

姜璐, 丁博文, 周学伟, 等. 青海高原西宁城镇社区家庭能耗直接碳排放研究 [J]. 地理科学, 2023, 43(1): 119-129. [Jiang Lu, Ding Bowenpeng, Zhou Xuewei et al. Household energy consumption and carbon emissions in Xining on Qinghai Plateau. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(1): 119-129.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.01.013

青海高原西宁城镇社区家庭能耗直接碳排放研究

姜璐^{1,2}, 丁博文³, 周学伟¹, 胡小康², 史培军^{1,2}

(1. 青海师范大学高原科学与可持续发展研究院, 青海 西宁 810016; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 选取青海高原城市西宁为研究对象, 开展家庭能源消费问卷入户调查, 建立高原城市家庭能源消费数据库 ($N=500$), 采用探索性空间数据分析方法, 总结分析家庭能耗碳排放的空间特征与驱动因素, 得出以下结论: ① 西宁市家庭人均能源消费量与人均能耗碳排放平均值分别为 10.57 kgce/d 和 6.11 kg/d, 取暖、厨房设备及热水器设备是家庭能耗及碳排放的主要来源; ② 西宁市人均家庭能源消费碳排放总体呈现出高值区 (HH)、低值区 (LL) 相对集聚, 而局部地区也存在高低值区 (HL) 和低高值区 (LH) 集聚现象, 其空间规律呈现明显的异质性; ③ 家庭收入、地理环境以及建筑特征等因素是人均家庭能源消费碳排放空间异质性形成的主要因素。

关键词: 碳排放; 家庭能耗; 空间异质性; 高海拔城市; 社区尺度

中图分类号: F129.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2023)01-0119-11

家庭能源消费是区域典型人地关系活动的形式, 亦是能源地理精细化研究的新趋向^[1-2]。2019 年, 家庭能源消费量贡献了全球 1/4 的能源消费量^[3]; 近 10 a 来, 中国家庭能源消费总量呈持续上升趋势, 约占全社会能源消费总量的 13% 左右^[4]。家庭能源消费产生了诸多环境和生态问题, 尤其是二氧化碳 (CO₂) 的大量排放^[5-6]; 2035 年英国家庭化石燃料和电力使用的二氧化碳排放量将比 2015 年增加 11%^[7]。为此, 国际组织和各国政府一致认为家庭作为能源消费的主体之一, 在碳减排中扮演着重要角色, 英国政府就将家庭能源消费视为实现碳预算减排目标的重要部分^[8]; 美国环保局则认为如果能大范围内提高家庭能源效率, 可以降低碳减排成本^[9]。

近年来, 国内外学者在关于城市家庭能耗及碳排放研究主要集中在家庭能源消费结构、模式以及影响因素等方面^[10]。① 家庭能源消费结构与模式, 在全国尺度上, 中国家庭能耗特征存在明显的南北差异, 北方地区的人均能源消费量明显高于南方^[11], 电力、取暖、天然气和液化石油气的消费占总能源

消费的近 90%^[12]。此外, 中国人均居民生活碳排放呈现出逐年上升的趋势^[13]。在区域尺度上, 河南省农村地区普遍存在“气+电”组合的烹饪能源模式, 同时农业收入对农村炊事能源阶梯有明显的正向影响^[14]; 荣培君等^[15]对开封市家庭生活用能及碳排放空间分布特征进行了探索。Jiang 等^[16]使用微观调研数据分析了青海省农区、牧区以及农牧交错区的家庭能源消费, 发现生计方式是影响家庭能耗碳排放的主因。② 探索家庭能耗与碳排放的影响因素。家庭能源消费特征主要受居民的消费水平、家庭规模、受教育程度、能源结构等因素影响^[11]。Qin 等^[17]选取北京市 5 个代表不同碳排放水平的社区发现, 较高的人口密度、混合土地利用模式、较好的公共交通可达性和就业住房平衡是影响北京市家庭碳排放的重要因素; 有研究表明西北地区人均家庭能耗 CO₂ 排放量高于东部地区, 且与人均收入、月平均气温和城市化水平有关^[18], 人均 GDP 的增长对能源消费有显著的正向影响^[19]。总体来说, 尽管国内外学者对家庭能源消耗碳排放方面的研究比较深入,

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(42001130)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (42001130).]

作者简介: 姜璐(1989—), 女, 青海海东人, 教授, 博士, 主要从事能源地理与区域可持续发展研究。E-mail: jianglu@bnu.edu.cn

通讯作者: 史培军。E-mail: spj@bnu.edu.cn

但研究区域主要集中于农村地区,相对忽视了城镇家庭能源消费空间研究的探讨。

实际上,城镇是环境政策实施的基本单元,也是碳减排的关键区域^[20-21]。当前中国正处于历史最大规模的城镇化进程中,预计到2030年,超过10亿人、近70%的中国人口将定居城镇,必将产生更多的生活能耗,对城镇推进碳中和战略造成长期压力^[1]。已有研究证实居民科学用能带来的年均节能潜力约为15%~20%^[22],可抵世界平均核电站发电量的1/3^[23]。为引导居民能源消费行为向节能方向转变,中国政府已采取了一系列“自上而下”的激励措施。但因微观数据匮乏,难以精准识别城镇家庭能耗特征及存在问题,使得其政策在居民中的实际反响并不明确^[11],迫切需要提升城镇家庭能耗情景的高精度阐释,以微观调查数据为基础,“自下而上”对城镇家庭用能情况进行汇总分析,刻画城镇家庭能耗动态特征。在研究尺度上,随着城镇人口持续流动,不同阶层家庭在城镇内部空间进行“分选”,家庭的人口构成、行为特征以及生活方式等都存在城镇内部尺度上的空间分异,也存在社区尺度上的社会空间分异,这些因素使得家庭活动对能源的消费和占用呈空间分异特征^[15]。因此,结合城市社区空间结构分析能更好地揭示城镇家庭能耗地域空间过程^[24]。

西宁市作为推动中国西部地区经济社会发展的重要枢纽,改革开放后,快速的城镇化引发了大量能源消费,产生了家庭能源消费不均衡等问题,进一步加剧了城市社会空间分化,能源供需矛盾已成为制约西宁市人地关系协调发展的重要限制因素。一方面,西宁市是青海省人口密度最高的地区,2020年常住人口占全省总人口的41%,但总面积仅占全省总面积的1%,城镇的人口与自然资源矛盾突出^[25]。另一方面,西宁市全域平均海拔为3130 m,冬季寒冷且低温期较长,取暖期长^[25]。当前,随着国家兰西城市群建设的深入,西宁市承载着代表国家西部地区推动能源革命的使命,亟需开展自然条件约束下城市社会空间结构与能源消费的耦合关系分析,挖掘节能潜力,促进能源消费升级。基于此,本文以西宁市为研究对象,通过大样本微观家庭能源消费调查,总结和分析西宁市社区家庭能源消费特征,揭示高海拔城镇社区家庭能源消费的空间分布规律,为高海拔城市的能源转型政策制定提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区域

青海省地处青藏高原东北部,西北高中间低,地形复杂多样,形成了独具特色的高海拔高原大陆性气候,日照时间长,空气稀薄,全省平均海拔3000 m以上。2020年,青海省城镇居民人均可支配收入为35506元,其能源消费总量为4063.01万tce^[26]。西宁市市区平均海拔2261 m,年平均气温5.5℃,夏季平均气温17~19℃,年降水量500 mm左右,蒸发量1364 mm。2020年西宁市城镇居民人均可支配收入为36959元,高于青海省城镇人均可支配收入。同年,西宁市综合能源消耗量为982.94万tce。西宁市总面积7606.75 km²,全市下辖5个区、2个县,即城东区、城中区、城西区、城北区、湟中区、湟源县、大通回族土族自治县。2020年西宁市常住人口为246.79万人,人口密度324人/km²,是全省人口密度最高的地区,城镇人口为194.06万人,占总人口的78.63%^[25]。

1.2 数据来源

本文对西宁市家庭能源消费数据进行整理测算,并对西宁市家庭能耗及碳排放空间分异特征进行刻画。家庭能耗数据主要来自2021年7—8月间以问卷调查和深度访谈的方式开展的实地调研,调研范围覆盖西宁市5区2县,按照人口密度采用区县分层+社区随机抽样^[27],首先在区县尺度上,根据各区县人口密度计算各区县抽样比例,之后在各个区县内进行城市社区样本的随机抽样,总样本设置依据式(1)所得,即在95%的置信区间内,样本数据代表总体的最大误差是±2.83%,误差可接受范围±5%^[28-29]。最终,实际发放509份问卷,回收有效问卷500份,有效率为99%。

$$\theta = \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{p \times (1-p)}{n}} \quad (1)$$

式中, $Z=1.96$ (95%的置信区间), $p=0.5$, θ 为样本误差, n 为所有测试样本数, α 为分位数。

调查问卷包括受访者家庭基本信息(人口、年龄、性别、受教育程度、家庭年收入)、住房以及家庭能源消费情况等。本文的家庭能源消费量来源主要包括厨房设备、家用电器、取暖设备等能源消费以及照明设备能源消费,主要从问卷中获取家庭直接能耗信息和参数。本文将获取的500份家庭问卷

点数据进行了可视化, 其中, 使用的地图矢量数据为西宁市行政区矢量图-WGS84 坐标系西宁市行政地图(审图号 GS[2019]1822), 运用 ArcMap 10.2 软件进行制作, 问卷样本点如图 1 所示(人口密度图用等差分级)。

1.3 样本特征

从个人特征来看, 男女比例为 54:46, 受访者平均年龄为 42.7 岁, 其中, 46~60 岁年龄段受访者居多, 占 30.2%; 从受访者的社会经济特征进行分析, 在业人员占比较高(67.8%), 高中(大专)及以上的人员比例达 62.0%, 其中, 大学本科(大专)及以上占比为 40.0%, 家庭年总收入在 10 万元以下者居多, 占 58.9%。与西宁市第七次人口普查数据对比分析发现, 除受访者受教育程度以外, 本研究样本的家庭收入、男女比例等社会人口特征与“七普”数据基本一致^[30], 样本数据具有一定代表性。

2 研究方法

2.1 家庭能源消耗碳排放估算

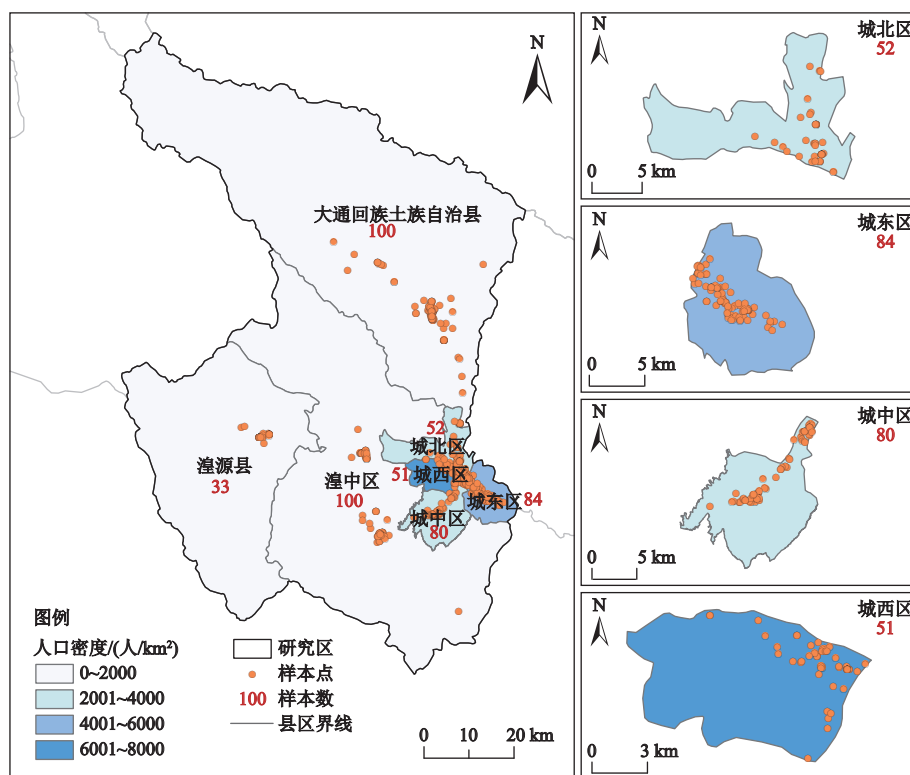
调研样本的家庭消耗能源类别主要为电力、天

然气、煤气等。研究采取 IPCC 温室气体清单指南的核算方法估算能耗碳排放, 公式如下:

$$C_T = \sum E_i \times N_i \times C_i \times O_i \times \frac{44}{12} \quad (2)$$

式中, C_T 表示总的能源消耗碳排放量, E_i 表示第 i 种能源的消耗量, N_i 表示第 i 种能源的净发热值, C_i 表示第 i 种能源的含碳量, O_i 表示第 i 种能源的氧化率, i 指代电力、天然气、煤气等能源类别。

计算电力相关设备能耗及碳排放时, 采用电力碳排放因子 $0.8922 \text{ tCO}_2/(\text{kW} \cdot \text{h})$ (2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子的西北区域部分)^[31]。在计算热水器和厨房设备的能耗碳排放量时, 天然气、煤气等使用的碳排放系数来源于 Shan 等^[32], 煤炭碳排放系数、能源平均低位发热值、氧化率等其他碳排放参数来源于中国家庭能源消费研究报告^[11]。由于太阳能等能源的使用本身不产生碳排放, 因此, 将使用以太阳能作为能源的热水器等家用设备的碳排放计为零。此次研究的具体家用能耗设备采用的计算方法及碳排放相关系数, 如表 1 和表 2 所示。



人口密度为 2020 年西宁市人口密度数据, 来自参考文献 [25], 下同

图 1 2021 年西宁市家庭能耗调查样本空间分布

Fig.1 Distribution of sample point of household energy consumption in Xining City in 2021

表 1 家庭能耗直接碳排放分设备计算方法

Table 1 The method of household energy consumption and direct carbon emission by equipment

能耗项	计算公式	说明
厨房设备	$Energy_{\text{厨房设备}} = \text{单位小时能耗} \times \text{使用时间}$	厨房设备主要计算灶头设备的能耗量, 共分为天然管道气灶、罐装煤气灶、电磁炉、电灶、其他等
电冰箱、洗衣机、电视机等大型家电	$Energy_{\text{大型家电}} = \text{设备功率} \times \text{使用时间} \times \text{能效标识}$	大型家电设备功率根据洗衣机的体积、冰箱容积及电视机屏幕尺寸叠加购物市场等数据平均值确定
取暖设备	$Energy_{\text{非电力供暖设备}} = \text{单位面积负荷} \times \text{住房使用面积} \times \text{取暖天数}$	根据调研实际情况, 冬季取暖主要方式包括烧煤、天然气等
热水器	$Energy_{\text{热水器}} = \text{设备功率} \times \text{工作时间} \times \text{能效标识} \times \text{工作频率}$	根据调研实际情况, 将使用太阳能、太阳能加电及电力为主要能源的热水器计为储水式热水器, 其他计为即热式热水器
照明设备	$Energy_{\text{照明设备}} = \text{设备功率} \times \text{使用时间}$	调研数据中主要有荧光灯(光管)、节能灯(LED)、普通白炽灯3类照明设备
总和	$E_T = \sum Energy_j'$	$Energy_j'$ 为 $Energy_j$ 经相应能源折标系数化为标准煤后的结果, j 为厨房设备、大型家电、热水器、照明设备等

注: 部分家庭能效系数等信息在采集时为不关注能效系数, 通过相应使用频率的相似样本众数确定其样本能效系数。

表 2 家庭能耗分能源类别碳排放参数

Table 2 Carbon emission coefficient of household energy consumption by energy category

能源类别	平均低位发热	单位热值含碳量	氧化率/%	CO ₂ 排放系数
煤气	1.67	13.58	0.98	0.8162
天然气	5.14	15.32	0.99	2.8603
煤炭	2.09	26.32	0.90	1.8194

注: 煤气和天然气的平均低位发热以气体单位立方米计算, 单位为PJ/10⁸m³, 二者的二氧化碳排放系数单位为kg CO₂/m³; 煤炭的平均低位发热以固体单位千克计算, 单位为PJ/10⁸kg, 其二氧化碳排放系数单位为kg CO₂/kg; 单位热值含碳量的单位为吨碳/吨焦(TC/TJ)。

2.2 空间自相关分析

本研究采用空间自相关分析西宁市碳排放的空间特征。空间自相关方法包括全局自相关和局域自相关。全局自相关在于描述某现象的整体分布状况, 判断此现象在空间是否有聚集特性存在; 而局域自相关是从部分区域上描述地理现象或属性的空间特征, 能够推算出聚集地的范围。文中采用全局自相关的莫兰指数和局部自相关的 LISA 聚集地图表征西宁市家庭能源消费直接碳排放之间的关系。由于调研数据中包括样本对应的地理位置信息, 通过百度地图等相关软件将地理位置信息转换为经纬度坐标, 再将经纬度数据导入 ArcMap 10.2 软件中进行可视化处理。

2.2.1 全局空间自相关

全局自相关莫兰指数可以描述区域属性值的分布是否为聚集、离散或随机分布。莫兰指数 Moran's I , 计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (x_j - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中, W_{ij} 为空间权重矩阵, n 为样本的数量, x_i 表示 i 样本的碳排放强度, x_j 表示 j 样本的碳排放强度, $i \neq j$, $\bar{x}$ 表示碳排放强度的均值, 一般来说, I 的取值范围是 $[-1, 1]$, $I > 0$ 证明为正相关, $I < 0$ 证明为负相关, 同时其绝对值越接近于 1, 表明相关性越强。通过 Z 值对 Moran's I 进行检验。

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (4)$$

式中, $E(I)$ 为数学期望, $E(I) = \frac{1}{N-1}$, $\text{Var}(I)$ 为变异系数。

同时, 利用全局 G 系数我们可以明确样本的聚集是高值聚集还是低值聚集, 全局 G 系数计算公式如下:

$$G(d) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}(d) x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j} \quad (5)$$

$$Z = \frac{G(d) - E(d)}{\sqrt{\text{Var}[G(d)]}} \quad (6)$$

式中, d 为样本间距离, $W_{ij}(d)$ 为 i, j 点的距离权重, $Z > 0$ 为高值聚集, 反之则为低值聚集。

2.2.2 局部空间自相关

局部自相关的 LISA 聚集图可以反映出样本的聚集程度。散点图对数据聚集类型划分为 HH(高高)、HL(高低)、LH(低高)和 LL(低低)4 种类型,其中,HH(LL)集聚型表示相邻点位间存在正的空间自相关,且存在高(低)碳排放强度空间集聚效应,LH(HL)则表示相邻样本间存在负的空间自相关。通过将碳排放矢量文件导入 Geoda 软件,建立 k -近邻空间权重矩阵,使用软件对样本碳排放数据做局部自相关分析,在 LISA 集聚地图中将高高(HH),低低(LL),高低(HL),低高(LH)聚集的样本分别选中并导出矢量文件,加载入 ArcMap 10.2 软件中查看并对比其分布特征。

3 结果分析

3.1 能源消费结构

目前家庭尺度的基础能源消费数据仍处于缺失状态,本文试图通过建立标准化的家庭能源消费数据调查方法^[33],开展家庭能源消费研究的跨区域集成分析,进而增加研究的增值效应。为此,本文在家庭能耗结构与驱动机制 2 个比较的核心维度下,建立起观察的参照系,将西宁、广州不同经济发展水平的城市纳入比较的视野,分析家庭能源消费特征及转型进程,讨论不同城市能源转型与治理能力,以及文化和经济对家庭能源消费的影响。本文所列能耗数据均已折算为千克标准煤(kgce)。

根据西宁市家庭能源消费数据显示(表 3),西宁市人均能耗为 10.57 kgce/d,户均能耗为 33.14 kgce/d,人均能耗是全球超级城市经济体广州(0.58 kgce/d)的 18 倍^[34-35]。从家庭使用设备分类来看,取暖、厨房设备和热水器的能耗排在前三位。取暖能耗位居第一,占总能耗的 93.99%,其次是厨房设备和热水器,分别占 2.59% 和 2.08%。在广州家庭能源消费结构中,热水器占比较高,达到 37.79%,其

次为厨房设备(36.10%)和制冷(20.51%)。对比两市家庭能源消费结构发现,受地理环境、生活方式以及经济水平差异影响,家庭能耗呈现典型的南北空间差异^[33]。从变异系数来看,变异系数从大到小依次排列是:大型家电>热水器>厨房设备>取暖>照明,进一步说明了不同能耗设备的变异性不同,使家庭间的用能碳排放也存在相应差异。

从家庭能耗种类来看,西宁市居民家庭用能以电力为主,天然气次之,使用比例最低的是煤炭。电力、天然气能耗占总能耗比例分别为 47.05% 和 37.54%。同时,不同区域的能源消费结构和数量也有所不同,例如西宁市炊事能源以天然气和电力为主,显著区别于广州以液化石油气为主的炊事能源结构,这主要得益于西宁市市政设施不断完善,大部分地区铺设了天然气管道,增加了西宁市居民使用天然气的比例。值得关注的是,西宁市外围部分家庭依然依赖煤炭来取暖和炊事。此外,西宁市大型家电设备的能耗量占比低于广州,调研发现是因为广州家庭在购买家用电器时比较关注能效,更愿意购买高能效产品,进而减少了家庭能耗量。

3.2 碳排放空间分布特征

3.2.1 家庭人均能耗碳排放空间格局

通过将问卷收集到的具体地址转换成经纬度坐标,并导入 ArcMap 10.2 软件,与计算出来的家庭人均碳排放数据进行可视化处理,得到西宁市人均家庭生活用能碳排放分布图(人均碳排放图用等比分级),以探究人均家庭生活用能碳排放的空间分布特征(图 2)。西宁市人均碳排放的高值样本的聚集位置有比较明显的特征:高值样本主要聚集在西宁市主城区,包括城北区、城西区、城东区、城中区等,在湟中区、大通县和湟源县也有少量分布,这与西宁市各区县近几年的经济水平相吻合。人均碳排放低值点在每个行政区均有分布,除湟源县集中分布之外,其余县、区出现频率也较高,但比较分散。

表 3 基于家庭能耗设备分类的西宁市家庭能源消费

Table 3 Household energy consumption by equipment in Xining

能耗类型	占总能耗比例/%	均值/(kgce/d)	标准差	变异系数	极大值/(kgce/d)	极小值/(kgce/d)
厨房设备	2.59	0.7593	0.7080	0.9324	5.8320	0
热水器	2.08	0.6116	1.1100	1.8148	4.9600	0
照明	0.36	0.1069	0.1179	0.1020	1.0969	0.0323
大型家电	0.98	0.0960	2.6015	27.1037	0.1741	0
取暖	93.99	31.3697	4.8093	0.1533	34.8552	17.4276
总和	100.00	33.1356	6.5242	0.1969	123.4228	17.4602

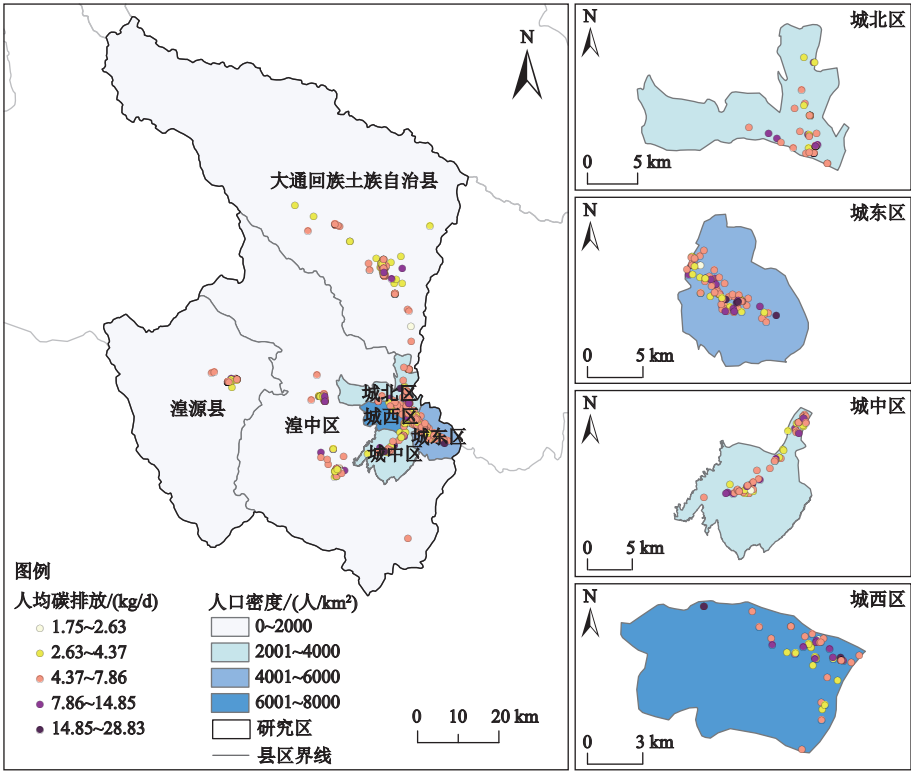


图 2 2021 年西宁市家庭人均碳排放空间分布

Fig.2 Spatial distribution of household carbon emissions in Xining City in 2021

3.2.2 家庭能耗碳排放全局差异分析

根据 Moran's I 计算公式计算了样本数据碳排放的全局自相关莫兰指数,并根据 Z 值进行了检验。如表 4 所示,全局和局部的莫兰指数均大于 0,且全局自相关 Z 值大于 99% 置信区间临界值 2.58,拒绝随机分布的原假设,通过显著性检验,说明样本数据的碳排放不是随机分布的,具有高值与高值邻近,低值与低值邻近的特征。再通过在 ArcMap 10.2 中计算样本数据的全局 Getis-Ord General G 值,结果显示观测值大于期望值,呈现高聚集的特征,且在 90% 的置信水平上显著,说明西宁市碳排放存在空间上的集聚热点区。

3.2.3 家庭能耗碳排放局部差异分析

1) 人均碳排放局部差异。如图 3 所示,西宁市家庭人均碳排放高值点集聚特征明显,主要分布在

西宁市主城区以及大通县,也是西宁市经济发展较好的区域,这一结论也与相关研究得出的人均碳排放的差异可能与区域经济发展水平相关相符合。从统计数据分析得出:家庭人均碳排放高高聚集样本(HH)特征表现为住房面积较大,常住人口少。住房面积大于 70 m^2 的占 81.7%,家庭人数为 1~2 人的家庭占 98.2%。高值被低值包围的高低集聚(HL)样本特征也十分明显,全部在大通县和湟中区,其住房面积大于 70 m^2 的占 88.1%,面积超过 100 m^2 的家庭占 76.4%。低值被高值包围的低高集聚(LH)样本分布在西宁市市区,家庭常住人口数超过 4 人的占 92.6%。低低集聚(LL)样本主要分布在大通县和湟中区,表现为家庭常住人口数较多,其常住人口数均超过 4 人,且均远离市中心区。我们发现,人均碳排放的聚集特征可能与家庭的住房面积以及

表 4 西宁市家庭人均碳排放的 Moran's I 和 General G

Table 4 Estimation of Moran's I and General G for household carbon emissions in Xining City

	Moran's I	$Z(I)$	$P(I)$	$G(d)$	$E(d)$	$Z(d)$	$P(d)$
人均能耗碳排放	0.010568	4.491003	0.000007	0.423886	0.407295	1.829309	0.067353

注: $Z(I)$ 为莫兰指数 Z 得分, $P(I)$ 为莫兰指数检验概率, $G(d)$ 为 General G 观测值, $E(d)$ 为 General G 期望值, $Z(d)$ 为 General G 的 Z 得分, $P(d)$ 为 General G 检验概率。 Z 得分和 P 值可帮助量度统计显著性,用来判断是否拒绝零假设,即是否随机分布。

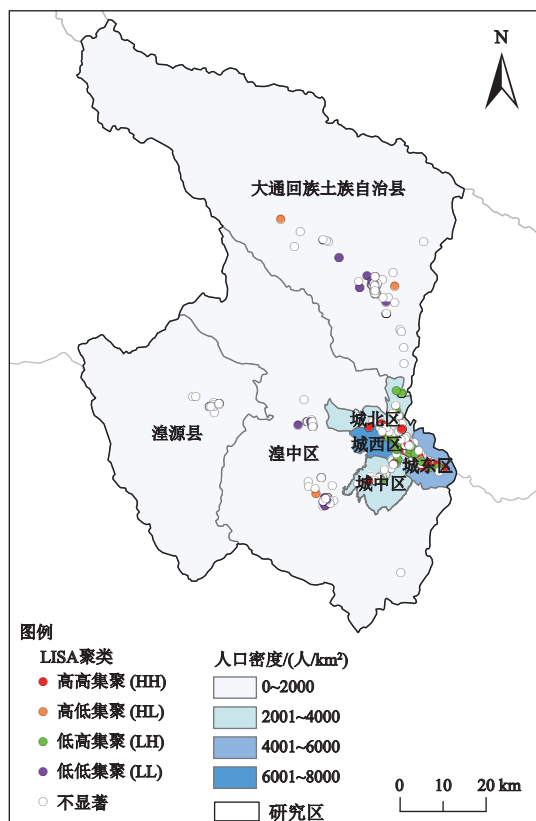


图3 2021年西宁市家庭能源人均碳排放 LISA 聚类

Fig.3 LISA cluster of household carbon emissions in Xining in 2021

常住人口数相关,但需要根据碳排放的主要组成部分进一步探究潜在驱动因素。

2)取暖、厨房炊事设备能耗碳排放局部差异。西宁市家庭冬季取暖所产生的碳排放占总量的93.99%,分析取暖所产生碳排放的分布特征,能够进一步探究西宁市居民能耗碳排放的空间驱动因素。如图4所示,人均取暖碳排放的高值样本(>7.56 kg/d),除湟源县外,在西宁市每个行政区内均有分布,但高高聚集样本(HH)主要分布在围绕西宁市城西区 and 城东区的市中心区,城北区和城中区及其湟源县也有少量分布;低值样本(<2.63 kg/d)在西宁市每个行政区也都有分布,高值被低值包围的高低聚集(HL)样本与低低聚集样本(LL)空间分布情况相类似,主要分布在主城区(城西区、城北区、城东区 and 城中区)和湟中区。取暖及厨房炊事设备能耗碳排放 HH 区中,房屋面积大于 70 m² 的占 83.5%, 100 m² 以上的占 36.3%; LL 区中房屋面积大于 70 m² 的占 76.4%。值得关注的是,受气候和海拔自然因素影响,居民取暖时间较长,使得取暖能源类型对于碳排放量和空间集聚特征具有较大影响。

3.2.4 家庭能耗碳排放空间差异的驱动因素

1)能耗结构。在家庭能耗结构中,用于取暖的能耗占总能耗的 93.99%。中国以“秦岭-淮河”线划分集中供热区域,西宁市位于青藏高原边缘地区,属于冬季供暖区,集中供暖时长为 6 个月(182 d),时长与东北三省一致,但比华北地区多 1~2 个月,使得用于取暖能耗量占比较高,所产生的碳排放也较高。值得关注的是,相较于其他北方城市,西宁城镇家庭自取暖占比较高,60% 位于西宁城区的周边区县并未实现集中供暖的全覆盖,部分家庭仍使用煤炭取暖。根据实地调研,我们认为可能存在 3 方面原因,一是部分受访者认为集中供暖温度不能满足其热舒适度需求,二是受访者认为集中供暖费用高,尽管部分居民家里已通了天然气可用于取暖,但由于天然气取暖的费用是烧煤取暖的两倍,成本较高,居民仍然依赖烧煤的方式。三是部分事业单位家属区因建成时间较长,而未集中供暖。除了取暖用能外,热水器能耗占 2.59% 和 2.08%,这是因为西宁的年平均气温仅为 5.5℃,昼夜温差较大,使得家庭对于热水的需求较高,部分家庭夏季早晚也需要用热水洗漱。

2)能耗量与碳排放。家庭年收入决定了家庭能耗量。研究表明,家庭人均年收入超过 3 万元的样本在人均碳排放高高聚集(HH)样本中数量占比较高,达到了 67.3%,而家庭人均年收入低于 1.5 万元的仅占 14.5%。此外,实地访谈发现,收入增长之后,居民会使用更多的耗能产品,如洗衣机,热水器等,用以满足更高的生活需求。综上可以认为,收入差距是产生家庭能耗碳排放空间格局差异的主因,这一结果与现有研究结论基本一致^[36]。

住房面积显著影响家庭能耗量。人均碳排放高高聚集的样本中,住房面积高于 70 m² 的样本数量多于住房面积较小的样本,70 m² 以上的样本占比达到 81.70%, 50 m² 以下样本仅占比 12.60%。已有研究也表明:住宅面积越大,供热的需求越高,耗电设备也相应增加,因而能耗量越高^[17,19]。本文进一步分析发现,住房地理位置也影响人均碳排放量,如居住地位于大通县的样本人均碳排放水平最低;在人均碳排放高高聚集样本中,大通县样本数量仅为城东区样本数量的 1/16,说明西宁城区外县域人均碳排放水平低于城区内。

建筑特征也对家庭能耗量及碳排放产生影响,在人均碳排放高值聚集区(HH)的样本中,与房屋

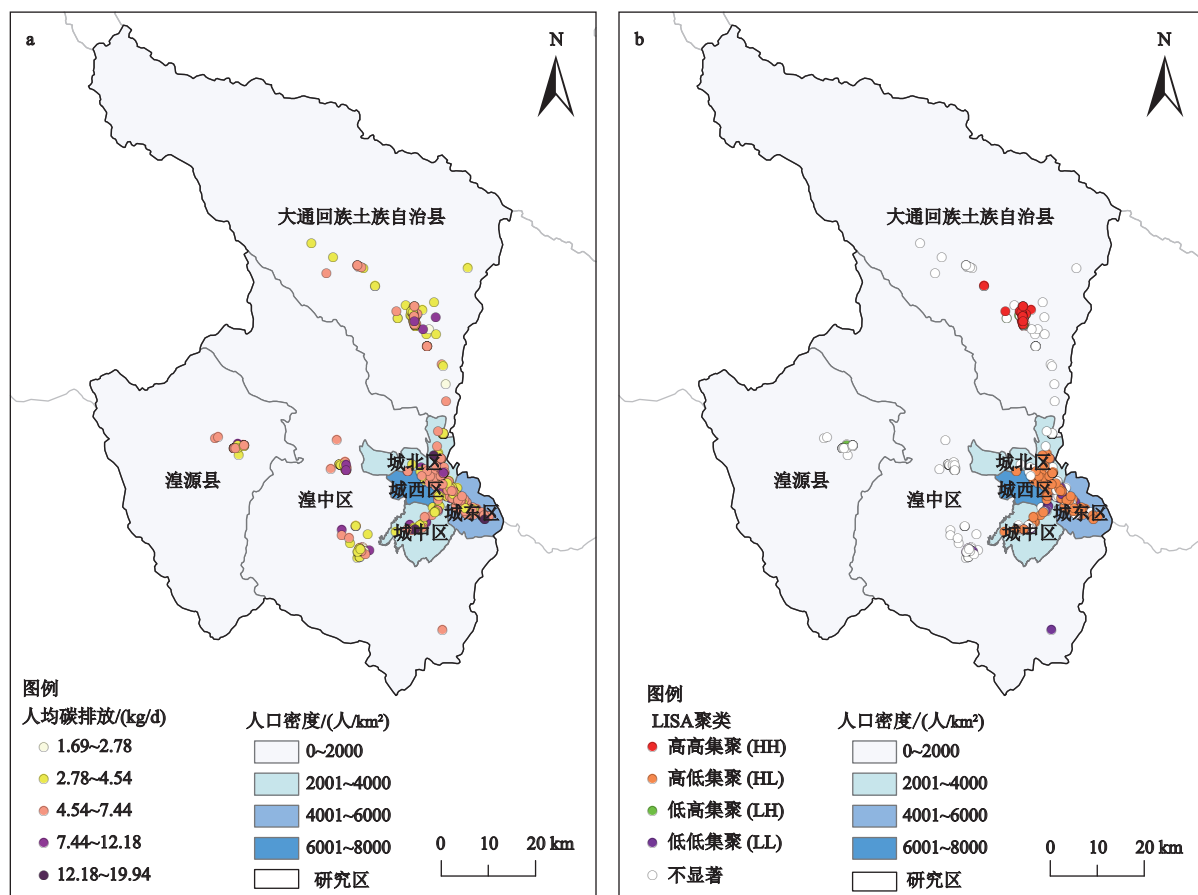


图 4 2021 年西宁市取暖人均每日碳排放(a)和取暖碳排放 LISA 聚类图(b)

Fig.4 The per capita daily household carbon emissions (a) and LISA cluster of heating (b) in Xining City in 2021

建造时间(即楼龄)关联的特征十分明显。从统计数据上来看,人均碳排放高高聚集样本中,建造 10 a 以上样本占比 60.0%,其中 20 a 及以上样本和 5 a 以下样本数量相同,占比均为 12.7%。不同年代建造房屋的建设标准不同,可能影响建筑的能耗水平,在新标准下的房屋建筑会比旧建造标准下的房屋更加节能。同时,不同的户型和房屋类型也对家庭能耗产生影响。事实上,2000 年西宁市的住宅面积已达 2 417 万 m^2 ,但住宅建筑较少采用节能措施,大多属于高能耗建筑^[37],总体能耗偏高。

4 结论与讨论

1)西宁市家庭人均能耗量与人均能耗碳排放分别为 10.57 kgce/d 和 6.11 kg/d,取暖、厨房设备及热水器设备是家庭能耗碳排放的主要来源。与开展了同样实地调查工作的广州对比发现,西宁的人均家庭能耗是广州人均能耗的 18 倍,这主要是因为取暖能耗占西宁市家庭总能耗的 93.99%,西宁

平均海拔超过 3 000 m,且低温期较长,居民取暖期也长,使得用于取暖的总能耗量较多。而广州位于华南地区,能耗占比最高的分别是热水器(37.79%)和制冷(20.51%),这是因为广州全年平均气温为 15.2~28.9℃,空气湿度高(79%),使得用于洗澡和室内制冷的能耗较多。可见,在中国不同区域的城市家庭人均能耗与碳排放上存在明显的结构和数量差异。

2)西宁市人均家庭能耗碳排放存在较为明显的空间异质性。碳排放的高值聚集样本本区主要表现为家庭常住人口少,住房面积较大的家庭。低值聚集样本本区主要分布在大通县和湟中区,表现为家庭常住人口数较多,且均远离市中心区。同时,西宁市人均家庭能源消费碳排放总体呈现出高值区(HH)、低值区(LL)相对集聚现象,而局部地区也存在高、低值区(HL)和低、高值区(LH)集聚现象,而对广州而言,除住房面积和常住人口外,本地户籍也对人均家庭能源消费空间分布也有很大影响,这说明人

均家庭能源消费碳排放是一个复杂的问题。

3)家庭收入、地理环境以及建筑特征因素是影响西宁市人均家庭能耗碳排放空间异质性形成的主要驱动力。其中,家庭收入和建筑特征是家庭能耗量和碳排放空间异质性的主要因素,而地理环境则是西宁市家庭能耗结构的主要决定因素,与之不同的是广州的饮食习惯和生活方式对于人均家庭能耗碳排放空间异质性具有显著的驱动作用。未来伴随着居民收入的整体提高,对生活品质的追求,家庭能源消费需求还将进一步增长,尤其在北方城市冬季取暖和厨房设备需求等方面,因此关于家庭能耗消费及碳排放的研究需要重点关注。

当前,人民对于美好生活需要的不断提高使得家庭对能源的需求持续增加,进而对区域实现“碳中和”目标构成挑战。结合本文研究结论,建议从宏观和微观2个层面进行能源政策优化,以改善家庭能源消费结构,减少家庭能耗碳排放。在宏观能源政策层面,青海省太阳能资源丰富,风能可开发量可观。通过技术引领、机制创新,把资源禀赋转化为当地的发展优势,借助建设国家清洁能源产业高地的契机,优化城镇基础能源设施建设,保障城镇居民清洁能源供应。在微观技术改造层面,考虑到由于海拔、气候等因素,城市居民对冬季取暖需求增长的压力,建议进行建筑“绿色化”节能改造,同时利用太阳能和天然气代替原有的煤炭取暖,加强炊事、热水器等领域节能设备推广,引导家庭向太阳能、天然气等新能源转型,促进清洁能源消费结构占比稳步提高;此外,鉴于建筑类型对家庭能耗的影响显著,应提高建筑能效和新增建筑能耗的低碳标准,并推动既有建筑向低碳建筑转型。

参考文献(References):

- [1] 姜璐,黄耿志,谢惠春,等.空间尺度视角下的家庭能源消费研究进展与展望[J].*地理科学进展*,2021,40(10):1788-1798.[Jiang Lu, Huang Gengzhi, Xie Huichun et al. A review of household energy consumption research from the perspective of spatial scale. *Progress in Geography*, 2021, 40(10): 1788-1798.]
- [2] Calvert K. From 'energy geography' to 'energy geographies' Perspectives on a fertile academic borderland[J]. *Progress in Human Geography*, 2016, 40(1): 105-125.
- [3] IEA (International Energy Agency). Explore energy data by category, indicator, country or region 2019[N/OL]. 2022-03-09. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=TFC-SharesBySector>.
- [4] 国家统计局. 国家统计年鉴[DB/OL]. 2020. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>. [National Bureau of Statistics. China statistical yearbook. 2020. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>.]
- [5] Mi Z, Zheng J, Meng J et al. Economic development and converging household carbon footprints in China[J]. *Nature Sustainability*, 2020: 1-9.
- [6] Shen G, Ru M, Du W et al. Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1-8.
- [7] LSE (The London School of Economics and Political Science). Why are household energy efficiency measures important for tackling climate change? [N/OL]. 2022-03-09. <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/explainers/why-are-household-energy-efficiency-measures-important-for-tackling-climate-change/>.
- [8] UK Government (Department for Business, Energy & Industrial Strategy). Energy follow up survey: Household energy consumption & affordability [N/OL]. 2022-03-09. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1018725/efus-Household-Energy-Consumption-Affordability.pdf.
- [9] EIA (U S Energy Information Administration). Assumptions to AEO2022 [N/OL]. 2022-03-09. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions>.
- [10] Han X, Wei C. Household energy consumption: State of the art, research gaps, and future prospects[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(8): 12479-12504.
- [11] 郑新业, 魏楚, 虞义华, 等. 中国家庭能源消费研究报告(2016)[M]. 北京: 科学出版社, 2017. [Zheng Xinye, Wei Chu, Yu Yihua et al. China household energy consumption research report (2016). Beijing: Science Press, 2017.]
- [12] 刘子兰, 姚健. 中国居民家庭能源消费研究: 基于LA-AIDS模型[J]. 湖南师范大学社会科学学报, 2020, 49(1): 78-85. [Liu Zilan, Yao Jian. Household energy consumption in China: An application of the LA-AIDS Model. *Journal of Social Science of Hunan Normal University*, 2020, 49(1): 78-85.]
- [13] 曲建升, 刘莉娜, 曾静静, 等. 基于入户调查数据的中国居民生活碳排放评估[J]. 科学通报, 2018, 63(Z1): 547-557. [Qu Jian-sheng, Liu Lina, Zeng Jingjing et al. Household CO₂ emissions: An assessment based a large sample survey in China. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(Z1): 547-557.]
- [14] Zi C, Qian M, Baozhong G. The consumption patterns and determining factors of rural household energy: A case study of Henan Province in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 146: 111142.
- [15] 荣培君, 张丽君, 杨群涛, 等. 中小城市家庭生活用碳排放空间分异——以开封市为例[J]. 地理研究, 2016, 35(8): 1495-1509. [Rong Peijun, Zhang Lijun, Yang Quntao et al. Spatial differentiation patterns of carbon emissions from residential energy consumption in small and medium-sized cities: A case study of Kaifeng. *Geographical Research*, 2016, 35(8): 1495-

- 1509.]
- [16] Jiang L, Xing R, Chen X et al. A survey-based investigation of greenhouse gas and pollutant emissions from household energy consumption in the Qinghai-Tibet Plateau of China[J]. *Energy and Buildings*, 2021, 235: 110753.
- [17] Qin B, Han S S. Planning parameters and household carbon emission: Evidence from high-and low-carbon neighborhoods in Beijing[J]. *Habitat International*, 2013, 37: 52-60.
- [18] Li J, Huang X, Yang H et al. Situation and determinants of household carbon emissions in Northwest China[J]. *Habitat International*, 2016, 51: 178-187.
- [19] Wu S, Zheng X, Wei C. Measurement of inequality using household energy consumption data in rural China[J]. *Nature Energy*, 2017, 2(10): 795-803.
- [20] Kammen D, Sunter D. City-integrated renewable energy for urban sustainability[J]. *Science*, 2016, 352(6288): 922-928.
- [21] 杜祥琬. 城市引领推动中国能源转型[J]. *中国电力企业管理*, 2019(13): 10-11. [Du Xiangwan. Cities lead the way in China's energy transition. *China Power Enterprise Management*, 2019(13): 10-11.]
- [22] Shove E, Walker G. Governing transitions in the sustainability of everyday life[J]. *Research Policy*, 2010, 39: 471-476.
- [23] Nadimi, Reza, and Koji Tokimatsu. Modeling of quality of life in terms of energy and electricity consumption[J]. *Applied Energy*, 2018, 212: 1282-1294.
- [24] Reid, Louise, Philip Sutton et al. Theorizing the meso level: The household as a crucible of pro-environmental behaviour[J]. *Progress in Human Geography*, 2010, 34(3): 309-327.
- [25] 西宁市统计局. 西宁年统计年鉴[DB/OL]. 2000, 2001. [2021-11-26]. https://tjj.xining.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/tjxx/gjnj/202111/t20211126_159614.html. [Xining Statistical Bureau. Xining statistical yearbook. 2000, 2001. 2021-11-26. https://tjj.xining.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/tjxx/gjnj/202111/t20211126_159614.html.]
- [26] 青海省统计局. 青海省统计年鉴[DB/OL]. 2020. [Qinghai Statistical Bureau. Qinghai statistical yearbook. 2020. <http://tjj.qinghai.gov.cn/nj/2020/indexch.htm>.]
- [27] 姜璐 余露, 薛冰, 等. 青海省家庭能源消费结构地域特征[J]. *经济地理*, 2019, 39(8): 146-152+176. [Jiang Lu, Yu Lu, Xue Bing. Regional characteristics of household energy consumption structure in Qinghai Province. *Economic Geography*, 2019, 39(8): 146-152+176.]
- [28] Jiang L, Xue B, Xing R et al. Rural household energy consumption of farmers and herders in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Energy*, 2020, 192: 116649.
- [29] Jiang L, Yu L, Xue B et al. Who is energy poor? Evidence from the least developed regions in China[J]. *Energy Policy*, 2020, 137: 111122.
- [30] 西宁市统计局. 西宁市第七次全国人口普查公报[EB/OL]. 2021. <https://tjj.xining.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/tjxx/tjgb/>. [Xining Statistical Bureau. Communiqué of the Seventh National Census of Xining City. 2021. <https://tjj.xining.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/tjxx/tjgb/>.]
- [31] 国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会. GB/T 2589-2020综合能耗计算通则[EB/OL]. 2020. <http://www.gb688.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=53D1440B68E6D50B8BA0CCAB619B6B3E>. [State Administration for Market Regulation and Standardization Administration. GB/T 2589-2020 General rules for the calculation of comprehensive energy consumption. 2020. <http://www.gb688.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=53D1440B68E6D50B8BA0CCAB619B6B3E>.]
- [32] Shan Y, Guan D, Zheng H et al. China CO₂ emission accounts 1997—2015[J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 1-14.
- [33] 姜璐, 薛冰, 刘惠玉. 家庭能源消费的调查方法及实证研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(7): 885-892. [Jiang Lu, Xue Bing, Liu Huiyu. Quantifying energy consumption in household surveys and empirical research. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(7): 885-892.]
- [34] Jiang L, Ding B, Shi X et al. Household energy consumption patterns and carbon emissions for the megacities —Evidence from Guangzhou, China[J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2731.
- [35] Jiang L, Shi X, Wu S et al. What factors affect household energy consumption in mega-cities? A case study of Guangzhou, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022: 132388.
- [36] 张云辉, 郝时雨. 收入差距与经济集聚对碳排放影响的时空分析[J]. *软科学*, 2022: 1-11. [Zhang Yunhui, Hao Shiyu. Spatiotemporal analysis of the impact of income gap and economic agglomeration on carbon emissions. *Soft Science*, 2022: 1-11.]
- [37] Yu L, Wu S, Jiang L et al. Do more efficient buildings lead to lower household energy consumption for cooling? Evidence from Guangzhou, China[J]. *Energy Policy*, 2022, 168: 113119.

Household energy consumption and carbon emissions in Xining on Qinghai Plateau

Jiang Lu^{1,2}, Ding Bowenpeng³, Zhou Xuewei¹, Hu Xiaokang², Shi Peijun^{1,2}

(1. *Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810016, Qinghai, China*; 2. *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 3. *College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: Chinese cities need to advance sustainable energy consumption and ensure carbon emission peak and carbon neutrality. The research topic of this paper is the relationship between urban growth in a Chinese plateau city and the factors driving households to consume different kinds of household energy and their carbon emissions. We select Xining, a plateau city in Qinghai, as the research object, conduct household energy consumption questionnaire household surveys, establish a plateau city household energy consumption database ($N=500$), and use spatial data analysis methods to analyze household energy consumption and carbon emissions. We found that: 1) The per capita energy consumption and per capita carbon emissions of households in Xining, a plateau city, are 10.57 kgce/d and 6.11 kg/d, respectively, heating, kitchen equipment, and water heater equipment are the main sources. What is more, the per capita energy consumption of Xining is 18 times that of Guangzhou (0.58 kgce/d), a global super city economy. However, the proportion of energy consumption of large household appliances in Xining is lower than that in Guangzhou, because Guangzhou households pay more attention to energy efficiency when purchasing household appliances and are more willing to buy energy-efficient products; 2) The carbon emission per capita household energy consumption in Xining City generally shows a relative concentration of high-value areas (HH) and low-value areas (LL), and there are also high and low-value areas in some areas. high and low-value areas (HL) and low- and high-value areas (LH) agglomeration phenomenon and its spatial law present obvious heterogeneity; 3) Factors such as household income, geographical environment, and building characteristics are the formation of spatial heterogeneity of per capita household energy consumption carbon emissions. We observe the diversity of energy transition by comparing the patterns of carbon emission from household energy consumption within the city. Then, a comprehensive picture of the diversity underlying the energy transition applied across cases can be distilled.

Key words: carbon emission; household energy consumption; spatial heterogeneity; high altitude city; community scale