

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市场尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应: 以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析: 以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe) 可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 习海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)
信息(1663, 1796, 1833)	

现实工况下挖掘机尾气排放特征分析

马帅, 张凯山*, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌

(四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要:为量化挖掘机在实际施工作业中尾气排放特征, 研究选取成都市不同建设工地在用的8台挖掘机, 利用便携式尾气测量系统对其进行现实工况下的尾气排放测量, 测试按挖掘机的不同作业特点分怠速、行走和作业进行。测量的尾气排放污染物包括CO、HC、NO和PM_{2.5}。结果表明, 挖掘机的尾气排放随工况的不同而不同, 怠速时NO排放平稳, 行走和作业时排放速率波动较大。满足不同尾气排放标准的挖掘机, 其尾气排放也有所不同, 例如, 国II阶段的挖掘机与国I阶段的挖掘机相比, 其在怠速、行走、作业工况下尾气排放的NO分别减小8%、35%和5%, PM_{2.5}分别降低88%、87%和80%。另外, 本研究中挖掘机尾气排放的实测结果与我国非道路机械尾气排放因子技术指南中推荐的用于排放清单估算的排放因子相比, 也均有显著不同。这说明, 开展非道路机械尾气排放现实工况下的测量, 对于提高尾气排放清单精准度具有重要作用。

关键词:便携式尾气测量系统(PEMS); 挖掘机; 排放特征; 排放清单; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1670-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201806224

Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators

MA Shuai, ZHANG Kai-shan*, WANG Fan, PANG Kai-li, ZHU Yi-jing, LI Zhen, MAO Hong-mei, HU Bao-mei, YANG Jin-jin, WANG Bin

(College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In this paper, the objective is to characterize real-world tailpipe emissions from excavators. Eight excavators in several construction sites in Chengdu were selected in this study. A portable emission measurement system (PEMS) was used for real-world emissions measurements (i. e., CO, HC, NO, and PM_{2.5}) for three predefined operation modes: idling, moving, and working. The results showed that the tailpipe emissions of excavators vary depending on the operation mode as well as the equipment. NO emissions were relatively stable when the engine was idling compared to when the excavator was moving or doing actual work. In addition, excavators that complied to different emissions standards also exhibited different emissions, with those that met higher emission standards producing fewer emissions. For example, when comparing excavators complying with Stage II emission standards to those complying with Stage I emission standards, the NO and PM_{2.5} emissions appeared to decrease. On average, the NO emissions decreased by 8%, 35%, and 5%, and the PM_{2.5} emissions decreased by 88%, 87%, and 80% for the idling, moving, and working modes, respectively. Furthermore, the studies showed significant differences existed between the emissions factors in the real-world measurements and those recommended by national guidance. This indicated that real-world emission measurements of non-road equipment will play a key role in emissions inventory development. This study demonstrated that PEMS can be used to characterize real-world emissions from non-road equipment.

Key words: portable emission measurement system (PEMS); excavators; emission characterization; emission inventory; emissions factors

非道路机械的尾气排放已成为我国空气污染的重要来源之一^[1, 2]。挖掘机作为一种重要的工程建筑机械, 随着经济建设的快速发展, 其保有量持续增加^[3]。据估算, 2015年全国挖掘机保有量已超过160万台, 占全部工程机械的23%^[4]。由于挖掘机主要以柴油为燃料, 其排放的NO_x和PM通常比汽油等其他燃料高^[5, 6], 加之如此庞大的保有量, 其排放的污染物不容忽视。

与道路移动源的尾气排放研究相比, 对非道路移动源的尾气排放研究处于起步阶段, 特别是现实工况下的尾气排放测量研究较少。因此, 在估算这类机械尾气排放清单用于制定相应地减排控制政策时, 由于实测排放因子缺失^[7], 所用的排放因子通常来自NONROAD、OFFROAD等非道路机械排放

因子模型^[8]、或者少量的实验室台架测试结果^[9], 且往往机械类型不同却采用同一排放因子^[10, 11], 从而造成估算的排放清单具有较大的不确定性。目前, 国内对非道路机械排放因子的研究主要来自于台架测试^[12~14], 而台架测试只能对实验室内的发动机采用预定好的参数进行测试, 无法完全反映机械在现实作业条件下的排放水平。由于非道路机械的尾气排放水平受机械维护状况^[15]、实际作业工况、环境条件等因素的影响, 为了更好地表征非道路机械的尾气排放, 提高其尾气排放清单估算的精

收稿日期: 2018-06-28; 修订日期: 2018-11-01

基金项目: 环境保护部公益性行业科研专项项目(201409012)

作者简介: 马帅(1992~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 784513191@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangkaishan@scu.edu.cn

准度，开展非道路机械现实条件下的尾气排放测量研究尤为必要。

便携式尾气测量系统 (portable emission measurement system, PEMS) 可用于对配备发动机的机械的尾气排放进行现实工况下的测量，近些年由于其发展迅速而得到广泛应用，其中既包括道路机动车的尾气排放测量^[16~19]，也包括非道路机械的尾气排放测量^[20, 21]。对于非道路挖掘机机械尾气排放测量，国外已有相对较多研究^[22, 23]。与国外相比，国内利用 PEMS 对非道路机械，特别是挖掘机的尾气排放特征的实测研究较少而且更多地是在实验室或者固定场地预先设计工况进行模拟测量^[24, 25]。而且相关研究也表明我国工程机械的实际尾气排放与国外的同类机械还是存在着明显的差异^[26]。这更加凸显出在我国开展非道路机械现实工况下的尾气排放实际测量，以提高尾气排放清单估算精准度的必要性。

本研究的主要目的是利用 PEMS 对挖掘机在实际施工作业中的尾气排放进行测量，量化其尾气排放特征，以弥补我国在挖掘机尾气排放实测工作方面的不足，完善相应机械的排放因子数据库，并完

善工程机械现实工况尾气排放测量方法，以期为进一步开展相关研究提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验设计

为了使挖掘机实际工况下测量的尾气排放能较好反映其排放特征，在尾气排放测量的实验设计中需要考虑影响尾气排放的主要因素，包括机械设备、作业类型以及作业工况等。本部分主要介绍现实工况下用于尾气排放测量的实验设计，内容包括：①测量机械、测量时间及地点的选择；②测量工况设计；③测量设备选择；④现实工况下的实际测量。

1.1.1 测量机械、时间及地点选择

本研究选择常见的挖掘机类型用于尾气排放测量。但由于选择受现实条件的影响较大，因此，本研究综合考虑建设工地的安全性和实验许可，选择成都市几个不同施工建设工地的 8 台挖掘机进行测试。这些机械满足的排放标准包括国 1 和国 2，其额定功率也涵盖了排放标准中的 4 个功率范围，详见表 1。

表 1 测量挖掘机信息
Table 1 Testing information of selected excavators in this study

项目		测量挖掘机							
		1	2	3	4	5	6	7	8
机械	制造商	日立建机	斗山	神钢	竹内	现代	神钢	小松	现代
	出厂年份	2009	2010	2008	2010	2011	2011	2011	2012
	机械型号	ZX210K-8	DH225LC-7	SK260LC	TB150-C	R60-7	260LC	PC360-7	275LC-9T
发动机	制造商	五十铃	斗山	日野	洋马	洋马	日野	小松	康明斯
	型号	Isuzu AI-4 HK1X	DB58T1A	J05ETB-EDDD	4TNV88-QTBC	4TNV94L-XHYBC	CA-J05ETB-EDDC	SAA6D114E-2	6C8.3
	额定功率/kW	122	115	137	27.3	53.1	137	190	186
	额定转速/r·min ⁻¹	2 000	1 950	2 100	2 200	2 400	2 100	1 900	1 900
	压缩比	17.4	18	18	18	18	18	18	18
	气缸体积	5.193	8.071	5.123	2.19	3.054	5.123	8.27	8.3
	排放标准	国 I	国 I	国 II	国 II	国 II	国 II	国 II	国 II
建筑地点	地点	楼房地基 建设工地	楼房地基 建设工地	楼房地基 建设工地	绿化建设 工地	地铁建设 工地	楼房地基 建设工地	楼房地基 建设工地	公园建设 工地
	作业内容	破碎钢筋 水泥石块	挖土装车	挖土装车	挖坑种树/ 平整路面	破碎水泥 路面	挖土平路	挖土平路	水渠施工/ 转移土堆

1.1.2 测量工况设计

挖掘机在实际作业过程中工况变化十分复杂，为了获得具有代表性的尾气排放特征，本研究根据挖掘机的工作特点，针对 3 种工况进行测量，即怠速、行走和作业。怠速工况指发动机空转，同时机械保持静止；行走工况为机械仅保持前进或者后退，不进行其他工作任务；作业工况是指除去怠速和行走之外，使用配件进行挖掘，破碎、搬运、装车等一系列操作行为的组合。另

外，为了既不影响挖掘机的实际工作又方便对其尾气排放分工况测量，在进行测量之前，需与机械操作人员进行沟通，令其熟悉整个实验的流程。测试主要流程如下：测量之前，挖掘机首先预热 10~20 min，怠速测量时，挖掘机空转并保持静止，行走工况的测量安排在转换作业场地的行走阶段，或者在施工场地进行前后移动的模拟测试，作业工况的测试安排在挖掘机实际作业中进行测试。当工况改变时，由机械操作人员提醒实验人

员以便进行滤膜更换,从而保证测试工况是现实工况下的测量而不是预先设计的工况,增强代表性.测试过程中,测试人员会架设录像机对机械行为实时记录.

1.1.3 尾气排放测量设备选择

本研究根据非道路机械尾气排放实际测量需要设计开发了一套便携式尾气排放测量系统,并已先期用于其他非道路机械尾气排放的实际测量^[27].该测量系统主要由3部分组成:①采用电化学(NO和O₂)和光学传感器(CO、CO₂、HC)测量尾气中各气体污染物的浓度;②采用滤膜称重法测量颗粒物的质量排放;③采用温度、压力及转速传感器测量

发动机进气口温度、尾气温度、主管压力以及转速.该系统的测量精度(体积分数)分别为NO: 3×10^{-6} 、CO和CO₂:0.01%、HC: 1×10^{-6} ;其他传感器均在成都计量检定测试院检定合格;颗粒物采用47 mm聚四氟乙烯滤膜.测量系统在实验室台架上与常见的尾气排放测量系统HORIBA OBS2000进行比对,结果的一致性较强^[27].该测量系统的结构示意图如图1所示.

为了确保仪器的正常工作,每次测量前后均采用标准气体对仪器进行标定.用于标定的标准气体体积分数分别为:CO 8.02%, CO₂ 20.06%, C₃H₈ 1.603×10^{-3} , NO 2.905×10^{-3} .

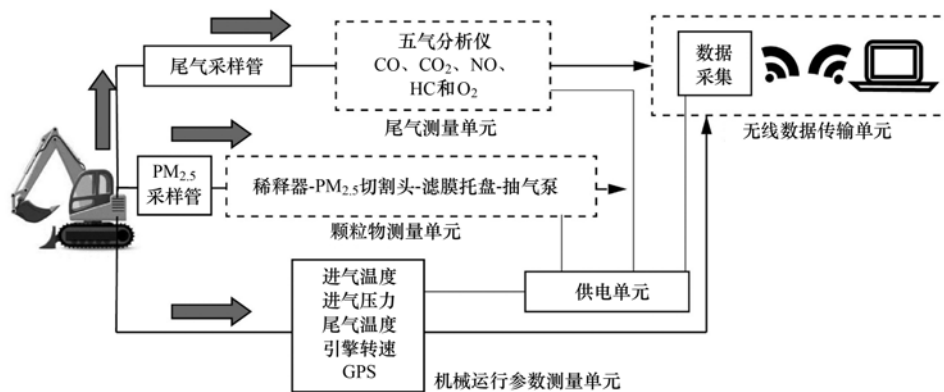


图1 便携式尾气排放测试系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of the portable emissions measurement system used in this study

1.1.4 现实工况的实际测量

现实工况下挖掘机械尾气排放测量的工作通常包括3个部分:①测量的前期准备,②测量设备安装调试,③不同工况的尾气排放测量.测量的前期准备包括测量设备固定位置的选择、传感器与各类管线的准备与布设等.测试仪器通常固定在挖掘机顶部较平坦位置,同时要考虑测量期间便于研究人员更换颗粒物滤膜.测量仪器使用不锈钢框架进行保护,在不锈钢框架底部与机械接触面放置橡胶垫,减少机械震动对仪器测量造成影响.转速传感器固定在发动机主轴附近,进气压力传感器和进气温度传感器被安装在涡轮增压装置和发动机气缸之间,用于捕捉发动机进气压力和温度.尾气温度传感器插入尾气排放口内.五气分析仪和颗粒物的采样头并排插入排气口,气体分析仪传输管加装干燥装置用于过滤水汽,颗粒物的采样管线用加热垫包裹以减少水汽的冷凝.此外,所有的传感器外侧要用耐高温的材料包裹,采样传输管线尽量避免弯折,靠近热源的导线需做隔热处理.

测试前,抽取现场空气30~60 min,得到施工场地PM_{2.5}的本底值.测量前,仪器进行预热和泄

漏检查,测量时,每隔一定时间吸入空气进行零校正,防止信号漂移.为了防止颗粒物过少不符合称量天平的称量要求,或者过多导致滤膜通气能力差而破损,需基于实际工况的操作特点进行设计,通常每个测试样的测试时间考虑在10~20 min之间,整体测量时间超过3 h,测试样品均不少于4个(除8号挖掘机).测试结束后,仪器继续开机10 min,吸入空气对仪器内部进行清洗,拆卸顺序与安装顺序相反,拆卸后,整套测量系统将被及时运回反吹和校准,验证测量数据的可靠性并准备下一次测量.

1.2 测量结果的数据分析

1.2.1 测量数据的质控和后处理

由于在尾气排放的实际测试过程中,机械作业环境恶劣,测试仪器在高温环境中长时间工作,无线传输设备具有一定的传输距离限制,并易受外界干扰等,这些情况均会造成数据错误或缺失.为了保证测量数据的精准度以利于后续的分析,需对测量的原始数据进行质量控制和后处理.测量过程中常见的数据错误包括:各类数据获取的时间不同步、仪器凝滞、数据连线脱落等.因此,数据的质量控制和后处理主要针对上述出现的情况,设计数据质

控和后处理程序。首先根据五气分析仪和各类传感器测试数据的时间差对不同测量模块采集的数据进行时间同步, 然后剔除数据中出现的异常测量值, 当出现数据重复采集时(在数据中的表现为 1 s 出现 2~3 个数据), 以重复时间的数据平均值作为该时刻的测量数据, 对测量数据中时间点不连续的数据(不连续的数据 ≤ 3 s)做插值处理, 补全时间序列, 对超出 3 s 的缺失数据, 不做补充, 测试中若某项数据无法补全, 整条数据剔除。

1.2.2 测量数据的统计分析

测量数据统计分析的主要内容是对挖掘机在现实条件下的尾气排放分工况进行模式分析以及估算其典型的综合排放因子。按上面章节提及的怠速、行走和作业这 3 种工况分别计算各污染物的质量排放速率和油耗速率, 并以此估算基于油耗和功耗的尾气排放因子。

利用引擎参数、机械运行参数和尾气测量单元的测量数据, 依据质量守恒原理、燃烧过程、理想气体方程等计算逐秒的尾气质量排放速率以及燃油消耗速率^[28]。尾气中颗粒物所携带的碳元素与排气中的其他碳元素相比, 所占比例极低, 计算时忽略颗粒物中的碳元素对计算结果影响较小。油耗计算公式见式(1)~(3):

$$m_{\text{fuel}} = M_e \times (y_{\text{CO}} + y_{\text{CO}_2} + 6y_{\text{HC}}) \times M_{r,\text{fuel}} \quad (1)$$

式中, m_{fuel} 为油耗的质量速率($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); M_e 是干尾气排放摩尔速率($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$); y_{CO} 、 y_{CO_2} 和 y_{HC} 分别表示干尾气排放中 CO、CO₂ 和 HC 的摩尔分数; $M_{r,\text{fuel}}$ 为燃料的等同分子式(CH_xO_z)的相对分子质量, 柴油一般取 13.857。

其中, 干尾气排放摩尔速率 M_e 的计算方式如下:

$$M_e = 2 \times M_{\text{air}} \times y_{\text{O}_2,\text{in}} \div [(2y_{\text{O}_2,\text{out}} + y_{\text{CO}} + 2y_{\text{CO}_2} + y_{\text{NO}} - 7y_{\text{HC}}) - (z - 0.5x)(y_{\text{CO}} + y_{\text{CO}_2} + 6y_{\text{HC}})] \quad (2)$$

式中, M_{air} 是进气量的摩尔速率($\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$); $y_{\text{O}_2,\text{in}}$ 是进气中的 O₂ 摩尔分数; $y_{\text{O}_2,\text{out}}$ 为干尾气排放中 O₂ 的摩尔分数; x 和 z 分别为燃料的等同分子式(CH_xO_z)中 H 和 O 的个数。

其中, M_{air} 的计算方式为:

$$M_{\text{air}} = \frac{\left(P_{\text{MAP}} - \frac{P_{\text{B}}}{C_{\text{engine}}}\right) \times V_{\text{engine}} \times \frac{S_{\text{engine}}}{120}}{R(T_{\text{intake}} + 273.15)} \times \eta_{\text{engine}} \quad (3)$$

式中, P_{MAP} 是引擎进气主管的压力(kPa); P_{B} 是大气压(kPa); C_{engine} 为引擎压缩比; V_{engine} 气缸体积

(L); S_{engine} 是引擎转速($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$); η_{engine} 是引擎体积效率, 一般取 0.95; R 为气体常数, 一般取 $8.314 [\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}]$; T_{intake} 为进气口温度($^{\circ}\text{C}$)。

CO、CO₂、HC、NO 逐秒的质量排放速率的计算方法见式(4):

$$m_i = M_e \times y_i \times M_{ri} \quad (4)$$

式中, m_i 为污染物 i 的质量排放速率($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$); y_i 为干尾气排放中污染物 i 的摩尔分数; M_{ri} 是污染物 i 的相对分子质量, i 为 CO、CO₂、HC、NO。

为了进一步研究尾气排放的特征, 本研究除了计算尾气排放污染物的质量速率之外, 还计算了单位燃油消耗排放的尾气污染物质量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 以及单位功耗的污染物排放质量[$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]。基于油耗的污染物的排放质量的计算公式为:

$$\text{EF}_{i,\text{fuel}} = \frac{m_i \times 1000}{m_{\text{fuel}}} \quad (5)$$

式中, $\text{EF}_{i,\text{fuel}}$ 为基于油耗的排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); i 为尾气排放污染物 CO、CO₂、HC、NO。

通过燃油消耗率(BSFC)进行基于引擎做功的排放因子与基于油耗的排放因子的转换^[29, 30]。

$$\text{EF}_p = \text{EF}_{\text{fuel}} \times (\text{BSFC}/1000) \quad (6)$$

式中, EF_p 为基于引擎做功的排放因子[$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]; EF_{fuel} 基于油耗的排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); BSFC 为指定稳态工况下燃油消耗率, 当引擎额定功率 P 小于 75kW 时, BSFC 取 248.4 [$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$], 当 P 大于等于 75kW 时, BSFC 取 223.4 [$\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$]。

基于油耗的排放因子因其本身变化性较小且活动水平数据更易获取, 在非道路机械排放清单的建立中被广泛地采用。由于挖掘机的尾气排放受工况的影响较大, 本探究根据典型工作条件下, 不同工况时间占比的实际调研结果, 按式(7)估算基于油耗的挖掘机综合排放因子。

$$\text{CEF}_i = \sum_{j=1}^n (\text{EF}_{i,j} \times T_j) \quad (7)$$

式中, CEF_i 为污染物 i 的综合排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), i 指污染物类型; $\text{EF}_{i,j}$ 是污染物 i 在 j 工况中的平均排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), j 指挖掘机的工况, 如: 怠速、行走、作业; n 为测试的工况类型数, 这里取 3; T_j 指挖掘机在完成某一任务时 j 工况的时间占比(%)。各工况典型的时间占比根据前期的调研结果获得, 即怠速 11%, 行走 15%, 作业 74%。

此外, 为了评价本地化的测量结果能否有效地补充现有的排放因子数据库, 本研究同时将所获得的综合排放因子与国家推荐使用的排放因子进行比较。

本研究的数据处理利用 EXCEL 2013 内嵌的 VBA 进行编程和开展相关分析。

2 结果与讨论

本部分主要介绍的内容包括:①挖掘机尾气排放的实际测量;②现实工况下尾气排放质量速率分析;③尾气排放的模式分析;以及④挖掘机尾气排放综合排放因子分析与比较等。

2.1 挖掘机尾气排放的实际测量

本研究在成都市的不同工地对预先选取的 8 台

挖掘机进行尾气排放的实际测量。如图 2 所示,测量设备的固定位置和传感器的安装均随着机械的不同而不同。除去测量设备的安装及调试外本研究对每台机械约进行 8~9 h 的测量,经数据的质量控制与后处理之后,每台机械获取约 4~6 h 的有效的逐秒的尾气排放数据。

此外,测试期间对不同施工点共 13 台挖掘机的操作进行共约 10 h 的实时录像,以补充前期调研获取的挖掘机在现实施工各工况的典型时间占比数据。



图 2 测量设备安装示意

Fig. 2 Installation of PEMS on excavators for real-world tailpipe emissions measurements

2.2 现实工况下尾气排放质量速率分析

通常情况下,挖掘机作业时的尾气排放速率和油耗比行走和怠速时较高,以怠速最低,如图 3 所示。由于受工况的影响较大,即使是同一种工作工况,其尾气排放和油耗也有所波动。此外,不同机械之间,即使处于相同的工况条件下,其尾气排放及油耗也有显著的区别。从图 3 可知,安装破碎锤的日立建机 ZX210K-8 的 CO 排放较安装铲斗的斗山 DH225LC-7 大,而其他的污染物排放及油耗则偏小。造成挖掘机尾气排放存在较大变化的原因很多,包括挖掘机的作业内容、挖掘机引擎技术和功率大小、驾驶员的操作习惯、作业环境、以及不同辅助作业工具的使用等。

2.3 挖掘机尾气排放的模式分析

表 2 给出了测试挖掘机在不同工况模式下气态污染物和细颗粒物基于时间的平均排放质量速率及其 95% 置信区间。通常情况下,挖掘机在怠速、行走、作业工况中,CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 的排放速率呈现增大趋势,特别是在大功率段的机械更加明显,这与付明亮等^[25]的研究结果较为一致。对 CO 排放,行走和作业时的排放分别是怠速的 4.0 倍和 4.4 倍;对 HC,行走和作业的排放分别是怠速的 2.3 和 2.6 倍;对于 NO 排放,行走和作业时排放的

NO 是怠速工况的 4.0 倍和 5.2 倍,行走和作业时排放的 $PM_{2.5}$ 分别是怠速工况的 11.2 和 17.2 倍。这可能是挖掘机在行走和作业时,燃烧室的燃烧条件变化剧烈导致了排放的迅速增加。另外,研究发现挖掘机尾气排放随额定功率增大而增加的趋势并不明显,这可能跟测量的挖掘机样本相对有限相关。

与基于时间的排放因子相比,基于油耗的各工况下的尾气排放因子的差异相对较小。如图 4 所示,对 CO 和 HC,行走和作业阶段基于油耗的排放因子较怠速时减小,表现出在行走和作业时燃烧效率有所提高,国 I 和国 II 的 CO 和 HC 排放没有出现显著性差异。挖掘机在不同工况下 NO 的排放差别较小,国 I 和国 II 阶段的挖掘机相同工况下的排放没有显著性差异,但总体上国 II 阶段的排放较小,与预期的结果一致。但对于 $PM_{2.5}$ 的排放而言,国 I 和国 II 则出现显著性差异,国 II 阶段的排放显著减少。当然,由于测试机械的数量相对较少,各工况下的尾气排放存在着较大的变化性,体现在具有较宽的 95% 置信区间,特别是对于满足国 I 排放标准的挖掘机。

2.4 挖掘机尾气综合排放因子分析与比较

本研究根据实测的挖掘机尾气排放结果以及调

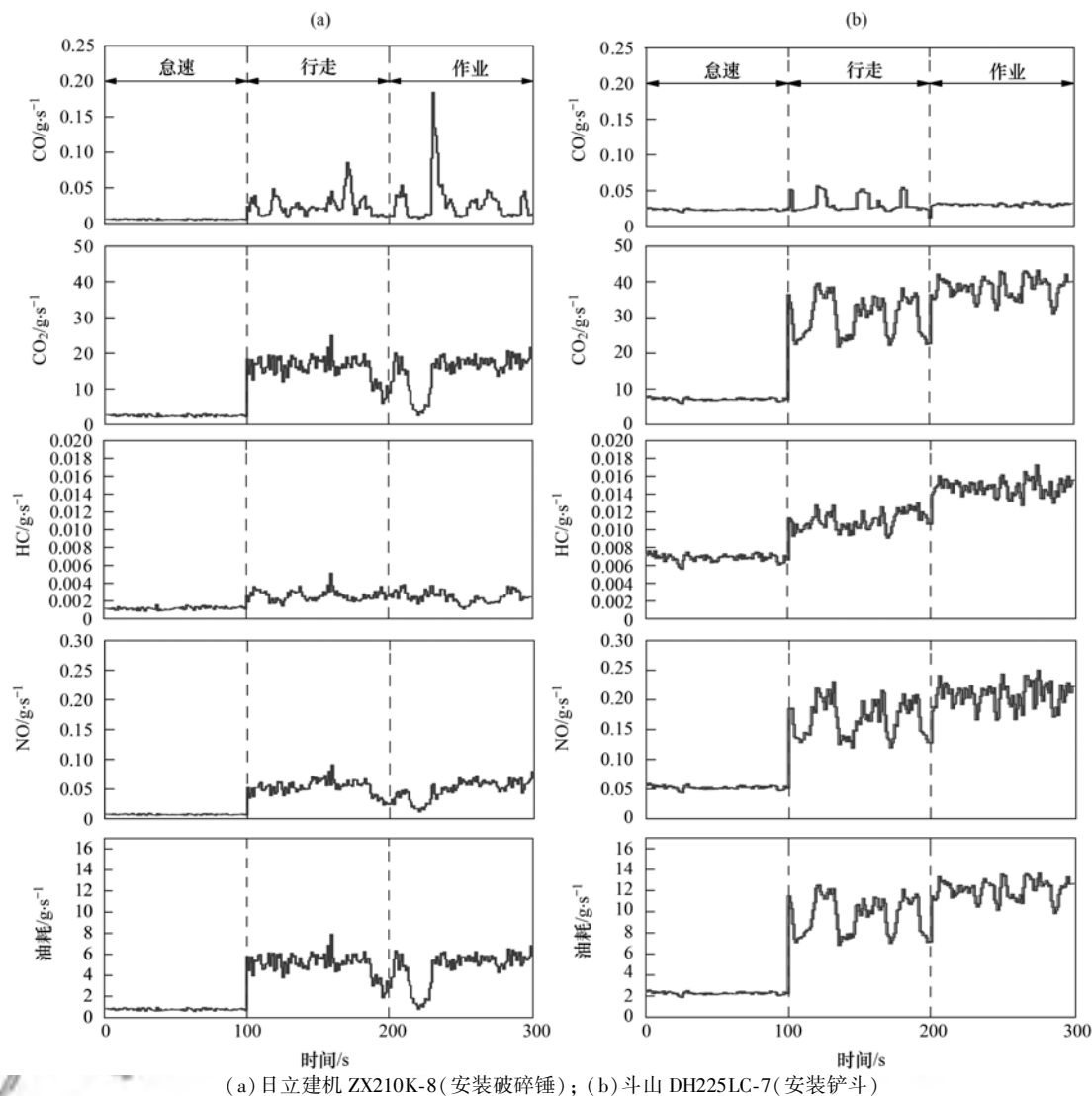


图3 不同挖掘机3种工况下瞬时排放质量速率和油耗速率

Fig. 3 Emissions and fuel consumption vs. time for two excavators in the three operation modes

表2 不同操作模式基于时间的排放因子¹⁾/g·h⁻¹

Table 2 Average time-based emission factors in the different operating modes/g·h ⁻¹				
污染物	功率范围 /kW	工作模式		
		怠速	行走	作业
CO	18≤P<37	8.92±5.73	13.05 [*]	7.13±0.43
	37≤P<75	6.80±0.11	11.15±0.61	11.04±1.29
	75≤P<130	49.20±18.24	335.12±178.64	271.28±93.51
	130≤P≤560	51.34±14.40	100.53 [*]	223.01±101.50
	均值	29.06±24.03	114.96±149.53	128.11±136.08
HC	18≤P<37	10.49±3.60	31.91 [*]	20.37±2.58
	37≤P<75	2.57±0.80	5.21±5.66	12.51±4.30
	75≤P<130	13.43±5.21	34.76±17.69	37.66±12.86
	130≤P≤560	22.62±9.21	41.58 [*]	58.84±12.60
	均值	12.28±8.11	28.36±15.64	32.35±20.14
NO	18≤P<37	10.49±3.60	31.91 [*]	20.37±2.58
	37≤P<75	18.19±1.98	44.27±3.00	51.35±4.08
	75≤P<130	132.82±104.63	403.61±419.09	567.35±97.52
	130≤P≤560	71.01±10.00	458.37±37.70	567.10±76.85
	均值	58.13±55.46	234.54±223.44	301.54±300.90
PM _{2.5}	18≤P<37	1.88±1.54	16.91 [*]	11.05±5.40
	37≤P<75	1.64±0.08	8.27±5.29	12.93±14.00
	75≤P<130	2.16±1.95	29.19±55.19	28.78±17.75
	130≤P≤560	1.31±0.75	24.35±17.80	67.61±31.50
	均值	1.75±0.36	19.68±8.95	30.09±25.72

1) * 表示测试样只有一个

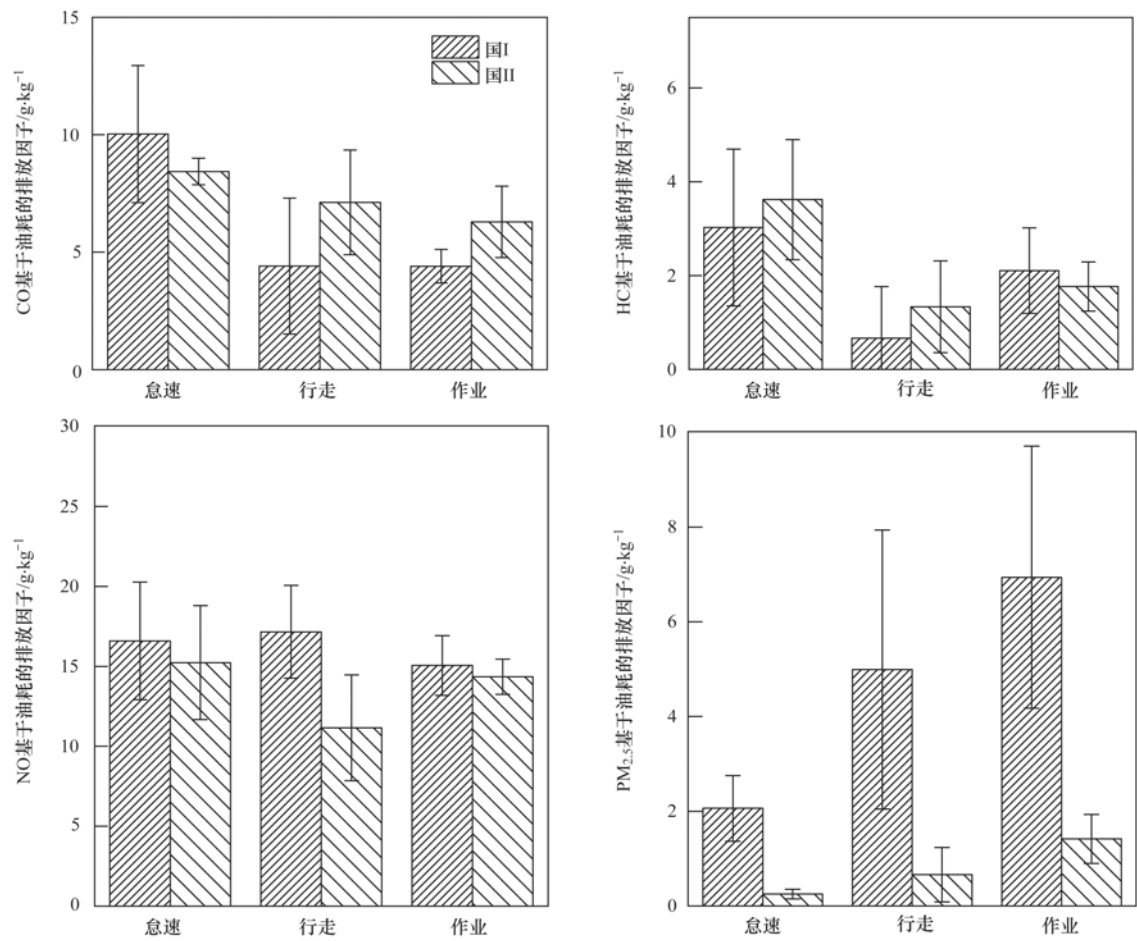


图4 不同工况下基于油耗的尾气排放因子

Fig. 4 Modal fuel-based emission rates for selected excavators

研得到的各工况典型时间占比按不同功率估算挖掘机基于油耗的综合排放因子,具体如表3所示.对于NO而言,虽然不同功率水平的排放略有不同,且由于测量样本较小,排放随功率变化的趋势不明显,且不同功率之间的排放差异较小.相比之下,颗粒物的排放则呈现较大的变化性.最小与最大值

之间可相差10倍.此外,本研究的实测综合排放因子与文献[31]的推荐值存在较大的差别.如表3所示,对CO而言,文献[31]推荐值是本研究实测结果的2.3~6.8倍,HC在1.4~5.7倍,NO在1.6~3.1倍,PM_{2.5}在0.4~4.4倍.

表3 测试挖掘机基于油耗的综合排放因子¹⁾/g·kg⁻¹

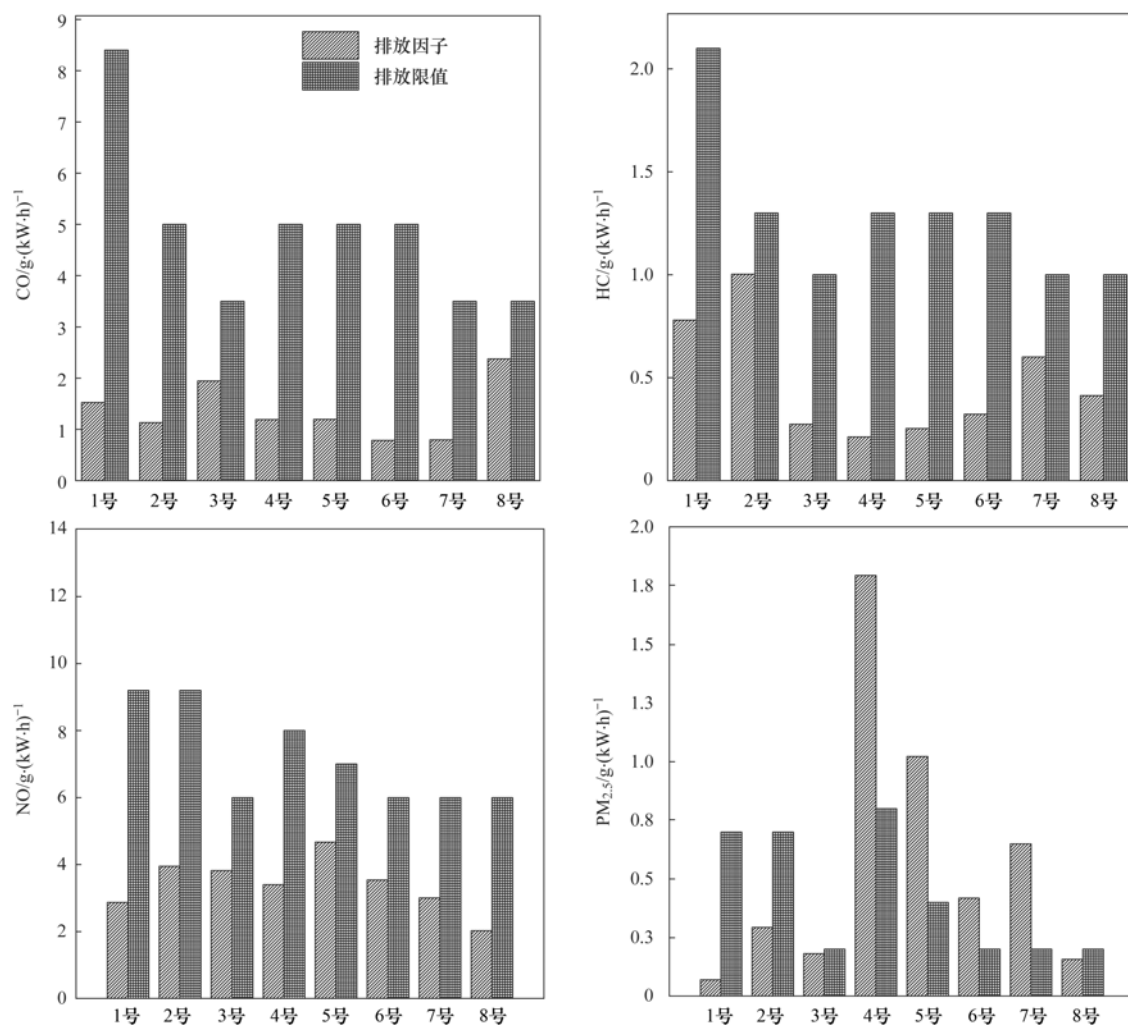
Table 3 Fuel-based composite emission factors of selected excavators in this study/g·kg⁻¹

功率段/kW	排放标准	CO		HC		NO		PM _{2.5}	
		本研究	文献[31]	本研究	文献[31]	本研究	文献[31]	本研究	文献[31]
$G < 37$	I	6.14	26.00	3.14	5.20	13.68	42.00	7.23	3.80
$75 < G < 130$	I	3.51	23.80	1.44	6.19	17.68	43.80	1.31	3.16
$G > 130$	I	5.35	25.00	1.13	6.50	17.11	46.00	0.81	2.57
$37 < G < 75$	II	4.55	21.70	4.04	5.65	18.79	30.40	4.12	1.65
$75 < G < 130$	II	5.33	23.80	0.95	4.76	12.84	28.60	0.31	1.36
$G > 130$	II	7.63	17.50	1.92	5.00	12.78	30.00	1.83	0.95

1) 若行走工况缺失,采用该机械作业工况代替

这表明使用文献[31]推荐的排放因子单独预测挖掘机可能会使排放清单结果偏高数倍.这一方面也突显对挖掘机等非道路机械在现实工况下实测以获取相对准确的尾气排放因子的必要性,另一方面也表明针对非道路机械分机械类型单独计算排

放清单的重要性.此外,为了评价制定的各级排放标准能否有效的控制非道路机械的尾气排放,将估算得到的综合排放因子与相应的国家排放标准比较,结果如图5所示.就CO、HC、NO而言,所测的各台挖掘机的



1号:日立建机-2009-国 I; 2号:斗山-2010-国 I; 3号:神钢-2008-国 II; 4号:竹内-2010-国 II;
5号:现代-2011-国 II; 6号:神钢-2011-国 II; 7号:小松-2011-国 II; 8号:现代-2012-国 II

图5 挖掘机实际作业排放因子与其满足的国家排放标准比较

Fig. 5 Comparison of the measured emission factors and compliance with national emissions standards for selected excavators

排放水平均低于其相应的国家排放标准. 而对于 $PM_{2.5}$ 而言, 则有较大差别. 8 台挖掘机中有 5 台的实际排放水平比其相应的国家排放标准高. 这可能是由于作业条件及维护水平的差异, 而造成后处理设施的劣化程度较大等原因造成.

3 结论

(1) 本研究通过对 8 台在用挖掘机怠速、行走和作业工况下的尾气排放测试, 获得挖掘机不同工况下 CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 的排放因子, 并利用施工场地实际调研数据, 计算得到在用挖掘机尾气综合排放因子. 本研究通过挖掘机尾气排放的实际测量表明, 采用便携式尾气排放测量系统可以有效地捕捉非道路机械的尾气排放特征.

(2) 测试结果表明, 不同工况对挖掘机尾气排放的影响较大. 一般情况下, 作业时的排放比行走和怠速时大. 不同的机械由于其作业环境、功率、

排放标准等条件的不同, 其尾气排放也有显著不同. 根据实测结果, 挖掘机行走时排放的 CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 的质量速率分别是怠速的 4.0、2.3、4.0 和 11.2 倍; 作业时排放的 CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 的质量速率分别是怠速的 4.4、2.6、5.2 和 17.2 倍. 国 II 阶段挖掘机和国 I 相比, CO、HC、NO_x 基于油耗的排放因子不存在显著性差异, 总体上国 II 阶段的 NO 排放有所减小; 而对 $PM_{2.5}$, 国 II 阶段的排放显著减少, 表明提高尾气排放标准是减少机械尾气排放的有效措施之一.

(4) 本研究的实测综合排放因子与指南的推荐因子存在较大的差别, 文献[31]对 CO、HC、NO 和 $PM_{2.5}$ 的推荐值分别是本研究实测结果的 2.3 ~ 6.8 倍、1.4 ~ 5.7 倍、1.6 ~ 3.1 倍以及 0.4 ~ 4.4 倍. 由估算得到的挖掘机基于功率的排放因子与国家排放标准相比, 就 CO、HC、NO 而言, 测试结果低于国家排放标准; 而对 $PM_{2.5}$, 8 台挖掘机中有 5 台高

于相应国家排放标准,表明对挖掘机颗粒物的控制是未来工作的重点。

参考文献:

- [1] Wang F, Li Z, Zhang K S, *et al.* An overview of non-road equipment emissions in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **132**: 283-289.
- [2] 宁亚东,李宏亮. 我国移动源主要大气污染物排放量的估算[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(8): 4435-4444.
Ning Y D, Li H L. Estimation for main atmospheric pollutants emissions from mobile sources in China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(8): 4435-4444.
- [3] 中国机械工业年鉴编辑委员会,中国工程机械工业协会. 中国工程机械工业年鉴[M]. 北京:机械工业出版社,2015. 13.
- [4] 韩学松. 2015年中国工程机械主要设备保有量[J]. *今日工程机械*, 2016, (8): 34-36.
- [5] 樊守彬,田灵娣,张东旭,等. 北京市机动车尾气排放因子研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2374-2380.
Fan S B, Tian L D, Zhang D X, *et al.* Emission factors of vehicle exhaust in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2374-2380.
- [6] Myung C L, Lee H, Choi K, *et al.* Effects of gasoline, diesel, LPG, and low-carbon fuels and various certification modes on nanoparticle emission characteristics in light-duty vehicles[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2009, **10**(5): 537-544.
- [7] 张意, Michel A, 李东,等. 天津市非道路移动源污染物排放清单开发[J]. *环境科学*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
Zhang Y, Michel A, Li D, *et al.* Development of a non-road mobile source emissions inventory for Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4447-4453.
- [8] 黄成,安静宇,鲁君. 长三角区域非道路移动机械排放清单及预测[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 3965-3975.
Huang C, An J Y, Lu J. Emission inventory and prediction of non-road machineries in the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 3965-3975.
- [9] 鲁君,黄成,胡馨遥,等. 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
Lu J, Huang C, Hu Q Y, *et al.* Air pollutant emission inventory of non-road machineries in typical cities in eastern China[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2738-2746.
- [10] 李伟铿,张宝春,叶子铭,等. 南宁市非道路移动源排放清单研究[J]. *广东化工*, 2016, **43**(8): 120, 122.
Li W K, Zhang B C, Ye Z M, *et al.* Study on non-road mobile source emission inventory for Nanning[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, **43**(8): 120, 122.
- [11] 谢轶嵩,郑新梅. 南京市非道路移动源大气污染物排放清单及特征[J]. *污染防治技术*, 2016, **29**(4): 47-51.
Xie Y S, Zheng X M. Atmospheric pollutant emission inventory from non-road mobile sources in Nanjing and its characteristics[J]. *Pollution Control Technology*, 2016, **29**(4): 47-51.
- [12] 崔敏. 基于实测的道路与非道路柴油车颗粒物排放特征初步研究[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所,2016.
- [13] 蒋稼琦,丁剑,田勇,等. 小型非道路柴油机稳态和瞬态排放特性分析[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2017, **42**(3): 904-912.
Jiang J Q, Ding J, Tian Y, *et al.* An analysis on the steady-state and transient emission characteristics of small non-road diesel engine[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2017, **42**(3): 904-912.
- [14] 邢辉,段树林,黄连忠,等. 基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3750-3757.
Xing H, Duan S L, Huang L Z, *et al.* Testbed-based exhaust emission factors for marine diesel engines in China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3750-3757.
- [15] Fu M L, Ge Y S, Tan J W, *et al.* Characteristics of typical non-road machinery emissions in China by using portable emission measurement system[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **437**: 255-261.
- [16] 吴晓伟,彭美春,方荣华,等. 基于 PEMS 的柴油公交车排放测试分析[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(1): 146-149.
Wu X W, Peng M C, Fang R H, *et al.* Emission test and analysis for diesel transit bus using PEMS[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35**(1): 146-149.
- [17] 楼狄明,赵可心,谭丕强,等. 不同后处理装置对柴油车排放特性的影响——基于行驶里程的后处理装置对柴油公交车气态物排放特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(8): 2282-2288.
Lou D M, Zhao K X, Tan P Q, *et al.* Gaseous emission characteristics of diesel bus equipped with different after-treatments based on driving distance[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2282-2288.
- [18] Frey H C, Zhang K S, Roupail N M. Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(7): 2483-2489.
- [19] Zhang K S, Frey C. Evaluation of response time of a portable system for in-use vehicle tailpipe emissions measurement[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(1): 221-227.
- [20] Merksiz J, Lijewski P, Fuć P, *et al.* Exhaust Emission tests from non-road vehicles conducted with the use of PEMS analyzers[J]. *Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne*, 2013, **15**(4): 364-368.
- [21] Lijewski P, Merksiz J, Fuc P, *et al.* Air pollution by the exhaust emissions from construction machinery under actual operating conditions[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **390**: 313-319.
- [22] Abolhasani S, Frey H C, Kim K, *et al.* Real-world in-use activity, fuel use, and emissions for nonroad construction vehicles; a case study for excavators[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2008, **58**(8): 1033-1046.
- [23] Cao T F, Durbin T D, Russell R L, *et al.* Evaluations of in-use emission factors from off-road construction equipment[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **147**: 234-245.
- [24] 曲亮,何立强,胡京南,等. 工程机械不同工况下 PM_{2.5} 排放及其碳质组分特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(7): 1047-1052.
Qu L, He L Q, Hu J N, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} emissions and its carbonaceous components from construction machines under different typical driving modes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(7): 1047-1052.
- [25] 付明亮,丁焰,尹航,等. 基于燃油消耗的工程机械排放因子研究[J]. *北京理工大学学报*, 2014, **34**(2): 138-142.
Fu M L, Ding Y, Yin H, *et al.* Study on fuel-based emission factors from construction equipment[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, **34**(2): 138-142.
- [26] Peng Z H, Ge Y S, Tan J W, *et al.* Real-world emission from in-use construction equipment in China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(8): 1893-1902.
- [27] Li Z, Zhang K S, Pang K L, *et al.* A fuel-based approach for

- emission factor development for highway paving construction equipment in China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2016, **66**(12): 1214-1223.
- [28] 张凯山. 机动车尾气测量与预测[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 21-25.
- [29] 李东玲, 吴烨, 周昱, 等. 我国典型工程机械燃油消耗量及排放清单研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 518-524.
Li D L, Wu Y, Zhou Y, *et al.* Fuel consumption and emission inventory of typical construction equipments in China [J]. Environmental Science, 2012, **33**(2): 518-524.
- [30] United States Environmental Protection Agency. Exhaust and crankcase emission factors for nonroad engine modeling-compression ignition, EPA-420-R-10-018 [R]. Washington, D. C.: United States Environmental Protection Agency, 2010.
- [31] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等 5 项技术指南的公告 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2014-12-31.



CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)