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.3

第40卷 第3期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第3期
2019年3月15日

目 次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估 …… 尹晓梅，李梓铭，熊亚军，乔林，邱雨露，孙兆彬，寇星霞(1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响 …… 李颖若，汪君霞，韩婷婷，王垚，何迪，权维俊，马志强(1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气$PM_{2.5}$来源解析 …… 王彤，华阳，许庆成，王书肖(1035)
四川省典型工业行业$PM_{2.5}$成分谱分析 …… 冯小琼，陈军辉，熊文朋，梅林德，徐雪梅，尹寒梅，范武波，姜涛，钱骏，叶宏(1043)
典型物流城市2016年冬季2次污染过程$PM_{2.5}$污染特征及来源解析 …… 赵雪艳，杨文，王静，刘盈盈，白雯宇，徐艳萍，王歆华，白志鹏(1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气$PM_{2.5}$污染特征及来源分析 …… 张显，田莎莎，刘盈盈，赵雪艳，余浩，张辉，陈莉，王歆华(1062)
新乡冬季$PM_{2.5}$中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析 …… 闫广轩，雷豪杰，张靖雯，唐明双，张佳羽，曹治国，李云蓓，王跃思，樊静，李虎(1071)
烟台市环境受体$PM_{2.5}$四季污染特征与来源解析 …… 刘童，王晓军，陈倩，温杰，黄渤，朱红霞，田瑛泽，冯银厂(1082)
常州市冬季$PM_{2.5}$中类腐殖质昼夜特征分析 …… 顾远，李清，黄雯倩，赵竹子，马帅帅，叶招莲(1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险 …… 曹红梅，赵留元，穆熙，李尧捷，毛潇萱，黄韬，马建民，高宏(1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析 …… 邱昀，李令军，姜磊，王新辉，赵文慧，张立坤，鹿海峰(1111)
中国城市O_3浓度时空变化特征及驱动因素 …… 黄小刚，赵景波，曹军骥，宋永永(1120)
基于卫星和地面观测的2013年以来我国臭氧时空分布及变化特征 …… 张倩倩，张兴赢(1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析 …… 王俏丽，董敏丽，李素静，吴成志，王刚，陈必新，李伟，高翔，叶荣民(1143)
中国建筑涂料使用VOCs排放因子及排放清单的建立 …… 高美平，邵霞，聂磊，王海林，安小栓(1152)
异戊二烯和甲苯二次有机示踪物的臭氧非均相氧化 …… 黄亚娟，曹罡，朱荣淑，欧阳峰(1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征 …… 栗世学，郭文凯，何昕，朱玉凡，陈强(1172)
成都次降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析 …… 胡月，刘国东，孟玉川，张文江，夏成城(1179)
基于TBL模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面CO_2扩散通量估算 …… 张逸飞，杨平，赵光辉，李玲，谭立山，仝川(1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物(CDOM)的分布特征和季节变化 …… 刘兆冰，梁文健，秦礼萍，唐建辉(1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学 …… 劳心宇，原杰，刘瑜，Khan M. G. Mostofa(1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征 …… 刘启明，梁海涛，锡桂莉，胡欣，葛健(1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析 …… 王奇岗，肖琼，赵海娟，王建力，郭永丽，张清华(1222)
鲜水河断裂带虾拉沱盆地断面地下水化学特征及控制因素 …… 何锦，张幼宽，赵雨晴，韩双宝，刘元晴，张涛(1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征 …… 吴迪，印红玲，李世平，王增武，邓旭，罗怡，罗林(1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与PICRUSt功能预测分析 …… 张菲，田伟，孙峰，陈彦，丁传雨，庞发虎，姚伦广，李玉英，陈兆进(1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响 …… 刘志迎，许海，詹旭，朱广伟，秦伯强，张运林(1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价 …… 苏瑶，许育新，安文浩，王云龙，何振超，楼颖雯，沈阿林(1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响 …… 黄磊，梁银坤，梁岩，罗星，陈玉成(1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性 …… 何湖滨，陈诚，林育青，严晗璐，董建玮，陈求稳(1287)
BiOCl-$(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制 …… 张文海，吉庆华，兰华春，李静(1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中1,2-二氯乙烷的高效去除 …… 吴乃瑾，宋云，魏文侠，王海见，孙仲平(1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除 …… 邓曼君，王学江，成雪君，景焕平，赵建夫(1310)
Ca/Mg负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性 …… 易蔓，李婷婷，李海红，黄巧，杨金娥，陈玉成，杨志敏(1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素 …… 程扬，沈启斌，刘子丹，杨小莹，张太平，廖志钟(1328)
静止和水动力扰动状态下锆改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响 …… 俞阳，林建伟，詹艳慧，何思琪，吴小龙，王艳，赵钰颖，林莹，刘鹏茜(1337)
4种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制 …… 王大鹏，张娴，颜昌宙(1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析 …… 徐婷，李勇，朱怡嘉，薛梦婷，汤同欢(1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响 …… 李冬，曹美忠，郭跃洲，梅宁，李帅，张杰(1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复 …… 李海玲，李冬，张杰，刘博(1367)
CAST工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能 …… 马娟，杨蕊春，俞小军，周猛，陈永志(1375)
不同曝气量和好氧时间下SPNDPR系统处理低C/N城市污水的脱氮除磷性能 …… 袁梦飞，于德爽，巩秀珍，王晓霞，陈光辉，杜世明，甄建园(1382)
ABR除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水 …… 李田，曹家炜，谢凤莲，沈耀良，吴鹏，宋吟玲(1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性 …… 谢璐琳，王建芳，钱飞跃，张泽宇，沈耀良，齐泽坤(1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征 …… 任君怡，陈林艺，李慧春，秦玉洁，曹雁，王桐屿，周少奇(1405)
降温过程中生物膜CANON反应器的运行特征 …… 付昆明，廖敏辉，周厚田，付巢，姜姗，仇付国，曹秀芹(1412)
IEM-UF同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析 …… 刘子奇，张岩，马翔山，张博康，曹孟京，陈昌明(1419)
温度对硝化杆菌(*Nitrobacter*)活性动力学影响 …… 于雪，孙洪伟，李维维，祁国平，马娟，陈永志，吕心涛(1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化 …… 牛雨彤，刘吉宝，马爽，李亚明，解立平，魏源送，孟晓山(1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响 …… 彭晶，王科，谷月，王爱杰(1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响 …… 张彦军，郭胜利(1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨的响应 …… 李一凡，王玉杰，王彬，王云琦(1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响 …… 王甜，黄志霖，曾立雄，肖文发，宋文梅(1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征 …… 宁赵，程爱武，唐海明，葛体达，邓扬悟，苏以荣，陈香碧(1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征 …… 童瑶瑶，王季斐，祝贞科，邓扬悟，陈珊，葛体达，袁红朝，吴金水(1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征 …… 徐广平，李艳琼，沈育伊，张德楠，孙英杰，张中峰，周龙武，段春燕(1491)
缙云山4种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征 …… 王富华，吕盛，黄容，高明，王子芳，徐畅(1504)
大气污染对居民健康影响研究进展 …… 秦耀辰，谢志祥，李阳(1512)
《环境科学》征订启事(1042)　《环境科学》征稿简则(1162)　信息(1208，1235，1286)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第40卷 第3期 2019年3月
Vol. 40, No. 3 Mar., 2019

中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立

高美平, 邵霞, 聂磊*, 王海林, 安小栓
(北京市环境保护科学研究院, 城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037)

摘要: VOCs 是国家重要空气污染物, 其排放控制是大气污染防治的重要内容, 建筑涂料是我国大气 VOCs 的重要来源. 由于经济的发展及城镇化水平提高, 住宅及其他房屋建筑施工面积居高不下, 对建筑涂料的需求不断增加, 建筑涂料 VOCs 污染受到越来越多的关注, 但有关建筑涂料 VOCs 排放因子及量化其排放量的研究相对较少. 本文建立一套自下而上的建筑涂料 VOCs 排放清单估算方法, 通过实测建筑涂料中 VOCs 及总结梳理国内有关建筑涂料 VOCs 含量的相关研究, 获取了各类型建筑涂料 VOCs 排放因子, 结合建筑涂料使用量, 编制了我国 2013 ~ 2016 年建筑涂料 VOCs 排放清单. 结果表明: ①水性内墙涂料 VOCs 排放因子为 24.63 $g \cdot kg^{-1}$, 水性和溶剂型外墙涂料分别为 17.5 $g \cdot kg^{-1}$ 和 298.8 $g \cdot kg^{-1}$, 水性、反应固化型和溶剂型防水涂料分别为 2.75、87.86 和 400 $g \cdot kg^{-1}$, 水性、无溶剂型与溶剂型地坪涂料分别为 86.2、25.24 和 317 $g \cdot kg^{-1}$, 水性和溶剂型防腐涂料分别为 31.95 $g \cdot kg^{-1}$ 和 464.61 $g \cdot kg^{-1}$, 水性与溶剂型防火涂料分别为 59.7 $g \cdot kg^{-1}$ 和 347.2 $g \cdot kg^{-1}$. ②2013 ~ 2016 我国建筑涂料使用 VOCs 排放量分别为 25.59 万 t、28.75 万 t、31.97 万 t 和 34.8 万 t, 呈增长趋势. ③2016 年建筑涂料使用排放 VOCs 34.8 万 t 中, 地坪涂料贡献率最大, 排放量为 7.87 万 t, 占 22.61%, 其次是外墙涂料排放量为 6.49 万 t, 占 18.65%, 防火和防腐涂料作为功能性涂料, 排放量分别为 6.45 万 t 和 5.08 万 t, 分别占 18.53% 与 14.6%, 防水涂料和内墙涂料排放量分别为 4.61 万 t 和 4.3 万 t, 分别占 13.25% 和 12.36%. ④2016 年水性建筑涂料使用量为 488.94 万 t, VOCs 排放量为 9.79 万 t, VOCs 平均排放因子为 20.02 $g \cdot kg^{-1}$, 溶剂型建筑涂料使用量为 63.65 万 t, VOCs 排放量为 22.72 万 t, VOCs 平均排放因子为 356.95 $g \cdot kg^{-1}$, 减少溶剂型涂料的使用有利于消减 VOCs 排放, 建筑涂料进一步水性化是降低 VOCs 排放的趋势. ⑤在空间分布上, 建筑涂料使用 VOCs 排放主要集中在山东、江苏、浙江、河南、四川、广东以及河北等人口数量多的省份, 山东省排放量最大, 约占 9.36%, 江苏省次之, 约占 8.54%.

关键词: 建筑涂料; 挥发性有机化合物 (VOCs); 排放因子 (EF); 排放清单; 分散介质
中图分类号: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2019)03-1152-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201806203

Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China

GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei*, WANG Hai-lin, AN Xiao-shuan
(Beijing Key Laboratory for VOCs Pollution Prevention and Treatment Technology and Application of Urban Air, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) are important air pollutants in China, and control of their emission is an important subject of air pollution prevention and control. Architectural coatings play a significant role as sources of atmospheric VOCs in China. Due to recent economic development and increase in the levels of urbanization, the building of residences and other buildings is ongoing all the time, which results in increasing demand for architectural coatings and the VOCs pollution caused by painting operations. However, there are few studies of the VOCs emission factors and VOCs emissions due to architectural coatings. In this paper, a set of bottom-up VOCs emission inventory estimation methods for architectural coatings in China was established. The architectural coatings VOCs emission factors were gotten by actual measurement of VOCs in architectural coatings and by summarizing studies of VOCs contents in architectural coatings. Combining these results with the consumption of architectural coating sources, a VOCs emission inventory of architectural coatings in China from 2013 to 2016 was established. The results showed the following. ① VOCs emission factors were 24.63 $g \cdot kg^{-1}$ for water-based interior wall coatings; 17.5 $g \cdot kg^{-1}$ and 298.8 $g \cdot kg^{-1}$ for water-based and solvent-based exterior wall coatings, respectively. They were 2.75, 87.86, and 400 $g \cdot kg^{-1}$ for water-based, reaction-type, and solvent-based waterproof coatings, respectively. For water-based, solventless, and solvent-based floor coatings, they were 86.2, 25.24, and 317 $g \cdot kg^{-1}$, respectively; and 31.95 $g \cdot kg^{-1}$ and 464.61 $g \cdot kg^{-1}$ for water-based and solvent-based anticorrosive coatings respectively. The emission factors were 59.7 $g \cdot kg^{-1}$ and 347.2 $g \cdot kg^{-1}$ for water-based and solvent-based fire retardant coatings, respectively. ② VOCs emissions from the use of architectural coatings were 255 900 t, 287 500 t, 319 700 t, and 348 000 t from 2013 to 2016 in China, with an upward trend. ③ Total VOCs emissions from architectural coatings was 348 000 t in 2016, and the VOCs emissions from floor coatings was 78 700 t, accounting for 22.61% with the maximum contribution rate. The VOCs emissions from exterior wall coatings were 64 900 t, accounting for 18.65% (second place), and the VOCs emissions from fire retardant coatings and anticorrosive coatings (functional coatings) were 64 500 t and 50 800 t, accounting for 18.53% and 14.6% respectively. The VOCs emissions from

收稿日期: 2018-06-25; **修订日期**: 2018-09-18
基金项目: 北京市科技重大专项(Z171100004417029); 环境保护公益性行业科研专项(201509006)
作者简介: 高美平(1986 ~), 女, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为大气污染物控制, E-mail: gaomeiping@cee.cn
* 通信作者, E-mail: nielei@cee.cn

waterproof coatings and interior wall coatings were 46 100 t and 43 000 t, accounting for 13.25% and 12.36%, respectively. ④ The consumption of water-based architectural coatings reached a total of 4 889 400 t in 2016 with VOCs emissions of 97 900 t and average VOCs emissions factor of 20.02 $g \cdot kg^{-1}$; however, the consumption of solvent-based architectural coatings totaled 636 500 t with VOCs emissions of 227 200 t and average VOCs emission factor of 356.95 $g \cdot kg^{-1}$. Reducing the consumption of solvent-based coatings would be favorable for reduction of VOCs emissions. ⑤ As for the spatial distribution, architectural coating-related VOCs emissions were mainly concentrated in Shandong, Jiangsu, Zhejiang, Henan, Sichuan, Guangdong, and Hebei provinces, which have large populations. The province with the highest VOCs emissions was Shandong, with a percentage of 9.36%, and the second was Jiangsu, with a percentage of 8.54%.

Key words: architectural coatings; volatile organic compounds (VOCs); emission factor (EF); emission inventory; dispersion medium

近几年，我国区域性的雾-霾天气频繁发生，光化学烟雾污染在各地区出现频率逐渐增高[1]，挥发性有机物(volatile organic compounds，VOCs)作为二次有机物(SOA)和臭氧的关键前体物，对雾-霾和光化学烟雾的形成有重大影响[2~4]. 涂料行业是大气 VOCs 重要来源，涂料在生产、施工和成膜过程中均会向空气中释放 VOCs，对环境、生产和施工人员及消费者的健康造成危害[5~8]. 根据中国涂料工业协会初步测算数据，涂料涂装行业每年向大气排放的 VOCs 总量约为 430 万 t.

近年来城镇化建设所带来的住宅、交通、公用建筑等基础设施对各种涂料、特别建筑涂料的需求非常巨大. 据行业统计，我国建筑涂料总产量由 2006 年的 179.6 万 t 增加到 2017 年的 630 万 t，10 年间建筑涂料产量增长了 3.5 倍[9].

目前，国内外学者针对我国不同行业的 VOCs 排放清单开展了大量研究[10~22]，然而缺乏建筑涂料 VOCs 排放因子和排放清单. 因此，本研究通过实测建筑涂料中 VOCs 含量水平，结合国内建筑涂料标准 VOCs 指标限值和建筑涂料 VOCs 含量情况的相关研究，获取了建筑涂料 VOCs 排放因子，采用自下而上的排放因子法对我国 2013 ~ 2016 年建筑涂料 VOCs 排放量进行了估算并建立排放清单，以期为环境决策提供技术依据.

1　建筑涂料使用状况

1.1　建筑涂料分类

根据 GB/T 2705-2003《涂料产品分类和命名》分类方法，建筑涂料包括墙面涂料(内墙涂料与外墙涂料)、防水涂料、地坪涂料、功能性建筑涂料(防火涂料、防霉涂料、保温隔热涂料、其他功能性建筑涂料)这 4 大类[23]，目前实际使用的水性涂料基本都需要加入防霉剂，没有专门防霉涂料，保温隔热涂料适用于建筑外墙与玻璃表面，既有涂料基本特性，又有保温材料特点，属于外墙涂料一类.

1.2　建筑涂料 VOCs 定义

目前我国涂料行业对 VOCs 的定义与欧盟现行的定义一致，是以沸点来界定 VOCs 的，指在 101.3 kPa 标准压力下，任何初沸点低于或等于 250℃ 的有机化合物. 主要包括脂肪族和芳香族的各种烷烃、烯烃、含氧烃、卤代烃和含氮硫化合物等，如甲苯、乙苯、间/对/邻-二甲苯、丙苯、烯丙苯、乙二醇、丙二醇、环己酮、乙酸乙酯、碳酸二甲酯、二甲基乙醇胺等.

1.3　各分散介质建筑涂料占比

每大类涂料根据分散介质包括水性、反应型、无溶剂型与溶剂型，对于不同分散介质涂料占比，根据近年来市场及行业调研，内墙涂料中水性涂料的使用占比已基本达到 100%，外墙涂料除一些对装饰性、耐厚性、耐污染有特殊要求的市政工程少量采用溶剂型涂料外，水性涂料占有绝对优势，防水涂料水性涂料占比较大，其次为反应固化型，溶剂型用于施工温度较低环境，已使用较少，防腐涂料以溶剂型为主，水性防腐涂料可以达到中低程度的防腐性能.

按涂料分散介质统计我国目前使用的建筑涂料种类及占比情况，见表 1.

表 1　我国建筑涂料使用种类及占比情况

Table 1　Statistics for architectural coating species and percentage in China

涂料类别	涂料小类	分散介质	不同分散介质涂料占各类涂料比例/%
墙体涂料	内墙涂料	水性	100
	外墙涂料	水性	98
		溶剂型	2
防水涂料	—	水性	50
		反应固化型	40
		溶剂型	10
地坪涂料	—	水性	10
		无溶剂型	20
		溶剂型	70
功能性建筑涂料	防腐涂料	水性	10
		溶剂型	90
	防火涂料	水性	20
		溶剂型	80

2　材料与方法

2.1　研究方法

国家建筑涂料 VOCs 排放量的计算采用排放系

数法，即根据排放系数及相应活动水平计算污染物的排放量，见式(1).

$$E = A \times \mathrm{EF} \times (1 - \mathrm{ER}/100) \quad (1)$$

式中，E 为排放量，t；A 为活动水平，在本研究中为建筑涂料使用量，t；EF 为排放系数(emission factor)，$g \cdot kg^{-1}$；ER 为消减率.

由于建筑涂料必须在开放空间中涂装，目前涂装中产生的 VOCs 基本属于无组织排放，按当前排放控制水平，可认为无任何 VOCs 末端控制措施[24]，因此建筑涂料 VOCs 排放量计算可简化为式(2).

$$E = A \times \mathrm{EF} \quad (2)$$

2.2 活动水平

建筑涂料使用量包括内墙涂料、外墙涂料、防水涂料、地坪涂料、防火涂料与防腐涂料 6 类涂料使用量，内墙和外墙涂料使用量又包括新建房屋内墙与外墙涂料使用量和旧房重涂内墙与外墙涂料使用量. 1996～2010 年我国建筑涂料产量由国家统计局统计，2011 年之后国家统计局只提供全国(香港、澳门、台湾资料暂缺)规模以上涂料企业的涂料总产量，建筑涂料使用量是由建材协会和涂料行业专家根据全国竣工的建筑面积及相关数据测算.

2.2.1 新建房屋内墙与外墙涂料使用量

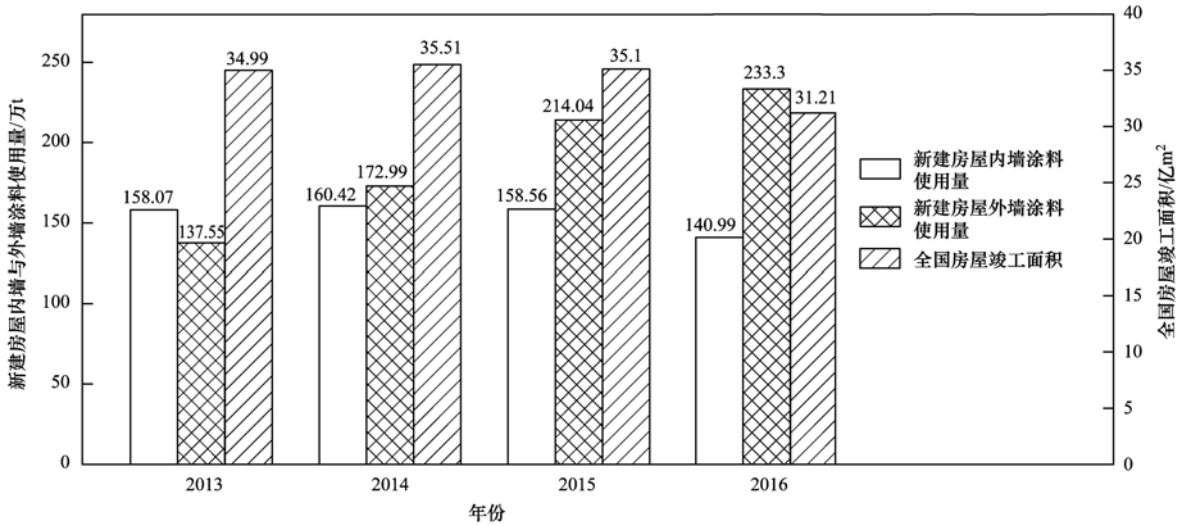
新建房屋内墙涂料与外墙涂料的使用量通过基准年全国房屋竣工面积估算，见公式(3)～(5)所示. 全国每年的房屋竣工面积从中国统计年鉴中获取，2013～2016 年全国房屋竣工面积如图 1 所示. 目前，国内常用的建筑装饰材料主要有装饰石材、玻璃幕墙、外墙饰面砖、铝塑复合板、涂料等，但前 4 种饰面材料在应用过程中普遍存在着各种各样的问题[25]，随着建筑涂料应用的普及，内墙和外墙用涂料所占份额逐年提高，2013～2016 年内墙和外墙用涂料比例如图 2 所示[26]. 外墙面积采用平涂和真石漆、质感涂料两种方式，涂装单位外墙面积使用涂料量相差较大，故采用不同估算公式，根据多年行业调研及中国涂料工业年鉴[26]数据，外墙面积中采用真石漆与质感涂料涂刷比例从 2013 年的 20% 增长到 2016 年的 42%，年增长约为 28.1%，平涂比例逐年下降，在以上基础上得到 2013～2016 年全国新建房屋内墙与外墙涂料使用量，如图 1 所示. 从中可见，2013～2016 年房屋竣工面积都保持在 30 亿 m^2 以上，新建房屋内墙涂料使用量与房屋竣工面积变化趋势一致，因真石漆与质感涂料涂刷比例逐年增加，新建房屋外墙涂料使用量呈现逐年增加趋势.

$$A_{\text{内墙涂料}} = \frac{B \times 2.5 \times K_1 \times 1.39}{6 \times 10} \quad (3)$$

$$A_{\text{平涂外墙涂料}} = \frac{B \times 0.7 \times K_2 \times 1.35}{5 \times 10} \quad (4)$$

$$A_{\text{真石漆与质感外墙涂料}} = \frac{B \times 0.7 \times K_2 \times 1.35}{0.375 \times 10} \quad (5)$$

式中，$A_{\text{内墙涂料}}$为新建房屋内墙涂料使用量，万 t；B 为统计年鉴中的房屋竣工面积，亿 m^2；2.5 为房屋竣工面积与内墙面积的相关系数，内墙面积是房屋竣工面积的 2.5 倍；K_1 为内墙用涂料比例，%；6 为单位体积内墙涂料可以涂刷内墙面积，内墙涂料为平涂，1 L 内墙涂料可以涂刷 6 m^2 内墙，$m^2 \cdot L^{-1}$；1.39 为内墙涂料密度，$g \cdot mL^{-1}$；10 为转换因子；$A_{\text{平涂外墙涂料}}$为新建房屋平涂外墙涂料使用量，万 t；0.7 为房屋竣工面积与外墙面积的相关系数，外墙



香港、澳门、台湾资料暂缺，下同

图 1 2013～2016 年全国房屋竣工面积及新建房屋内墙与外墙涂料使用量

Fig. 1 Floor space completed and consumption of interior and exterior wall coatings for new buildings from 2013 to 2016 in China

面积是房屋竣工面积的 0.7 倍；K_2 为外墙用涂料比例，%；5 为平涂时单位体积外墙涂料可以涂刷外墙面积，1 L 外墙涂料可以涂刷 5 m^2 外墙，$m^2 \cdot L^{-1}$；1.35 为外墙涂料密度，$g \cdot mL^{-1}$；$A_{真石漆与质感外墙涂料}$ 为新建房屋采用真石漆或质感涂料涂刷时外墙涂料使用量，万 t；0.375 为采用真石漆与质感涂料涂刷时单位体积外墙涂料可以涂刷外墙面积，1 L 外墙涂料可以涂刷 0.375 m^2 外墙，$m^2 \cdot L^{-1}$.

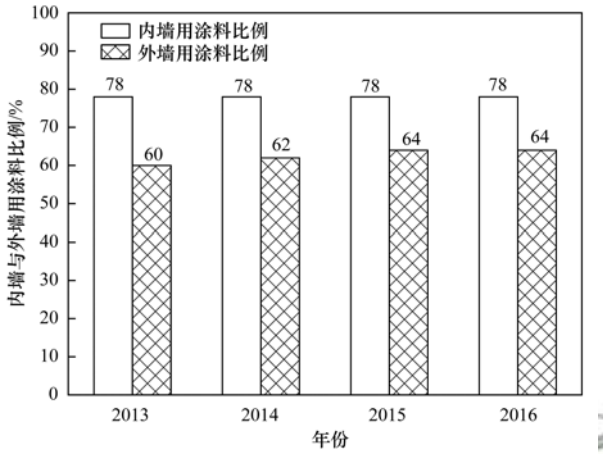


图 2　2013 ~ 2016 年我国内墙和外墙用涂料比例

Fig. 2　Coating proportions used in interior and exterior walls from 2013 to 2016 in China

2.2.2　旧房重涂内墙与外墙涂料使用量

随着 20 世纪 90 年代末至本世纪初的大量建筑装饰开始老旧，建筑物内外的重涂需求正在快速扩大，旧房重涂需要用大量内墙与外墙涂料. 内墙重涂受重涂周期、二手房交易量以及居民消费水平的影响，林宣益[9]根据有统计数据以来(从 1981 年开始)的总共房屋竣工面积、中国建筑科学研究院估测的“十二五”期间每年拆除面积及二手房交易情况等估计 2013 年旧房重涂需 24 万 t 内墙涂料，且以后几年重涂内墙涂料用量年增速约为 12%. 外墙重涂主要受重涂周期的影响，需重涂面积根据总共房屋竣工面积(从 1981 年开始)、总共拆除面积及重涂周期估算，外墙重涂周期一般为 10 a，但由于经济发展水平原因，以 15 a 作为一个重涂周期更符合实际情况，以 15 a 为一个重涂周期核算，见公式(6)所示. 基于 2.2.1 节中外墙涂料使用量估算方法，外墙重涂基本都采用平涂，得到 2013 ~ 2016 年重涂内墙和外墙涂料使用量，如图 3 所示.

$$B_{重涂面积} = \frac{B_{总} - B_{拆除}}{15} \tag{6}$$

式中，$B_{重涂面积}$ 为需重涂面积，亿 m^2；$B_{总}$ 为总共房屋竣工面积，亿 m^2；$B_{拆除}$ 为总共拆除面积，亿 m^2；15 为重涂周期，a.

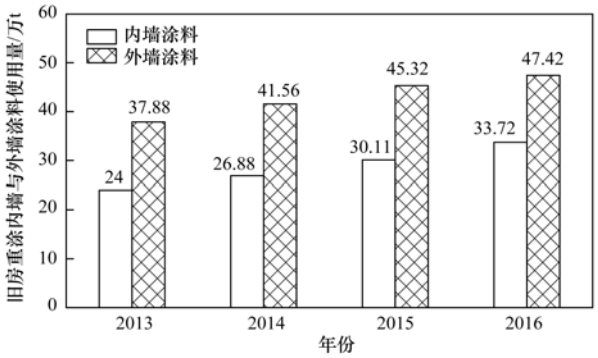


图 3　2013 ~ 2016 年我国旧房重涂内墙与外墙涂料使用量

Fig. 3　Consumption of interior and exterior wall coatings for old buildings from 2013 to 2016 in China

2.2.3　其他涂料使用量

根据中国涂料工业年鉴数据[26]、林宣益的研究[27]、行业调研及近几年建筑涂料增长速率[9]，得到 2013 ~ 2016 年全国防水涂料、地坪涂料、防火涂料与防腐涂料使用量，如图 4 所示. 防水涂料与防腐涂料增长率同近几年建筑涂料增长率，因近几年工业化和城镇化推进较快，各地基础设施发展较快，大型建筑如展览馆、候机楼、大型商场、高级宾馆及工业厂房不断增加，对地坪涂料与防火涂料需求量增长较快，增长率估测为 16.7%.

3　结果与讨论

3.1　排放因子

3.1.1　国内建筑涂料 VOCs 标准指标

首先，研究国内建筑涂料标准 VOCs 指标，为排放因子研究提供基础数据. 环保标准 HJBZ 4-1999 首次提出涂料 VOCs 的理念和限值，2001 年我国制定了第一个强制性内墙涂料标准 GB 18582-2001，对影响环境和人体健康的项目 VOCs 纳入标准，随着我国涂料行业的一系列技术进步，在保证涂料物理性能基础上，调整配方进一步降低 VOCs 含量，随后颁布的标准文件对 VOCs 含量要求进一步趋强，国内建筑涂料相关标准 VOCs 指标总结见表 2[28 ~ 40].

3.1.2　国内建筑涂料 VOCs 含量研究

国内研究的建筑涂料 VOCs 含量水平见表 3. 梅一飞等[41]于 2010 ~ 2015 每年统计了 700 个左右内墙涂料样本，每年的 VOCs 平均含量水平分别为 40.46、38.76、36.23、33.87、41.64 和 40.79 $g \cdot L^{-1}$，处于 30 ~ 40 $g \cdot L^{-1}$ 之间.

3.1.3　实测建筑涂料 VOCs 含量

抽检市场、生产企业及工程在用的涂料样品检测结果汇总见表 4，墙体涂料和防水涂料通过市场销售、生产企业及工程在用抽检获取；地坪涂料和

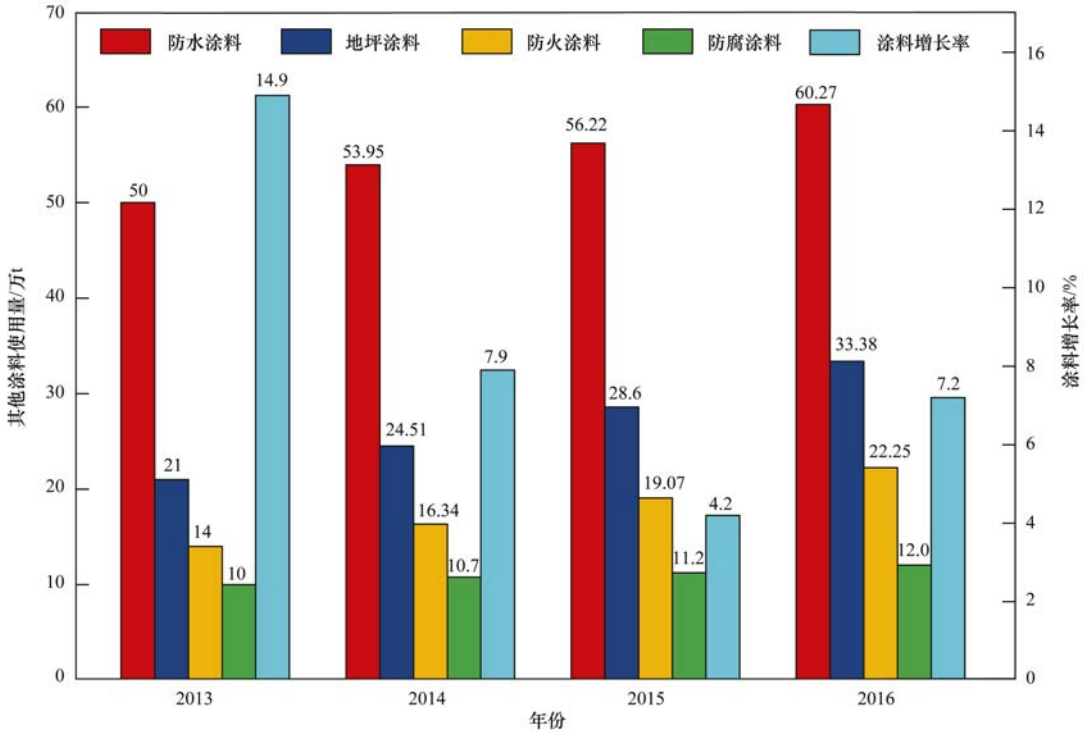


图 4 2013 ~ 2016 年我国其他涂料使用量

Fig. 4 Consumption of other coatings from 2013 to 2016 in China

表 2 国内建筑涂料相关标准 VOCs 指标

Table 2 Index of VOCs in different standards of architectural coatings in China

标准号	涂料类别	VOCs 限量值
HJBZ 4-1999	水性涂料	≤250 g·L^{-1}
GB 18582-2001	内墙涂料	≤200 g·L^{-1}
HBC 12-2002	水性涂料	内墙涂料≤100 g·L^{-1}，外墙涂料≤200 g·L^{-1}，水性防腐涂料、水性防水涂料≤250 g·L^{-1}
HJ/T 201-2005	水性涂料	内墙涂料≤80 g·L^{-1}，外墙涂料≤150 g·L^{-1}，墙体用底漆≤80 g·L^{-1}，水性防腐涂料、水性防水涂料≤250 g·L^{-1}，腻子(粉状、膏状)≤10 g·kg^{-1}
GB 18582-2008	内墙涂料	水性墙面涂料≤120 g·L^{-1}，水性墙面腻子≤15 g·kg^{-1}
JC1066-2008	防水涂料	水性建筑防水涂料：A 级≤80 g·L^{-1}，B 级≤120 g·L^{-1}；反应型建筑防水涂料：A 级≤50 g·L^{-1}，B 级≤200 g·L^{-1}；溶剂型建筑防水涂料 B 级≤750 g·L^{-1}
GB/T 22374-2008	地坪涂料	水性≤120 g·L^{-1}，溶剂型≤500 g·L^{-1}，无溶剂型≤60 g·L^{-1}
HJ 457-2009	防水涂料	挥发固化型防水涂料≤10 g·L^{-1}；反应固化型防水涂料：环氧防水涂料≤150 g·kg^{-1}，聚脲防水涂料≤50 g·kg^{-1}，聚氨酯防水涂料≤100 g·kg^{-1}
GB 24408-2009	外墙涂料	水性外墙涂料：底漆≤120 g·L^{-1}，面漆≤150 g·L^{-1}，腻子≤15 g·kg^{-1}；溶剂型外墙涂料：色漆≤680 g·L^{-1}，清漆≤700 g·L^{-1}，闪光漆≤760 g·L^{-1}
JG/T 415-2013	防火涂料	膨胀型：溶剂型≤500 g·L^{-1}，水性≤80 g·L^{-1}；非膨胀型≤80 g·L^{-1}
GB 30981-2014	防腐涂料	溶剂型防腐涂料 VOC 范围为 390 ~ 720 g·L^{-1}
HJ 2537-2014	水性涂料	内墙涂料：面漆[光泽(60°)≤10]≤50 g·L^{-1}，面漆[光泽(60°)>10]≤80 g·L^{-1}，底漆≤50 g·L^{-1}；外墙涂料：面漆≤100 g·L^{-1}，底漆≤80 g·L^{-1}；腻子(粉状、膏状)≤10 g·kg^{-1}
JG/T 338-2011	建筑玻璃用隔热涂料	水性产品符合 GB 18582-2008 要求，溶剂型产品符合 GB 24408-2009 要求

防火涂料属于工程涂料，需通过对生产企业抽检获取；大部分防腐涂料通过对生产企业抽检获取，少部分防腐涂料通过市场销售抽检获取. 抽样原则为：选取国际、国内全国性、国内地方性品牌；每个品牌尽量选取不同档次与不同功能的样品；对市场抽检的涂料，选取高档建材超市、建材批发市场与个人销售点这 3 种不同档次的销售企业进行抽样；对企业抽检的涂料，尽量抽查企业的主导产品；对工程在用的涂料，选取典型建筑工程和室内装饰装修工程使用的涂料进行抽样.

水性内墙涂料 VOCs 平均含量为 34.23 g·L^{-1}，与梅一飞等[41]的研究比较接近，远小于

表 3　国内建筑涂料 VOCs 含量相关研究

Table 3　Study on VOCs contents of architectural coatings for domestic use

涂料类别	涂料小类	分散介质	各研究样本量	各研究 VOCs 含量范围/g·L^{-1}	各研究 VOCs 平均含量/g·L^{-1}	各研究年份	文献
墙体涂料	内墙涂料	水性	4 200		38.63	2010～2015	[41]
		水性	250～375 g·L^{-1} 2 个；25～250 g·L^{-1}22 个；≤25 g·L^{-1}2 个	15～368		2001	[42]
		水性	250～375 g·L^{-1} 4 个；25～250 g·L^{-1}30 个；≤25 g·L^{-1}2 个	10～353		2002	[42]
		水性	25	101～369	190	2006	[43]
功能性建筑涂料	防火涂料	溶剂型	6	344～620	463	2016	[44]

GB 18582-2008 中规定的 VOCs 含量限值 120 g·L^{-1}. 水性外墙涂料 VOCs 平均含量为 23.63 g·L^{-1}，远小于 GB 24408-2009 中规定的 150 g·L^{-1}限值. 水性防水涂料 VOCs 平均含量为 4.31 g·L^{-1}，是环保标准 HJ 457-2009 限值的 0.431 倍，反应固化型防水涂料 VOCs 平均含量为 109.83 g·L^{-1}，与 JC 1066-2008 和 HJ 457-2009 中规定的限值比较接近，符合目前反应型防水涂料 VOCs 含量水平. 水性地坪涂料 VOCs 平均含量为 107.75 g·L^{-1}，接近 GB/T 22374-2008 中规定的 120 g·L^{-1}限值，溶剂型地坪涂料 VOCs 平均含量为 396.25 g·L^{-1}，比 GB/T 22374-2008 中规定的 500 g·L^{-1}限值低一些，地坪涂料行业经过将近十年的技术进步，VOCs 含量逐渐降低. 溶剂型防腐涂料 VOCs 平均含量为 520.36 g·L^{-1}，GB 30981-2014 规定不同类型溶剂型防腐涂料 VOCs 限量值范围为 390～720 g·L^{-1}，抽检涂料的含量水平与标准相接近. 抽检防火涂料 VOCs 平均含量为 465.25 g·L^{-1}，与孙秋颖等[44]的研究比较接近，同时接近 JG/T 415-2013 规定的限值 500 g·L^{-1}. 对比建筑涂料标准 VOCs 指标、实测抽检涂料 VOCs 含量水平及国内相关研究，发现实测 VOCs 水平与近几年发布标准限值比较接近，远小于十年前发布标准规定的限值.

表 4　实测建筑涂料 VOCs 含量

Table 4　Actual measurement of VOCs contents of architectural coatings

涂料类别	涂料小类	分散介质	实测样本量	VOCs 含量范围/g·L^{-1}	各含量范围样品数	VOCs 平均含量/g·L^{-1}
墙体涂料	内墙涂料	水性	188	≤2	24	34.23
				2～80	151	
				>80	13	
	外墙涂料	水性	98	≤2	19	23.63
				2～80	74	
				>80	5	
		溶剂型	2	291～456	2	373.50
防水涂料	—	水性	136	≤10	131	4.31
				>10	5	
		反应固化型	53	7～324	53	109.83
地坪涂料	—	水性	4	104～115	4	107.75
		无溶剂型	40	5～60	40	31.55
		溶剂型	16	140～580	16	396.25
功能性建筑涂料	防腐涂料	水性	16	2～116	16	39.94
		溶剂型	22	282～681	22	520.36
	防火涂料	溶剂型	8	310～713	8	465.25

3.1.4　建筑涂料排放因子估算

根据以上研究，本研究各类型建筑涂料的排放因子见表 5. 内墙涂料与水性外墙涂料排放因子采用实测 VOCs 含量，接近目前含量水平. 溶剂型外墙涂料抽检到数量较少，目前使用的溶剂型外墙涂料醇酸涂料较多，VOCs 含量相对较低，采用 373.5 g·L^{-1}. 反应固化型防水涂料、水性地坪涂料、溶剂型防腐涂料、溶剂型防火涂料实测 VOCs 含量接近标准限值，采用实测值. 水性防水涂料、无溶剂型地坪涂料、溶剂型地坪涂料比将近 10 年前规定的限值低一些，采用实测值. JC 1066-2008 规定溶剂型防水涂料限值为 750 g·L^{-1}，本研究因没有抽检到溶剂型防水涂料，经过几年的技术进步，估测溶剂型防水涂料 VOCs 含量为 500 g·L^{-1}，接近溶剂型

表 5 国内不同类型建筑涂料 VOCs 排放因子[1)]

Table 5 VOCs emission factors of different types of architectural coatings in China

涂料类别	涂料小类	分散介质	VOCs 排放因子(单位体积) /g·L^{-1}	VOCs 排放因子(单位质量) /g·kg^{-1}
墙体涂料	内墙涂料	水性	34.23	24.63
	外墙涂料	水性	23.63	17.5
		溶剂型	373.5	298.8
防水涂料	—	水性	4.31	2.75
		反应固化型	109.83	87.86
		溶剂型	500	400
地坪涂料	—	水性	107.75	86.2
		无溶剂型	31.55	25.24
		溶剂型	396.25	317.00
功能性建筑涂料	防腐涂料	水性	39.94	31.95
		溶剂型	520.36	464.61
	防火涂料	水性	80	59.7
		溶剂型	465.25	347.2

1)水性内墙涂料密度为 1.39 kg·L^{-1}，水性外墙涂料密度为 1.35 kg·L^{-1}，水性防水涂料密度为 1.57 kg·L^{-1}，溶剂型防腐涂料密度为 1.12 kg·L^{-1}，水性和溶剂型防火涂料密度为 1.34 kg·L^{-1}，其他类型涂料密度为 1.25 kg·L^{-1}

防腐涂料. 水性防腐涂料采用实测 VOCs 含量. 水性防火涂料采用 JG/T 415-2013 标准规定的限值.

3.2 2013～2016 年建筑涂料 VOCs 排放清单

结合建筑涂料使用量及近几年各分散介质涂料使用量占比情况，根据排放因子法，估算了 2013～2016 年全国建筑涂料使用 VOCs 排放量，见图 5. 从中可见，2013～2016 年建筑涂料使用引起的 VOCs 排放量逐年增加，分别为 25.59 万 t、28.76 万 t、31.97 万 t 和 34.8 万 t. 虽然近几年房屋竣工面积变化不大，2016 年还有所下降，但因重涂市场引起的重涂涂料使用量快速增长，以及地坪涂料和功能性涂料使用量增长幅度较大，导致建筑涂料使用量逐年增加，VOCs 排放量随建筑涂料使用量增长而增加. 而且，地坪涂料和功能性涂料中溶剂型涂料占比很高，引起 VOCs 排放量增长较多.

3.3 2016 年各类型建筑涂料 VOCs 排放占比

2016 年我国各类型建筑涂料使用量及 VOCs 排放量占比情况如图 6 所示. 2016 年全国建筑涂料使用排放 VOCs 共 34.8 万 t，其中地坪涂料贡献率最大，排放量为 7.87 万 t，占建筑涂料 VOCs 总排放量的 22.61%，地坪涂料中溶剂型地坪涂料贡献率最大，占 VOCs 总排放量的 21.29%，这几年城市化进程引起基础设施建设对地坪涂料需求量较大，且目前地坪涂料以溶剂型为主，从而导致了 VOCs 排放量较大. 其次是外墙涂料，占 18.65%，虽水性外墙涂料 VOCs 排放因子较小，但外墙涂料使用量占建筑涂料总使用量 48.12%，将近一半，且仍有少量溶剂型外墙涂料在使用，VOCs 排放量较高. 防火与防腐涂料作为功能性涂料，近几年增长较快，

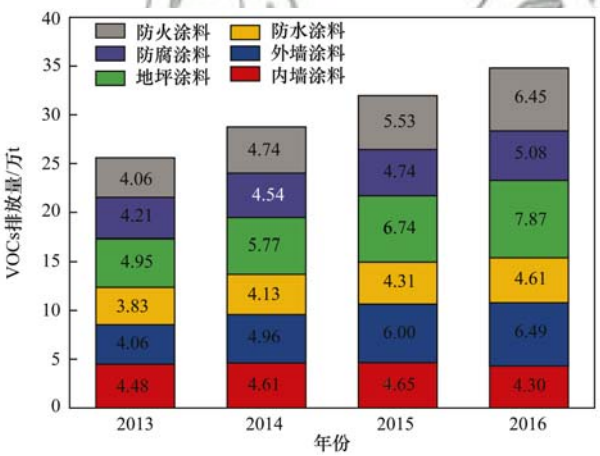
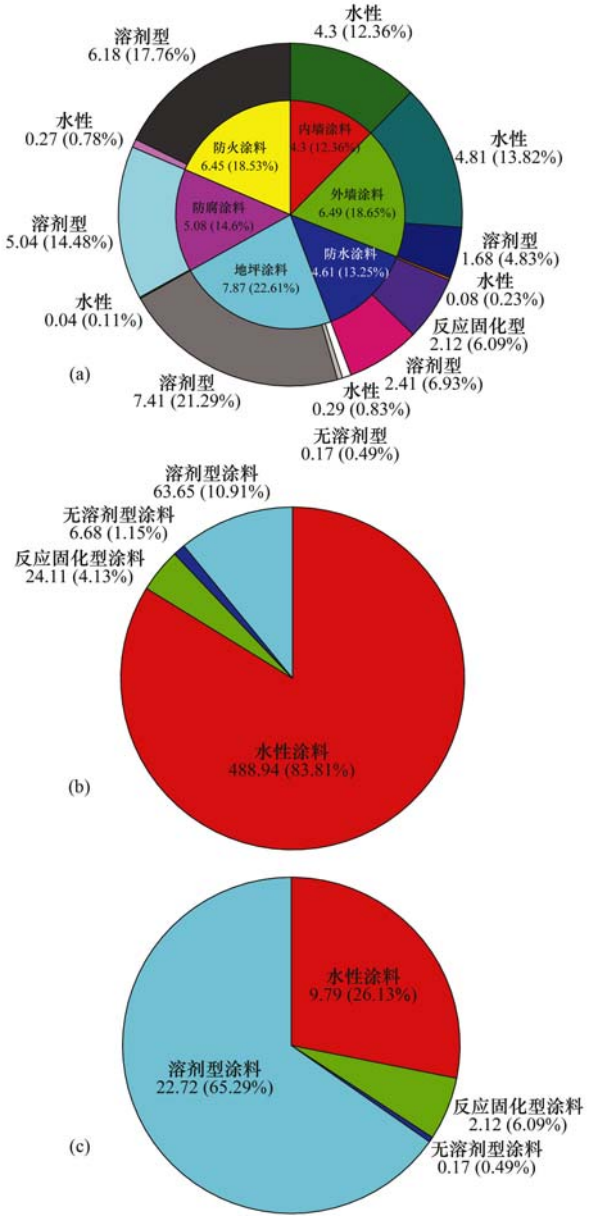


图 5 2013～2016 年我国建筑涂料 VOCs 排放量

Fig. 5 Emission of VOCs from architectural coatings from 2013 to 2016 in China

加之溶剂型占比很高，VOCs 排放量约占建筑涂料 VOCs 总排放量的 18.53% 与 14.6%. 相对来讲，防水涂料中溶剂型占比很少，内墙涂料全部为水性，VOCs 排放贡献比其他涂料小.

2016 年建筑涂料总使用量为 583.38 万 t，水性涂料使用量为 488.94 万 t，占总使用量的 83.81%，而 VOCs 排放量为 9.79 万 t，占建筑涂料 VOCs 总排放量的 28.13%，VOCs 平均排放因子为 20.02 g·kg^{-1}；溶剂型涂料使用量为 63.65 万 t，占总使用量的 10.91%，而 VOCs 排放量为 22.72 万 t，占建筑涂料 VOCs 总排放量的 65.29%，VOCs 平均排放因子为 356.95 g·kg^{-1}. 虽然溶剂型涂料使用量不大，但其 VOCs 排放量占比很高，应予以重视，减少溶剂型涂料的使用有利于减少 VOCs 排放，建筑涂料进一步水性化是降低 VOCs 排放的趋势.



(a)各类型建筑涂料 VOCs 排放占比；(b)各分散介质涂料用量使占比；(c)各分散介质涂料 VOCs 排放占比；使用量单位：万 t

图 6　2016 年我国各类型建筑涂料使用量及 VOCs 排放占比

Fig. 6　Consumptions and emission proportions of VOCs from different types of architectural coatings in 2016 in China

3.4　2016 年新建房屋建筑涂料 VOCs 排放空间分布特征

结合 2016 年中国统计年鉴中各省份房屋竣工面积及 2016 年全国新建房屋建筑涂料 VOCs 总排放量，建立了 2016 年全国新建房屋建筑涂料 VOCs 排放的空间分布，如图 7 所示. 从中可以看出，山东、江苏、浙江、河南、四川、广东以及河北人口数量排名靠前的省份 VOCs 排放量较大，其 VOCs 排放量都占全国的 5% 以上，其中山东省最大，约占 9.36%，江苏省次之，占 8.54%，这些省份人口数量多，住房需求量大，房屋施工及竣工面积较大，建筑涂料使用量较大，从而导致 VOCs 排放量较大. 海南、宁夏、青海及西藏由于人口数量较少，房屋竣工面积小，VOCs 排放量较低，其 VOCs 排放量占全国的不到 1%. 北京、上海等一线城市虽人口数量较多，人口密集，但是这些城市开发程度基本饱和，可供开发土地存量较小，因此房屋竣工面积很小，以房屋竣工面积核算出的 VOCs 排放量较小，但北京与上海都是以二手房为主导，旧房重涂对涂料需求量比其他省份大，实际 VOCs 排放量比图 7 空间分布中的排放量稍大.

3.5　不确定性分析

在建筑涂料 VOCs 排放估算过程中，不确定性主要来自活动水平和排放因子[45, 46]，包括以下 2 个方面.

(1)对于活动水平　计算旧房重涂内墙与外墙涂料使用量影响因素较多，旧房重涂内墙涂料使用量来自国内相关研究估计，旧房重涂外墙涂料使用量常 以 10 a 为一个重涂周期核算，实际中重涂周期可能会更长，且城市间经济发展水平的差异也会引起重涂周期的不同，这会给计算带来了影响. 防水涂料、地坪涂料、防火涂料与防腐涂料使用量主要来自于国内相关研究结果，每类型建筑涂料各分散介质涂料的占比情况主要来自于行业调研结果，这些数据的可靠性也一定程度上影响了本研究的估算结果. 缺乏各类型建筑涂料使用量统计数据，是估算误差的一个来源.

(2)对于排放因子　本文采用排放因子是根据大量实测结果获取，并与其他研究实测结果进行了比较，比较接近，但地坪涂料、防腐涂料与防火涂料等工程涂料市场上抽检不到，主要从企业抽检，抽检数量有限，且这几类涂料 VOCs 含量普遍较高，其平均排放因子可能带来估算结果的误差. 市场上销售使用的涂料厂家、品牌、功能等种类很多，不能全部都抽检到位，存在一定的不确定性.

4　结论

(1)基于实测建筑涂料中 VOCs 含量水平获取了各类型建筑涂料 VOCs 排放因子，水性内墙涂料 VOCs 排放因子为 24.63 $g \cdot kg^{-1}$，水性与溶剂型外墙涂料分别为 17.5 $g \cdot kg^{-1}$ 和 298.8 $g \cdot kg^{-1}$，水性、反应固化型与溶剂型防水涂料分别为 2.75、87.86 和 400 $g \cdot kg^{-1}$，水性、无溶剂型与溶剂型地坪涂料分别为 86.2、25.24 和 317 $g \cdot kg^{-1}$，水性与溶剂型防腐涂料分别为 31.95 $g \cdot kg^{-1}$ 和 464.61 $g \cdot kg^{-1}$，水性与溶剂型防火涂料分别为 59.7 $g \cdot kg^{-1}$ 和 347.2 $g \cdot kg^{-1}$.

(2)根据建筑涂料使用量及近几年各分散介质

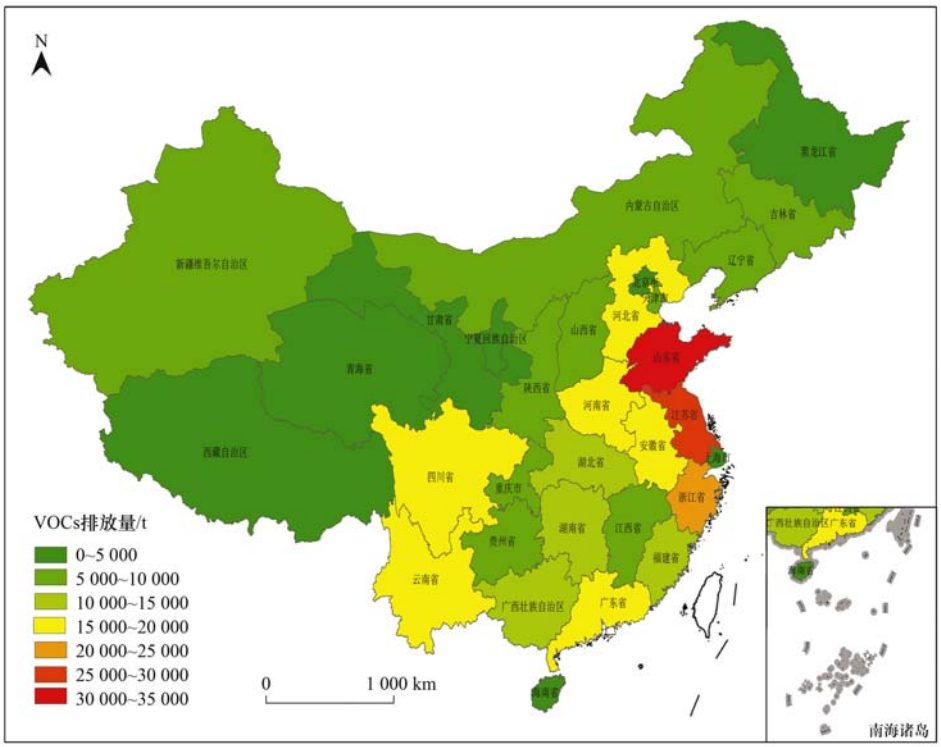


图 7 2016 年我国新建房屋建筑涂料 VOCs 排放空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of VOCs emission from architectural coatings for new buildings in 2016 in China

涂料使用量所占比例，采用排放因子法，估算 2013~2016 我国建筑涂料使用 VOCs 排放量分别为 25.59 万 t、28.75 万 t、31.97 万 t 和 34.8 万 t，呈增长趋势.

(3)2016 年建筑涂料使用排放 VOCs 共 34.8 万 t，地坪涂料贡献率最大，排放量为 7.87 万 t，占 22.61%，其次是外墙涂料排放量为 6.49 万 t，占 18.65%，防火与防腐涂料作为功能性涂料，排放量分别为 6.45 万 t 与 5.08 万 t，分别占 18.53% 与 14.6%，防水涂料和内墙涂料排放量分别为 4.61 万 t 与 4.3 万 t，分别占 13.25% 与 12.36%.

(4)2016 年水性涂料使用量为 488.94 万吨，VOCs 排放量为 9.79 万 t，VOCs 平均排放因子为 20.02 $g \cdot kg^{-1}$，溶剂型涂料使用量为 63.65 万 t，VOCs 排放量为 22.72 万 t，VOCs 平均排放因子为 356.95 $g \cdot kg^{-1}$，减少溶剂型涂料的使用有利于减少 VOCs 排放，建筑涂料进一步水性化是降低 VOCs 排放的趋势.

(5)建筑涂料使用 VOCs 排放量主要集中在 山东、江苏、浙江、河南、四川、广东以及河北等省份，主要原因是这些省份人口数量多，住宅需求量大，导致房屋竣工面积及建筑涂料使用量较大. 山东省排放量最大，约占 9.36%，江苏省次之，占 8.54%.

参考文献：

[1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 中国环境状况公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/home/jrtt_1/201606/t20160602_353077.shtml, 2016-06-02.

[2] Kansal A. Sources and reactivity of NMHCs and VOCs in the atmosphere: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **166**(1): 17-26.

[3] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al*. VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(17): 8815-8832.

[4] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change (2nd ed.)[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016.

[5] 季军宏，唐瑛. 涂料中 VOC 测试方法的建议与展望[J]. 涂料工业，2015，**45**(4)：60-63，73.
Ji J H, Tang Y. Suggestion on determination methods of volatile organic compounds in coatings[J]. Paint & Coatings Industry, 2015, **45**(4): 60-63, 73.

[6] 唐孝炎，张远航，邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京：高等教育出版社，2006.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environmental chemistry (2nd ed.)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.

[7] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al*. Characterization of non-methane hydrocarbons and their sources in an industrialized coastal city, Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **593-594**: 641-653.

[8] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al*. Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Research, 2016, **176-177**: 64-74.

[9] 林宣益. 2016 年建筑涂料现状和 2017 年发展趋势[J]. 中国涂料，2017，**32**(3)：27-30，37.
Lin X Y. Current situation of architectural coatings in 2016 and development trend in 2017[J]. China Coatings, 2017, **32**(3):

27-30, 37.

[10] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al*. A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(1): 481-501.

[11] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2016, **143**: 209-217.

[12] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 845-854.
Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al*. Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 845-854.

[13] 黄玉虎, 胡玮, 李贝贝. 北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 618-625.
Huang Y H, Hu W, Li B B, *et al*. VOCs emission inventory of service stations in a subcenter (Tongzhou District) of the city of Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 618-625.

[14] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al*. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(20): 4976-4988.

[15] 闫东杰, 苏航, 黄学敏, 等. 西安市人为源挥发性有机物排放清单及研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(2): 446-452.
Yan D J, Su H, Huang X M, *et al*. VOCs emission inventory of anthropogenic sources in Xi'an [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(2): 446-452.

[16] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al*. Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **530-531**: 393-402.

[17] 李俊仪, 田梁宇, 伦小秀, 等. 北京地区植物源挥发性有机物(BVOCs)排放清单[J]. 环境化学, 2017, **36**(4): 776-786.
Li J Y, Tian L Y, Lun X X, *et al*. Emission inventory of botanical volatile organic compounds (BVOCs) in Beijing[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(4): 776-786.

[18] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al*. Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **533**: 422-431.

[19] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al*. Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2655-2669.

[20] 韩丽, 陈军辉, 吕晓彤, 等. 四川地区天然源挥发性有机物排放清单研究[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(2): 203-209.
Han L, Chen J H, Lyu X T, *et al*. Biogenic volatile organic compounds emission inventory in Sichuan region [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, **40**(2): 203-209.

[21] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4086-4093.
Yan Y L, Peng L. Emission inventory of anthropogenic VOCs and its contribution to ozone formation in Shanxi Province[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4086-4093.

[22] 夏思佳, 赵秋月, 李冰, 等. 江苏省人为源挥发性有机物排放清单[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(2): 120-126.
Xia S J, Zhao Q Y, Li B, *et al*. Anthropogenic source VOCs emission inventory of Jiangsu Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(2): 120-126.

[23] GB/T 2705-2003, 涂料产品分类和命名[S].
GB/T 2705-2003, Classification and nomenclature for coating products[S].

[24] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014. 21-49.

[25] 张华洁, 张培. 外墙涂料推广应用背景和现状及发展趋势[J]. 山西建筑, 2010, **36**(9): 165-167.
Zhang H J, Zhang P. The generalize application background and present state and developing trend of exterior wall coating[J]. Shanxi Architecture, 2010, **36**(9): 165-167.

[26] 林宣益. 建筑涂料行业 2013 年回顾及展望[EB/OL]. http://info.coatings.hc360.com/2014/03/071459548369.shtml. 2014-03-07.

[27] 林宣益. 2017 年建筑涂料分析和 2018 年展望——高质量发展[J]. 中国涂料, 2018, **33**(3): 40-46.
Lin X Y. Analysis of architectural coatings in 2017 and outlook of 2018——high-quality development[J]. China Coatings, 2018, **33**(3): 40-46.

[28] HJBZ 4-1999, 水性涂料[S].
HJBZ 4-1999, Water soluble coatings[S].

[29] GB 18582-2001, 室内装饰装修材料 内墙涂料中有害物质限量[S].
GB 18582-2001, Indoor decorating and refurbishing materials-Limit of harmful substances of interior architectural coatings[S].

[30] HBC 12-2002, 环境标志产品认证技术要求 水性涂料[S].
HBC 12-2002, Technical requirement for environmental labeling products-Water soluble coatings[S].

[31] HJ/T 201-2005, 环境标志产品技术要求 水性涂料[S].
HJ/T 201-2005, Technical requirement for environmental labeling products Water based coatings[S].

[32] GB 18582-2008, 室内装饰装修材料 内墙涂料中有害物质限量[S].
GB 18582-2008, Indoor decorating and refurbishing materials-Limit of harmful substances of interior architectural coatings[S].

[33] JC 1066-2008, 建筑防水涂料中有害物质限量[S].
JC 1066-2008, Limit of harmful substances of building waterproof coatings[S].

[34] GB/T 22374-2008, 地坪涂装材料[S].
GB/T 22374-2008, Floor coatings[S].

[35] HJ 457-2009, 环境标志产品技术要求 防水涂料[S].
HJ 457-2009, Technical requirement for environmental labeling products Waterproof coatings[S].

[36] GB 24408-2009, 建筑用外墙涂料中有害物质限量[S].
GB 24408-2009, Limit of harmful substances of exterior wall coatings[S].

[37] JG/T 415-2013, 建筑防火涂料有害物质限量及检测方法[S].
JG/T 415-2013, Limit and test method of harmful substances in fire-retardant coating[S].

[38] GB 30981-2014, 建筑钢结构防腐涂料中有害物质限量[S].
GB 30981-2014, Limit of harmful substances of anticorrosion coatings for construction steel structure[S].

[39] HJ 2537-2014, 环境标志产品技术要求 水性涂料[S].

[40] JG/T 338-2011, 建筑玻璃用隔热涂料[S].
JG/T 338-2011, Thermal insulation coatings for building glass[S].

[41] 梅一飞, 关红艳, 郭中宝, 等. 我国涂料行业的环保技术发展回顾[J]. 中国涂料, 2016, **31**(7): 8-13.
Mei Y F, Guan H Y, Guo Z B, *et al*. Review on environmental

performance of coatings in China[J]. China Coatings, 2016, **31**(7): 8-13.

[42] 林宣益. 建筑涂料中挥发性有机化合物含量的测定和控制[J]. 上海涂料, 2003, **41**(1): 22-26.
Li X Y. Determination and controlling of VOC in architectural coatings[J]. Shanghai Coatings, 2003, **41**(1): 22-26.

[43] 李晓红, 刘兴荣, 李万伟. 内墙涂料中挥发性有机物含量测定与评价[J]. 中国公共卫生, 2006, **22**(4): 511-512.
Li X H, Liu X R, Li W W. Detection and assessment of volatile organic compounds in interior wall coating in Lanzhou city[J]. Chinese Journal of Public Health, 2006, **22**(4): 511-512.

[44] 孙秋颖, 崔伟伟, 袁扬, 等. 溶剂型防火涂料中苯系物和VOC测试部分解读[J]. 工程质量, 2016, **34**(7): 78-80.
Sun Q Y, Cui W W, Yuan Y, *et al*. An interpretation of the determination on benzenes and VOC in solvent fire-retardant coatings[J]. Quality Test, 2016, **34**(7): 78-80.

[45] Qiu P P, Tian H Z, Zhu C Y, *et al*. An elaborate high resolution emission inventory of primary air pollutants for the Central Plain Urban Agglomeration of China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **86**: 93-101.

[46] 魏巍,王书肖,郝吉明. 中国人为源VOC排放清单不确定性研究[J]. 环境科学,2011,**32**(2):305-312.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 305-312.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hjkx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写, 3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE Vol. 40 No. 3
Environmental Science (monthly) Mar. 15, 2019

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017 ····· YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, *et al.* (1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014 ····· LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, *et al.* (1024)
Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter ····· WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, *et al.* (1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, *et al.* (1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of $PM_{2.5}$ During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City ····· ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, *et al.* (1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in Heating and Non-heating Periods in Shenyang ····· ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, *et al.* (1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment ····· YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, *et al.* (1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient $PM_{2.5}$ During Four Seasons in Yantai City ····· LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, *et al.* (1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in $PM_{2.5}$ During Winter in Changzhou ····· GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, *et al.* (1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China ····· CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, *et al.* (1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations ····· QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, *et al.* (1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China ····· HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, *et al.* (1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation ····· ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying (1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan ····· WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, *et al.* (1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China ····· GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, *et al.* (1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone ····· HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, *et al.* (1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City ····· LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, *et al.* (1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu ····· HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, *et al.* (1179)
Diffusive CO_2 Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model ····· ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, *et al.* (1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea ····· LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, *et al.* (1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir ····· LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, *et al.* (1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China ····· LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, *et al.* (1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring ····· WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, *et al.* (1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River ····· HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, *et al.* (1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City ····· WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, *et al.* (1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir ····· ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, *et al.* (1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China ····· LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, *et al.* (1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI) ····· SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, *et al.* (1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of *Acorus calamus* in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland ····· HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, *et al.* (1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials ····· HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, *et al.* (1287)
Preparation of BiOCl-$(NH_4)_3PW_{12}O_{40}$ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants ····· ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, *et al.* (1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source ··· WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, *et al.* (1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite ····· DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, *et al.* (1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar ····· YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, *et al.* (1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution ····· CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, *et al.* (1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions ····· YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant ····· WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou (1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes ····· XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, *et al.* (1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System ····· LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, *et al.* (1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification ····· LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, *et al.* (1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance ····· MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, *et al.* (1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times ····· YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, *et al.* (1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater ····· LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, *et al.* (1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature ····· XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics ····· REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, *et al.* (1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process ····· FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, *et al.* (1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System ····· LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, *et al.* (1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of *Nitrobacter* ····· YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, *et al.* (1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron ····· NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, *et al.* (1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems ····· PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, *et al.* (1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity ····· ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li (1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area ····· LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, *et al.* (1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area ····· WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, *et al.* (1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management ····· NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, *et al.* (1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil ····· TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, *et al.* (1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin ····· XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, *et al.* (1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain ····· WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, *et al.* (1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents ····· QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang (1512)