李梓阳,李天昕,曹素珍,等.采暖和非采暖期华北居民空气质量满意度研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4114-4123.
Li Z Y, Li T X, Cao S Z, et al. Study on air environmental quality satisfaction in North China during heating and non-heating periods [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4114-4123.

采暖和非采暖期华北居民空气质量满意度研究

李梓阳[1],李天昕*,曹素珍[1],乔 岑[1],温东森[2],张亚群[3] (1.北京科技大学能源与环境工程学院,北京 100083；2.中化商务有限公司,北京 100073；3.甘肃省环境科学设计研究院,甘肃 兰州 730030)

摘要：以华北地区居民为研究对象,利用空气质量满意度评估模型和指标体系,分别于采暖期和非采暖期开展空气污染分布特征和居民空气质量满意度研究,并探究华北地区居民空气质量满意度的影响因素.研究发现,华北地区采暖期居民空气质量满意度为 72.15,非采暖期满意度为 72.62,均达到“比较满意”.采暖期居民空气质量满意度与$PM_{2.5}$呈显著负相关关系,非采暖期居民空气质量满意度与PM_{10}呈显著负相关关系,证实模型具有良好的拟合效果.指标体系中公众期待、感知价值和公众信任 3 项指标受采暖因素影响较大:采暖期的公众期待显著低于非采暖的公众期待;采暖期的感知价值显著高于非采暖期的感知价值;采暖期的公众信任显著低于非采暖期的公众信任.颗粒物污染仍是影响华北地区居民空气质量满意度的重要因素,除此之外,居民空气质量满意度还受教育水平、年龄和信息公开度等多重因素的影响.在未来的空气质量政策治理上,政府应继续注重对 $PM_{2.5}$的排放治理、采暖期集中供暖的大气污染以及内蒙古沙尘治理等问题.

关键词：空气质量；公众满意度指数；华北地区；莫兰指数
中图分类号：X503.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4114-10

Study on air environmental quality satisfaction in North China during heating and non-heating periods. LI Zi-yang[1], LI Tian-xin*, CAO Su-zhen[1], QIAO Cen[1], WEN Dong-sen[2], ZHANG Ya-qun[3] (1.School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China；2.Sinochem Commerce Co. Ltd, Beijing 100073, China；3.Gansu Provincial Environmental Science Design and Research Institute, Lanzhou 730030,China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4114~4123

Abstract：Taking the residents in North China as research subjects, the study employed an air quality satisfaction assessment and indicator system to analyse the patterns of air pollution and residents' satisfaction with air quality during both the heating and non-heating seasons. It also examined the factors influencing residents' satisfaction with air quality in North China. The findings revealed that the air quality satisfaction scores for residents were 72.15 during the heating period and 72.62 during the non-heating period, indicating a level of "relatively satisfied". A significant negative correlation was found between the satisfaction index and $PM_{2.5}$ levels during the heating period, and a similar negative correlation with PM_{10} levels during the non-heating season, demonstrating a good model fit. The indicator system showed that public expectations, perceived value and public trust were significantly influenced by heating conditions: public expectations during the heating period were significantly lower than those during the non-heating period; perceived value during the heating period was significantly higher than that during the non-heating period; and public trust during the heating period was significantly lower than that during the non-heating period. Particulate matter pollution remained an important factor affecting residents' satisfaction with air quality in North China. Furthermore, residents' satisfaction with air quality was influenced by multiple factors such as education level, age, and information transparency. Therefore, in future air quality management policies, the government should continue to focus on issues such as $PM_{2.5}$ emissions control, air pollution from centralized heating in winter, and the dust management in Inner Mongolia.

Key words：air quality；public satisfaction index；North China；Moran's *I*

空气污染对人体健康影响显著,会影响人体呼吸系统、循环系统和预期寿命[1],PM_{10}、$PM_{2.5}$和NO_2等常见污染物可显著增加心血管疾病[2]和呼吸系统疾病的死亡率[3],对公共健康和国民经济造成严重损害[4].我国于 2013 年发布《大气污染防治计划》等一系列大气污染防治措施,并于 2018 年印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,强调加强对京津冀及周边重点区域的空气质量改善.截至 2022 年,$PM_{2.5}$

收稿日期：2024-11-05
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3702604,2022YFC3701303);甘肃省重点研发项目(20YF8WA026)
* 责任作者, 教授, tianxili@ustb.edu.cn

降幅达 57%[5],但仍存在约 37%城市空气质量超标,其中华北地区 $PM_{2.5}$ 超标天数约占总超标天数的36.9%,大气污染问题依然严重.作为我国北方最大的综合性工业基地,华北地区长期以来能源消费总量大、传统型能源依赖性强[6],同时存在秋冬季激增的煤炭能源消耗.当前,对华北地区空气质量的研究聚焦于空气污染时空特征[7]、大气污染的来源解析[8]和污染组分的分析[9],鲜少从公众主观满意度的视角开展空气质量状况的评估,这种视角的缺失不利于了解公众对空气质量改善的需求和期待,也不利于制定有针对性的空气污染治理措施[10].

满意度评价方法和模型是基于美国顾客满意指数[11](ACSI)的内容和结构发展而来的,被广泛用于公共产品或公共政策的评估[12].国外在空气质量满意度研究方面已形成较为成熟体系,相关研究普遍将主观满意度与客观空气污染数据相结合[13-14],在此基础上广泛运用生活满意度模型,量化空气污染造成的社会福利损失[15-16].研究路径不仅涵盖多样化群体与区域差异,还拓展至跨国比较与本土化实证验证[17],形成了较为系统的研究框架.国内研究则主要依托中国综合社会调查(CGSS)或中国劳动力动态调查(CLDS)等调查平台,探讨环境因素对公众主观感受的影响.如黄永明等[18]利用 2003 和 2006 年中国综合社会调查数据,证实了主观污染感知和客观污染程度对居民幸福感的影响;郑君君等[19]进一步分析了不同群体在污染感知上的差异,强调了分群体研究的重要性.潘丹等[20]关注农村群体,揭示环境污染对其满意度的结构性影响.此外,宋国军等[21]运用问卷调查的方法,将空气质量、污染源排放及信息公开纳入综合满意度评估体系中,填补了公众反馈方面研究的空白.尽管现有研究在理论建构和实证探索上取得一定成果,但仍存在两方面的不足:一是现阶段的研究多依赖于社会调查中的主观幸福感数据[22-24],或基于单一问题回答的满意度数值,不能表征居民空气质量满意度的真实情况.二是相关研究多聚焦于单一地区满意度情况,缺乏跨区域、跨时段及分群体的分析[25],不利于制定精准环境改善政策.

本研究采用空气质量公众满意度指数模型[26](AEQS),综合考虑居民心理预期、负面反馈及主观感受等因素,从 6 个维度来衡量空气质量满意度.本文将研究重点聚焦华北地区采暖期和非采暖期居民空气质量满意度的差异,探讨影响空气质量居民满意度的多种因素,旨在为提高华北地区居民空气质量满意度和制定有针对性的大气环境治理措施提供参考.

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

华北地区位于 32°N 至 42°N,110°E 至 120°E 间,包括北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区 5 个省份,拥有平原、丘陵、高原等地貌特征,如图 1 所示.根据 2022 年统计数据,该地区常住人口16804.79 万人,国内生产总值达 15.48 万亿元.华北地区钢铁、化工、煤炭等高污染产业密集,排放的污染物数量巨大,加上气候条件和地形条件的影响,致使华北地区空气污染极为严重[27].

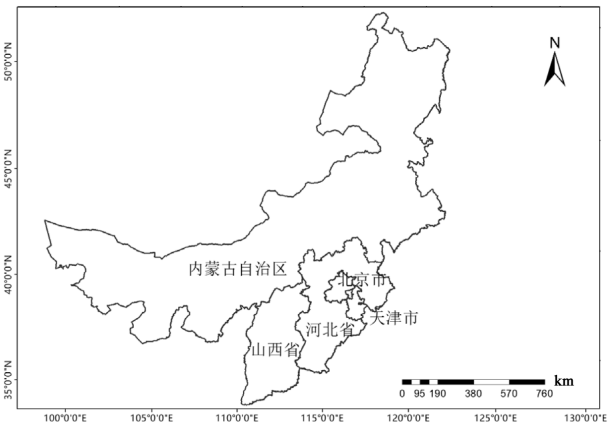


图 1　研究区域概况

Fig.1　Location of the study area

基于标准地图服务网站 GS(2016)2923 标准地图制作

1.2　空气质量公众满意度指数模型

空气质量公众满意度指数模型(AEQS)利用层次分析法,构建了包括 19 个三级指标和 6 个二级指标在内的综合指标体系.其中,感知质量、感知价值和公众期待是 AEQS 的原因变量,公众负面和公众信任是 AEQS 的结果变量,AEQS 的提升会导致公众负面的减少和公众信任的提高.本文采用样本加权平均的方法对 6 个指标进行处理,最终得到空气质量总体满意度(CSI).本研究采用居民空气质量总体满意度指数来量化公众对环境空气质量的主观评价和感受.

1.3 调查方法

1.3.1 问卷设计 为了准确地评估华北地区居民空气质量满意度,结合当前国内外现有的满意度问卷、中国当前的空气环境状况、环境管理的需求等,设计了居民空气质量满意度调查问卷.该问卷共分 7 个部分:第一部分是感知质量,旨在了解个人对空气质量的关注情况、获取空气质量信息的途径以及对空气质量的实际感受;第二部分是公众期待,旨在了解居民对环境质量的预期;第三部分是感知价值,旨在了解居民对防治空气污染的支付意愿;第四部分是直接满意度,旨在了解居民对当前空气环境质量直观感受情况;第五部分是公众负面,旨在了解居民对当地空气环境质量的抱怨及不满程度;第六部分是公众信任,了解居民对政府环境管理政策的认可度.第七部分是基础信息,包括调查对象的年龄、性别、学历等基本人口学信息.满意度调查部分均采用李克特五级量表,通过五个等级逐级递减来量化被调查者的反应:非常满意赋值 5、比较满意赋值 4、一般满意赋值 3、不太满意赋值 2、非常不满意赋值 1.

1.3.2 样本量确定 (1)最小样本量估算:本研究采用分层随机抽样的方法来确定调查的样本量,最小样本量的确定如公式(1)所示[28].

$$n=\left(\frac{u_{\alpha/2}\cdot\sigma}{\delta\cdot\mu}\right)^2\cdot\mathrm{deff} \tag{1}$$

式中:n 为每层最小样本量;u 为显著性水平为 95%时相应的标准正态差,取 1.96;$\mu_{\alpha/2}$ 为调查参数的算术均数,根据空气质量满意度 2021 年调查结果,取值 83.8;σ 为调查参数的标准差,取值 18.6[26];δ 为允许误差.本研究问卷调查法,取 10%[29];deff 为设计效应值.问卷调查法单纯随机抽样[30],取 3.5.

(2)总样本量估算:为保证问卷调查的代表性,本次调查监测以年龄为最小调查监测单元,年龄、性别、区县、城乡作为主要分层因素进行分层抽样,具体公式如公式(2)所示.

$$N=\frac{n\cdot q}{1-q} \tag{2}$$

式中:N 为总样本量;n 为每层最小样本量;p 为失访率,取值 9%;q 为分层因素的乘积.

(3)样本量分配:

$$N_i=N\cdot\eta_i \tag{3}$$

式中:N 为华北总样本量;N_i 为调查点位 i 样本量;η_i 为调查点位 i 人口数占华北地区总人口的比例.

1.3.3 数据收集 通过在线平台和微信电子问卷随机推送的方式,于 2022 年的 1 月、5 月、8 月、11 月在华北地区开展四个季度的居民空气质量满意度调查.2022 年华北地区共收回有效问卷 9170,问卷有效率为 83.76%.各省份问卷实际收集情况见表 1.本研究将第一季度和第四季度视为采暖期,第二季度和第三季度视为非采暖期.采用空气污染指数 AQI、$PM_{2.5}$、PM_{10} 作为量化空气污染程度的主要指标,空气监测数据来自中国环境监测总站平台.

表 1 各省份四季度问卷收集情况

Table 1 Questionnaire responses collected from each province in the fourth quarter

省份	第一季度	第二季度	第三季度	第四季度	总计
北京市	1357	385	385	218	2345
天津市	205	277	277	121	880
河北省	471	1174	1174	623	3442
山西省	141	540	540	312	1533
内蒙古	66	361	361	182	970
总计	2240	2737	2737	1456	9170

1.4 统计分析方法

使用 SPSS 软件对收集到的居民空气质量满意度数据进行预处理,并使用 ArcGIS 软件进行数据的可视化处理.对处理后数据进行 K-S 非参数检验后,采用斯皮尔曼检验对不同城市的空气质量公众满意度与 AQI、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 数据进行双变量差异性统计分析.对采暖期和非采暖期的 6 项指标进行非参数的曼-惠特尼 U 检验.使用 Geoda 软件以区县为最小单元进行莫兰指数的空间相关性分析.最后,综合考虑筛选出 $PM_{2.5}$、年收入、信息公开度等因素,经多重共线性筛选后,应用多元线性回归模型开展居民空气质量满意度的影响因素分析.

空间自相关分析是一种用于描述空间中交互现象的统计方法[31],分为全局空间自相关分析和局部空间自相关分析.全局空间自相关是对整个空间结构是否存在聚集或分散进行分析.莫兰指数(Moran's I)用于量化自相关度,范围介于-1~1 之间,值为正表示目标倾向于聚集在一起,值为负表示相似值在空间上分散.局部空间自相关分析通过比较每个空间目标与其邻近空间目标之间的相似性来

评估空间集聚现象.本研究利用 Geoda 软件进行空间自相关分析.具体计算[32-33]:

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}} \tag{4}$$

$$I_{\mathrm{i}}=\frac{\left(x_i-\bar{x}\right)}{S_i^{\,2}}\sum_{j=1,j\neq i}^{n}W_{ij}\left(x_j-\bar{x}\right) \tag{5}$$

式中:n为区域内空间目标的数量;x_i为研究区域内第i个单元内要素的特征值;x_j为研究区域内第j个单元内要素的特征值;W_{ij}为构造的空间加权矩阵;I_i为第i个区域单元的 Moran's I.

2　结果与分析

2.1　居民空气质量公众满意度概况

2.1.1　样本人口学特征　如表 2 所示,本次调查对象主要以城镇居民中的青中年群体为主,城市和农村居民各占比 83.9%和 16.1%,年龄 18~45 岁的居民占比 91.9%.男女居民各占比 44.5%和 55.5%,男女比例相对均衡,基本符合华北地区人口分布特征.

表 2　调查对象社会人口学结构特征

Table 2　Demographic and socio-structural characteristics of survey respondents

类别		N	不同年龄人群			
			17 岁及以下	18~35 岁	36~45 岁	45 岁以上
城市	男性	3356	101(3.0%)	2269(67.6%)	805(24%)	181(5.4%)
	女性	4338	117(2.7%)	3041(70.1%)	1002(23.1%)	178(4.1%)
	小计	7694	218(2.8%)	5310(69.0%)	1807(23.5%)	359(4.7%)
农村	男性	728	62(8.5%)	514(70.6%)	132(18.1%)	20(2.7%)
	女性	748	57(7.6%)	564(75.4%)	102(13.6%)	25(3.3%)
	小计	1476	119(8.1%)	1078(73.0%)	234(15.9%)	45(3.0%)
总计	男性	4084	163(4.0%)	2781(68.1%)	939(23.0%)	201(4.9%)
	女性	5086	173(3.4%)	3606(70.9%)	1105(21.7%)	203(4.0%)
	小计	9170	336(3.7%)	6387(69.6%)	2044(22.3%)	403(4.4%)

2.1.2　居民空气质量总体满意度　北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区五地的居民满意度分别为 72.95、72.80、72.30、72.41 和 72.00;华北地区 67.61%的居民对当前空气质量比较满意,高于王蓉 2020 年调查结果中 57.24%居民表示比较满意[34],说明近 2 年来居民对空气质量改善的认可度较高,满意度水平有所提升.各城市中鄂尔多斯市、大同市居民空气质量满意度较高,分别为 75.85 和 75.64,可能与这些城市均位于开阔地带,空气流通性强有关.而呼伦贝尔市、唐山市和乌海市满意度较低,分别为 70.53、70.52 和 67.91,这可能与两地长期以来较高的工业源排放有关[35].

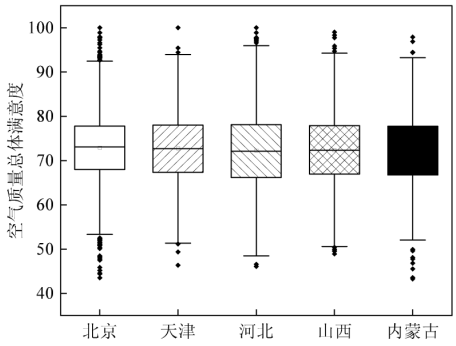


图 2　各省份居民空气质量满意度箱式图

Fig.2　Box plot of air environmental quality satisfaction by province

2.2　居民空气质量感知和评价

表 3　采暖期非采暖期居民空气质量满意度 6 项指标的差异性分析

Table 3　Comparative analysis of six indicators of air environmental quality satisfaction during heating and non-heating periods in North China region

指标	采暖期　均值(最小值~最大值)	非采暖期　均值(最小值~最大值)	P
感知质量	80.00(80.00~80.00)	80.00(80.00~80.00)	0.493
公众期待	84.69(81.15~87.27)	86.59(84.24~89.14)	0.010**
感知价值	73.89(69.25~74.96)	63.04(60.62~64.99)	0.000**
直接满意度	67.64(64.88~70.45)	69.86(65.22~70.11)	0.421
公众负面	67.25(65.22~71.21)	70.74(66.26~74.41)	0.062
公众信任	69.12(64.14~70.88)	80.00(70.34~80.00)	0.000**
总体满意度	71.92(71.04~74.08)	71.96(71.33~73.28)	0.873

注:*和**分别表示在0.05和0.01的显著性水平上显著,下同.

对居民空气质量满意度的二级指标进行曼-惠特尼 U 检验,如表 3 所示,采暖期的公众期待显著低于非采暖期的公众期待;采暖期的感知价值显著高于非采暖期的感知价值;采暖期的公众信任显著低于非采暖期的公众信任.这种差异可能与华北地区的空气污染存在显著的时间异质性有关[36],采暖期 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的平均浓度为 43.77,79.04μg/m^3,显著高于非采暖期的颗粒物平均浓度 24.34μg/m^3, 57.54μg/m^3.污染物浓度的增加,易诱发与空气质量相关的健康症状,如呼吸道疾病、头痛等[37],这些症状及对症状的担忧会使居民佩戴口罩、购置空气净化器的意愿增强,进

而使得采暖期的感知价值显著高于非采暖期的感知价值.其次,为改善秋冬季大气污染的局面,政府出台企业错峰生产、“散乱污”企业治理、冬季限行等措施[38],在各地经济受影响的情况下,居民对空气质量的改善提出了更高的要求,因此在数据上表现为公众期待和公众信任存在显著差异.

2.3 居民空气质量满意度分析

2.3.1 采暖期和非采暖期空气质量及满意度 华北地区采暖期居民空气质量满意度为 72.62,非采暖期居民空气质量满意度为 72.15,均为比较满意.

如图 3 所示,华北地区 $PM_{2.5}$ 浓度总体呈现采暖期高、非采暖期低的季节性变化规律,采暖期 $PM_{2.5}$ 浓度高于 35μg/m^3 的区域主要集中在胡焕庸线以东,即在河北的中南部、山西的大部分地区及内蒙古的中西部巴彦淖尔地区,内蒙古中部锡林郭勒盟及其周边赤峰、张家口等城市情况较好,全年 $PM_{2.5}$ 浓度均低于 35μg/m^3.该分布特征与罗悦函等研究的污染物浓度分布情况相符[39].这一现象与采暖期燃煤排放的增加密切相关,同时也受到秋冬季气象条件不利及污染物区域传输效率下降等因素的共同影响[40],致使污染物呈局部集聚分布.PM_{10} 的浓度与 $PM_{2.5}$ 的浓度分布大体一致,在采暖期,除内蒙古西部、北部锡林郭勒盟、呼伦贝尔和河北西部等地区外,其余地区均未达到Ⅱ级标准.非采暖期空气质量未达Ⅱ级标准区域则主要集中在河北中南部、山西西部以及内蒙古巴彦淖尔.居民空气质量满意度指数分布与颗粒物浓度分布重合较好.内蒙古中部、河北北部、北京、天津地区非采暖期居民空气质量满意度较采暖期有明显提升,与该地区空气质量的季节性变化相对应.其余地区居民满意度无明显差异.其中,山西西部和内蒙古西部地区均出现采暖期居民空气质量满意度高于非采暖期的情况,这可能与该地区受访者采暖期对空气质量的感知力较差有关.该区域属内陆高平原地区,年最低气温可达−30℃,居民采暖期间倾向于待在室内,户外活动减少,对空气质量的感知受影响,室内的舒适感也会使他们对空气质量包容度增加.其次,该区域颗粒物浓度全年保持在较好水平,采暖期、非采暖期空气质量差异较小.

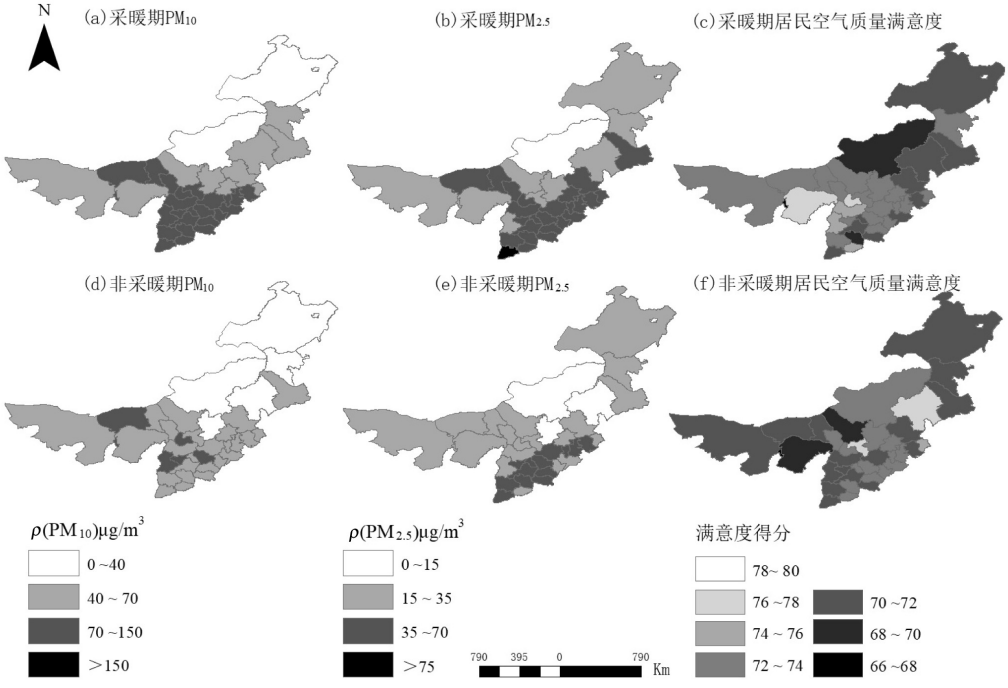


图 3 华北地区空气质量及居民满意度分布

Fig.3 Distribution of air quality and air environmental quality satisfaction

审图号:GS(2016)2923

2.3.2 采暖期和非采暖期居民满意度空间相关性 利用 Geoda 软件对华北地区采暖期和非采暖期居民空气质量满意度评价指标体系中各指标进行空间相关性分析,采用区县作为最小单元做空间分

析,未统计到的区县满意度数值取与其直线距离最近的区县数值,结果见表 4.

表 4　采暖期、非采暖期的居民空气质量满意度的莫兰指数

Table 4　Moran's *I* of air environmental quality satisfaction during heating and non-heating periods

时段	参数	感知质量	公众期待	感知价值	公众满意度	公众负面	公众信任	总满意度
采暖期	Moran's *I*	0.176	0.127	0.219	0.132	0.162	0.129	0.119
	P	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.002**	0.001**
非采暖期	Moran's *I*	0.152	0.046	0.137	0.127	0.157	0.017	0.047
	P	0.001**	0.053	0.001**	0.001**	0.001**	0.252	0.048**

结果显示,采暖期的居民总体满意度和非采暖期的居民总体满意度均存在显著相关性,除非采暖期的公众期待和公众信任指标不显著外,其余指标在采暖期和非采暖期也均显示显著的正相关性.利用 Geoda 软件进行局部空间相关性分析,绘制其 LISA 分布,如图 4 所示,在显著性水平为 0.05 的条件下,LISA 分布图结果以高位聚集和低位聚集为主.

采暖期内蒙古东部的呼伦贝尔、中部的锡林郭勒盟、南部的鄂尔多斯地区正向指标较多的呈低位集聚特征,非采暖期正向指标的低位集聚地区主要分布在胡焕庸线以北的内蒙古地区.值得注意的是,鄂尔多斯地区和锡林郭勒地区负向指标(公众负面)全年均呈高位集聚特征.内蒙古地区空气质量居民满意度各指标表现较差的原因可能与以下几个因素相关.内蒙古自治区位于荒漠化严重的干旱半干旱地区,沙尘天气频发[41-42],其中草地类型沙尘源分布较广泛,从阿拉善沿黄河向东一直到大兴安岭岭西的呼伦贝尔均有分布[43],并集中发生在 3~5 月份.沙尘暴这种突发的极恶劣天气会混淆居民对空气质量的认识,致使居民空气质量满意度降低,这一现象也在 LISA 图上得到体现:鄂尔多斯、锡林郭勒盟和呼伦贝尔为中心的地区正向指标多呈低-低的空间集聚特征,负向指标(公众负面)多呈高-高的集聚特征.

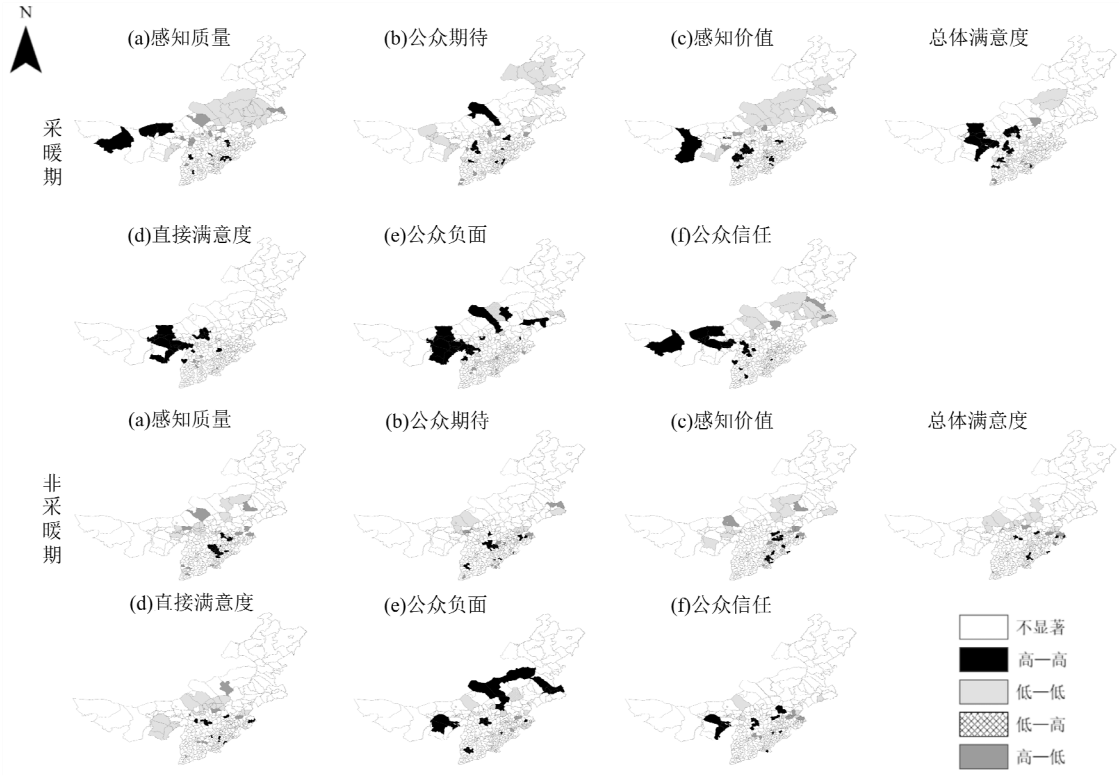


图 4　居民空气质量满意度及二级指标的 LISA 分布

Fig.4　LISA cluster map of air environmental quality satisfaction and secondary indicators

审图号:GS(2016)2923

非采暖期居民空气质量满意度正向指标的高位集聚地区较多的集中在京津冀中部,以北京东部和天津为中心的圆圈内.同时该地区全年无负面指标高位集聚现象,整体上居民空气质量满意度好于其他地区.这一现象主要归因于近年来政府在京津冀地区实施了一系列空气质量改善政策,如《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》和《北京城市总体规划(2016 年−2030 年)》等,减少了大规模燃煤供暖活动,自 2017 年起,京津及其周边地区的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 出现 63.5%和 43%的显著降低[44].此外,该区域居民整体收入水平和学历水平高,获取政策信息及解读信息能力较强,对空气质量政策实施情况的了解程度较高,因此该地区在整体空气质量不突出的情况下,空气质量满意度却相对较高.

2.3.3 空气质量公众满意度相关性 整体上,京津冀和山西地区空气质量情况与公众满意度模型拟合情况较高.而内蒙古自治区的西部阿拉善盟地区和中部锡林郭勒盟等地区空气质量情况与模型的拟合程度低于其他地区.利用斯皮尔曼检验对不同城市的居民空气质量总体满意度与 AQI、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 进行相关性分析.由表 5 可知,在 0.05 的显著性水平下,采暖期的空气质量满意度与 $PM_{2.5}$ 呈显著负相关关系,非采暖期居民空气质量满意度与 PM_{10} 呈显著负相关关系,表明空气污染对居民满意度具有显著的负面影响,这一结论与 Yu 等[45]和 Zhao 等[46]的结论一致.说明本研究采用的空气质量公众满意度指数模型在反映各地区空气质量状况和公众对空气质量治理水平满意度上具有良好的科学性和准确性.

表 5 居民空气质量满意度和 $PM_{2.5}$、PM_{10} 浓度、AQI 指数的相关分析

Table 5 Correlation analysis between air environmental quality satisfaction, concentrations and AQI indices

时段	参数	总体满意度	AQI	PM_{10}	$PM_{2.5}$
采暖期	总体满意度	1			
	AQI	−0.248	1		
	PM_{10}	−0.144	0.913**	1	
	$PM_{2.5}$	−0.332*	0.935**	0.779**	1
非采暖期	总体满意度	1			
	AQI	−0.017	1		
	PM_{10}	−0.440*	0.594**	1	
	$PM_{2.5}$	−0.212	0.889**	0.610**	1

注:*和**分别表示在0.05和0.01的显著性水平上显著.

2.3.4 居民空气质量满意度影响因素 利用多元线性回归模型进行居民总体满意度影响因素的分析,控制人口学变量中的性别、城乡、职业等混杂因素,筛选出 $PM_{2.5}$、家庭年收入等自变量,剔除共线性较强的 AQI、人口等因素,采用逐步回归法构建模型,选择 R^2 最大的模型进行影响因素分析,R^2 为 0.53.

表 6 显示:受教育年限、年龄、家庭年收入、空气治理措施、信息公开度、污染防护支付意愿均与满意度呈显著正相关关系,而 $PM_{2.5}$ 浓度和受空气污染影响程度与满意度呈显著负相关.以下将逐一分析这些因素的作用机制:从受教育年限来看,受教育程度高的居民通常对空气质量政策更为关注[47],且对政策有着更全面的理解,这使得其对相关政策成效的认可度更高;从年龄层面分析,年龄较大的居民户外活动时间相对较少,受到空气污染直接影响较小[48],因此满意度水平较高;从家庭年收入维度来看,收入较高的群体往往表现出更强的污染防护支付意愿[49],购置空气净化器等防护设备的比例更高,这些防护措施一定程度上缓解了空气污染的负面影响,从而显著提升其满意度水平.此外,空气治理措施的落实及政策信息的公开透明在提升居民满意度方面具有关键作用.这说明更完善的空气治理政策和更高程度的信息公开力度能极大的增强居民对政府治理能力的信心,从而提高其对空气质量改善成效的认可度.而相较于以上正向因素,空气污染的加剧则显著降低了居民空气质量满意度,$PM_{2.5}$ 浓度较高的区域,居民满意度存在明显降低,这一结论与刘倩倩等的研究结果一致[50],同时,在受污染影响程度严重的区域和群体中,这种负面效应更为突出,这也在一定程度上解释了河北南部城市群整体居民满意度低的原因.

进一步分析显示,不同的群体间也存在显著的差异,城市群体显著低于农村,这可能归因于城市聚集更多人口的同时空气污染水平也更高,如京津冀地区城市 $PM_{2.5}$ 浓度比农村高 11.3%~16.9%[51].男性居民满意度显著低于女性,可能与男性群体更多的从事户外体力工作、受空气污染影响更大有关[52].基于以上分析结果,建议政府在制定和实施空气质量管控措施时,充分考虑群体特征和区域差异,进一步优化和完善空气质量监测网络建设,提升政策信息透明度,为居民提供更准确更契合的大气

信息产品.

2.3.5　研究局限性　本研究在采暖期范围的界定上,未充分考虑华北地区各省市可能存在的供暖时间差异.此外,小部分省市的问卷回收数量略低于预期计算样本量,可能对研究结果的精确性产生一定影响.

表 6　华北地区居民空气质量满意度的影响因素

Table 6　Influencing factors of air environmental quality satisfaction in North China

影响因素		回归系数	*P*	置信区间		共线性统计
				下限	上限	VIF
常量		72.317	0.000	72.190	72.445	
$PM_{2.5}$		−0.382	0.000	−0.517	−0.246	1.073
受教育年限		1.076	0.000	0.931	1.222	1.258
年龄		0.479	0.000	0.340	0.618	1.175
家庭年收入		0.888	0.000	0.740	1.036	1.352
空气治理措施		1.423	0.000	1.286	1.561	1.126
空气质量政策信息公开度		4.435	0.000	4.303	4.566	1.075
污染防护支付意愿		0.736	0.000	0.598	0.875	1.199
受空气影响程度		−2.330	0.000	−2.481	−2.180	1.400
性别	男性(参照:女性)	−0.189	0.004	−0.317	−0.061	1.012
城乡	城市(参照:农村)	−0.214	0.002	−0.353	−0.076	1.184
职业(参照:其他)	企业从业人员	0.218	0.061	−0.010	0.446	3.235
	科教文体卫专业人员	0.052	0.504	−0.101	0.205	1.443
	自由职业者	−0.137	0.130	−0.315	0.040	1.938
	个体商贩	0.066	0.405	−0.090	0.222	1.533
	离退休人员	−0.050	0.496	−0.192	0.093	1.162
	农民	0.004	0.956	−0.130	0.138	1.140
	学生	−0.063	0.592	−0.294	0.168	3.289
	失业、无业人员	−0.189	0.015	−0.342	−0.036	1.217

2.4　建议

采暖期燃煤污染是影响华北地区居民空气质量满意度的关键因素.同时,居民空气质量满意度还受 $PM_{2.5}$、受教育年限、年龄、信息公开度等因素影响.针对这些因素,相关部门应充分考虑群体特征和区域差异,制定灵活的空气污染管控措施.持续优化空气质量监测网络建设,扩大政策信息公开力度,整合优化各类空气质量监测数据,推出更准确更具针对性的空气污染实时信息产品,为公众日常出行提供便利.此外,针对内蒙古沙尘频发的地区,相关部门应完善对沙尘天气的监测体系、制定科学有效的保障预案,以降低沙尘对居民日常生活的影响.

3　结论

3.1　华北地区采暖期的居民空气质量满意度为72.15,非采暖期的居民空气质量总满意度为 72.62,均为“比较满意”.研究表明,居民空气质量满意度模型与空气质量分布拟合良好

3.2　空间分布上,内蒙古自治区鄂尔多斯、锡林郭勒盟、呼伦贝尔地区形成了空气质量居民满意度的“低谷”,与该地区季节性频发的沙尘天气有关.北京、天津及其周边地区在非采暖期空气质量居民满意度正向指标呈高位集聚特征,与该地空气质量改善幅度大、居民受教育程度高有关.

参考文献:

[1] Hu F P, Guo Y M. Health impacts of air pollution in China [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2020,15(4):17.

[2] Zhang C, Ding R, Xiao C C, et al. Association between air pollution and cardiovascular mortality in Hefei, China: A time−series analysis [J]. Environmental Pollution, 2017,229:790−797.

[3] Milanzi E B, Kopplelman G H, Smit H A, et al. Air pollution exposure and lung function until age 16 years: the PIAMA birth cohort study [J]. European Respiratory Journal, 2018,52(3):1800218.

[4] 曾贤刚,阮芳芳.中国 $PM_{2.5}$ 污染健康效应的国民经济影响分析 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):3228−3238.
Zeng X G, Ruan F F. Analysis on the national economic impact of $PM_{2.5}$−induced health effects in China [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):3228−3238.

[5] 马　本,秦　露,夏天辰.中国城市 $PM_{2.5}$ 污染暴露不平等及其驱动因素——基于 Theil 指数和 LMDI 分解 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):555−566.

Ma B, Qin L, Xia T C. Inequality of $PM_{2.5}$ exposure and its driving factors in China:Based on Theil index and LMDI decomposition [J]. China Environmental Science, 2024,44(1):555−566.

[6] 张 莹,王式功,贾旭伟,等.华北地区冬半年空气污染天气客观分型研究 [J]. 环境科学学报, 2018,38(10):3826−3833.
Zhang Y, Wang S G, Jia X W, et al. Study on an objective synoptic typing method for air pollution weather in North China during winter half year [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018,38(10):3826−3833.

[7] 张逸琴.华北平原东部区域 $PM_{2.5}$ 组分特征及来源解析 [D]. 北京:北京化工大学, 2021.DOI:10.26939/d.cnki.gbhgu.2020.000634.
Zhang Y Q. Characteristics and sources of $PM_{2.5}$ components in the Eastern part of North China plain [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.DOI:10.26939/d.cnki.gbhgu.2020.000634.

[8] 焦亚音,孟 凯,杜惠云,等.京津冀中南部污染气象贡献的时空变化特征 [J]. 中国环境科学, 2021,41(11):4982−4989.
Jiao Y Y, Meng K, Du H Y, et al. Spatial−temporal characteristics of the contributions to the particle pollution meteorological conditions in central and southern Beijing−Tianjin−Hebei (BTH) region [J]. China Environmental Science, 2021,41(11):4982−4989.

[9] Zhan J Y, Huang G C, Zhou H, et al. Spatial and temporal distribution characteristics and factors of particulate matter concentration in North China [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(4):1036.

[10] Chu Z P, Bian C, Yang J. How can public participation improve environmental governance in China? A policy simulation approach with multi-player evolutionary game [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022,95:106782.

[11] Morgeson F V, Hult G T, Sharma U, et al. The American Customer Satisfaction Index (ACSI): A sample dataset and description [J]. Data in Brief, 2023,48:109123.

[12] Sun K A, Kim D Y. Does customer satisfaction increase firm performance? An application of American Customer Satisfaction Index (ACSI) [J]. International Journal of Hospitality Management, 2013,35:68−77.

[13] Levinson A. Valuing public goods using happiness data: The case of air quality [J]. Journal of Public Economics, 2012.96(9/10):869−880.

[14] Welsch H. Environment and happiness: Valuation of air pollution using life satisfaction data [J]. Ecological Economics, 2006,58(4):801–813.

[15] Ahumada G, Iturra V. If the air was cleaner, would we be happier? An economic assessment of the effects of air pollution on individual subjective well−being in Chile [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,289:125152.

[16] Ambrey C L, Fleming C M, Chan A Y. Estimating the cost of air pollution in South East Queensland: An application of the life satisfaction non−market valuation approach [J]. Ecological Economics, 2014.97:172−181.

[17] Sarmiento L, Wägner N, Zaklan A. The air quality and well−being effects of low emission zones [J]. Journal of Public Economics, 2023,227:105014.

[18] 黄永明,何凌云.城市化、环境污染与居民主观幸福感——来自中国的经验证据 [J]. 中国软科学, 2013,(12):82−93.
Huang Y M, He L Y. Urbanization, Environmental Pollution and Subjective Well−being: An Empirical Study on China [J]. China Soft Science, 2013,(12):82−93.

[19] 郑君君,刘 璨,李诚志.环境污染对中国居民幸福感的影响——基于 CGSS 的实证分析 [J]. 武汉大学学报(哲学社会科学版), 2015,68(4):66−73.
Zheng J J, Liu C, Li C Z. The impact of environmental pollution on the well−being of Chinese residents: An empirical analysis based on CGSS [J]. Wuhan University Journal (Philosophy & Social Sciences), 2015,68(4):66−73.

[20] 潘 丹,胡启志.主观感知的环境污染对农民幸福感的影响 [J]. 中国人口·资源与环境, 2022,32(9):119−131.
Pan D, Hu Q Z. Impact of perceived environmental pollution on rural residents'well−being [J]. China population, resources and environment, 2022,32(9):119−131.

[21] 宋国君,肖翠翠.基于问卷的空气质量满意度调查方法及应用研究 [J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2014,14(4):52−59,140.
Song G J, Xiao C C. Study on questionnaire−based air quality satisfaction survey method and application [J]. Journal of China University of Geosciences(Social Science), 2014,14(4):52−59,140.

[22] Bonasia M, Simoe E D, D'Uva M, et al. Environmental protection and happiness: A long−run relationship in Europe [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022,93:106704.

[23] Song, Y, Zhou A, Zhang M, et al. Assessing the effects of haze pollution on subjective well−being based on Chinese General Social Survey [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,235:574−582.

[24] Zhang, B B, Wu B B, Liu J. $PM_{2.5}$ pollution−related health effects and willingness to pay for improved air quality: Evidence from China's prefecture−level cities [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,273.

[25] 潘本锋,宫正宇,王 帅,等.环境空气质量指数在应用中存在的问题及建议 [J]. 中国环境监测, 2015,31(1):64−67.
Pan B F, Gong Z Y, Wang S, et al. Defects and Revising suggestions of the application of ambient air quality index [J]. Environmental Monitoring in China, 2015,31(1):64−67.

[26] 李天昕,乔 岑,李雨霏,等.基于问卷的空气质量公众满意度模型和评价指标体系构建 [J]. 环境科学研究, 2023,36(12):2314−2321.
Li T X, Qiao C, Li Y F, et al. Construction of air quality public satisfaction model and evaluation index system based on questionnaire [J]. 2023,36(12):2314−2321.

[27] Fan H, Zhao C, Yang Y. A comprehensive analysis of the spatio−temporal variation of urban air pollution in China during 2014~2018 [J]. Atmospheric Environment, 2020,220:117066.

[28] Daniela R M. Determining the sample size in qualitative research [J]. International Multidisciplinary Scientific Conferences on the Dialogue between Sciences & Arts, Religion & Education, 2020,4(1):181−187.

[29] 郑晶晶.问卷调查法研究综述 [J]. 理论观察, 2014,(10):102−103.
Zhang J J. Literature review on questionnaire survey methods [J]. Theoretic Observation, 2014,(10):102−103.

[30] 罗 薇.设计效应分解在复杂样本设计中的应用研究 [J]. 统计与信息论坛, 2018,33(11):16−23.
Luo W. The reasearch on the application of design effects decomposition in complex sample [J]. Statistics & Information Forum, 2018,33(11):16−23.

[31] Wang Y F, Lv W Y, Wang M J, et al. Application of improved Moran's I in the evaluation of urban spatial development [Z]. Spatial Statistics, 2023,54:100736.

[32] Anselin L. Local Indicators of Spatial Association: LISA [J]. Geographical Analysis, 1995,27(2):93−115.

[33] Moran P A P. Notes on Continuous stochastic phenomena [J]. Biometrika, 1950,37(1/2):17−23.

[34] 王　蓉,赵雪雁,高　峰,等.公众对美丽中国建设水平的满意度 [J]. 中国人口·资源与环境, 2021,31(12):149−162.
Wang R, Zhao X Y, Gao F, et al. Public satisfaction with the implementation of the Beautiful China Initiativep [J]. China population, resources and environment, 2021,31(12):149−162.

[35] 韩力慧,兰　童,程水源,等.唐山市大气颗粒物和 O_3 多尺度变化及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2024,44(3):1185−1194.
Han L H, Lan T, Cheng S Y, et al. The variations and influencing factors of atmospheric particulate matter and O_3 at multiple scales in Tangshan [J]. China Environmental Science, 2024,44(3):1185−1194.

[36] 孙　爽,李令军,赵文吉,等.京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 [J]. 环境科学, 2019,40(4):1585−1593.
Sun S, Li L J, Zhao W J, et al. Variation in pollutant concentrations and correlation analysis with the vegetation index in Beijing−Tianjin−Hebei [J]. Environmental Science, 2019,40(4):1585−1593.

[37] Ruotsalainen R, Jaakkola1J J, Ronnberg R, et al. Symptoms and perceived indoor air quality among occupants of houses and apartments with different ventilation systems [J]. Indoor Air, 1991, 1(4):428−438.

[38] 李　洋,唐　伟,杜谨宏,等."2+26"城市秋冬季大气污染治理措施效果评估 [J]. 中国环境科学, 2021,41(10):4484−4494.
Li Y, Tang W, Du J H, et al. Assessment on air pollution control measures during autumn and winter seasons in "2+26" cities [J]. China Environmental Science, 2021,41(10):4484−4494.

[39] 罗悦函,赵天良,孟　凯,等.华北平原和山区城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 变化关系比较分析 [J]. 中国环境科学, 2021,41(9):3981−3989.
Luo Y H, Zhao T L, Meng K, et al. Comparative analysis of the relationship between $PM_{2.5}$ and O_3 in plain and mountainous cities in North China [J]. China Environmental Science, 2021,41(9):3981−3989.

[40] 白伟超,王晓琦,程水源,等.2019 年秋冬季京津冀与周边地区污染传输特征分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(9):4086−4099.
Bai W C, Wang X Q, Cheng S Y, et al. Pollution transport characteristics of Beijing−Tianjin−Hebei region and its surrounding areas in January 2019 [J]. China Environmental Science, 2022,42(9): 4086−4099.

[41] 徐　冉,张碧辉,安林昌,等.2000~2021 年中国沙尘传输路径特征及气象成因分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(9):4450−4458.
Xu R, Zhang B H, An L C, et al. Analysis of sand and dust storm transport paths characteristics and meteorological causes in China from 2000 to 2021 [J]. China Environmental Science, 2023,43(9): 4450−4458.

[42] 王　宁,陈　健,张缘园,等.2021 年中国北方首次沙尘天气的多源遥感分析 [J]. 中国环境科学, 2022,42(5):2002−2014.
Wang N, Chen J, Zhang Y Y, et al. Multi−source remote sensing analysis of the first sand and dust weather in Northern China in 2021 [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2002−2014.

[43] Gao T, Xu Y F, Bo Y H, et al. Synoptic characteristics of dust storms observed in Inner Mongolia and their influence on the downwind area (the Beijing–Tianjin Region) [J]. Meteorological Applications, 2007, 13(4):393−403.

[44] Si R R, Xin J Y, Zhang W Y, et al. Environmental and health benefits of establishing a coal banning area in the Beijing−Tianjin−Hebei region of China [J]. Atmospheric Environment, 2021,247:118191.

[45] Yu X H, Fan Y T, Kim J S, et al. Is ignorance bliss? Evaluating information awareness and life satisfaction through the lens of perceived air pollution: The case of Beijing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2024,371:123087.

[46] Zhao, X H, Cao Y M, Cheng Z. Perception matters: How air pollution influences life satisfaction in China [J]. Heliyon, 2024,10(11):e31927.

[47] 李雪妮,苏　杨,周绍杰.空气质量如何影响公众主观满意度?——基于中国民生调查微观数据的证据 [J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(5):127−136.
Li X N, Sun Y, Zhou S J. How does air quality affect the subjective satisfaction of the public?——Evidence based on microdata from China's livelihood survey [J]. China Population, Resources and Environment, 2020,30(5):127−136.

[48] Wang Y, Hu Y, Jiang S Y, et al. Distinguishing urban−rural difference in Chinese population exposure to ambient air pollutants [J]. Atmospheric Environment, 2024,334:120704.

[49] Shao S, Tian Z H, Fan M T. Do the rich have stronger willingness to pay for environmental protection? New evidence from a survey in China [J]. World Development, 2018,105:83−94.

[50] 刘倩倩,党云晓,张文忠,等.中国城市 $PM_{2.5}$ 污染对居民主观幸福感的影响及支付意愿研究 [J]. 地理科学, 2021,41(12):2096−2106.
Liu Q Q, Dang Y X, Zhang W Z, et al. Impact of $PM_{2.5}$ pollution on urban residents happiness and willingness−to−pay: A case study of urban China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2021,41(12):2096−2106.

[51] 姜蕴聪,杨元建,王　泓,等.2015~2018 年中国代表性城市 $PM_{2.5}$ 浓度的城乡差异 [J]. 中国环境科学, 2019,39(11):4552−4560.
Jiang Y C, Yang Y J, Wang H, et al. Urban−rural differences in $PM_{2.5}$ concentrations in the representative cities of China during 2015~2018 [J]. China Environmental Science, 2019,39(11):4552−4560.

[52] 刘倩楠,刘之光,尹　潞,等.我国成人户外体力活动与 $PM_{2.5}$ 的相关性研究 [J]. 中国循环杂志, 2018,33(10):1001−1005.
Liu Q N, Liu Z G, Yin L, et al. Association between outdoor physical activities and $PM_{2.5}$ in Chinese adults [J]. Chinese Circulation Journal, 2018,33(10):1001−1005.

作者简介：李梓阳(2001−),男,河北邯郸人,北京科技大学硕士研究生,主要研究方向为居民空气质量满意度.发表论文 1 篇.ziyangli200166@163.com.