

文章编号: 1671-6612 (2023) 03-428-06

地铁车站挥发性有机异味污染实测分析: 以华南地区为例

孟金玲¹ 吕心霸² 魏 翩² 汪郑强² 关 军²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司 广州 510010;

2. 南京理工大学能源与动力工程学院 南京 210094)

【摘 要】 为深入研究地铁站内异味污染特征, 随机选取华南地区某城市的 13 个地铁站, 对其站台及其关联空间的挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 进行现场采样分析, 进而确定其站内目标异味 VOCs 及其污染特征。研究表明, 站内主要检出 26 种 VOC 物质, 结合其异味特性筛选确定 12 种目标异味 VOCs, 其均值浓度和 OAV 值分别为 0.36–7.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 0.00–1.27, 除个别站点以外, 所测试站点的 VOC 异味感知风险均较小; 针对其中 2 个案例站点分析表明, 仅老站站台检出的壬醛 (OAV=1.27) 存在单一 VOC 物质异味风险, 为异味贡献最高的物质; 老站的总体异味风险 (SOAV=5.78 \pm 2.91) 远高于新站 (SOAV=0.54 \pm 0.20), 其可能主要源于站台自身、隧道以及站外异味 VOCs 散发的共同影响。该研究以期为深入认识地铁站内异味污染提供参考。

【关键词】 地铁站; VOCs; 异味物质; 异味风险评价; 实测研究

中图分类号 X820.3 文献标识码 A

Preliminary Study on Odor Pollution of Volatile Organic Compounds in Subway Stations: Case Studies in Southern China

Meng Jinling¹ Lv Xinba² Wei Pian² Wang Zhengqiang² Guan Jun²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Guangzhou, 510010;

2. School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

【Abstract】 In order to deeply study the characteristics of odor pollution in underground subway stations, 13 subway stations were randomly selected to conduct on-site measurements on volatile organic compounds (VOCs) in their platform air and other associated spaces. The results showed that a total of 12 odor VOCs were targeted by individual order characteristics among 26 main detected VOCs, with the concentrations ranging from 0.36–7.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and the Odor Activity Values (OAVs) ranging from 0.00–1.27. The perception risks of VOC odors in the tested sites were found to be quite low with a few exception. Two case analyses further indicated that nonanal was found to have a single VOC odor risk (OAV=1.27) only in the older station platform air, which contributed the most to the total odor density than other target VOC species in the case platform. The overall odor perception risk at the older station (SOAV=5.78 \pm 2.91) was much higher than that of the newer station (SOAV=0.54 \pm 0.20), possibly affected by the platform, the tunnel and outside air. This study could provide a reference for in-depth understanding of odor pollution in subway stations.

【Keywords】 subway station; VOCs; odor substances; odor risk assessment; field study

作者简介: 孟金玲 (1983-), 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: 51470294@qq.com

通讯作者: 关 军 (1978-), 男, 博士, 副教授, E-mail: guanjun@njjust.edu.cn

收稿日期: 2023-01-11

0 引言

2020 年国内的总客运量达到 206.71 亿人次, 主要大中城市的地铁客运量在公共交通客运量的占比均已过半^[1]。然而, 地下轨道交通迅速发展的同时, 特殊的地下站内环境易导致室内污染问题, 并引发异味投诉时有发生。因此, 深入认识地铁站异味污染对地铁站内空气质量控制具有重要的现实意义。

目前, 已有文献针对地铁站内可挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 污染开展了现场测试分析, 进而揭示站内 VOCs 污染特征^[2-10]。例如, Feng 等人^[2]在上海市地铁站内共检出 19 种羟基化合物, 其中甲醛、乙醛、丙酮的浓度最高, 且大部分羟基化合物在早晚高峰期间的浓度高于白天非高峰期间。Chertok 等人^[5]在悉尼地铁的采样测试结果表明, 站内气态污染物主要有苯、甲苯、二甲苯、乙苯, 且较多与异味污染有关。Wang 等人^[6]对地铁内人员对异味感知强度的调研发现, 其人员异味感知强度与人员密度显著正相关, 当环境温度较低、通风量增大时, 地铁内的异味会减少。此外, 针对站内污染来源的研究发现, 站内装修采用的各种复合材料^[5-7,9]、卫生间^[10]、区间隧道^[8,10]等, 均可成为地铁站内潜在的异味污染源。

综合上述研究表明, 地铁站内污染物种类较多, 来源复杂, 目前的研究主要关注部分污染物的暴露水平及其健康风险, 而针对站内目标异味 VOCs 及其基本污染特征等的相关研究较为缺乏。因此, 本文选择华南地区的 13 个地铁站, 对其站台的 VOCs 进行现场采样分析, 进而提出站内目标异味 VOCs 物质及其污染特征。该研究以期对地铁站内异味污染成因及空气质量控制策略提供科学参考。

1 研究方法

本研究于 2022 年元月, 选取华南地区某城市 13 个地铁站站内进行 VOC 采样测试, 以确认地铁站内目标异味 VOC 的种类及浓度水平 (13 个地铁站均为典型岛式地下车站, 投入运营时间均在 2011 年至 2019 年之间, 涵盖不同地铁线路, VOC 采样时间包含客流高峰期与非高峰期)。此外, 随机选取其中新、老两个典型车站 (站 A 于 2015 年投入使用, 站 B 于 2019 年投入使用, 且两站位于不同

地铁线路), 对其站台及其关联空间 (如隧道、站外环境等) 进行同步采样测试, 进而计算其异味强度以及异味贡献度, 以进一步分析站台的关联空间对其异味污染的影响。

站台测点距离屏蔽门 1.5m, 所有采样测点离地面约 1.2m^[11,12], 站台测点示意图如图 1 所示。采用恒流采样器 (QC-6H 型) 采样空气样品, 每次采样两根 Tenax-TA 管, 互为平行样, 以 0.5L/min 的流量连续采样 30min, 采样完成后送到实验室进行分析。主要的分析仪器包括热脱附仪 (TD, Markes, UK) 和气相色谱-质谱分析仪 (GC/MS, 6875/5975B, Agilent, USA)。此外, 每轮次采样活动均保留空白管, 用以确定其采样质量是否处于可接受的范围^[13]。

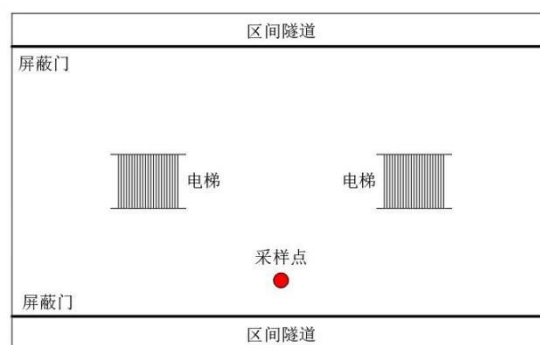


图 1 地铁站台采样点示意图

Fig.1 Subway station sampling point diagram

考虑到地铁站内 VOC 种类丰富, 需进一步筛选主要异味 VOC 物质, 以针对性开展进一步的定性、定量分析。为此, 目标异味 VOCs 的选取根据以下原则及步骤进行:

(1) 选取所有 13 个测试站点具有高浓度、高检出率以及低异味阈值的 VOC 物质作为具有共性特征的目标异味物质, 对于均值浓度低于 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 且检出率低于 50%^[13], 以及未见其公开报道异味阈值的 VOC 物质^[14]在本研究中不予考虑;

(2) 考虑到各站点的潜在个体化差异, 同时选取案例站点各个测点检出浓度较高且异味阈值较低的物质作为具有个体化特征的目标异味物质, 以进一步开展案例站点的异味成因分析。

VOC 物种的检测率 (DR) 由以下等式定义^[13]:

$$DR(x) = \frac{F(x)}{N} \quad (1)$$

式中, DR 是某单一 VOC 的检测率 (%), 更

高的 DR 意味着更高的检出概率；变量 x 是某单一 VOC 物质； F 是某单一 VOC 物质的检出频次，次数； N 是样本总数量。

由于异味 VOCs 浓度值不能直接用来评价异味强度，本文采用异味活度值 (Odor Activity Value, OAV) 来评价可感知的异味强度^[15]，其定义的公式为^[14]：

$$OAV = \frac{C}{OD} \quad (2)$$

式中， C 为异味污染物的浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ； OD 为污染物的异味阈值， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。当一种异味 VOCs 的浓度值高于异味阈值时 ($OAV > 1$)，认为其存在异味风险^[15,16]。

对于混合异味物质，混合物中某一组分的异味活度值越大，其异味贡献也就越大^[14,15]。因此，可以根据混合物中各组分异味活度值的大小来判断不同组分对混合物的异味贡献 (P_i)，其定义的公式为^[14]：

$$P_i = \frac{OAV_i}{SOAV} \quad (3)$$

式中， OAV_i 为混合物中各组分的异味活度值，无量纲； $SOAV$ 为混合物各组分的异味活度值加和，无量纲。

2 结果分析

2.1 站台主要 VOC 检出物

上述 13 个测试站点采样分析检出的 969 种 VOCs 中，芳香烃类（如甲苯、苯等苯系物）的检出浓度最高，其次为酯类和醇类（如乙酸乙酯、乙酸丁酯等）。根据上述 VOC 物质筛选原则，共确定 26 种主要检出物，如表 1 所示。结果表明，各主要检出物的浓度变化范围较广 ($0.30\text{--}14.60\mu\text{g}/\text{m}^3$)，且总体水平较高（均值浓度 $\geq 1\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。其中，甲苯的均值浓度最高 ($14.6\mu\text{g}/\text{m}^3$)，其次为苯甲酸 ($8.13\mu\text{g}/\text{m}^3$)；其他主要检出物还包括与人员排放有关的丙酮、壬醛、1-丁醇和 D-柠檬烯等物质^[17]，以及与交通排放有关的甲苯、苯、二甲苯等物质^[18]。

表1 站台主要VOC检出物及其浓度范围 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ($N=13$)

Table 1 The main VOC detected on the platform and its concentration range ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ($N=13$)

VOC 物质	均值浓度	最大浓度	最小浓度	VOC 物质	均值浓度	最大浓度	最小浓度
甲苯	14.60	31.51	6.73	乙酸仲丁酯	1.06	3.36	0.38
对二甲苯	7.62	13.72	2.91	苯乙烯	0.99	3.29	0.42
乙酸丁酯	3.38	6.75	1.47	乙酸乙酯	0.93	2.56	0.28
邻二甲苯	2.97	5.23	1.12	乙酸	0.89	2.86	0.37
乙苯	2.6	4.84	1.18	3-乙基甲苯	0.62	1.09	0.31
苯	1.98	3.06	1.35	2-丙烯酸丁酯	0.52	1.93	0.15
2-乙基己醇	1.80	3.44	1.09	丙酮	0.30	0.80	0.00
D-柠檬烯	1.69	3.08	0.65	壬醛	1.28	2.75	0.00
苯酚	1.52	4.75	0.61	1-丁醇	0.36	1.48	0.00
萘	1.29	2.23	0.80	乙腈	0.72	1.51	0.20
庚烷	1.10	3.71	0.23	十二烷	0.68	1.35	0.60
苯乙酮	2.11	5.25	0.64	苯甲醛	1.64	2.61	0.98
苯甲酸	8.13	19.68	1.67	癸烷	0.81	1.54	0.48
TVOC	133.26	216.48	79.18				

2.2 站台目标异味 VOCs

根据公开报道的异味阈值数据^[15,16]，进一步对上述 26 种主要 VOC 检出物进行筛选和 OAV 值计算，确定 12 种目标异味 VOCs 及其 OAV 值范围，如表 2 所示。结果显示，其主要浓度范围为 $0.36\text{--}7.62\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，OAV 值范围为 $0.00\text{--}1.27$ ，且大多

数小于 1.00，表明上述 13 个测试站点的异味感知风险总体较小。注意到，在所有目标异味 VOCs 中，壬醛的最大 OAV 值大于 1.00，推测其在部分测试站点应具有一定的异味感知风险。此外，考虑站台环境参数（如温湿度、风速等）的影响，上述其他目标 VOCs 的异味感知风险依然存在^[18]。

表2 目标异味VOC污染物及其OAV值范围 (N=13)

Table 2 Target odor VOC pollutants and their OAV value range (N=13)

VOC 物质	均值 OAV	最大 OAV	最小 OAV	异味阈值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^[15]	VOC 物质	均值 OAV	最大 OAV	最小 OAV	异味阈值 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ^[15]
对二甲苯	0.03	0.05	0.01	274.9	苯乙烯	0.01	0.02	0.00	162.73
乙酸丁酯	0.04	0.08	0.02	82.97	乙酸	0.06	0.18	0.02	16.08
2-乙基己醇	0.02	0.05	0.01	75.58	3-乙基甲苯	0.01	0.01	0.00	96.58
D-柠檬烯	0.01	0.01	0.00	231.1	2-丙烯酸丁酯	0.17	0.61	0.05	3.15
苯酚	0.06	0.20	0.03	23.53	壬醛	0.59	1.27	0.00	2.16
乙酸仲丁酯	0.09	0.27	0.03	12.45	1-丁醇	0.00	0.01	0.00	125.74

2.3 站台异味污染影响因素分析

结合表 2 和公式 (2) 确定 2 个案例地铁站各测点的目标异味物质, 如表 3 所示。结果显示, 2 个案例站点的站台、隧道、站外环境检出浓度最高的异味物质为对二甲苯 (分别为 $4.66 \pm 1.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5.05 \pm 1.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $4.52 \pm 2.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和苯酚 (分别为 $3.34 \pm 1.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $4.71 \pm 2.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.03 \pm 1.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 且隧道内大多数目标异味物质浓度均高于站台和站外环境。

对比分析两案例的站台目标异味物质 OAV 值发现, 除了站 A 的壬醛 (OAV 值=1.27) 略高以外, 两案例站台其他目标异味物质的 OAV 值均远低于 1.00, 表明导致站 A 异味风险的 VOC 物质主要为壬醛, 而站 B 应无单一物质异味风险。此外, 对存在异味风险的案例站点 A 的进一步分析显示, 该站点其他测点的少数目标异味物质 OAV 值 > 1.00, 包括隧道内的 2-丙烯酸丁酯 (3.04)、壬醛 (1.21) 和正戊酸 (4.39), 以及站外环境的 2-丙烯酸丁酯 (1.09) 和正戊酸 (3.26); 除壬醛以外, 隧道以及

站外环境对站台异味风险的综合影响较小。注意到, 案例站点 A 各测点的壬醛浓度均较高, 且壬醛的来源多样, 如站内人员、建筑材料等^[17-20], 推测其站台壬醛所导致的异味风险应来自站台自身、隧道以及站外环境的综合影响。需要说明的是, 尽管表 3 所列的其他目标 VOC 的异味感知风险较小, 但隧道和站外环境检出的部分目标异味物质 (如 2-乙基己醇、乙酸和 2-丙烯酸丁酯) 浓度均高于站台, 推测其依然可能通过屏蔽门通风渗透或通风系统送风对站台带来潜在的异味感知风险。

进一步对比各测点的 SOAV 值计算结果表明, 站 A (老站) 所有测点的 SOAV 值 (SOAV=们 5.78 ± 2.91) 均高于站 B (新站) (SOAV=0.54±0.20), 表明老站的异味感知风险远高于新站。此外, 由于站 B 所有测点的 SOAV 值均小于 1.00, 其存在的异味风险较小; 相比较而言, 站 A 隧道和站外测点的 SOAV 值均比其站台测点高, 表明其隧道和站外的异味强度比站台更大, 进而给站台带来潜在的异味污染风险。

表3 案例站点各测点目标异味VOC物质均值浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 及OAV值水平

Table 3 The mean concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) and OAV value level of target odorous VOC substances at each measuring point of the case site

目标异味物质	站 A						站 B					
	站台 浓度	站台 OAV	隧道 浓度	隧道 OAV	站外 浓度	站外 OAV	站台 浓度	站台 OAV	隧道 浓度	隧道 OAV	站外 浓度	站外 OAV
对二甲苯	3.08	0.01	3.55	0.01	2.37	0.01	6.23	0.02	6.54	0.02	6.66	0.02
乙酸丁酯	1.29	0.02	2.29	0.03	0.83	0.01	2.06	0.02	2.06	0.02	2.27	0.03
2-乙基己醇	3.44	0.05	4.73	0.06	4.66	0.06	1.96	0.03	2.82	0.04	0.29	0.00
D-柠檬烯	1.69	0.01	5.43	0.02	0.66	0.00	0.92	0.00	0.85	0.00	0.53	0.00
苯酚	4.75	0.20	6.77	0.29	4.53	0.19	1.92	0.08	2.65	0.11	0.57	0.02
乙酸仲丁酯	1.65	0.13	0.64	0.05	0.00	0.00	0.62	0.05	0.60	0.05	0.82	0.07
苯乙烯	1.13	0.01	0.86	0.01	0.51	0.00	0.89	0.01	1.29	0.01	0.55	0.00

续表3 案例站点各测点目标异味VOC物质均值浓度 (μg/m³) 及OAV值水平

目标异味物质	站 A						站 B					
	站台 浓度	站台 OAV	隧道 浓度	隧道 OAV	站外 浓度	站外 OAV	站台 浓度	站台 OAV	隧道 浓度	隧道 OAV	站外 浓度	站外 OAV
乙酸	2.86	0.18	4.14	0.26	1.71	0.11	0.38	0.02	0.78	0.05	0.79	0.05
3-乙基甲苯	0.74	0.01	5.87	0.06	0.29	0.00	0.69	0.01	0.00	0.00	0.74	0.01
2-丙烯酸丁酯	1.55	0.49	9.58	3.04	3.44	1.09	0.32	0.10	0.39	0.12	0.54	0.17
壬醛	2.75	1.27	2.61	1.21	1.59	0.74	1.03	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
1-丁醇	1.48	0.01	7.71	0.06	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
正戊酸*	0.00	0.00	0.74	4.39	0.55	3.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SOAV	2.39		9.49		5.47		0.82		0.42		0.37	

注：“*”表示该物质为单一地铁站点检出的目标异味 VOCs 物质，加粗表示该测点该物质 OAV≥1（可感知到该物质异味）。

通过公式(3)计算表3中的各目标VOC的异味贡献(P_i)，结果如图2所示。结果显示，壬醛(站A: 53%、站B: 59%)为两个站台异味贡献最高的物质且均高于同站其他测点(站A隧道: 13%、站B隧道: 0%、站A站外: 14%、站B站外: 0%)，正戊酸为站A隧道(46%)和站外(59%)异味贡献最高的物质，而2-丙烯酸丁酯为站B隧道(28%)和站外(45%)异味贡献最高的物质。此外，两案例站点的隧道和站外2-丙烯酸丁酯的异味贡献(站A隧道和站外: 32%和20%; 站B隧道和站外: 28%和45%)均高于同站站台(站A: 21%; 站B: 12%)，表明两案例站点的隧道和站外的2-丙烯酸丁酯均对各自的站台构成潜在的异味污染风险。

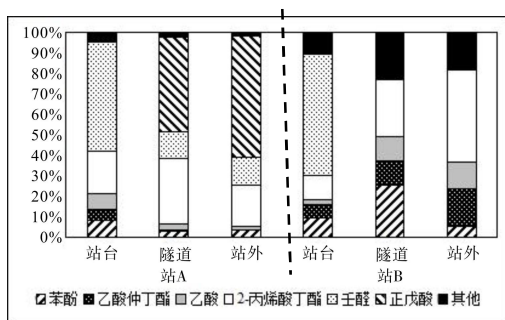


图2 案例站点各测点主要目标VOCs的异味贡献

Fig.2 The odor contribution of the main target VOCs at each measuring point of the case site

3 结论

本研究选取华南地区13个地下地铁车站开展实测研究，分析确定了测试站点站台的目标异味VOCs及其浓度水平，并随机选取两个案例站点，

定量分析其站台及其关联空间各目标VOC的异味强度以及异味贡献度等异味特征。其主要结论如下：

(1)根据采样测试检出的969种VOC物质的检出率和浓度水平，筛选确定26种主要VOC检出物，并结合其异味阈值，最终确定12种目标异味VOC物质，其浓度均值和OAV值范围分别为0.36–7.62μg/m³和0.00–1.27，除个别站点以外，所测试站点异味VOCs感知风险总体较小；

(2)案例站点的分析结果表明，仅老站站台存在单一VOC物质异味风险(壬醛，OAV=1.27)，其为案例站台异味贡献最高的物质，且老站的总体异味风险(SOAV=5.78±2.91)远高于新站(SOAV=0.54±0.20)，并受站台自身、隧道以及站外异味来源的共同影响。

参考文献:

[1] 曾平利.2020年中国城市地铁客运量报告[J].城市轨道交通,2021,(2):51-54.

[2] Feng Y, Mu C, Zhai J, et al. Characteristics and personal exposures of carbonyl compounds in the subway stations and in-subway trains of Shanghai, China [J]. Journal of hazardous materials, 2010,183(1-3):574-582.

[3] Tong R, Zhang L, Yang X, et al. Probabilistic health risk of volatile organic compounds (VOCs): Comparison among different commuting modes in Guangzhou, China[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2019,25(3):637-658.

[4] Leng J, Wen Y. Environmental standards for healthy ventilation in metros: Status, problems and prospects [J].

- Energy and Buildings, 2021,245:111068.
- [5] 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.
- [6] Wang B, Zacharias J. Noise, odor and passenger density in perceived crowding in public transport[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020,135:215-223.
- [7] Pang L, Yang C, Cao X, et al. Experimental Investigation of Air Quality in a Subway Station with Fully Enclosed Platform Screen Doors[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(14):5213.
- [8] Park W M, Park J B, Roh J, et al. Levels of formaldehyde and TVOCs and influential factors of 100 underground station environments from 2013 to 2015[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2018,24(4):1030-1042.
- [9] Li J, Yan L, Xie C, et al. Characteristics of carbonyls: concentrations, possible sources, and personal exposures for indoor and outdoor subway microenvironments[C]. 2012 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, IEEE, 2012:1-4
- [10] 韩新宇,陈缘奇,邓昊,等.昆明地铁环境空气质量检测分析[J].云南大学学报(自然科学版),2017,(6):115-121.
- [11] 王涵,黄盛浩,邓梦思,等.成都市地铁站及车厢内挥发性有机化合物种类探究及影响因素分析[J].环境工程学报,2022,16(8):2796-2806.
- [12] GB/T 18204.6-2013,公共场所卫生检验方法 第6部分: 卫生监测技术规范[S].北京:中国质检出版社,2013.
- [13] Fu N, Wei P, Jia Y, et al. Indoor volatile organic compounds in densely occupied education buildings of four universities: Target list, concentration levels and correlation analysis[J]. Building and Environment, 2021,191:107599.
- [14] Wu C, Liu J, Yan L, et al. Assessment of odor activity value coefficient and odor contribution based on binary interaction effects in waste disposal plant[J]. Atmospheric Environment, 2015,103:231-237.
- [15] Mayol A R, Acree T E. Advances in gas chromatography-olfactometry[M]. 2001.
- [16] <https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx>
- [17] Sun X, He J, Yang X. Human breath as a source of VOCs in the built environment, Part I: A method for sampling and detection species[J]. Building and Environment, 2017,125:565-573.
- [18] Liu Z, Li N, Wang N. Characterization and source identification of ambient VOCs in Jinan, China[J]. Air Quality Atmosphere & Health, 2016,9(3):285-291.
- [19] Le Berre E, Béno N, Ishii A, et al. Just noticeable differences in component concentrations modify the odor quality of a blending mixture[J]. Chemical senses, 2008,33(4):389-395.
- [20] Kruza M, Lewis A C, Morrison G C, et al. Impact of surface ozone interactions on indoor air chemistry: A modeling study[J]. Indoor Air, 2017,27(5):1001-1011.

(上接第 397 页)

- [5] 刘希臣,戎向阳,贾纪康,等.高原建筑组合式太阳能被动供暖技术应用分析[J].暖通空调,2022,52(3):112-119.
- [6] Navid Ekrami, Raghad S Kamel, Anais Garat, et al. Applications of Active Hollow Core Slabs and Insulated Concrete Foam Walls as Thermal Storage in Cold Climate Residential Buildings [J]. Energy Procedia, 2015,78.
- [7] 王闯,赵金玲,陈滨.太阳能空气集热耦合地板蓄热系统热特性实验研究[J].制冷与空调,2014,28(2):112-115,121.
- [8] 王小林.太阳能空气集热模块结合热质的热过程分析[D].大连:大连理工大学,2009.
- [9] 胡威.太阳能热风蓄热楼板供暖系统蓄放热特性及室内热环境研究[D].西安:西安建筑科技大学,2019.
- [10] 朱珂.辐射供暖地板表面综合传热系数的理论计算探究[D].郑州:华北水利水电大学,2019.