]. 对于砷这种同时可以引起多种靶标脏器危害的情况, 如何考虑不同疾病特征计算健康风险是水质标准制定过程所面临关键问题. 以往的研究中, 通常基于疾病的发病率和死亡率计算疾病负担 (burden of disease, BOD) 作为风险定量指标. 随着近些年医疗卫生水平的快速提高, 各种疾病的死亡率被大大降低, 很多癌症例如皮肤癌都能在治疗后得到一定的恢复, 但是在治愈过程中却存在很大的

负担, 因此直接采用死亡率计算疾病负担存在问题. 在分析疾病负担时, 不仅要考虑癌症死亡者, 还要考虑癌症治愈者因伤残而导致的健康损失, 以便在同一尺度上对不同癌症进行风险比较.

伤残调整寿命年 (disability-adjusted life years, DALYs) 以时间作为度量单位, 相对于旧的风险指标更加合理、全面、灵活, 可以应用于不同癌症的健康风险比较. 同时其计算结果具有可加性, 适用于累计风险的计算. 目前, 已有许多利用 DALYs 估算饮水砷疾病负担的研究^[4-7], 但主要集中于皮肤癌,

收稿日期: 2016-08-22; 修订日期: 2016-11-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51290283, 21277169, 21477158)

作者简介: 张秋秋 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境健康风险评估, E-mail: zhangqiuqier@163.com

* 通信作者, E-mail: anwei@rcees.ac.cn

对于砷可以导致多种癌症的多靶标风险研究仍然匮乏,使得风险计算结果较为粗糙和片面。

本研究基于我国重点城市饮水砷的调查数据,充分考虑砷可能导致的多种健康危害,以皮肤癌、肺癌、肝癌、膀胱癌为疾病终点,以 DALYs 作为健康风险评价的指标,计算不同疾病的风险并累计总疾病负担,以期为我国城市饮水砷的风险管理提供帮助。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

本研究的数据来源于 2009 年 11 月~2012 年 5 月对我国 35 个重点城市进行的两次大规模水质调查,根据其中砷的浓度调查数据进行健康风险评价。关于采样地点、水样采集、准备、分析及质量控制等细节可以参考文献[8]。

1.2 暴露评价

根据水质调查数据,进行参数分布拟合。长期慢性每日摄入量(chronic daily intake, CDI)为个体终生暴露于某种致癌物质下单位时间单位体重的平均日摄入量。仅考虑饮水暴露途径,用浓度数据的参数分布根据式(1)计算获得其暴露水平分布^[5]:

$$CDI = c_w \times IR \times EF \times ED / (BW \times AT) \quad (1)$$

式中, c_w 为饮用水中砷的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),IR 为饮水量($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$)^[9],BW 为人体体重(kg),AT 为平均暴露时间(d),EF 为暴露频率($\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$),ED 为暴露时长(a)^[10]。

在整个风险评价过程中,利用蒙特卡洛模拟整合由于浓度值变化而造成的不确定性,按照其参数分布,利用 Crystal Ball 2000 软件进行 5 000 次的随机模拟以获得风险估计值的概率分布。

1.3 疾病终点的确定

饮水中砷浓度过高的暴露会导致许多健康问题,其中流行病学证据包括:皮肤病变(如色素沉着、角化过度)、皮肤癌、肺癌、肝癌和膀胱癌^[11]。根据本研究中对水砷浓度数据的初步分析和暴露分析结果,认为本次调查的水砷浓度很低,皮肤病变的健康影响甚微。其他的健康影响如对前列腺、心血管、内分泌、生殖及认知功能的有害影响^[4]仍缺乏确凿证据。因此,本文最终考虑的疾病终点为皮肤癌、肺癌、肝癌及膀胱癌。

1.4 剂量-效应关系的确定

饮水砷致癌需要很长的暴露时间($>20\text{ a}$)^[12],世界各国普遍采用台湾地区的调查数据^[13,14]建立

剂量-效应关系。因此,本文将采用已有的连续型模型进行估算。

美国 EPA (U. S Environmental Protection Agency) 基于台湾的流行病学数据^[13]建立了饮水砷和皮肤癌的剂量-效应关系^[15],以估计不同年龄及不同砷暴露量下的皮肤癌患病率。由于缺乏足够的信息去评估砷致癌的作用机制,EPA 保守地假设在低剂量时呈线性关系,采用广义多阶段模型进行拟合,其参数形式如式(2)所示:

$$P(t, d) = 1 - \exp[-(q_1 d + q_2 d^2) \times (t - m)^k H(t - m)] \quad (2)$$

式中, $P(t, d)$ 表示患皮肤癌的人群比例, t 表示年龄(a), d 表示暴露量 [$\mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$]. H 表示 Heaviside 函数,当 $t < m$ 时, $H(t - m) = 0$; 当 $t > m$ 时, $H(t - m) = 1$. q_1 、 q_2 、 k 、 m 均为非负参数,不同性别的参数值如表 1 所示。

加拿大 NRC (National Research Council) 基于台湾地区调查数据^[14]建立了饮水砷与内脏癌的剂量-效应关系^[16]。本研究将利用 NRC 建立的模型,它将癌症的发病率表示为连续的剂量和年龄的函数,其参数形式如式(3)所示:

$$h(c, t) = k(q_1 c + q_2 c^2) (t - m)^{k-1} H(t - m) \quad (3)$$

式中, $h(c, t)$ 表示癌症的发病率,其他变量和参数的意义如式(2),不同性别的不同癌症的参数值如表 1 所示。

1.5 皮肤癌患病率与发病率的转换

其他疾病终点的 DALYs 估算均基于疾病的发病率,因此,为了比较皮肤癌与其他疾病的 DALYs 损失,需要将皮肤癌的患病率估计转换为发病率。为此作以下假设:①皮肤癌患者的死亡率与非患者的死亡率相等(砷导致的皮肤癌为黑色素瘤皮肤癌,是一种非致死性的癌症,其治愈率高达 90% 以上^[17],因此患者的死亡率将不会比非患者高很多,其低估的癌症发病率并不会十分显著,所以假设具有合理性);②人口组成结构持续稳定不变(此假设在一段时间内是合理的)。

年龄别的发病率和患病率满足式(4)^[18]:

$$\frac{(1 - P_0)P_1 \exp(-m_0 - h)}{1 - P_1} = P_0 \exp(-m_1) + \frac{(1 - P_0)h[\exp(-m_1) - \exp(-m_0 - h)]}{m_0 - m_1 + h} \quad (4)$$

式中, P_0 表示年龄为 x 时的皮肤癌患病率, P_1 表示年龄为 $x + t$ 时的皮肤癌患病率, m_0 表示非患者在

表 1 砷致癌的剂量-效应曲线的参数值

Table 1 Parameter values of Arsenic carcinogenic dose-response curve

癌症类型	性别	q_1	q_2	k	m
肺癌	男	1.4672×10^{-11}	0	3.9195	21.4946
	女	0	6.1194×10^{-14}	3.5137	17.0978
肝癌	男	3.6947×10^{-14}	4.9984×10^{-13}	2.9054	16.8998
	女	2.8015×10^{-11}	4.9395×10^{-13}	2.7282	25.9420
膀胱癌	男	0	7.3394×10^{-17}	5.1306	14.7025
	女	0	2.2225×10^{-13}	3.4732	33.0365
皮肤癌	男	7.936×10^{-10}	1.640×10^{-12}	2.950	6.873
	女	6.291×10^{-11}	3.265×10^{-13}	3.231	9.000

年龄区间($x, x + t$)内的死亡率, m_1 表示患者在年龄区间($x, x + t$)内的死亡率, h 为在年龄区间($x, x + t$)内皮肤癌的发病率。

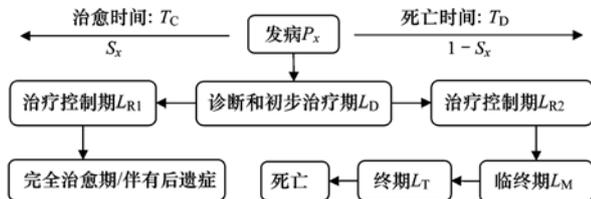
在第一个假设下,公式(4)可转换为:

$$h = \ln \frac{1 - P_0}{1 - P_1} \quad (5)$$

因此,将年龄别的患病率估计代入公式(5)中,即可获得不同年龄区间的发病率。

1.6 疾病模型及 DALYs 的计算

为评估饮水砷的疾病负担,将终身癌症发病率估计结合 WHO 设计的两阶段疾病模型(图 1)计算 DALYs^[19]。



P_x : 年龄为 x 时的发病率; S_x : 年龄为 x 时的生存率; $L_D, L_{R1}, L_{R2}, L_M, L_T$: 每个疾病阶段的持续时间; $T_c = L_D + L_{R1}$; $T_D = L_D + L_{R2} + L_M + L_T$

图 1 两阶段疾病模型

Fig. 1 Two-stage disease model

疾病模型是对整个疾病历程的简化,描述了病程中各个不同的阶段,每个阶段需要考虑疾病带来的失能损失或者死亡损失,死亡损失 (years of life lost, YLLs) 和失能损失 (years of lived with disability, YLDs) 的基本计算公式如式(6)和式(7)所示^[20]。

$$YLLs = \sum_x n_x P_x (1 - S_x) (e_x^* - T_D) \quad (6)$$

$$YLDs = \sum_{x,y} n_x P_x \{ (1 - S_x) DW_y L_y + S_x [DW_y L_y + P_{seq} DW_{seq} (e_x^* - T_C)] \} \quad (7)$$

式中, x 表示年龄阶段(划分为 18 个年龄组: 0~5, 5~10, 10~15, ..., 80~85, 85 及以上), y 表示不同的

疾病阶段, n 表示人口数, P 表示发病率, S 表示生存率, e^* 表示标准期望寿命, T_D 表示死亡经历的病程时间, DW 表示失能权重, L 表示持续时间, P_{seq} 表示后遗症患者的比例, DW_{seq} 表示后遗症的失能权重, T_C 表示治愈所经历的病程时间. 诊断和预治疗期时间(L_D)、临末期时间(L_M)和终末期时间(L_T)分别设为 4 个月、3 个月和 1 个月^[19]. 癌症的死亡时间(T_D)和治疗时间(T_C)采用挪威癌症登记处的数据^[19]. 根据疾病模型,分别计算治愈病患的控制时间(L_{R1})和死亡病患的控制时间(L_{R2}). DW 取自维多利亚州的疾病负担研究^[19]. 每个阶段的 L 和 DW 的总结如表 2 所示. 人口数目(n_x)基于 2011 年我国人口结构的调查数据^[21]. 标准的生命期望(e^*)基于西方模型寿命表^[22]. 对于膀胱癌的生存者,后遗症包括尿失禁、阳痿和不育. 各种后遗症的发生比例和失能权重^[23,24]如表 3 所示。

人在不同时期对砷的敏感度不一样,因此需要将终身癌症风险估计值划分到人生的不同时期^[19]. 为了与 DALYs 的单位(人·a⁻¹)保持一致,需要将 P_x 表示为每年的发病率. 因此, P_x 按以下公式计算:

$$P_x = CR \times RS_x / Sp_x \quad [25]$$

式中, CR 为估计的终身癌症发病率, RS_x 为年龄 x 时对癌症的相对敏感度, Sp_x 用来转化单位,等于每个年龄组的年龄跨度值(即 5). 膀胱癌、肝癌、肺癌的 RS_x 通过中国癌症登记地区的登记数据^[26-28]进行估计,将年龄别发病率除以总发病率获得,满足 $\sum_x RS_x = 1$. 年龄别生存率 S_x 采用 5 年相对生存率估计,有研究表明死亡率(M)与生存率(I)的比值的补数 $[1 - (M/I)]$ 是其很好的相似值^[19]. 采用中国癌症登记地区的癌症年龄别发病率和死亡率计算 S_x . 砷引起的皮肤癌为非黑色素瘤皮肤癌,其治愈率很高,因此我国没有此类癌症的登记信息. 据已

有报道砷引起的皮肤癌仅有 10% 会最终导致死亡^[17],故将皮肤癌的 S_x 定为 90%.

表 2 每个疾病阶段的持续时间(L)和失能权重(DW)

Table 2 Duration (L) and disability weight (DW) of each disease stage

参数	癌症类型	诊断和初步治疗期	治疗控制期	临终期	终期
DW	膀胱癌	0.27	0.18	0.64	0.93
	肝癌	0.43	0.20	0.83	0.93
	肺癌	0.72	0.47	0.91	0.93
	皮肤癌	0.056	0.056	0.81	0.93
L/a	膀胱癌	0.33	3.67/1.53	0.25	0.083
	肝癌	0.50	4.5/0.0	0.25	0.083
	肺癌	0.50	5.50/0.00	0.25	0.083
	皮肤癌	0.08	4.92/0.59	0.25	0.083

表 3 膀胱癌治愈者后遗症的发生比例和失能权重

Table 3 Proportion of incidence and disability weight of sequelae of bladder cancer

后遗症	发生比例/%	失能权重
尿失禁	5	0.157
阳痿	10	0.195
原发性不孕	<40 岁:16	0.18
继发性不孕	40~60 岁:16	0.10

2 结果与分析

2.1 饮水砷浓度的初步分析及暴露分析

对于砷浓度的测定,采集的水厂样本数共有 716 个,其中检出的样本数有 342 个,检出率为 47.8%. 砷浓度分布如图 2 所示. 所有样本中的砷浓度均未超过我国《生活饮用水卫生标准》规定的限值 ($10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),其均值和中位数分别为 $1.03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 最佳拟合分布为对数正态分布,拟合参数为 $\text{Lnorm}(1.77, 1.24)$. 基于蒙特卡洛模拟,获得饮水砷的 CDI 中值为 $0.02 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,其 95% 置信区间为 $0.00 \sim 0.13 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$,远低于 EPA 估算的饮水砷的 RfD 水平 [$0.3 \mu\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$].

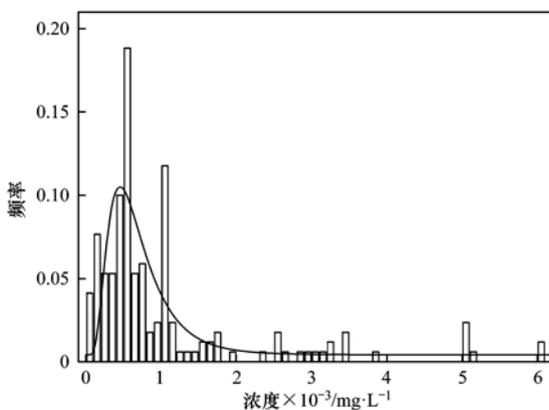


图 2 饮水砷浓度分布

Fig. 2 Distribution of concentration of arsenic in drinking water

2.2 癌症的发病率

基于蒙特卡洛模拟获得的 CDI 中值,计算年龄别皮肤癌的患病率及肺癌、肝癌和膀胱癌的发病率. 将皮肤癌的患病率转换为发病率,所有癌症的发病率结果如图 3 所示. 在给定的暴露砷含量下,随着年龄的增加,各种癌症风险增加. 将各年龄组的发病率乘以各年龄组的年龄区间长度,然后相加,可以获得癌症的终身发病率. 不同癌症的终身风险排序为:皮肤癌 (1.53×10^{-5}) > 肺癌 (2.25×10^{-6}) > 肝癌 (2.30×10^{-8}) > 膀胱癌 (1.34×10^{-10}),总的终身致癌风险为 1.76×10^{-5} . 美国 EPA 规定癌症风险的限制区间为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ^[29]. 饮水砷导致的总的终身致癌风险在这个限值区间内,但比癌症风险下限 (10^{-6}) 高约 17 倍. 而对于不同癌症来说,膀胱癌和肝癌的风险可以忽略不计,皮肤癌的风险是可忽略风险的 15 倍.

2.3 癌症引起的 DALYs 损失

基于蒙特卡洛模拟获得的 CDI 中值,不同癌症的年龄别 DALYs 损失结果如图 4 所示. 皮肤癌、肺癌、肝癌和膀胱癌的 DALYs 损失最大的年龄组分别为:45~50 岁 ($264.31 \text{ 人}\cdot\text{a}^{-1}$), 55~60 岁 ($120.11 \text{ 人}\cdot\text{a}^{-1}$), 45~50 岁 ($0.67 \text{ 人}\cdot\text{a}^{-1}$) 和 70~75 岁 ($0.001 \text{ 人}\cdot\text{a}^{-1}$). 其中,皮肤癌的疾病负担分布偏年轻化.

将不同癌症的所有年龄组的 DALYs 相加得到总 DALYs 损失,除以我国总人口数,可以获得人均 DALYs 损失,结果如表 4 所示. 饮水砷引起各类癌症的 DALYs 损失大小排序为:皮肤癌 > 肺癌 > 肝癌 > 膀胱癌. 其中,皮肤癌和肺癌分别占了总疾病负担的 70.2% 和 29.0%,而肝癌和膀胱癌的疾病负担几乎可以忽略不计. WHO 的《饮用水水质准则》中规定:风险的参考水平定为 $10^{-6} \text{ 人}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[30],饮水砷引起的人均疾病负担 ($1.91 \times 10^{-6} \text{ 人}\cdot\text{a}^{-1}$) 约为该参

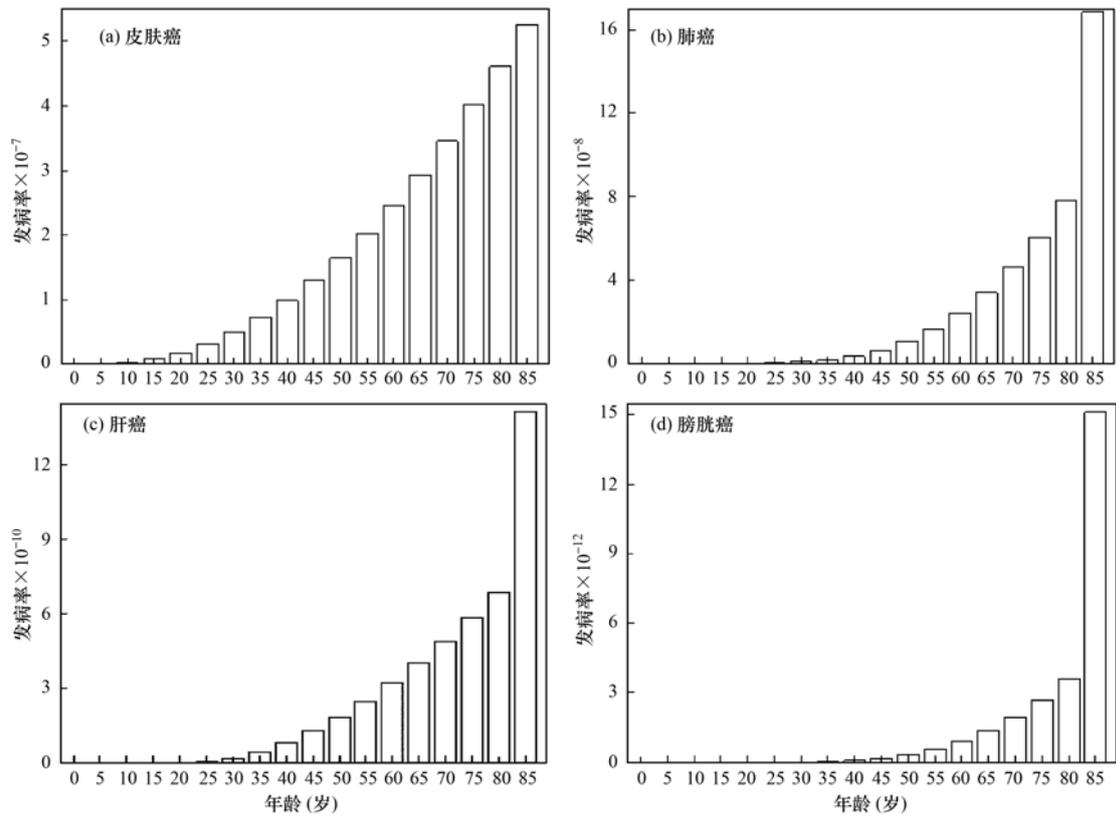


图3 各类癌症的年龄别发病率

Fig. 3 Age-specific morbidity rates of different cancers

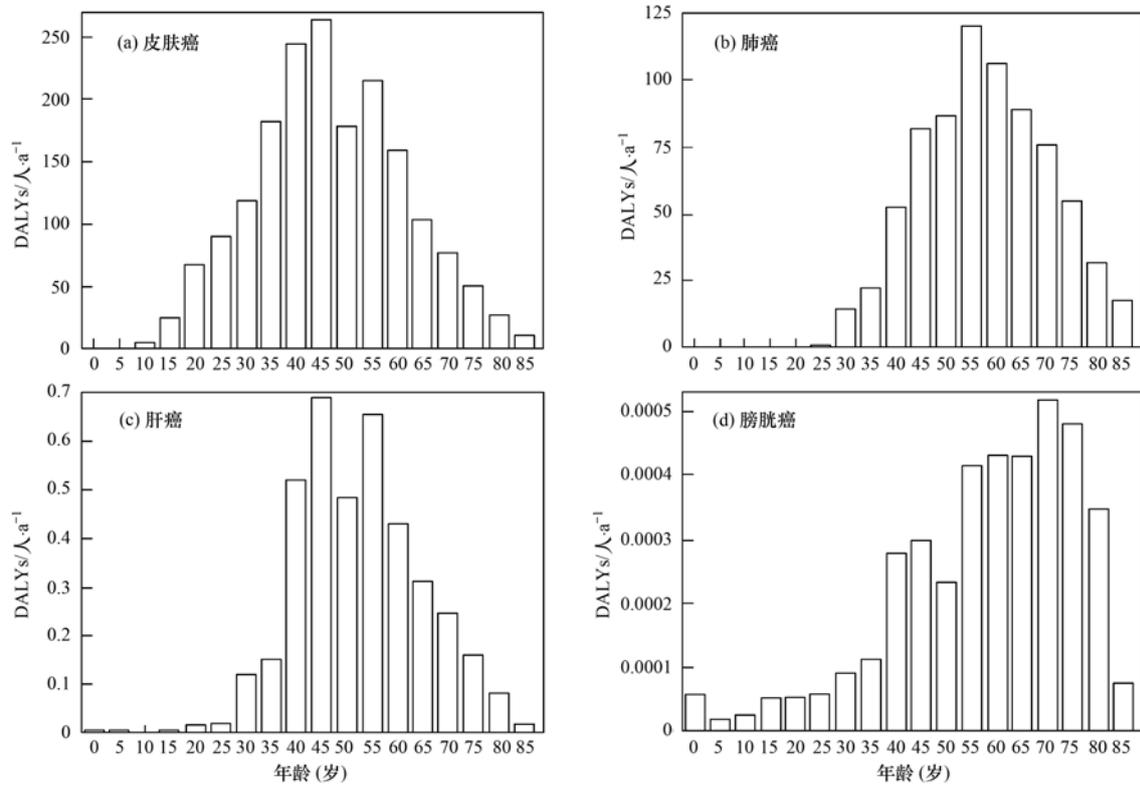


图4 各类癌症的年龄别 DALYs 损失

Fig. 4 Age-specific DALYs loss of different cancers

考水平的 2 倍,四类癌症中只有皮肤癌的疾病负担略超该值。

表 4 饮水砷引起的总的疾病负担及人均疾病负担

Table 4 Total disease burden and that of per person caused by arsenic in drinking water

类型	总的疾病负担 /人·a ⁻¹	人均疾病负担 ×10 ⁻⁶ /人·a ⁻¹
肺癌	752.856	0.558
膀胱癌	0.004	0.000
肝癌	4.061	0.003
皮肤癌	1 820.456	1.351
总计	2 577.377	1.912

3 讨论

3.1 不确定性分析

采用 DALYs 进行风险评价的过程中包含了许多不确定性。首先,不确定性来自采用 EPA 及 NRC 的饮水砷剂量-效应模型。这两类模型都基于台湾地区高砷暴露人口的流行病学数据,由于目前缺乏足够信息基于砷的致癌机制建立合适的剂量-效应模型,美国 EPA 采用了保守的外推模式,认为在低剂量水平下呈线性关系。由此外推预测我国低饮水砷暴露危害可能高估实际的致癌风险。同时以上模型仅考虑了饮用水的摄砷方式。而粮食蔬菜的种植和鱼类养殖均可能使用被砷污染的水资源,食物是十分重要的摄砷途径。因此,台湾居民实际的摄砷量将大于饮水摄砷量。最后,台湾居民与大陆居民的营养水平和饮水习惯及模式可能存在一定的差异,而这将影响人群对饮水砷的敏感程度和摄砷水平,进而导致不同的致癌风险。

另外,在 DALYs 计算过程中,失能权重 DW 和病程持续时间 L 等参数取自外国研究,尽管很难估计这些参数将如何影响结果的准确性,但有证据表明 DALYs 是一个十分稳健的估计量,它的变异性主要来自于流行病学数据,而非 DW 或者 L^[19]。

综上所述,本研究预测的风险值是一个保守的估计值。饮水砷风险评价过程中的核心问题是建立合适的剂量-效应曲线。这需要综合考虑各种信息,包括基础流行病学数据和砷的毒理学数据等,将在今后的研究中进一步探讨。

3.2 我国饮水砷健康风险分析

根据本研究,我国的饮水砷处于很低的水平,远低于我国及 WHO 规定的上限值(10 μg·L⁻¹),总的癌症发病率处于 EPA 规定的癌症风险限制区间内(10⁻⁶~10⁻⁴),而疾病负担要高于 WHO 规定的参考水平(10⁻⁶人·a⁻¹),这与 Liu 等^[5]在 2009 年对我

国的研究结果相近。控制砷污染源及采取更加先进的除砷技术将是未来控制水砷污染的有效措施^[5]。不同癌症年龄别损失最大的年龄组集中在中老年,可能是由于砷致癌需要较长的时间(>20 a),且人的免疫功能会随着年龄的增长下降。而皮肤癌的疾病负担偏年轻化,可能是由于现代环境污染日益严重以及不良生活习惯的养成。对比 4 种癌症造成的 DALYs 损失可以看出,虽然皮肤癌的发病率处于一个最高水平,但是砷造成的肺癌也对人群健康具有很大的影响。对比国外两种主要的估算饮水砷造成的疾病负担的研究方法^[31,32],本研究综合考虑了砷导致的皮肤癌及其他癌症风险,也考虑到不同年龄别 DALYs 损失的区别,提高了风险评价的准确性。未来可以和其他污染物造成的风险进行比较,从而为我国控制水砷浓度及优先污染物的筛选提供参考。

4 结论

(1)我国城市供水的砷浓度处于较低的水平(中值:0.53 μg·L⁻¹),远低于 WHO 以及我国饮用水卫生标准规定的限值。

(2)饮水砷导致的总的终身癌症发病率为 1.76 × 10⁻⁵,不同癌症的风险排序为:皮肤癌(1.53 × 10⁻⁵) > 肺癌(2.25 × 10⁻⁶) > 肝癌(2.30 × 10⁻⁸) > 膀胱癌(1.34 × 10⁻¹⁰)。皮肤癌的发病率较高,在生活中应采取措施避免长期慢性摄入砷,尤其是在高砷暴露地区。

(3)饮水砷导致的人均癌症疾病负担为 1.91 × 10⁻⁶人·a⁻¹,不同癌症的风险排序为:皮肤癌 > 肺癌 > 肝癌 > 膀胱癌。其中,皮肤癌和肺癌分别占 70.2% 和 29.0%,膀胱癌和肝癌的疾病负担可忽略不计。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Steinmaus C, Ferreccio C, Yuan Y, et al. Elevated lung cancer in younger adults and low concentrations of arsenic in water[J]. American Journal of Epidemiology, 2014, 180(11): 1082-1087.
- [3] Naujokas M F, Anderson B, Ahsan H, et al. The broad scope of health effects from chronic arsenic exposure: update on a worldwide public health problem[J]. Environmental Health Perspectives, 2013, 121(3): 295-302.
- [4] Ling M P, Liao C M. Risk characterization and exposure

- assessment in arseniasis-endemic areas of Taiwan [J]. *Environment International*, 2007, **33**(1): 98-107.
- [5] Liu Y, Zheng B H, Fu Q, *et al.* Risk assessment and management of arsenic in source water in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **170**(2-3): 729-734.
- [6] Muhammad S, Tahir Shah M, Khan S. Arsenic health risk assessment in drinking water and source apportionment using multivariate statistical techniques in Kohistan region, northern Pakistan [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, **48**(10): 2855-2864.
- [7] Phan K, Sthiannopkao S, Kim K W, *et al.* Health risk assessment of inorganic arsenic intake of Cambodia residents through groundwater drinking pathway [J]. *Water Research*, 2010, **44**(19): 5777-5788.
- [8] Ding H H, Meng L P, Zhang H F, *et al.* Occurrence, profiling and prioritization of halogenated disinfection by-products in drinking water of China [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2013, **15**(7): 1424-1429.
- [9] 郑婵娟, 赵秀阁, 黄楠, 等. 我国成人饮水摄入量研究 [J]. *环境与健康杂志*, 2014, **31**(11): 967-970.
Zheng C J, Zhao X G, Huang N, *et al.* Investigation of drinking water intake rate of adults in China [J]. *Journal of Environment and Health*, 2014, **31**(11): 967-970.
- [10] Lee S C, Guo H, Lam S M J, *et al.* Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in Hong Kong [J]. *Environmental Research*, 2004, **94**(1): 47-56.
- [11] Fewtrell L, Fuge R, Kay D. An estimation of the global burden of disease due to skin lesions caused by arsenic in drinking water [J]. *Journal of Water and Health*, 2005, **3**(3): 101-107.
- [12] Dauphiné D C, Smith A H, Yuan Y, *et al.* Case-control study of arsenic in drinking water and lung cancer in California and Nevada [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, **10**(8): 3310-3324.
- [13] 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.
- [14] Chen C J, Chuang Y C, Lin T M, *et al.* Malignant neoplasms among residents of a blackfoot disease-endemic area in Taiwan: high-arsenic artesian well water and cancers [J]. *Cancer Research*, 1985, **45**(11 Pt 2): 5895-5899.
- [15] U. S. EPA. Special report on ingested inorganic arsenic. Skin cancer, nutritional essentiality [M]. Washington, DC: Risk Assessment Forum, Environmental Protection Agency, 1988. 136.
- [16] NRC. Arsenic in drinking water: 2001 update [M]. Washington DC: National Academy Press, 2001. 136.
- [17] Byrd D M, Roegner M L, Griffiths J C, *et al.* Carcinogenic risks of inorganic arsenic in perspective [J]. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 1996, **68**(6): 484-494.
- [18] Podgor M J, Leske M C. Estimating incidence from age-specific prevalence for irreversible diseases with differential mortality [J]. *Statistics in Medicine*, 1986, **5**(6): 573-578.
- [19] Pan S L, An W, Li H Y, *et al.* Cancer risk assessment on trihalomethanes and haloacetic acids in drinking water of China using disability-adjusted life years [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **280**: 288-294.
- [20] Soerjomataram I, Lortet-Tieulent J, Ferlay J, *et al.* Estimating and validating disability-adjusted life years at the global level: a methodological framework for cancer [J]. *BMC Medical Research Methodology*, 2012, **12**(1): 125.
- [21] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2012/indexeh.htm>, 2013-05-18.
- [22] Murray C J. Quantifying the burden of disease: the technical basis for disability-adjusted life years [J]. *Bulletin of the World Health Organization*, 1994, **72**(3): 429-445.
- [23] Fosså S D, Ous S, Espetveit S, *et al.* Patterns of primary care and survival in 336 consecutive unselected Norwegian patients with bladder cancer [J]. *Scandinavian Journal of Urology and Nephrology*, 1992, **26**(2): 131-138.
- [24] Hardt J, Filipas D, Hohenfellner R, *et al.* Quality of life in patients with bladder carcinoma after cystectomy: first results of a prospective study [J]. *Quality of Life Research*, 2000, **9**(1): 1-12.
- [25] Watanabe T, Hashimoto K, Abe Y, *et al.* Evaluation of health risks in the wastewater reclamation in the Abukuma Watershed, Japan [J]. *Journal of Water and Environment Technology*, 2005, **3**(2): 223-233.
- [26] 温登瑰, 单保恩, 张思维, 等. 2003—2007年中国肿瘤登记地区膀胱癌的发病与死亡分析 [J]. *肿瘤*, 2012, **32**(4): 256-262.
Wen D G, Shan B E, Zhang S W, *et al.* Analysis of incidence and mortality rates of bladder cancer in registration areas of China from 2003 to 2007 [J]. *Tumor*, 2012, **32**(4): 256-262.
- [27] 陈建国, 陈万青, 张思维, 等. 中国2003-2007年肝癌发病率与死亡率分析 [J]. *中华流行病学杂志*, 2012, **33**(6): 547-553.
Chen J G, Chen W Q, Zhang S W, *et al.* Incidence and mortality of liver cancer in China: an analysis on data from the national registration system between 2003 and 2007 [J]. *Chinese Journal of Epidemiology*, 2012, **33**(6): 547-553.
- [28] 陈万青, 郑荣寿, 张思维, 等. 2003-2007年中国肺癌发病与死亡分析 [J]. *实用肿瘤学杂志*, 2012, **26**(1): 6-10.
Chen W Q, Zheng R S, Zhang S W, *et al.* An analysis of lung cancer incidence and mortality in China, 2003-2007 [J]. *Practical Oncology Journal*, 2012, **26**(1): 6-10.
- [29] US EPA. Risk assessment guidance for superfund. Volume I: human health evaluation manual (Part A) [M]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1989.
- [30] WHO. Guidelines for drinking-water quality (4th ed.) [M]. Geneva: World Health Organization, 2011.
- [31] Lokuge K M, Smith W, Caldwell B, *et al.* The effect of arsenic mitigation interventions on disease burden in Bangladesh [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112**(11): 1172-1177.
- [32] Howard G, Ahmed M F, Mahmud S G, *et al.* Disease burden estimation to support policy decision-making and research prioritization for arsenic mitigation [J]. *Journal of Water and Health*, 2007, **5**(1): 67-81.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)