

中国城市气候变化适应性评价

裴孝东^{1,2} 吴静^{1,2,*} 薛俊波^{1,2} 赵金彩³ 刘昌新^{1,2} 田园¹ (1.中国科学院科技战略咨询研究院,北京,100190;2.中国科学院大学公共政策与管理学院,北京,100049;3.河南师范大学商学院,河南新乡,453007)

【摘要】随着气候变化不断加剧,城市地区极端气候事件频发,造成了严重的生命和财产损失,提升城市气候变化适应性迫在眉睫。聚焦高温、低温、干旱以及洪水四类气候变化事件影响,通过构建涵盖自然、经济、社会等多维度要素的城市气候变化适应性综合评价体系,利用熵权法、空间自相关分析及障碍度模型,对中国258个城市的气候变化适应性展开了多角度分析。结果表明:中国城市对气候变化适应性整体较低,干旱是中国城市适应气候变化的主要挑战;高温和洪水适应性均呈现北高南低分布态势,高温低适应性城市主要分布于两广、华东、川渝地区等地,洪水低适应性城市主要分布于珠江流域、淮河流域;低温低适应性城市主要分布在西南、淮河流域、华中等区域;城市干旱适应性呈现显著的自东南向西北逐级递减的趋势,西北地区干旱适应性普遍较低。12年及以上教育人口占比和每万人专利授权数将从社会、管理维度提高城市综合适应气候变化水平,而各类气候事件下城市适应性改进应着重提高适应能力、提高经济就绪度、降低暴露度。中国气候适应型试点城市总体适应性也较低,气候风险压力较大。

【关键词】城市;气候变化;适应性;指标体系;熵权法

【中图分类号】X22 **【文献标识码】**A

0 引言

城市作为人口、资源以及基础设施更集中的区域,消耗了世界三分之二的能源、排放了全球70%以上的CO₂^[1]。在面对气候变化的不利影响时,城市经济、社会要素的高度集中使得风险和损失的放大效应更为突出^[2]。在此背景下,适应作为应对气候变化的重要组成部分,近年来逐步受到各国各级政府的关注。IPCC报告认为适应是指根据实际或预期的气候刺激及其影响而对生态、社会或经济系统进行的调整^[3]。2016年,国家发改委联合住房和城乡建设部发布了《城市适应气候变化行动方案》和《气候适应型城市建设试点工作方案》,并“根据不同的城市气候风险、城市功能和城市规模,在全国选择30个左右典型城市开展气候适应型城市建

设试点”。城市已经成为中国推进和落实应对气候变化适应工作的主战场。

在学界,对于气候变化适应性的研究兴起于20世纪70年代^[4];目前在对城市气候变化脆弱性、城市韧性等气候变化适应性相关研究的基础上,国内外学者从城市适应气候变化的指标体系构建、适应能力提升、成本效益等多方面开展了大量工作^[5-9]。中国城市适应气候变化的研究主要在两大方向展开:一是对城市进行气候变化适应性评价,诸多学者采用指标体系综合评价法开展了相关研究,包括:潘家华等^[10]提出以气候容量作为适应气候变化的核心测度;谢欣露等^[11]构建了基于经济支撑能力、社会发展能力、资源禀赋、技术适应能力、风险治理能力5层要素的城市气候适应综合能力指数;陈太根等^[12]选取经济、农业、社会和资源环境系统作为气候变化适应度评价指标,对咸阳市的气候变化适应展开了评价;潘家华等^[13]提出了适应气候变化的基本分析框架,区分增量型适应和发展型适应;刘霞飞等^[14]、赵春黎等^[15]分别基于适应评价指标体系,开展了城市级别的适应性评价。二是对城市适应气候变化对策与政策研究,包括:Ng, Ren^[16]着重介绍了武汉、澳门、香港等地出台的气候适应

基金项目:国家自然科学基金项目“《巴黎协定》背景下中国城市参与国家气候治理的分类机制及政策研究”(批准号:41871219);国家自然科学基金项目“微观创新驱动下京津冀城市群低碳经济转型建模及政策评估——基于agent模拟”(批准号:41971266)

* 通讯作者:吴静(1981—),女,浙江温州人,博士,研究员、硕士生导师,主要研究方向为气候变化经济学、政策模拟。Email: wujing@casisd.cn。

政策;付琳等^[17]对中国气候适应城市建设试点的典型做法进行了梳理分析;向柳等^[18]、何洁琳等^[19]分别对四川、广西百色未来气候变化适应对策展开了研究。比较而言,城市适应气候变化政策和对策研究指引城市开展气候变化适应行动,而城市适应气候变化评价可为城市气候变化适应政策落实及其能力建设情况提供量化参考,并反馈支撑后续政策的制定。两方面的研究相辅相成,是城市适应气候变化的两个重要组成部分。

目前中国适应气候变化政策与行动尚处于起步阶段^[20],随着中国城市适应气候变化行动的推进,迫切需要开展大范围的、定量的城市气候变化适应性评价。现有研究或主要针对中国部分区域的城市适应性评价,或主要从社会维度考察城市气候适应能力,对城市适应性综合评价仍有待进一步拓展。特别是中国幅员辽阔,各地面临的气候事件类型差别极大,Brooks认为需要对多类具体气候事件进行有针对性的适应性评价、出台特定的适应对策^[21]。因此,在城市层面开展气候事件类型细分的气候适应性评价将有助于识别各地的气候适应性差异,并为制定相应适应政策提供支撑。

本文聚焦高温、低温、干旱以及洪水四类气候事件,通过构建涵盖自然、经济、社会多维度要素的综合评价体系,开展中国城市气候变化适应性评价,并对适应性空间分布特征和障碍因子展开进一步探讨,以期因地制宜的城市气候变化适应性政策制定提供基础支撑。

1 研究方法

1.1 适应性指标体系构建

中国城市气候变化适应性指标体系的构建既要能客观公正地反映各城市气候变化适应性的强弱,又要能充分体现适应性的基本内涵、本质特征和主要内容。本文以美国圣母大学全球适应倡议(ND-GAIN)设立的气候适应性评价框架^[22-23]为研究基础,结合中国实际情况,对中国258个城市的高温、低温、干旱以及洪水的气候适应性建立指标体系。ND-GAIN气候适应性评价指标体系由两个维度构成,一是脆弱性评价,二是就绪度评价。相较于IPCC的城市适应气候变化指标体系^[24],ND-GAIN的气候适应性评价指标体系增加了气候适应性的就绪度评价,反映城市面临气候风险时开展自

我调整、降低气候事件风险的能力,此框架目前已被广泛应用于适应性研究^[25-27]。因此,本文的城市气候变化适应性指标体系也从脆弱性和就绪度两个维度展开构建。

脆弱性体现了研究对象在特定时空环境下对事件干扰所具备的敏感反应以及自我恢复的能力,由暴露度、敏感性以及适应能力复合而成。暴露度是指研究对象遭受外界环境胁迫与压力的程度,由所处位置和外界环境决定;敏感性是研究对象对外界环境胁迫或压力产生影响的易于感知程度,由研究对象内部结构决定;适应能力指城市对气候事件负面影响的响应能力。各气候事件细分指标如图1所示。

就绪度是城市降低自身风险能力的客观刻画,因此在各气候事件中具有一致性,由社会就绪度、管理就绪度以及经济就绪度复合而成。其中,社会就绪度指通过适应性投资带来利益的社会能力;管理就绪度指民众对气候事件的认识意识以及地方政府的透明度和管理能力;经济就绪度指对气候事件适应性建设投入的可支配资金能力。各细分指标如图1所示。

1.2 适应性计算方法

本文研究涉及的人口数据、经济数据以及社会数据(各基础设施、专利等)主要来自于各城市第六次人口普查、《中国城市统计年鉴(2018)》、国信房地产信息网和光大证券研报;气象数据来源于中国气象数据网,通过气象站点观测数据空间插值得到。对于缺失的部分数据,通过统计学方法估算得出或通过互联网渠道搜索补充。基于原始数据的获取,本研究分四个步骤展开:

首先,研究采用极差法对原始数据进行标准化,经过无量纲标准化后的值越大则对适应性值的贡献越大。其次,选用客观赋权的熵权法计算各指标权重,避免了人为确定指标权重的主观性。再次,基于258个城市气候适应性值计算,研究通过空间计量方法对城市气候变化适应性进行等级划分和区域分布特征分析。空间自相关分析可以体现城市适应性在区域内的潜在相互关联性,包括全局自相关(Moran I)和局部自相关(LISA)两种测度方法。Moran I指数越大空间集聚性越强,值越小空间差异性越强。局部空间自相关分析可对局部单元与其邻域的差异程度进行研究,检验局部地区离散

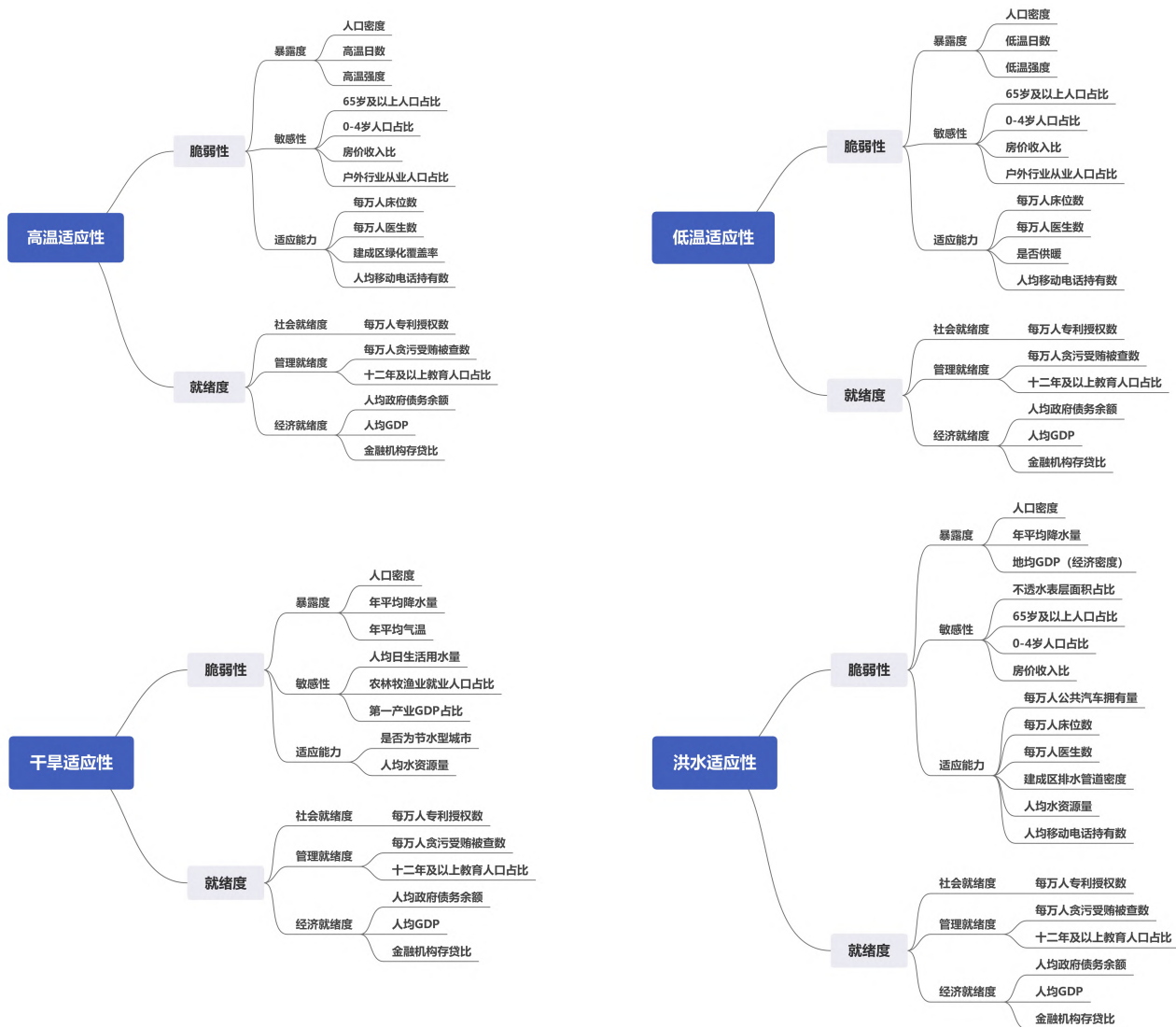


图1 城市气候变化适应性评价指标体系
图片来源: 作者绘制

或集聚的效应。最后,针对各指标对城市适应性的障碍度展开分析,考察各因子对各市气候变化适应性的影响程度,可在路径上为提高城市气候变化适应性提供指引。障碍度模型的计算公式为:

$$O_{ij} = 1 - Y_{ij} \quad (1)$$

$$a_{ij} = \frac{w_j \times O_{ij}}{\sum_{j=1}^n w_j \times O_{ij}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Y_{ij} 代表第 i 个城市第 j 个指标经过无量纲标准化后的值, O_{ij} 表示指标偏离度, w_j 为第 j 项指标的权重, a_{ij} 为第 i 个城市第 j 个指标的障碍度。在求出各指标的障碍度得分基础上,可依据所属关系

累加求出要素层各因子的障碍度得分。

需要说明的是,以上研究中数据标准化、熵权法、全局自相关、局部自相关的计算方法都已较为成熟,本文限于篇幅不具体介绍相关计算公式。

2 结果分析

2.1 适应性影响范围分析

基于对 258 个城市气候变化适应性计算,结果显示 258 个城市中气候变化高适应性、中适应性、低适应性的城市总数占比分别为 21%、38%、41%,表明在气候事件影响下,中国约有近 80% 的城市处于中适应性、低适应性等级,面临较大的气候事件风

险挑战。其中,干旱适应性低的城市数量较其他气候事件下同等级城市数量多,覆盖 136 个城市;其次为低温和洪水低适应性的城市,均为 102 个;而高温低适应性的城市相对较少,为 82 个,高温适应性高的城市数量在四类气候事件中最多。表明在综合考虑自然、经济、社会要素情况下,中国城市对高温具有相对较好的适应性,而对于干旱的适应性较低。

进一步,研究对四类气候事件适应性各等级城市的人口数分布情况展开统计,以评估不同气候事件影响的人口范围(表 1)。总体而言,四类气候事件下,中适应性、低适应性人口数占比平均值分别为 34.11%和 37.86%,也就是说在研究覆盖的 258

个城市中,约有 71.98%的人口将处于中适应性、低适应性区域,表明气候事件不仅在城市数量上,而且在城市人口数上均存在广泛影响。其中,低适应性涉及人口数量最多的为干旱,覆盖 50 808 万人,占总人口数约 42.65%;洪水与低温的低适应性城市虽然在数量上相等,但从覆盖人口数看,洪水低适应性城市人口数显著多于低温低适应性城市人口数,影响人口占比分别为 41.19%和 35.54%,表明洪水带来的气候变化影响较低温影响大。而影响人口数最少的仍然是高温,这与气候事件影响的城市数量具有类似之处。

表 1 各等级城市总人数及占比

气候事件	高适应性		中适应性		低适应性	
	城市人口数 (万人)	占比 (%)	城市人口数 (万人)	占比 (%)	城市人口数 (万人)	占比 (%)
高温	36545	30.68	44384	37.26	38191	32.06
低温	29894	25.1	46895	39.37	42330	35.54
干旱	34937	29.33	33374	28.02	50808	42.65
洪水	32158	27	37900	31.82	49062	41.19

资料来源:作者计算所得

同时,研究发现,在四类气候事件下均处于低适应性等级的城市有 50 个,主要分布于广西、湖南、湖北、河南、四川等省(图 2,见封三),覆盖人口数达 23 090.1 万人。这些城市将是提高气候变化适应性最为急迫的区域。

综上,从城市气候适应性评价数据看,中国城市对气候事件总体适应性较低,其中以干旱适应性低的城市数量和人口数量最多,表明从全局而言,干旱是中国城市适应气候变化的主要挑战。相较之下,中国城市对高温具有较高适应性,其影响人口数也较少。

2.2 适应性空间分布特征分析

在城市适应性空间分布的基础之上,研究计算了城市气候适应性空间全局自相关 Moran I 指数,如表 2 所示。总体而言,城市在高温、低温、干旱、洪水四类气候事件下的适应性均呈现集聚特征,但不同气候事件的城市适应性存在差别,见图 3(见封三)所示。

表 2 适应性全局空间自相关分析

气候事件	Moran I 指数	Z 得分	P 值	空间格局
高温	0.503	12.033	0.001	集聚
低温	0.219	5.359	0.001	集聚
干旱	0.351	8.219	0.001	集聚
洪水	0.425	9.997	0.001	集聚

在高温方面,高温高适应性城市主要集中于北方的东三省、内蒙古、山东、京津冀地区;低适应性城市主要分布于两广、华东、川渝地区以及河南省。此外,据图观察可以发现,沿海城市绝大多数处于中高适应性。在低温方面,高适应性城市主要以省会(首府)城市为主。中适应性城市形成比较明显的集聚,主要分布于华东、东三省、西北地区以及内蒙古地区,这得益于这些地区冬季供暖提高了低温适应性。相对而言,地处西南、淮河流域、华中地区等区域城市的低温适应性较低。在干旱方面,城市适应性呈现显著的自东南向西北逐级递减的趋势,形成显著的集聚特征。苏浙皖地区、珠三角地区呈现两个干旱适应性高值集聚区,此外福建的福州、泉州以及厦门也是高适应性城市;而广大地处第二

级阶梯区域的城市对干旱均呈现出低适应性特征,特别是西北地区具有显著的干旱低适应性集聚特征。在洪水方面,珠江流域、湘赣、淮河流域地区呈现洪水低适应集聚区。而由南向北,洪水适应性逐渐提升,高适应性区域主要分布在内蒙、东三省、甘肃西北地区等。

为进一步观察城市气候变化适应性与其周边城市适应性的差异性,研究基于四类气候事件城市适应性 LISA 集聚图(图 4,见封三)发现:城市对高温和洪水的适应性呈现出呈南北对立分布的态势,高一高集聚主要位于北方,而低—低集聚则主要位于南方,北方城市对高温和洪水的适应性更强;而在低温和干旱方面,相较于东部地区,西部地区表现出显著的低—低集聚。在四类事件的 LISA 集聚图里,高一低集聚区域零散分布,主要分布在直辖市或各省级行政区的省会(首府)与其周边城市,也

表明省会(首府)城市社会、经济以及管理等能力相比于周边城市更强,应对事件更加具有优势。在低温、干旱以及洪水四类气候事件中,长江三角洲地区基本呈现出显著的高—高集聚,这主要是由于该区域经济基础雄厚、基础设施完备、生产生活条件较好,区域内城市经济均衡、协调及一体化融合发展、动态联系紧密,对气候事件应对及适应能力强。

2.3 适应性因子障碍度分析及启示

厘清城市应对不同事件时的主要障碍因素,探究是哪些因子阻碍城市向更高等级城市迈进,对城市采取有针对性的适应措施具有重要意义。为此,本文基于障碍度模型分别在要素层和指标层计算了城市适应性的主要障碍因子,并将障碍度大于 10%的指标因子和障碍度大于 20%的要素因子作为最关键阻碍因素,并对关键阻碍因子频数展开分析,如图 5、图 6 所示。

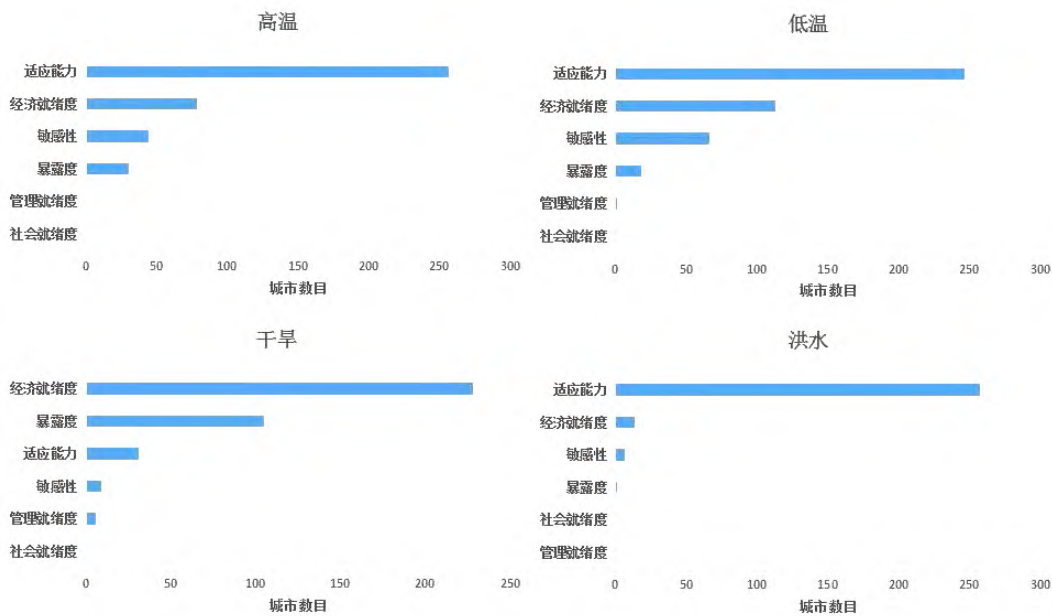


图 5 城市气候变化适应性障碍要素频次分析

在要素层面,高温和低温适应性的障碍因子排序相同,排名第一的阻碍因子均为适应能力,排名第二和第三的分别为经济就绪度和敏感性,而管理就绪度和社会就绪度基本不构成障碍因子;干旱适应性的障碍因子中,最重要的为经济就绪度,暴露度次之,剩余四个要素基本不起阻碍作用;而洪水适应性的障碍因子居首位的为适应能力,频数远高

于其余五个要素。因此,城市在应对高温和低温时,重点是采取提高适应能力、经济就绪度和降低敏感性的措施,应对干旱时,采取提高经济就绪度、降低暴露度的相关措施是关键,而应对洪水时,采取提高适应能力的措施是增强适应性的主要途径。

在指标层面,比较发现,四类事件适应性排名靠前的障碍因子均包含 12 年及以上教育人口占比

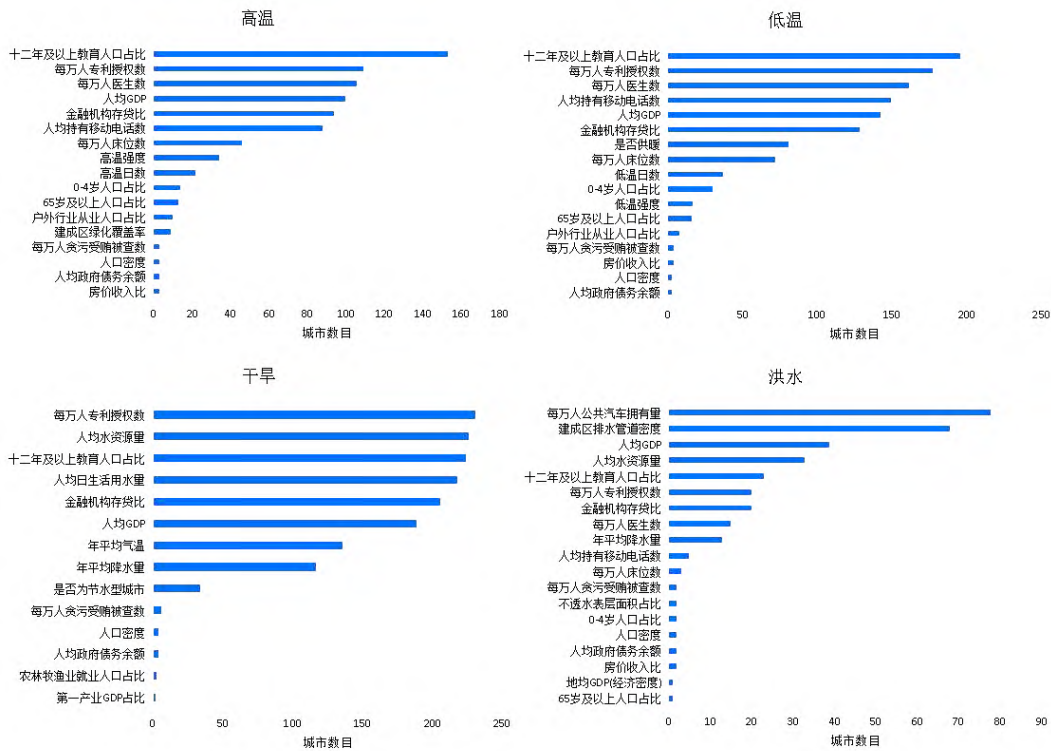


图6 城市气候变化适应性障碍指标频次分析

和每万人专利授权数。前者反映为提高气候事件适应性应改善城市教育条件、优化调整城市内部教育结构;后者反映应加大 R&D 经费投入、积极引入高校和创新型企业及人才,提高城市整体创新能力适应气候变化。

高温和低温适应性排名靠前的障碍因子基本相似,除了12年及以上教育人口占比和每万人专利授权数外,前六名均包括每万人医生数、人均GDP、存贷比和人均持有移动电话数。这些指标与要素层分析发现的适应能力和经济就绪度形成指标分解的呼应。具体而言,发达的医疗水平和完备的医疗设施有助于提高城市的灾后医疗救援能力;城市人均GDP越高,则经济就绪度越强,更有能力购买或建设防御事件的工具和设施;城市存贷比越高,则经济活力越强,城市更易成为投资聚集区,有助于城市基础设施的开发建设;人均持有移动电话数则反映了城市居民对气候事件讯息的接收程度,有助于提高民众备灾能力。因此,城市要提高高温及低温的适应性,重点应在这六个关键因子上发力。

干旱适应性排名前六位的障碍因子除了每万人专利授权数、12年及以上教育人口占比、存贷比

和人均持有移动电话数外,还包括了人均水资源量和人均日生活用水量。城市人均水资源量可以说是资源禀赋,受城市所处的地理条件和气候环境所决定,在较短的时间内难以发生变化,因此可通过优化调整用水结构、加强水资源的整体利用降低城市对干旱的敏感性,提高适应性。

洪水适应性障碍因子排名前两位的分别为每万人公共汽车拥有量和建成区排水管道密度。每万人公共汽车拥有量体现了城市的道路交通及紧急避险能力,在洪水强度超过城市防灾设施的应对能力时,良好的交通运输设施为躲避洪水提供了重要保障;当洪涝发生时,排水管道密度过小则无法将雨水排出,容易在城市低洼处造成内涝,适当的排水管道密度是城市防洪体系的一块基石。为提高洪灾适应性,城市必须重视发展公共交通、完善交通基础设施,同时也要加快防洪排水系统的建造与优化。

2.4 适应型试点城市适应性比较

目前,中国已将28个地区列为气候适应型城市建设试点,本研究涵盖了其中24个城市,各城市在四类事件下的适应性等级分布情况如表3所示。

表3 国家适应型试点城市适应性分类

	高温	低温	干旱	洪水
高适应性	呼和浩特、大连、济南、武汉、海口、西咸新区、白银、西宁湟中县 (8个)	呼和浩特、大连、丽水、合肥、济南、武汉、海口、西咸新区、西宁湟中县 (9个)	大连、合肥、济南、武汉、西宁湟中县 (5个)	呼和浩特、大连、合肥、济南、武汉、西咸新区、西宁湟中县 (7个)
中适应性	朝阳、丽水、合肥、安阳、十堰、常德、岳阳、百色、六盘水、庆阳西峰区 (10个)	朝阳、九江、十堰、常德、岳阳、重庆璧山区和潼南区、六盘水、白银 (9个)	呼和浩特、丽水、九江、常德、岳阳、百色、海口、重庆璧山区和潼南区、西咸新区 (10个)	朝阳、丽水、九江、十堰、常德、岳阳、海口、重庆璧山区和潼南区、广元、商洛、白银、庆阳西峰区 (13个)
低适应性	淮北、九江、重庆璧山区和潼南区、广元、商洛 (6个)	淮北、安阳、百色、广元、商洛、庆阳西峰区 (6个)	朝阳、淮北、安阳、十堰、广元、六盘水、商洛、白银、庆阳西峰区 (9个)	淮北、安阳、百色、六盘水 (4个)

注:气候适应型城市样本中,城市辖区试点采用市级数据替代。西咸新区为国家级新区,采用了西安市的数据。

资料来源:作者整理

分析发现,本研究覆盖的24个城市在高适应性、中适应性、低适应性层面均有存在,表明中国政府在选取适应型试点城市中对不同风险等级城市的全面布局。同时,绝大多数试点城市都为中适应性、低适应性,应对气候风险的压力较大。特别应引起注意的是,部分试点城市的适应性在不同气候事件下均处于中适应性、低适应性等级,包括:淮北、广元、商洛、安阳、朝阳、六盘水、百色、常德、岳阳、丽水、十堰等,这些城市亟须开展全面适应性能力建设。

自试点启动以来,各城市因地制宜地进行政策布局^[17]。以在四类气候事件中均处于低适应性的淮北为例,淮北市早在2016年9月便成立了应对气候变化和节能工作领导小组,并于一年后发布了《淮北市气候适应型城市试点建设行动计划》^[28](下文简称《行动计划》),该计划重点提出了提高气候变化适应性的“七大任务”,从规划布局、基础设施、生态修复、技术创新等多个维度全面覆盖了城市应对气候变化高温、低温、干旱、洪水等多方面的适应能力建设;如在洪水适应能力建设方面,《行动计划》提出“建设科学合理的城市防洪排涝体系。推进城市防洪堤建设和管理,靠着城市内河整治、河渠排水排污治理和积水易涝点治理,加大城市防洪排涝设施配套力度等。”适应型城市试点建设将为中国更多城市提高气候变化适应性提供经验借鉴,发挥引领和示范作用。

3 结论与讨论

本文聚焦中国258个城市气候变化适应性评价,构建了高温、低温、洪水、干旱四类气候事件下城市气

候变化适应性评价指标体系,通过熵权法、加权综合评分法、空间计量分析、障碍因子分析等方法对城市气候变化适应性展开综合分析。结论如下:

(1)在研究覆盖的258个城市中,约有近80%的城市处于中适应性、低适应性等级,对应的人口数占比约达71.98%。因此,无论是从城市数量还是从人口数量角度看,中国城市均面临较大的气候变化适应性挑战。其中,干旱是中国城市适应气候变化的主要风险来源;有50个城市在四类气候事件下均处于低适应性等级,面临较大的气候变化事件影响。

(2)从城市适应性空间分布而言,高温适应性呈南北对立分布的态势,高适应性城市主要集中在北方的东三省、内蒙古、山东、京津冀地区,低适应性城市主要分布于两广、华东、川渝地区以及河南省;低温高适应性城市主要以省会(首府)城市为主,形成以省会(首府)为中心的高一低集聚区,低温低适应性城市主要分布于西南、淮河流域、华中地区;城市干旱适应性呈现显著的自东南向西北逐级递减的趋势,高适应性城市主要集中在苏浙皖和珠三角,西北地区干旱适应性普遍较低,并表现出低—低集聚特征;城市洪水适应性呈现北高南低分布的态势,低适应性城市主要分布在珠江流域、淮河流域。

(3)从提高城市适应性的关键因素看,12年及以上教育人口占比和每万人专利授权数,将从社会、管理维度提高城市综合适应气候变化水平。针对各类气候事件适应性改进,在应对高温和低温时,城市应重点提高适应能力、经济就绪度,重点指标包括每万人医生数、人均GDP、存贷比、人均持有

移动电话数;应对干旱时,应重点部署提高经济就绪度、降低暴露度相关措施,改善的重点包括提高人均GDP、存贷比、人均水资源量和人均日生活用水量;应对洪水时,提高洪水适应能力是提高洪水适应性的主要途径,改进的重点是提高每万人公共汽车拥有量和建成区排水管道密度。

(4)从国家适应型试点城市的适应性分析看,本研究覆盖的24个试点城市在高适应性、中适应性、低适应性等级均有存在,且大多数试点城市处于中适应性、低适应等级,应对气候风险的压力较大。

然而,囿于城市尺度上数据采集可获得性限制,本研究目前仅聚焦于中国258个城市气候变化适应性在空间上的差异,未能体现历史时期城市适应性的变化轨迹,以及未来在不同气候情景下城市适应性的演变趋势。这也是笔者下一步的研究方向,容在后续的研究中继续探索和深化。△

【参考文献】

- [1] JOAN Manuel Fernández Mendoza, GABARRELL X, RIERADEVALL J, et al. Potential impacts of electro-mobility on the built environment of cities: the needs of comprehensive urban planning for its sustainable deployment [C]// ECOTECH & TOOLS Conference—Environmental and Integrated Assessment of Complex Systems, Montpellier. 2011.
- [2] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理 with 适应国家评估报告[M]. 科学出版社, 2015.
- [3] IPCC. Definition of adaptation [EB/OL]. [2021-6-15]. <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=643#fig181>.
- [4] NALAU J, VERRALL B. Mapping the evolution and current trends in climate change adaptation science [J]. *Climate Risk Management*, 2021, 32: 100290.
- [5] DAHYANN, ARAYA-Muñoz, MARC, et al. Assessing urban adaptive capacity to climate change [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 183: 314-324.
- [6] SETIADI R. A roadmap to effective urban climate change adaptation [C]//Conference Series: Earth and Environmental Science [A]. Publishing 2018, 129(1): 012041.
- [7] OBERLACK C, EISENACK K. Alleviating barriers to urban climate change adaptation through international cooperation [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 24: 349-362.
- [8] MASSON V, MARCHADIER C, ADOLPHE L, et al. Adapting cities to climate change: A systemic modelling approach [J]. *Post-Print*, 2014, 10(2): 407-429.
- [9] MARKANDAY A, GALARRAGA I, MARKANDYA A. A critical review of cost-benefit analysis for climate change adaptation in cities [J]. *Climate Change Economics (CCE)*, 2019, 10(04): 1950014.
- [10] 潘家华, 郑艳, 王玄武, 等. 气候容量: 适应气候变化的测度指标 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(02): 1-8.
- [11] 谢欣露, 郑艳. 气候适应型城市评价指标体系研究——以北京市为例 [J]. *城市与环境研究*, 2016(04): 50-66.
- [12] 陈太根, 董婕, 延军平, 等. 区域气候变化适应度评价——以咸阳市为例 [J]. *地理科学进展*, 2011, 30(03): 319-324.
- [13] 潘家华, 郑艳. 适应气候变化的分析框架及政策涵义 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10): 1-5.
- [14] 刘霞飞, 曲建升, 刘莉娜, 等. 我国西部地区城市气候变化适应能力评价 [J]. *生态经济*, 2019, 35(04): 104-110.
- [15] 赵春黎, 严岩, 陆咏晴, 等. 基于暴露度—恢复力—敏感度的城市适应气候变化能力评估与特征分析 [J]. *生态学报*, 2018, 38(09): 3238-3247.
- [16] NG E, REN C. China's adaptation to climate & urban climatic changes: A critical review [J]. *Urban Climate*, 2018, 23: 352-372.
- [17] 付琳, 曹颖, 杨秀. 国家气候适应型城市建设试点的进展分析与政策建议 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(06): 770-774.
- [18] 向柳, 张玉虎, 郭晓雁. 四川省气候变化风险及适应对策研究 [J]. *绿色科技*, 2019(04): 10-14+23.
- [19] 何洁琳, 陆甲, 李艳兰, 等. 百色气候变化特征及城市适应策略建议 [J]. *气象研究与应用*, 2019, 40(01): 34-37.
- [20] 付琳, 周泽宇, 杨秀. 适应气候变化政策机制的国际经验与启示 [J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(05): 641-651.
- [21] BROOKS, N. Vulnerability, risk and adaptation: A conceptual framework [C]//Working paper 38, tyndall centre for climate change research. University of East Anglia, Norwich 2003.
- [22] ND-GAIN. Urban Adaptation Assessment Technical Document [EB/OL]. [2021-6-15]. https://gain.nd.edu/assets/293226/uua_technical_document.pdf.
- [23] ND-GAIN. University of Notre Dame Global Adaptation Index Country Index Technical Report [EB/OL]. [2021-6-15]. https://gain.nd.edu/assets/254377/nd_gain_technical_document_2015.pdf.
- [24] IPCC. The third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. London: Cambridge University Press 2001.
- [25] NAGY G J, LEAL F W, AZEITEIRO U M, et al. An assessment of the relationships between extreme weather events, vulnerability, and the impacts on human wellbeing in Latin America [J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2018, 15(9): 1802.
- [26] A A O, B G O, C A Y, et al. Climate risk, culture and the Covid-19 mortality: A cross-country analysis - ScienceDirect [J]. *World Development*, 2021, 141: 105412.
- [27] TAN Chuie-Hong, HO Sin-Ban. 2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 505 012036.

(下转第52页)

A Comparative Study of Transportation Facilities in the Evolution of Urban Spatial Structure of Beijing and Tokyo

MENG Leilei

【Abstract】 By comparing the evolution of urban space and urban planning between Beijing and Tokyo , it is found that Beijing rail transit lags behind the evolution of urban space , resulting in the low coupling between rail transit and urban space. In addition , the slow construction of satellite towns in Beijing in various periods is related to the lack of a rail transit system. In the latest version of Beijing's urban planning , although the traffic development strategy of the circle structure is clearly put forward , there is an unclear division of rail transit. After further comparative analysis using space syntax , it reflects that the accessibility of connecting the suburban center directly through the suburban railway is better than that through the subway. Although the expressway construction contributes to the formation of a multi-center system , its accessibility may be restricted due to the road-bearing capacity. Finally , a multi-center and multi-circle Tokyo model of rail transit is proposed to clarify the service reference scope of rail transit in each circle.

【Keywords】 Multicenter and Multi Circle Structure; Urban Space; Urban Planning; Transportation Facilities; Space Syntax

(上接第 46 页)

[28] 碳交易网.安徽省淮北市气候适应型城市试点建设行动计划 (2017-2020 年) 全文发布 [EB/OL]. [2021-6-15]. <http://www.tanjiayoi.com/article-22536-1.html>.

作者简介: 裴孝东 (1997-) , 男, 安徽安庆人, 博士研究生, 研究方向为生态经济与可持续发展。

收稿日期: 2021-09-18

Assessment on Cities' Adaptation to Climate Change in China

PEI Xiaodong , WU Jing , XUE Junbo , ZHAO Jincai , LIU Changxin , TIAN Yuan

【Abstract】 With the aggravation of climate change , extreme climate events occur frequently in urban areas , resulting in great loss of human life and property. Therefore it is urgent to enhance the cities' adaptation to climate change. Focusing on the impact of high temperature , low temperature , drought , and floods , a multi-dimensional assessment system covering natural , economic , social elements for cities' climate change adaptation is established. Based on the assessment system , climate change adaptation studies are conducted in 258 cities in China with using entropy weight method , spatial autocorrelation analysis and obstacle degree model. The results show that China's cities are mostly in low adaptation to climate change. Drought is the main challenge for Chinese cities to adapt to climate change. Cities adaptations to high temperature and flood are characteristic in high-in-north and low-in-south. Cities with low adaptation to high temperature are mainly distributed in Guangdong , Guangxi , East China , Sichuan and Chongqing. Cities with low flood adaptation are mainly located in the Pearl River Basin and Huaihe River area. Cities with low adaptation to low temperature are mainly distributed in the Southwest , Huaihe River Basin and Central China. Cities' drought adaptation shows a significant decreasing trend from southeast to northwest , and cities' drought adaptation in northwestern China is generally low. The proportion of the population with more than 12 years of education and the number of patents granted per 10 ,000 people will improve the city's comprehensive adaptation to climate change from the social and management dimensions. The improvement of cities' adaptation should focus on improving responsiveness , increasing economic readiness , and reducing exposure. The adaptation of climate adaption pilot cities is also mostly low , showing a great pressure from climate change risks.

【Keywords】 City; Climate Change; Adaptation; Index System; Entropy Weight Method

中国城市气候变化适应性评价

斐孝东 吴静 薛俊波 赵金彩 刘昌新 田园 (正文第39-46页)

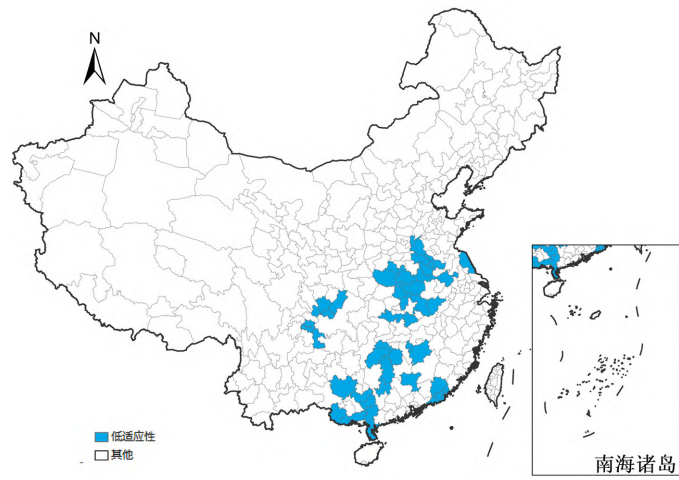


图2 四类气候事件下低适应性重叠城市

注：本文地图均基于审图号为GS(2020)4619号地图绘制，底图无修改，下同

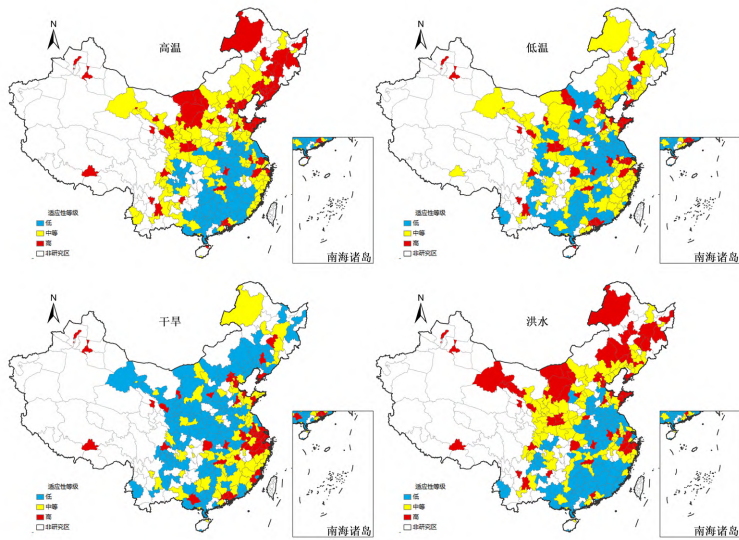


图3 气候变化适应性空间分布图

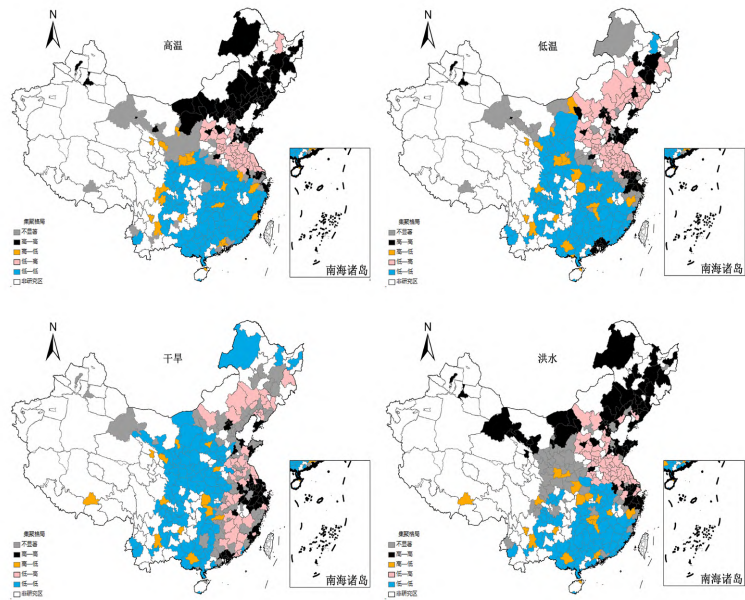


图4 气候变化适应性的LISA集聚图