

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业源挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骝骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽琚,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价

佟瑞鹏, 张磊

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对国内外交通微环境 VOCs 健康风险研究中通勤模式和有害挥发物较为单一的不足, 选取广州市家庭轿车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁和自行车这 5 种通勤模式中的苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、甲醛、乙醛和丙烯醛等 8 种 VOCs, 运用 Monte-Carlo 模拟方法, 进行健康风险评价并对各吸入暴露参数做出敏感性分析。结果表明, 空调公交车和家庭轿车的致癌风险较大, 分别服从 t 分布和对数正态分布, 为 $1.65 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$ 和 $5.01 \times 10^{-6} \pm 3.56 \times 10^{-11}$, 超过 10^{-6} 的概率分别为 97% 和 74.85%, 自行车和非空调公交车次之, 地铁的致癌风险最小, 但平均值皆超过 10^{-6} ; 家庭轿车和空调公共汽车的非致癌风险较大, 服从对数正态分布, 分别为 2.51 ± 2.74 和 1.20 ± 1.36 , 其中丙烯醛的贡献皆在 80% 以上, 骑自行车的非致癌风险较小, 预期将不会对人体健康产生威胁; 各暴露参数中, 对健康风险敏感度较大的依次为: 每天的暴露时间(ET)、有害挥发物的浓度(CA)、终生暴露年限(ED)、呼吸速率(IR)和每年的暴露天数(EF), 而体重(BW)具有负敏感性。

关键词: VOCs; 交通微环境; 通勤模式; 健康风险; Monte-Carlo 模拟方法

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0663-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201709077

Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes

TONG Rui-peng, ZHANG Lei

(School of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of a single commuting mode, eight VOCs including benzene, toluene, xylene, ethylbenzene, styrene, formaldehyde, acetaldehyde, and acrolein were studied in five commuting modes in Guangzhou. Applying the Monte Carlo simulation method, we assessed the health risk of these VOCs in five commuting modes, cars, air-conditioned buses, non-air-conditioned buses, subways, and bicycles, and analyzed the sensitivity of each exposure parameter. We used Crystal Ball 11.1 with 10 000 iterations of independent runs and 95% confidence interval. The results show that the commuters of air-conditioned buses and cars are subjected to a higher cancer risk, following the t -distribution and lognormal distribution with $1.65 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$ and $5.01 \times 10^{-6} \pm 3.56 \times 10^{-11}$, with the probability of exceeding 10^{-6} of 97% and 74.85%, respectively. The cancer risks of bicycles, non-air-conditioned buses, and subways are smaller, but their averages are higher than 10^{-6} . The commuters of cars and air-conditioned buses were subjected to a larger non-cancer risk, following the lognormal distribution of 2.51 ± 2.74 and 1.20 ± 1.36 ; the contributions of acrolein are above 80%. The non-cancer risk of bicycles is the smallest and will not be a threat to human health. Sensitivity analysis shows that the sensitivities of ET, CA, ED, IR, and EF are larger, with the values of 55.5%, 32%, 10.5%, 1.1%, 0.2%, respectively, and BW has negative sensitivity.

Key words: VOCs; transport microenvironment; commuting modes; health risk; Monte-Carlo simulation method

挥发性有机化合物(VOCs)作为近地面臭氧和大气细粒子的重要前体物,所造成的环境空气污染已经引起公众的关注。同时,VOCs对人体健康造成的危害也不容忽视,长期接触环境空气中的VOCs对人体的呼吸系统、造血系统和神经系统等会有慢性或急性损害,甚至可能诱发哮喘^[1]、白血病^[2]等症状。

近年来,Zhou等^[3]监测了室内和室外的VOCs浓度,但对工作场所、餐饮、交通等微环境的研究较为有限^[4,5]。而在这些微环境中,浓度有时高于室外^[6]。如Chen等发现^[7],公交车内苯、甲苯、二甲苯和乙苯浓度最大值分别是车外空气中相应苯系

物浓度的6.2、7.9、11和17.4倍。有研究表明,人们每天花费5%的时间用于通勤^[8],大都市通勤人数也在不断增加^[9]。例如,2016年广州地铁日均客流量达到700多万人次。由于装饰材料的围隔作用以及环境的密闭性,使得交通微环境内透气性变差,换气量减少,污染物易于积聚并对人体健康造成威胁^[10]。随着通勤人数和时间的增加,相对密闭的交通微环境中的空气质量对人体健康影响愈发不

收稿日期: 2017-09-09; 修订日期: 2017-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674268)

作者简介: 佟瑞鹏(1977~),男,博士,副教授,主要研究方向为职业健康与环境健康风险评估等, E-mail: tongrp@cumt.edu.cn

容忽视. 因此, 更有必要对交通微环境 VOCs 健康风险进行深入研究. 然而, 现有的研究大多是对单一的通勤模式进行健康风险评价^[11], 对不同通勤模式的 VOCs 健康风险也仅就苯和甲醛两种有害挥发物进行研究^[12].

鉴于此, 本文针对交通微环境, 选取了广州市居民常用的家庭轿车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁和自行车这 5 种通勤模式, 评估苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、甲醛、乙醛和丙烯醛等 8 种 VOCs 的暴露水平和健康风险, 并进行分析比较. 同时, 运用概率风险评估模型^[13], 引入 Monte-Carlo 模拟方法, 来处理风险评估过程中的不确定性^[14,15], 并对输入参数进行敏感性分析, 以期对暴露于 VOCs 的健康风险做出更科学、客观地评价.

1 材料与方法

1.1 污染源

本文选取中国典型的通勤模式, 包括家庭轿车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁和自行车, 来探究交通微环境中 VOCs 的暴露特征以及相应的健康风险. 家庭轿车内的 VOCs 主要来源于汽车零部件和车内装饰材料中所含有毒有害物质的释放、车外污染物进入车内以及汽车自身排放的污染物^[16,17]. 地铁车厢内 VOCs 的潜在来源主要包括装饰材料^[18]、乘客的呼吸^[19]以及车外空气渗透. 骑自行车人群 VOCs 暴露量参考交通干道附近的 VOCs 浓度^[20]进行计算, 其主要来源于车辆尾气排放和燃料挥发^[21].

1.2 评价模型

本文针对交通微环境中的苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、甲醛、乙醛和丙烯醛等 8 种有害挥发物进行健康风险评价. 需要说明的是, 基于大量车内空气的实验研究结果和对内饰零部件的分析结果, 我国 GB/T 27630-2011《乘用车内空气质量评价指南》把苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、甲醛、乙醛和丙烯醛作为主要控制物质, 与联合国欧洲经济委员会 (UNECE) 世界车辆规章协调论坛 (WP. 29) 全球车内空气法规工作组 (VIAQ) 的车内空气控制物质结果一致.

依据世界卫生组织 (WHO) 和国际癌症研究机构 (IARC) 的研究结果, 苯和甲醛被确定为人类致癌物, 甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、乙醛和丙烯醛等 6 种有害挥发物为非致癌物质或仍不能确定是否为人类致癌物. 美国环境保护署 (USEPA) 建立了一

系列风险评估指南, 其中人群健康评价手册 A 部分 and F 部分中提供了吸入化学污染物的健康风险评价模型, 包括致癌物质风险评价模型和非致癌物质风险评价模型. 因此, 本文运用致癌物质风险评价模型评估苯和甲醛的致癌风险, 对其他 6 种物质采用非致癌风险评价模型进行评估. 具体的公式和参数的意义如下.

(1) 致癌物质风险评价模型

$$LADD_i = \frac{CA_i \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times LT} \quad (1)$$

$$CR_i = LADD_i \times PF_i \quad (2)$$

$$TCR = \sum CR_i \quad (3)$$

式中, $LADD_i$: 第 i 种 VOC 的平均日暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; CA_i : 第 i 种 VOC 的实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); IR : 呼吸速率 ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$); ET : 人每天暴露在车内污染空气中时数 ($\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$); EF : 人每年暴露在车内污染空气中的天数 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$); ED : 人终生暴露在车内污染空气中年限 (a); BW : 体重 (kg); LT : 人平均寿命相对应的天数 (d); CR_i : 第 i 种 VOC 的致癌风险值; PF_i : 第 i 种 VOC 的致癌斜率因子 ($\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$); TCR : 多种 VOCs 的致癌风险值之和.

(2) 非致癌物质风险评价模型

$$EC_i = \frac{CA_i \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (4)$$

$$HQ_i = \frac{EC_i}{RfC_i} \quad (5)$$

$$THQ = \sum HQ_i \quad (6)$$

式中, EC_i : 第 i 种 VOC 的平均日暴露量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); AT : 人终生暴露在车内污染空气中的年限相对应的小时数 (h); HQ_i : 非致癌风险值; RfC_i : 第 i 种 VOC 的参考浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); THQ : 多种 VOCs 的非致癌风险之和; 其他参数与式 (1) 中相同.

1.3 参数取值

根据 Chan 等^[22]对广州市公共交通工具中芳香族挥发性有机化合物暴露水平的研究, 得到广州市家庭轿车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁车厢内的 VOCs 浓度, 参考 Zhao 等^[20]对城市主要干道附近的有害挥发物的研究得到骑自行车人群暴露于 VOCs 的浓度^[23], 浓度值见表 1.

依据王宗爽等^[24]对人体暴露参数的研究并参考中国人群暴露参数手册^[25], 得到广州居民各暴露参数的取值 (表 2).

表 1 居民在不同通勤模式下暴露于 VOCs 的浓度值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Residents of different commuting modes exposed to VOCs concentrations/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

VOCs	家庭轿车	空调公共汽车	非空调公共汽车	地铁	自行车
苯	13.9 ± 9.3	13.5 ± 4.9	11.3 ± 5.3	7.6 ± 4.3	6.4 ± 3.8
甲苯	151 ± 196.8	63.6 ± 18.4	48.9 ± 17.8	38 ± 13.8	19.4 ± 13.1
二甲苯	135.9 ± 201.0	80 ± 20	20 ± 10	5.3 ± 0.3	3.4 ± 2.8
乙苯	38.2 ± 56.1	8.2 ± 2.6	8.3 ± 2.6	5.6 ± 1.9	3.5 ± 4.5
苯乙烯	13.7 ± 12.6	4.1 ± 0.9	3.5 ± 0.6	1.7 ± 0.3	1.2 ± 0.2
甲醛	30.3 ± 10.6	140 ± 450	30 ± 10	14.2 ± 1.5	13 ± 5
乙醛	65.5 ± 38.5	9.3 ± 1.9	6.2 ± 1.1	5.3 ± 0.6	8.2 ± 1.3
丙烯醛	0.9 ± 0.2	0.7 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.8 ± 0.3	0.1 ± 0.1

表 2 各吸入暴露参数取值

Table 2 Values of inhalation exposure parameters

参数	单位	分布情况 ¹⁾	家庭轿车	公共汽车	地铁	自行车
IR	$\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$	TRI	0.3; 0.38; 0.49	0.36; 0.48; 0.62	0.36; 0.48; 0.62	0.97; 1.27; 1.66
ET	$\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$	LN	1.22 ± 1.53	0.84 ± 0.79	0.60 ± 0.42	0.77 ± 0.66
EF	$\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$	TRI	310; 340; 362	310; 340; 362	310; 340; 362	310; 340; 362
ED	a	TRI	5; 30; 45	5; 30; 45	5; 30; 45	5; 30; 45
BW	kg	N	61.52 ± 5.80	61.52 ± 5.80	61.52 ± 5.80	61.52 ± 5.80

1) TRI 为三角分布, 3 个参数值为: 最小值, 最可能值, 最大值; LN: 对数正态分布, N: 正态分布, 参数皆为平均值 ± 标准差; 下同

通过查询 USEPA 综合风险信息系统 (IRIS) 数据库, 得到苯和甲醛的致癌斜率因子 (PF) 以及甲

苯等 6 种有害挥发物的参考浓度 (RfC), 如表 3 所示.

表 3 8 种 VOCs 的致癌斜率因子/参考浓度

Table 3 Cancer slope factors/reference concentrations of eight VOCs

参数	单位	苯	甲苯	二甲苯	乙苯	苯乙烯	甲醛	乙醛	丙烯醛
PF	$\text{kg}\cdot\text{d}\cdot\text{mg}^{-3}$	0.029	—	—	—	—	0.046	—	—
RfC	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	—	5.00	0.10	1.00	1.00	—	0.009	0.000 02

2 结果与分析

风险评估存在很大的不确定性, 因此需要辨识健康风险评价过程中的不确定性, 并尽可能做出定量评估, 从而提高评价结果的准确度, 这可以通过概率风险评估来实现. 本文引入 Monte-Carlo 模拟方法, 运用概率风险评估模型, 通过参数不确定性分析对结果的不确定性进行评估, 并通过敏感性分析评估模型中各变量对结果的贡献. 运用 Monte-Carlo 模拟方法, 通过 Crystal Ball 11.1 软件, 设置

模拟次数 10000 次, 置信区间 95%, 对评价过程中的不确定性进行定量表达.

2.1 致癌风险评价

结合公式 (1) ~ (3), 运用 Monte-Carlo 模拟方法, 对中国居民在不同通勤模式下暴露于苯和甲醛的致癌风险进行评价, 结果见表 4. 采用 USEPA 推荐的可接受风险值, 若某污染物的致癌风险小于 10^{-6} , 则引起癌症的风险较低; 若致癌风险值介于 $10^{-4} \sim 10^{-6}$, 则有可能引起癌症; 若致癌风险值大于 10^{-4} , 则引起癌症的可能性较高.

表 4 不同通勤模式致癌风险及概率分布

Table 4 Cancer risks and probability distributions of different commuting modes

通勤模式	苯		甲醛		总致癌风险	
	分布	风险值	分布	风险值	分布	风险值
家庭轿车	ME ¹⁾	$1.13 \times 10^{-6} \pm 4.48 \times 10^{-12}$	LN	$3.87 \times 10^{-6} \pm 3.13 \times 10^{-11}$	LN	$5.01 \times 10^{-6} \pm 3.56 \times 10^{-11}$
空调公共汽车	LN	$9.06 \times 10^{-7} \pm 1.23 \times 10^{-12}$	$t^{2)}$	$1.56 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$	t	$1.65 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$
非空调公共汽车	LN	$7.59 \times 10^{-7} \pm 8.77 \times 10^{-13}$	LN	$3.31 \times 10^{-6} \pm 1.42 \times 10^{-11}$	LN	$4.07 \times 10^{-6} \pm 1.49 \times 10^{-11}$
地铁	LN	$3.65 \times 10^{-7} \pm 1.53 \times 10^{-13}$	LN	$1.09 \times 10^{-6} \pm 8.13 \times 10^{-13}$	LN	$1.46 \times 10^{-6} \pm 9.65 \times 10^{-13}$
自行车	ME	$1.07 \times 10^{-6} \pm 1.87 \times 10^{-12}$	LN	$3.46 \times 10^{-6} \pm 1.43 \times 10^{-11}$	LN	$4.53 \times 10^{-6} \pm 1.61 \times 10^{-11}$

1) ME: 最大极值分布; 2) t : t 分布, 参数皆为平均值 ± 标准差; 下同

乘坐家庭轿车通勤暴露于苯的致癌风险服从最大极值分布, 风险值为 $1.13 \times 10^{-6} \pm 4.48 \times 10^{-12}$, 中位值为 5.36×10^{-7} , 最大值为 7.66×10^{-5} , 超过 10^{-6} 的概率为 31.79%。乘坐空调公交车、非空调公交车和地铁暴露于苯的致癌风险分别服从 $9.06 \times 10^{-7} \pm 1.23 \times 10^{-12}$ 、 $7.59 \times 10^{-7} \pm 8.77 \times 10^{-13}$ 、 $3.65 \times 10^{-7} \pm 1.53 \times 10^{-13}$ 上的对数正态分布, 中位值分别为 5.70×10^{-7} 、 4.83×10^{-7} 、 2.56×10^{-7} , 最大值分别为 2.66×10^{-5} 、 1.58×10^{-5} 、 4.25×10^{-6} , 超过 10^{-6} 的概率分别为 28.51%、23.52%、6.4%。骑自行车暴露于苯的致癌风险为 $1.07 \times 10^{-6} \pm 1.87 \times 10^{-12}$ 的最大极值分布, 中位值为 6.64×10^{-7} , 最大值为 2.19×10^{-5} , 超过 10^{-6} 的概率为 35.83%。

从图 1 可以看出, 居民在不同通勤模式下暴露于甲醛的致癌风险较大, 平均值皆在 10^{-6} 以上。其中, 乘坐空调公交车的致癌风险最大, 服从 $1.56 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$ 的 t 分布, 中位值为 7.32×10^{-6} , 最大值为 1.13×10^{-3} , 超过 10^{-6} 的概率为 97%。家庭轿车、自行车、非空调公共汽车、地铁的甲醛致癌风险皆服从对数正态分布, 风险值依次为 $3.87 \times 10^{-6} \pm 3.13 \times 10^{-11}$ 、 $3.46 \times 10^{-6} \pm 1.43 \times 10^{-11}$ 、 $3.31 \times 10^{-6} \pm 1.42 \times 10^{-11}$ 、 $1.09 \times 10^{-6} \pm 8.13 \times 10^{-13}$, 超过 10^{-6} 的概率依次为 74.85%、77.22%、78.62%、41.02%。

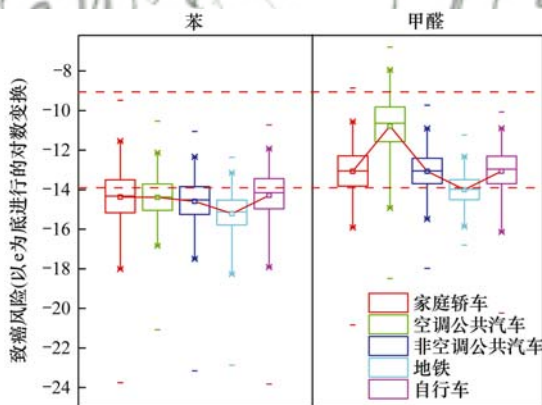


图 1 不同通勤模式暴露于苯和甲醛的致癌风险

Fig. 1 Cancer risks of benzene and formaldehyde for different commuting modes

居民在不同通勤模式下暴露于甲醛的致癌风险大于苯, 所以甲醛的致癌风险对总的致癌风险贡献较大。同时, 如图 2 所示, 居民在各通勤模式下总的致癌风险大小依次为: 空调公共汽车、家庭轿车、自行车、非空调公共汽车、地铁, 与甲醛一致。空调公共汽车服从 $1.65 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$ 的 t 分

布, 家庭轿车、自行车、非空调公共汽车、地铁分别为 $5.01 \times 10^{-6} \pm 3.56 \times 10^{-11}$ 、 $4.53 \times 10^{-6} \pm 1.61 \times 10^{-11}$ 、 $4.07 \times 10^{-6} \pm 1.49 \times 10^{-11}$ 、 $1.46 \times 10^{-6} \pm 9.65 \times 10^{-13}$ 的对数正态分布。上述各通勤模式总的致癌风险值超过 10^{-6} 的概率依次为 62.11%、89.77%、91.29%、91.58%、62.27%。

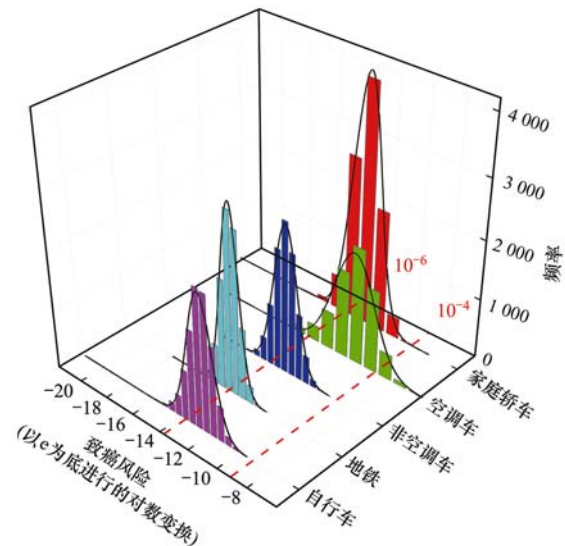


图 2 各通勤模式致癌风险值样本分布

Fig. 2 Distribution of cancer risk values in each commuting mode

2.2 非致癌风险评价

根据通勤者不同通勤模式暴露于甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、乙醛和丙烯醛等 6 种 VOCs 的浓度, 对其进行非致癌风险评价, 并对不同通勤模式总的非致癌风险进行分析和比较。

根据 USEPA 推荐的标准, 非致癌风险值 ≤ 1 表示暴露量低于会产生不良反应的阈值, 预期将不会对人体造成显著危害, 非致癌风险值 > 1 表示暴露量高于限值, 可能产生毒性。结合表 5 中各通勤模式下 VOCs 的非致癌风险可知, 甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯和乙醛的非致癌风险都小于 1, 将不会对人体造成危害。而家庭轿车和空调公共汽车内, 丙烯醛的非致癌风险服从对数正态分布, 分别为 2.09 ± 2.73 和 1.14 ± 1.36 , 平均值皆大于 1, 对人体存在非致癌风险。

从总的非致癌风险值来看, 通勤者骑自行车的非致癌风险为 $1.77 \times 10^{-1} \pm 5.40 \times 10^{-2}$, 小于 1, 预期将不会对人体健康造成危害。乘坐非空调车和地铁的非致癌风险分别为 $8.29 \times 10^{-1} \pm 6.30 \times 10^{-1}$ 和 $9.48 \times 10^{-1} \pm 6.10 \times 10^{-1}$, 接近于 1, 应该引起重视。而乘坐家庭轿车和空调公共汽车的非致癌风险较大, 服从对数正态分布, 分别为 2.51 ± 2.74 和

1.20 ± 1.36。如图 3 所示，乘坐家庭轿车和空调公共汽车的非致癌风险平均值皆大于 1，超过 1 的概率分别为 74.89% 和 42.05%。分析其原因，甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、乙醛等 5 种 VOCs 的非致

癌风险较小，而丙烯醛的非致癌风险较大，对总的非致癌风险的贡献率达到 83% 和 95%。因此，控制丙烯醛的含量是降低交通微环境非致癌风险的重中之重。

表 5 不同通勤模式暴露于 VOCs 的非致癌风险
Table 5 Non-cancer risk of VOCs for different commuting modes

项目	家庭轿车	空调公共汽车	非空调公共汽车	地铁	自行车
甲苯	$1.45 \times 10^{-3} \pm 1.25 \times 10^{-5}$	$4.16 \times 10^{-4} \pm 1.75 \times 10^{-7}$	$3.23 \times 10^{-4} \pm 1.72 \times 10^{-7}$	$1.78 \times 10^{-4} \pm 2.14 \times 10^{-8}$	$1.17 \times 10^{-4} \pm 1.98 \times 10^{-8}$
二甲苯	$6.69 \times 10^{-2} \pm 3.70 \times 10^{-2}$	$2.01 \times 10^{-2} \pm 6.76 \times 10^{-4}$	$6.43 \times 10^{-3} \pm 5.59 \times 10^{-5}$	$1.23 \times 10^{-3} \pm 7.65 \times 10^{-7}$	$1.02 \times 10^{-3} \pm 2.00 \times 10^{-6}$
乙苯	$1.83 \times 10^{-3} \pm 2.11 \times 10^{-5}$	$2.66 \times 10^{-4} \pm 7.63 \times 10^{-8}$	$2.68 \times 10^{-4} \pm 7.22 \times 10^{-8}$	$1.29 \times 10^{-4} \pm 1.08 \times 10^{-8}$	$1.04 \times 10^{-4} \pm 3.77 \times 10^{-8}$
苯乙烯	$6.63 \times 10^{-4} \pm 1.62 \times 10^{-6}$	$1.32 \times 10^{-4} \pm 1.90 \times 10^{-8}$	$1.13 \times 10^{-4} \pm 1.14 \times 10^{-8}$	$3.92 \times 10^{-5} \pm 7.99 \times 10^{-11}$	$3.53 \times 10^{-5} \pm 9.73 \times 10^{-10}$
乙醛	$3.41 \times 10^{-1} \pm 2.7 \times 10^{-1}$	$3.34 \times 10^{-2} \pm 1.02 \times 10^{-3}$	$2.23 \times 10^{-4} \pm 4.78 \times 10^{-8}$	$1.37 \times 10^{-2} \pm 9.72 \times 10^{-5}$	$2.71 \times 10^{-2} \pm 6.00 \times 10^{-4}$
丙烯醛	2.09 ± 2.73	1.14 ± 1.36	$7.99 \times 10^{-1} \pm 6.30 \times 10^{-1}$	$9.33 \times 10^{-1} \pm 6.10 \times 10^{-1}$	$1.49 \times 10^{-1} \pm 5.32 \times 10^{-2}$
总的非致癌风险	2.51 ± 2.74	1.20 ± 1.36	$8.29 \times 10^{-1} \pm 6.30 \times 10^{-1}$	$9.48 \times 10^{-1} \pm 6.10 \times 10^{-1}$	$1.77 \times 10^{-1} \pm 5.40 \times 10^{-2}$

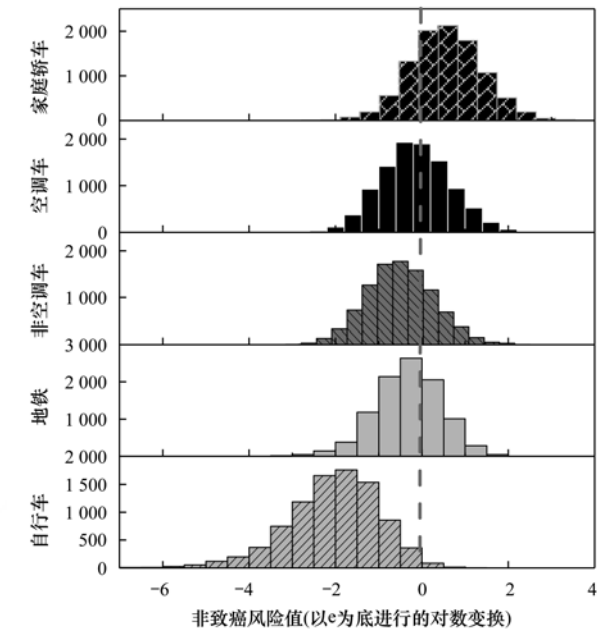


图 3 不同通勤模式总的非致癌风险对比
Fig. 3 Comparison of total non-cancer risk for different commuting modes

2.3 敏感性分析

由于非致癌风险评价模型中涉及的暴露参数略少，为了反映每个参数变化时对结果的影响，本文以致癌风险评价为例，运用 Monte-Carlo 模拟方法得到各暴露参数的敏感度^[14]并进行分析。敏感性分析若为正值，则表示与风险结果正相关，且结果越大，其对风险值的影响越大；若为负值，则表示与风险结果负相关，且结果的绝对值越大，其对风险值的影响越大^[26]。不同通勤模式各暴露参数的敏感度见图 4。

在影响致癌风险的各暴露参数中，每天的暴露时间(ET)、有害挥发物的浓度(CA)、终生暴露年

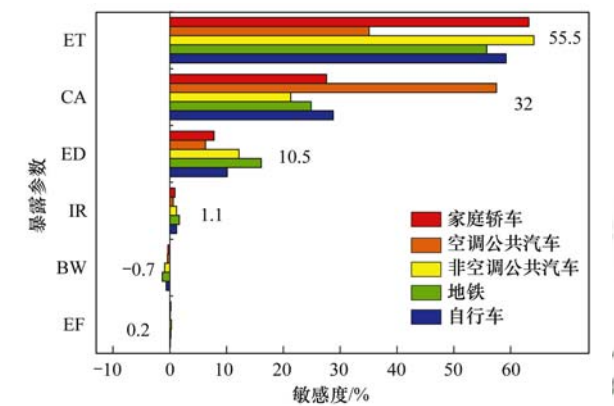


图 4 不同通勤模式总致癌风险的敏感性分析
Fig. 4 Sensitivity analysis of total cancer risk for different commuting modes

限(ED)的敏感度最大，平均值分别达到了 55.5%、32%、10.5%。呼吸速率(IR)和每年的暴露天数(EF)对致癌风险的敏感度较小，分别为 1.1% 和 0.2%。体重具有负敏感性，不同通勤模式的平均值为 -0.7%。

每天的暴露时间(ET)对致癌风险的影响最大，家庭轿车、空调车、非空调车、地铁、自行车的敏感度分别为 63.2%、35.1%、64.1%、55.8%、59.2%。随着城市化的发展，通勤距离增长和交通拥堵导致暴露时间增加。而暴露时间对致癌风险的影响较大，容易对人体健康造成威胁。通过分析不同通勤模式的数据可得，对致癌风险敏感度较大的暴露参数依次为：每天的暴露时间(ET)、有害挥发物的浓度(CA)、终生暴露年限(ED)、呼吸速率(IR)、每年的暴露天数(EF)。除了每天的暴露时间(ET)外，有害挥发物的浓度(CA)对致癌风险的影响也较大，各通勤模式敏感度分别为：27.6%、57.5%、21.3%、24.9%、28.8%。

3 讨论

3.1 对研究结果的讨论

各通勤模式暴露于苯的浓度大小依次为:家庭轿车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁、自行车,而暴露于苯的致癌风险大小依次为:家庭轿车、自行车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁.究其原因,骑自行车暴露于苯的浓度虽然最小,但是呼吸速率却接近其他通勤模式的3倍.另外,家庭轿车的苯致癌风险最大,这与家庭轿车内苯的浓度最大及居民每天乘家庭轿车通勤时长1.22 h都有关系.各通勤模式暴露于甲醛的浓度大小依次为:空调公共汽车、家庭轿车、非空调公共汽车、地铁、自行车,而暴露于甲醛的致癌风险大小却依次为:空调公共汽车、家庭轿车、自行车、非空调公共汽车、地铁.这也说明了骑自行车时呼吸速率较大,导致致癌风险的增加.同时,空调公共汽车车厢相对密闭,车内装饰物产生的VOCs在密闭环境下容易聚集,导致甲醛的浓度和致癌风险高于其他通勤模式.

对于各通勤模式,暴露于甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、乙醛的非致癌风险值都较小,不会对人体健康造成显著危害.而丙烯醛的非致癌风险值过高,导致家庭轿车和空调公共汽车内总的非致癌风

险大于1,超过USEPA推荐的标准.据报道,暴露于丙烯醛可对呼吸道、皮肤、眼造成损伤,吸入具有极高毒性,可诱导呼吸系统损伤和细胞凋亡^[27].由于丙烯醛对环境 and 人体具有极高危害,结合USEPA推荐的丙烯醛参考浓度,应该严格控制丙烯醛在车内的浓度水平.

风险评价结果表明:各通勤模式暴露于甲醛的致癌风险皆大于 10^{-6} ,由于苯的浓度过高,家庭轿车内苯的致癌风险也大于 10^{-6} ;另外,丙烯醛的非致癌风险较大,导致家庭轿车和空调公共汽车总的非致癌风险大于1.为保证居民的身体健康,一方面应该严格限制各通勤模式中的甲醛、丙烯醛和家庭轿车中的苯含量,以降低健康风险;另一方面,家庭轿车、空调公共汽车和地铁车厢相对密闭,污染物易于积聚,应该鼓励使用清洁能源和新型的装饰材料,并安装更高效的车厢空气净化装置以提升空气流通能力.

3.2 与其他城市通勤模式VOCs浓度的对比

本文对中国广州不同通勤模式的8种VOCs气体进行健康风险评价.由于地理位置、气候条件、经济水平等的差异,中国广州的VOCs浓度与其他国家的城市相比有其独自的特点和规律.其他学者只对某些通勤模式的苯、甲苯、二甲苯、乙苯进行研究,因此仅列举了这4种VOCs的数据来进行分析(表6).

表6 各城市不同通勤模式VOCs浓度值对比

Table 6 Comparison of VOCs concentrations in cities for different commuting modes

通勤模式	VOCs	中国 广州 ¹⁾	加拿大 渥太华 ^[28]	美国 底特律 ^[29]	澳大利亚 悉尼 ^[30]	英国 伯明翰 ^[31]
家庭轿车	苯	13.9 ± 9.3	5.1 ± 2.1	6.6 ± 2.5	12.29	17.9
	甲苯	151 ± 196.8	18.1 ± 14.5	17.4 ± 6.3	28.76	40.2
	二甲苯	135.9 ± 201.0	12.3 ± 10.8	—	19.91	—
	乙苯	38.2 ± 56.1	—	2.3 ± 0.9	4.38	—
公共汽车	苯	13.5 ± 4.9	3.4 ± 1.4	8.3 ± 2.6	6.94	20.2
	甲苯	63.6 ± 18.4	9.6 ± 5.2	22.2 ± 5.6	22.47	69.3
	二甲苯	80 ± 20	10.0 ± 3.5	—	15.18	—
	乙苯	8.2 ± 2.6	—	1.7 ± 0.8	4.00	8
地铁	苯	7.6 ± 4.3	—	—	3.77	24.3
	甲苯	38 ± 13.8	—	—	12.44	64.9
	二甲苯	5.3 ± 0.3	—	—	7.26	—
	乙苯	5.6 ± 1.9	—	—	1.73	5.6
自行车	苯	6.4 ± 3.8	4.2 ± 3.2	—	6.17	—
	甲苯	19.4 ± 13.1	14.4 ± 13.7	—	24.56	—
	二甲苯	3.4 ± 2.8	10.2 ± 7.8	—	12.16	—
	乙苯	3.5 ± 4.5	—	—	2.72	—

1) 中国广州公共汽车的数据以空调公共汽车为代表进行列举

中国广州家庭轿车内苯、甲苯、二甲苯和乙苯的浓度明显高于渥太华和底特律.苯的浓度与悉

尼、伯明翰相近,但是甲苯和二甲苯的含量明显要高出许多.广州空调公共汽车内VOCs浓度与伯明

翰的情况最为接近,略高于底特律和悉尼,渥太华的相关浓度最低.而伯明翰地铁内 4 种 VOCs 浓度最大,广州次之,悉尼最小.骑自行车人群暴露于 VOCs 的浓度相差并不大,只是在个别有害挥发物浓度水平上有所差别,如悉尼的甲苯和二甲苯浓度略高.从纵向上看,不同城市的 VOCs 浓度有其各自的特点和规律.渥太华是一个没有重大工业排放的城市,其路边和车载 VOCs 浓度水平都较低.广州和悉尼的 VOCs 整体水平较为相近,广州的家庭轿车和公共汽车内 VOCs 浓度高于悉尼,而悉尼的路边水平即骑自行车人群暴露于 VOCs 的浓度较高.

3.3 与传统风险评价的对比

与传统的健康风险评价相比较,本文选取广州市常用的公共交通工具,对不同通勤模式 VOCs 健康风险进行对比分析.而以往关于交通微环境的研究往往仅就某一通勤模式进行评价,例如, Gong 等^[11]研究了上海地铁一号线乘客暴露于 VOCs 的终生健康风险约为 2.7×10^{-5} , Pang 等^[32]得出北京市 3 种车型的公共汽车司机暴露于甲醛的致癌风险分别为 3.12×10^{-4} 、 2.08×10^{-4} 、 5.2×10^{-4} . 对不

同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险研究极少,也仅限于部分有害挥发物,如在墨西哥城^[16]乘坐汽车,基于苯和甲醛暴露的终生致癌风险约为 $2.0 \times 10^{-5} \sim 3.1 \times 10^{-5}$,微型巴士为 $3.1 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-5}$,公交车为 $2.0 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-5}$,地铁为 $1.3 \times 10^{-5} \sim 1.7 \times 10^{-5}$. 本文选取了居民常用的家庭轿车、空调公共汽车、非空调公共汽车、地铁、自行车等通勤模式,不仅考虑了苯和甲醛,还对甲苯、二甲苯、乙苯等 6 种非致癌物进行健康风险评价,力图全面、客观地反映交通微环境内 VOCs 的风险水平.

另外,本文引入 Monte-Carlo 方法来处理健康风险评价过程中的不确定性(表 7). 这种概率风险评估方法,利用整个输入数据的范围来确定各暴露参数的概率分布,而不是单一点值,这将使风险评价结果呈现出更多的信息^[4,33]. 使用 Crystal Ball 软件来实现 Monte-Carlo 模拟和敏感性分析,能够得到健康风险的最大值、最小值、标准差、分位数等数字特征,可以从各个角度全面地反映乘客在不同通勤模式下的健康风险水平.

表 7 基于 Monte-Carlo 模拟的健康风险评价结果

Table 7 Health risk assessment results based on Monte-Carlo simulation											
通勤模式	风险分布		最大值	最小值	平均值	标准差	百分位数/%				
							5	25	50	75	95
家庭轿车	TCR	LN	1.43×10^{-4}	1.02×10^{-7}	5.01×10^{-6}	3.56×10^{-11}	6.73×10^{-7}	1.74×10^{-6}	3.26×10^{-6}	6.05×10^{-6}	1.48×10^{-5}
	THQ	LN	47.5	4.37×10^{-3}	2.51	2.74	4.59×10^{-1}	8.82×10^{-1}	1.71	3.03	6.98
空调公交车	TCR	T	1.13×10^{-3}	2.13×10^{-8}	1.65×10^{-5}	5.74×10^{-9}	1.01×10^{-7}	9.75×10^{-6}	2.40×10^{-5}	5.47×10^{-5}	1.57×10^{-4}
	THQ	LN	17.73	5.17×10^{-2}	1.20	1.36	2.43×10^{-1}	5.00×10^{-1}	8.55×10^{-1}	1.48	3.32
非空调公交车	TCR	LN	6.00×10^{-5}	2.96×10^{-8}	4.07×10^{-6}	1.49×10^{-11}	7.92×10^{-7}	1.78×10^{-6}	2.96×10^{-6}	4.95×10^{-6}	1.12×10^{-5}
	THQ	ME	11.53	3.60×10^{-2}	8.29×10^{-1}	6.30×10^{-1}	1.77×10^{-1}	3.58×10^{-1}	5.93×10^{-1}	1.02	2.23
地铁	TCR	LN	1.37×10^{-5}	2.60×10^{-8}	1.46×10^{-6}	9.65×10^{-13}	4.16×10^{-7}	8.03×10^{-7}	1.22×10^{-6}	1.83×10^{-6}	3.34×10^{-6}
	THQ	LN	14.95	4.44×10^{-4}	9.48×10^{-1}	6.10×10^{-1}	1.94×10^{-1}	4.44×10^{-1}	7.43×10^{-1}	1.21	2.37
自行车	TCR	LN	4.26×10^{-5}	6.17×10^{-10}	4.53×10^{-6}	1.61×10^{-11}	7.28×10^{-7}	1.93×10^{-6}	3.44×10^{-6}	5.83×10^{-6}	1.19×10^{-5}
	THQ	ME	2.98	1.46×10^{-4}	1.77×10^{-1}	5.40×10^{-2}	1.90×10^{-2}	6.85×10^{-2}	1.40×10^{-1}	2.67×10^{-1}	6.18×10^{-1}

3.4 不确定分析

考虑到不同通勤模式 VOCs 浓度水平在不同年份、不同季节、不同区域、不同时间段上存在的差异,同时,此次健康风险评价污染来源的数据采样时间为 5 月,因此,本文的参数取值存在一定的局限性.另外,暴露参数在一定程度上与经济社会的发展水平有关,ET、EF 和 ED 主要参考中国人群暴露参数手册,而其中的参数主要基于 2011 ~ 2012 年的调查得到,随着时间的推移,暴露参数可能会略有变化,因此乘客在不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价结果仍存在一定的不确定性.

4 结论

(1)结果表明,各通勤模式致癌风险皆大于 10^{-6} ,其中,空调公交车和家庭轿车的致癌风险较大,分别服从 t 分布和对数正态分布,为 $1.65 \times 10^{-5} \pm 5.74 \times 10^{-9}$ 、 $5.01 \times 10^{-6} \pm 3.56 \times 10^{-11}$,超过 10^{-6} 的概率分别为 97% 和 74.85%;自行车、非空调公共汽车和地铁的致癌风险较小,服从对数正态分布,为 $4.53 \times 10^{-6} \pm 1.61 \times 10^{-11}$ 、 $4.07 \times 10^{-6} \pm 1.49 \times 10^{-11}$ 、 $1.46 \times 10^{-6} \pm 9.65 \times 10^{-13}$. 家庭轿车和空调公共汽车的非致癌风险较大,服从对数正

态分布, 分别为 2.51 ± 2.74 、 1.20 ± 1.36 , 超过 USEPA 推荐的标准, 可能对人体造成危害; 骑自行车的非致癌风险较小, 预期将不会对人体健康产生威胁。

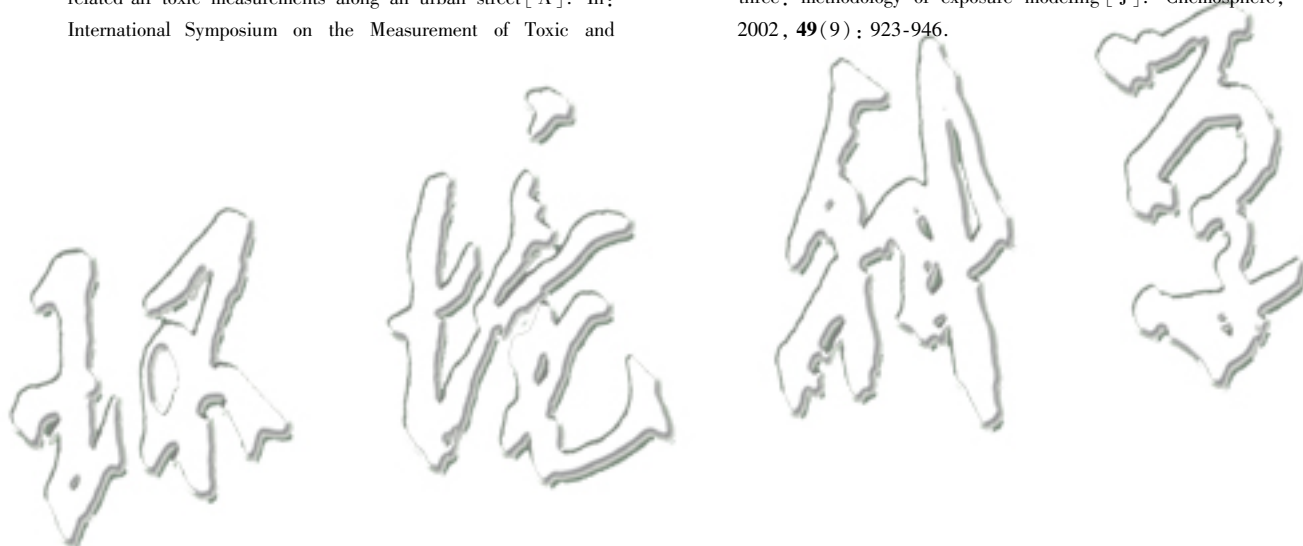
(2) 在致癌风险的占比中, 甲醛高于苯, 而且各通勤模式中甲醛的致癌风险也大于 10^{-6} , 应该对甲醛的含量加以严格的控制; 在非致癌风险方面, 丙烯醛的非致癌风险远高于其他 5 种非致癌物, 同时家庭轿车和空调公共汽车内丙烯醛的非致癌风险皆大于 1, 考虑其毒性, 应该采取措施对丙烯醛的含量进行限制。

(3) 各暴露参数中, 每天的暴露时间(ET)、有害挥发物的浓度(CA)、终生暴露年限(ED)的敏感度较大, 分别为 55.5%、32%、10.5%; 呼吸速率(IR)和每年的暴露天数(EF)对致癌风险的敏感度较小, 分别为 1.1% 和 0.2%; 体重具有负敏感性, 敏感度为 -0.7%。

参考文献:

- [1] Tagiyeva N, Sheikh A. Domestic exposure to volatile organic compounds in relation to asthma and allergy in children and adults[J]. *Expert Review of Clinical Immunology*, 2014, **10** (12): 1611-1639.
- [2] Zhou Y F, Zhang S Z, Li Z, *et al.* Maternal benzene exposure during pregnancy and risk of childhood acute lymphoblastic leukemia: a meta-analysis of epidemiologic studies[J]. *PLoS One*, 2014, **9**(10): e110466.
- [3] Zhou J, You Y, Bai Z P, *et al.* Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(3): 452-459.
- [4] Dodson R E, Houseman E A, Levy J I, *et al.* Measured and modeled personal exposures to and risks from volatile organic compounds[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (24): 8498-8505.
- [5] Adgate J L, Church T R, Ryan A D, *et al.* Outdoor, indoor, and personal exposure to VOCs in children[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112**(14): 1386-1392.
- [6] Ballesta P P, Field R A, Connolly R, *et al.* Population exposure to benzene: one day cross-sections in six European cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(18): 3355-3366.
- [7] Chen X K, Zhang G Q, Zhang Q, *et al.* Mass concentrations of BTEX inside air environment of buses in Changsha, China[J]. *Building and Environment*, 2011, **46**(2): 421-427.
- [8] Dudzińska M R. Volatile organic compounds in private cars and public vehicles[J]. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2011, **13**: 101-116.
- [9] Prud'homme R, Koning M, Lenormand L, *et al.* Public transport congestion costs: the case of the Paris subway[J]. *Transport Policy*, 2012, **21**: 101-109.
- [10] 李爽. 典型微环境空气中苯系物的污染特征及来源解析[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Li S. Characteristics and sources of monoaromatic Hydrocarbons in the air of typical microenvironment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [11] Gong Y, Wei Y J, Cheng J H, *et al.* Health risk assessment and personal exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in metro carriages—a case study in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1432-1438.
- [12] Shiohara N, Fernández-Bremauntz A A, Jiménez S B, *et al.* The commuters' exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in Mexico City[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (19): 3481-3489.
- [13] Öberg T, Bergbäck B. A review of probabilistic risk assessment of contaminated land (12 pp) [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2005, **5**(4): 213-224.
- [14] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [15] 于云江, 向明灯, 孙朋. 健康风险评价中的不确定性[J]. *环境与健康杂志*, 2011, **28**(9): 835-838.
Yu Y J, Xiang M D, Sun P. Uncertainty in health risk assessment: a review of recent related studies[J]. *Journal of Environment and Health*, 2011, **28**(9): 835-838.
- [16] 谢毅. 轿车内有害挥发物来源及其健康风险评价[J]. *环境科学导刊*, 2016, **35**(4): 82-85.
Xie Y. The sources and health risk assessment of harmful volatile substances inside of car[J]. *Environmental Science Survey*, 2016, **35**(4): 82-85.
- [17] 陈小开, 罗会龙, 程赫明. 汽车室内空气品质的研究进展[J]. *制冷与空调(四川)*, 2014, **28**(5): 615-618.
Chen X K, Luo H L, Cheng H M. Research development for indoor air quality of car[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2014, **28**(5): 615-618.
- [18] Brodzik K, Faber J, Łomankiewicz D, *et al.* In-vehicle VOCs composition of unconditioned, newly produced cars[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(5): 1052-1061.
- [19] Zhao W, Al-Nasser L F, Shan S Y, *et al.* Detection of mixed volatile organic compounds and lung cancer breaths using chemiresistor arrays with crosslinked nanoparticle thin films[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, **232**: 292-299.
- [20] Zhao L R, Wang X M, He Q S, *et al.* Exposure to hazardous volatile organic compounds, PM₁₀ and CO while walking along streets in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(36): 6177-6184.
- [21] 王宇. 北京市典型道路空气中挥发性有机物污染特征与模拟[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Wang Y. Pollution characteristics and modeling of volatile organic compounds on typical urban roads in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [22] Chan L Y, Lau W L, Wang X M, *et al.* Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China[J]. *Environment International*, 2003, **29** (4): 429-435.
- [23] Wang P, Zhao W. Assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) near major roads in urban Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **89**(3): 289-297.
- [24] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评价中我国居民暴露参数探讨[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1164-

- 1170.
- Wang Z S, Duan X L, Liu P, *et al.* Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22** (10): 1164-1170.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population (Adults)[M]. Beijing: China Environmental Press, 2013.
- [26] Bieda B. Stochastic approach to municipal solid waste landfill life based on the contaminant transit time modeling using the Monte Carlo (MC) simulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **442**: 489-496.
- [27] Wang H T, Chen T Y, Weng C W, *et al.* Acrolein preferentially damages nucleolus eliciting ribosomal stress and apoptosis in human cancer cells[J]. *Oncotarget*, 2016, **7** (49): 80450-80464.
- [28] Karman D, Noseworthy L, Graham L, *et al.* Motor vehicle related air toxic measurements along an urban street[A]. In: *International Symposium on the Measurement of Toxic and Related Air Pollutants* [C]. US: Air & Waste Management Association, US EPA, Research Triangle Park, 2000.
- [29] Batterman S A, Peng C Y, Braun J. Levels and composition of volatile organic compounds on commuting routes in Detroit, Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (39-40): 6015-6030.
- [30] Chertok M, Voukelatos A, Sheppard V, *et al.* Comparison of air pollution exposure for five commuting modes in Sydney-car, train, bus, bicycle and walking[J]. *Health Promotion Journal of Australia*, 2004, **15**(1): 63-67.
- [31] Kim Y M, Harrad S, Harrison R M. Concentrations and sources of VOCs in urban domestic and public microenvironments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35** (6): 997-1004.
- [32] Pang X B, Mu Y J. Characteristics of carbonyl compounds in public vehicles of Beijing city: concentrations, sources, and personal exposures [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41** (9): 1819-1824.
- [33] Moschandreas D J, Watson J, D'Abreton P, *et al.* Chapter three: methodology of exposure modeling [J]. *Chemosphere*, 2002, **49**(9): 923-946.



CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/CAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)