

张高健,巨菲,窦建虎,等. 西安市气候承载力分析评估[J]. 陕西气象,2026(2):97-104.

文章编号:1006-4354(2026)02-0097-08

# 西安市气候承载力分析评估

张高健<sup>1,2</sup>,巨菲<sup>3</sup>,窦建虎<sup>1</sup>,张寅<sup>1</sup>

(1. 西安市气象局,西安 710016;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 陕西省气象科学研究所,西安 710016)

**摘要:**基于2000—2022年西安市气温、降水、日照、风速等气象数据和GDP、人口密度、用电量等21项社会经济发展统计资料,构建了包括气候天然容量、气候极端事件压力、城市气候压力以及城市协调发展能力四大方面的气候承载力评估指标体系和模型,系统分析了西安市气候承载力变化特征及制约其变化的关键因子。结果表明,2000—2022年西安市气候承载力呈波动上升趋势,城市气候系统对城市发展压力的容纳能力有所增强。西安市气候天然容量相对稳定。极端气候事件压力呈波动上升趋势,暴雨日数、大风日数和高温日数等极端事件对气候承载力的影响尤为突出。城市气候压力与城市协调发展能力均呈上升趋势,但城市协调发展能力指数增速显著高于气候压力指数的增速,有效缓解了城市发展带来的部分负面影响。提升气候承载力建议从提高城市协调发展能力、降低城市气候压力和增强防御自然灾害能力入手,实施基于能源强度约束的绿色发展路径,构建可持续发展的城市气候生态系统,以应对气候变化带来的压力。

**关键词:**西安市;气候承载力;定量评估

**中图分类号:**P463.3

**文献标识码:**A

气候持续变暖已成为21世纪全球变化的显著标志,其对人类社会的深远影响亟待科学应对。过去几十年,中国城市化进程呈现出高速推进的态势,城市化水平由1978年的17.92%提升至2020年的63.89%,年均增长速率为1.09%<sup>[1]</sup>。城市化高速扩张进程加剧了城市气候的脆弱性,其中高温干旱和暴雨内涝的危害性最为显著。城市化进程中,下垫面的改变易引发热岛效应和雨岛效应<sup>[2]</sup>,改变产汇流关系,影响城市洪涝灾害的形成和发展<sup>[3]</sup>。例如,郑州“21·7”极端暴雨中,郑州最大雨强为201.9 mm/h,突破了中国大陆小时降雨量纪录<sup>[4]</sup>。此外,极端高温条件下,热岛效应显著加剧了超额死亡率的现象<sup>[5]</sup>。1998年热浪期间,上海市区平均超额死亡率远高于郊

区<sup>[6]</sup>。高密度建筑引起的热岛效应和低风速增加了香港市区高温期间死亡率<sup>[7]</sup>。城市作为人类活动影响气候变化的典型场景,如何平衡可持续发展与气候变化之间的关系,以及探索人类社会适应气候变化的有效途径,已成为当前亟待解决的科学问题。针对这一问题,学者们开展了相关研究。於俐等<sup>[8]</sup>将气候承载力定义为在一定的时空范围内,气候资源对整个区域经济社会长远发展的支撑能力。闫胜军等<sup>[9]</sup>较早将气候承载力概念运用到城市气候承载力评估中,构建了较完整的城市气候承载力评估指标体系。林宝亭等<sup>[10]</sup>、吴筱雯等<sup>[11]</sup>、李妍君等<sup>[12-13]</sup>在广西城市气候承载力评估研究中引入了极端事件压力指数,进一步完善了闫胜军等提出的评估方法,城市气候承载力

**收稿日期:**2025-06-04

**作者简介:**张高健(1975—),男,汉族,陕西临潼人,学士,高级工程师,主要从事气候变化研究与应用工作。

**通信作者:**巨菲(1987—),女,汉族,陕西韩城人,学士,工程师,主要从事气象科研管理工作。

**基金项目:**秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2024G-42)

评估体系在实践中得到了持续优化和完善,为科学评估城市气候系统的适应能力提供了重要理论支撑。

西安市作为关中平原城市群核心城市,人口持续增加、产业要素加速聚集、城市规模骨架不断扩大,快速城市化进程与西北气候暖湿化趋势叠加<sup>[14]</sup>,一定程度导致城市极端天气事件增多。例如,2021年西安市大暴雨日数显著偏多<sup>[15]</sup>,2016年极端小时降雨量突破历史极值<sup>[16]</sup>,高温热害日数呈增多趋势<sup>[17]</sup>。为科学评估西安市气候系统适应能力,本文参照已有研究形成的评估模型,系统分析西安市气候承载力的演变特征,识别影响和制约气象承载力变化的关键因子,以期为城市可持续发展与适应气候变化提供科学依据和决策参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源及处理

气象数据包括西安市7个国家气象站2000—2022年气温、降水、日照、风速等日数据,基准值采用1991—2020年气候整编资料。基于观测数据,统计以下极端气候事件指标:日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ 的高温日数,日最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 的低温日数,日降水量 $\geq 50\text{ mm}$ 的暴雨日数,逐日极大风速 $\geq 8$ 级的大风日数,年最长连续无雨日数。

公路里程、城市人口密度等21项(表1)社会经济发展统计数据,来自2000—2022年《西安年鉴》《陕西年鉴》及《城市建设统计年鉴》,2000年单位生产总能耗、环境保护投资、科技经费支出、人均绿地面积、城市公用设施建设投资用2001年数据代替,能源消费弹性系数采用全省平均值代替。

2000—2022年夜间灯光数据来源于美国国家地球物理数据中心([https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download\\_monthly.html](https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_monthly.html)) NPP/VIIRS夜间灯光遥感数据<sup>[18]</sup>。

2000—2022年归一化植被指数(NDVI)数据来源于国家青藏高原科学数据中心,分辨率为250 m的逐月归一化植被指数栅格数据<sup>[19]</sup>。基于逐月NDVI栅格数据(采用月度最大值NDVI),对西安市内栅格值进行区域平均处理,得到西安市逐月平均的月最大值NDVI。

### 1.2 指标体系的构建和计算方法

参考已广泛应用于南宁<sup>[12]</sup>、百色<sup>[13]</sup>、武夷山市<sup>[20]</sup>等城市的气候承载力模型,结合西安市气候特征和城市发展现状,对描述社会经济发展和城市建设的相关指标进行取舍,增加夜间灯光数据、城市公用设施建设投资等指标。夜间灯光数据一方面直接反映着当地的工业化水平和城市化水平;另一方面,在一定程度上反映人口集中分布情况。该指标与人口密度的主要区别是根据地表夜间灯光亮度,在一定程度上表征人类活动的强度,从而反映其对城市气候环境的影响程度。气候承载力(CCI)评估体系包括以下4个评估准则层:气候天然容量(CNC)反映区域自然气候资源的本底条件,极端气候事件压力(ECI)表征极端气候事件对城市系统的潜在威胁,城市气候压力(CCP)衡量城市化进程对气候系统的负面影响,城市协调发展能力(CDA)评估城市社会经济系统对气候变化的适应能力。该评价体系包含31个指标(表1),全面反映了区域自然气候特征与城市发展程度的相互作用。CCI计算公式如下<sup>[10-13]</sup>:

$$CCI = \frac{CDA}{CNC \cdot ECI \cdot CCP} \quad (1)$$

1.2.1 气候天然容量准则层(CNC) 选取气温、降雨、风速、日照时数4个基本要素,比较各要素与1991—2020年气候基准值的偏离程度,评估该地区的气候资源变化趋势。计算公式如下<sup>[10-13]</sup>。

$$CNC = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \left( \frac{|X_{ij} - \mu_j|}{\sigma_j} \right), \quad (2)$$

其中: $X_{ij}$ 为第*i*年第*j*项气候要素观测值, $\mu_j$ 、 $\sigma_j$ 分别为1991—2020年气候基准均值和标准差;*m*为研究时段年份数,*n*为评价指标总数。CNC越小,表明气候越接近正常,气候承载力越大。

1.2.2 极端气候事件压力准则层(ECI) 选取年高温日数、年低温日数、年暴雨日数、年最长连续无雨日数、年无雨日数、年大风日数等6个反映主要极端气候事件的要素参与计算。计算公式如下<sup>[10-13]</sup>。

$$ECI = \sum_{i=1}^n f_i \cdot W_i, \quad (3)$$

表 1 西安市气候承载力评估指标

准则层	指标层	单位
气候天然容量	年平均气温	°C
	平均年降水量	mm
	年平均风速	$m \cdot s^{-1}$
	年日照时数	h
极端气候事件压力	年高温日数	d
	年低温日数	d
	年暴雨日数	d
	年最长连续无雨日数	d
	年无雨日数	d
	年大风日数	d
城市气候压力	公路里程	km
	城市人口密度	$10^4 \text{ 人} \cdot \text{km}^{-2}$
	人均日综合生活用水量	$t \cdot \text{人}^{-1}$
	人均 GDP	元/人
	工业总产值	$10^4 \text{ 元}$
	城区建成面积	$\text{km}^2$
	民用车辆拥有量	$10^4 \text{ 辆}$
	城镇人均住房面积	$\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$
	单位生产总能耗	吨标准煤 $\cdot (10^4 \text{ 元})^{-1}$
	能源消费弹性系数	
	城市居民家庭恩格尔系数	%
	全社会用电量	$10^4 \text{ kWh}$
	城市居民生活用电	$10^4 \text{ kWh}$
	工业废气排放量	$10^4 \text{ 标 m}^3$
	NPP-VIIRS 夜间灯光数据	
城市协调发展能力	环境保护投资	$10^4 \text{ 元}$
	科技经费支出	$10^4 \text{ 元}$
	人均绿地面积	$\text{m}^2$
	第三产业贡献率	%
	NDVI	%
	城市公用设施建设投资	$10^4 \text{ 元}$

式中: ECI 为极端气候事件压力指数;  $f_i$  为各评价指标的权重, 权重计算采用熵权法<sup>[21]</sup>;  $W_i$  为各指标标准化值, 标准化处理方法采用比值法, 基准值使用 1991—2020 年气候均值;  $n$  为评估指标总数。 ECI 低值表明极端天气事件发生频次低, 对

城市气候承载力造成的压力小。反之 ECI 高值对应极端事件发生频次高值, 对城市气候承载力带来的压力大。

1.2.3 城市气候压力准则层 (CCP) 选取 GDP、城市人口、建成区面积等 15 项关键指标 (详

见表1),反映城市发展对气候资源的影响。CCP越大,城市气候压力越大,气候承载力越小。CCP的计算方法与ECI相同,其中,数据标准化基准值采用2000年指标值,这一做法能够直观地反映出历年各指标的变化趋势和程度。

1.2.4 城市协调发展能力准则层(CDA) CDA是唯一的正向评估准则层,该准则层包含6项指标(表1)。反映城市在环境治理、经济增长动力、资源配置效率、技术应用转化和生活质量提升等方面的协同发展水平。CDA越大,表明城市系统在维持社会经济可持续发展的同时,对气候变化适应能力越强。计算方法与CCP相同。

## 2 结果分析

### 2.1 气候天然容量指数(CNC)

2000—2022年,西安市的CNC呈现不显著下降趋势(图1),表明西安市气候天然容量现阶段趋于稳定,气候风险总体较小。CNC值在0.27~1.52之间波动,23 a中有18 a CNC较小( $CNC < 1.0$ ),仅2000、2002、2003、2013、2021年的CNC相对较大( $CNC > 1.0$ ),进一步说明西安市的气候状况总体处于较稳定状态。分析出现高值的原因,发现主要是由于该年中一项或多项指标的异常变化而造成。例如,2003年是因为年降水量偏多,年平均风速明显偏小;2021年则是因为年降水量异常偏多,较气候基准值偏多75%。反观CNC最小值2015年,各项指标均接近气候

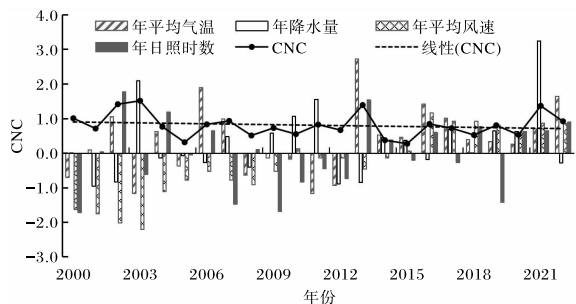


图1 2000—2022年西安市CNC及其各指标的标准化值

基准值,表明该年气候状况良好。综上所述,西安市CNC总体保持平稳状态,但年际波动明显,西安市气候天然容量易受降水、气温等要素异常波动影响,因此气候风险仍然不容忽视。

### 2.2 极端气候压力指数(ECI)

ECI在研究期内呈现弱上升趋势,年际波动剧烈,最高值为1.98(2021年),最低值为0.41(2020年)(图2)。从各指标权重来看,年暴雨日数、年大风日数、年高温日数位列前三,分别为0.464、0.259、0.136。从各指标相关系数来看,ECI与暴雨日数呈显著正相关(表2)。从图2中ECI时间变化趋势看,ECI年变化趋势与年暴雨日数、年大风日数、年高温日数的变化趋势密切相关,尤其以暴雨日数变化最为显著。2021年暴雨日数为近23 a最大值,较1991—2020年历史均值偏高2.3倍,异常偏多的暴雨日数导致当年ECI达到峰值。2020年各项指标均处于分析时段低位,其中大风日数、最长连续无降水日数均为最小值,因此ECI出现最低值。

综上所述,年暴雨日数、年大风日数、年高温日数和年最长连续无降水日数是影响西安市ECI的主要气候因子,其变化主导了ECI的年际波动特征。在西安市的发展进程中,加强应对极端气候事件的防御体系建设显得尤为重要。

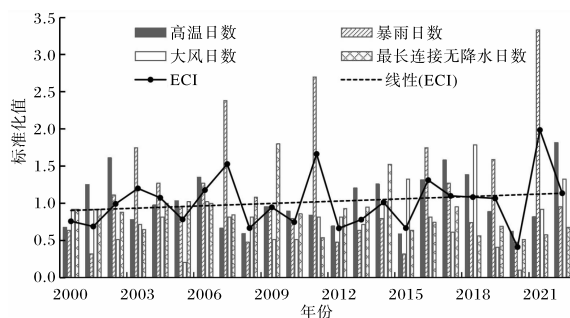


图2 2000—2022年西安市ECI及高温日数、大风日数、暴雨日数的标准化值

表2 西安市ECI各指标权重系数和相关系数

	高温日数	低温日数	暴雨日数	最长连续无降水日数	大风日数	无降水日数
权重系数	0.136	0.014	0.464	0.125	0.259	0.001
相关系数	0.142	-0.264	0.948**	-0.230	0.224	-0.143

注:\*、\*\*分别表示通过0.05、0.01的显著性水平检验,下同。

### 2.3 城市气候压力指数(CCP)

21世纪以来,西安市 CCP 呈现显著上升趋势( $P < 0.01$ ) (图 3)。2000—2009年,CCP 变化较为平稳,维持在 3 以下;2010 年较前一年有明显的增大,之后增速逐年变大,2022 年达到最大值(10.98),约为 2000 年的 10 倍。在 15 个评估指标中,工业总产值和全社会车辆数的权重最大,分别为 0.154 和 0.146(表 3),这两项指标对 CCP 的增长起主导作用。此外,城市居民生活用电和人均 GDP 的权重也相对较高,分别达到 0.103、0.100,其余的指标权重较低。从相关性分析(表 3)来看,CCP 与全社会车辆数、全社会用电量、城市居民生活用电和工业总产值相关系数均超过 0.980,表现出显著正相关关系。2010 年西安市 CCP 大幅增长正是由于工业总产值和全社会车辆数的快速增长而造成,两项指标分别较前一年增长 19% 和 15%;2010—2022 年的持续增长同样是由于工业总产值和全社会车辆数持续增长造成;2022 年 CCP 达到分析时段峰值,当年工业生产总产值是 2000 年的近 17 倍,全社会车辆数是 2000 年的 15 倍。2000—2022 年,西安市的工业生产总产值、全社会车辆数、城市居民生活用电等指标逐年上升,反映出西安市社会经济和城市建设的快速发展以及人民生活水平稳步提高。但同时也给城市气候系统带来巨大压力。

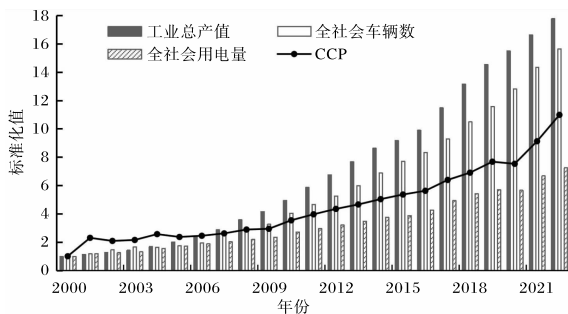


图 3 2000—2022 年西安市 CCP 及工业总产值、全社会车辆数和全社会用电量的标准化值

### 2.4 城市协调发展能力指数(CDA)

2000—2022 年西安市 CDA 呈现显著上升变化趋势( $P < 0.01$ ) (图 4)。2000—2008 年,CDA 变化平缓,年增速变化较小,2009 年增长幅度开始逐年增大,尽管 2016、2020 年出现小幅回落,但随后快速反弹并持续上升,至 2022 年达到最高值

表 3 西安市 CCP 各指标权重系数和相关系数

指标	权重系数	相关系数
道路长度	0.077	0.976**
城市人口密度	0.003	0.969**
人均日综合生活用水量	0.007	-0.213
人均 GDP	0.100	0.958**
工业总产值	0.154	0.983**
城区建成面积	0.064	0.975**
全社会车辆数	0.146	0.990**
城镇人均住房面积	0.018	0.827**
单位生产总能耗	0.056	-0.880**
能源消费弹性系数	0.094	0.166
城市居民家庭恩格尔系数	0.003	-0.880**
全社会用电量	0.078	0.990**
城市居民生活用电	0.103	0.985**
工业废气排放量	0.067	0.802**
夜间灯光	0.029	0.958**

(42.3)。2000—2022 年,西安市 CDA 增长了 42 倍。各评估指标中,科技经费支出、环境保护投资和城市公用设施建设的权重比较大,分别为 0.38、0.36 和 0.21。从相关性来看,CDA 与科技经费支出、环境保护投资相关系数均超过了 0.95,表现出显著的正相关关系,与城市公用设施建设投资的相关系数也超过了 0.8(表 4),表明这三项指标是促使城市协调发展能力提升的主导因子。截至 2022 年,这三项指标分别较 2000 年激增了 55 倍、40 倍和 31 倍,且与 CDA 的增长趋势紧密契合,凸显了城市政策导向和管理能力在推动 CDA 变化中的关键作用。近年来,西安市 CDA

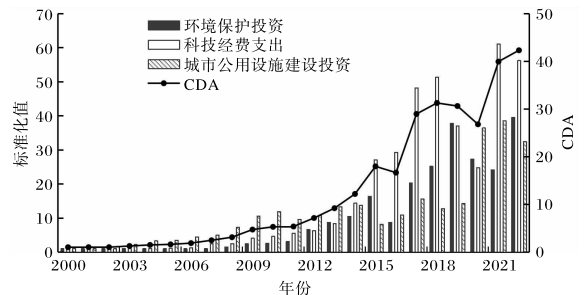


图 4 2000—2022 年西安市 CDA 及环境保护投资、科技经费支出、城市公用设施建设投资的标准化值

表4 西安市 CDA 各指标权重系数和相关系数

	环境保护 投资	科技经费 支出	人均绿地 面积	第三产业 贡献率	NDVI	城市公用设施 建设投资
权重系数	0.356	0.380	0.045	0.013	0.001	0.206
相关系数	0.951**	0.977**	0.712**	0.661**	0.885**	0.837**

显著增长,与科技、环境保护和城市公用设施等领域的巨大投入密切相关,这些投入显著增强了城市协调发展能力。

### 2.5 气候承载力指数(CCI)

2000—2022年,西安市气候承载力指数波动较大,整体呈上升趋势(图5)。CCI在2015年达到最高值,2002年出现最低值,两者相差50倍。2001—2004年、2006—2007年,CCI相较于基准年(2000年)处于较低水平,而其他年份则高于基准年。分析CCI波动变化的原因,2015年CCI出现最高值,该年的CNC和ECI均处于低位,CDA出现阶段性高值,CCP则变化平稳,表明该年气候状况稳定,极端气候事件发生较少,同时城市治理能力显著提升,促成气候承载能力达到最高值。2002年低值主要原因是CNC和ECI均处于高位,且CDA和CCP无明显变化,即当年气候状况差,而城市适应气候变化的能力没有明显改善,因此气候承载力较低。进一步分析发现,尽管2021年ECI和CNC处于高位,CCP增长迅速达到2000年以来次高值,但CCI却保持相对稳定,这主要是由于正向评价指数CDA显著增长(较2000年增长39倍),有效抵消了部分负向指标的影响。通过上述分析,发现CCI受ECI和CNC波动影响较大,表明西安市CCI对气候平均状态和极端气候事件压力十分敏感。气候异常变化会导致CCI明显下降,逐年上升的CCP也对CCI产生显著的负面影响。然而,CDA的快速增长对CCI的提升起到了关键支撑作用。

城市气候承载力因城市自然环境和社会经济发展水平不同而呈现出不同变化趋势。西安市气候承载力与玉林市<sup>[10]</sup>、百色市<sup>[13]</sup>相同,呈上升趋势,其中百色市对极端气候压力指数ECI敏感,玉林市则对气候天然容量CNC敏感,城市协调发展力CDA是增加两地气候承载力CCI的有效

手段。崇左市气候承载力呈现总体稳定的发展趋势<sup>[10]</sup>。而南宁市<sup>[12]</sup>、武夷山市<sup>[20]</sup>、青海省东部城市群<sup>[21]</sup>等城市气候承载力则呈下降趋势,三地气候承载力均表现为对CNC和ECI敏感,CCP带来的影响较大,城市协调力CDA的改善不足,造成CCI下降。

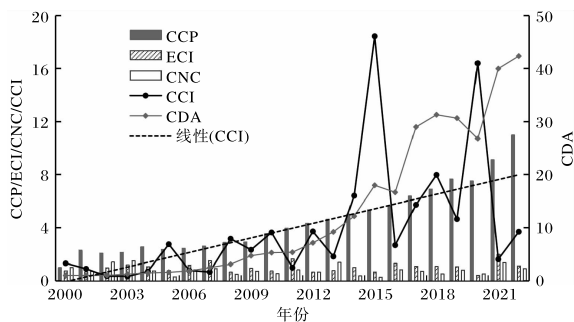


图5 2000—2022年西安市CCI及CNC、CCP、ECI、CDA变化

### 3 结论和讨论

基于气候承载力定量评估体系评估了西安市2000—2022年气候承载力以及气候天然容量、极端气候事件压力、城市气候压力、城市协调发展能力的变化,分析各指标的主要影响因子,结论如下:

(1)2000—2022年,CNC呈波动并逐渐趋向于气候平均态的变化趋势,西安市气候本底条件相对稳定,但气候风险依然不容忽视。ECI呈上升趋势,对暴雨日数、高温日数、大风日数以及最长连续无降水日数等极端气候事件表现出高度的敏感性。CCP呈显著上升趋势,2010年起涨幅明显加速,反映了城市GDP增长、人口增加以及车辆数量的攀升等城市发展进程对气候系统造成的压力正在不断加剧。CDA亦呈显著的上升趋势,且增速超过CCP,表明西安市的可持续发展策略取得了显著成效,城市管理能力和应对气候变化的能力在不断提升。

(2)2000—2022年,西安市CCI呈波动上升趋势,表明CDA的提升有效抵消了负面评价指标对城市发展造成的巨大压力。城市气候承载力处于平稳到增强的态势,城市气候环境可承受的经济发展空间增大。

(3)西安市的可持续发展面临气候系统的多重约束,自然环境方面表现为暴雨—高温—干旱复合型极端事件频发。人为活动方面,快速城市化导致气候压力指数CCP倍增效应影响(2000—2022年增长10倍)。异常气候和极端气候事件对西安市的稳定运行和发展造成影响,而经济增长和人类活动等因素则进一步加剧了城市面临的气候压力。尽管通过加大科技、环保、防灾减灾等领域的投入,城市韧性得到有效提升,极端气候事件以及经济发展所带来的负面影响仍然十分显著。

从研究结果来看,不同气候背景和经济发展状况的城市气候承载力的评价结果存在显著差异,表明气候承载力评估体系能客观反映气候系统对人类活动的支撑能力,为城市应对气候变化提供科学决策依据。但该评价体系也存在一定局限性,首先是数据分辨率问题,所选择的气象因子为国家气象站资料,水平分辨率低,存在一定片面性;其次是社会经济数据准确性问题,由于统计途径、方法等变化,这些数据可能会对城市压力指数和城市协调能力指数的精确计算产生一定影响。此外,在选择各指标层指数时,难免存在一定的主观判断,也可能对评估结果的客观性产生一定影响。今后可根据不同区域特点开展评估体系试验,构建更为科学的评估体系,利用更丰富的数据资源,获取更合理的评估结果。

#### 参考文献:

- [1] 管卫华,吴小妮,李焕兰,等. 改革开放以来中国区域城镇化格局及演化机制[J]. 地理科学,2025,45(2):265-277.
- [2] 万佳惠. 北京城市化与极端强降水的关系及影响研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2024.
- [3] 王斌,严小林,鲍振鑫,等. 土地利用变化对城区产汇流影响研究[J]. 水利水运工程学报,2025(3),25-36.
- [4] 张芳华,孔期,袁溢,等. 河南2021年“21.7”暴雨极端性特征及其与1975年“75.8”暴雨的对比[J]. 大气科学,2024,48(6):2405-2423.
- [5] ROBISON P J. On the definition of a heat wave[J]. Journal of Applied Meteorology,2001,40(4):762-775.
- [6] TAN J G,ZHENG Y F,TANG X,et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai[J]. International Journal of Biometeorology,2010,54(1):75-84.
- [7] GOGGINS W B,CHAN E Y Y,NG E,et al. Effect modification of the association between short-term meteorological factors and mortality by urban heat islands in Hong Kong[J]. PLoS One,2012,7(6):e38551.
- [8] 於刚,卢燕宇,黄玮,等. 气候承载力评估的意义及基本方法[M]. 北京:中国社会科学文献出版社,2015:289-301.
- [9] 闫胜军,何霄嘉,王炬,等. 城市气候承载力定量化评价方法初探[J]. 气候变化研究进展,2016,12(6):476-483.
- [10] 林宝亭,何洁琳,李妍君,等. 广西环北部湾内陆城市气候承载力初探——以玉林、崇左市为例[J]. 山地气象学报,2025,49(1):35-42.
- [11] 吴筱雯,何洁琳,李妍君,等. 广西北部湾沿海城市群气候承载力分析与评价[J]. 气候变化研究进展,2023,19(4):446-456.
- [12] 李妍君,何洁琳,秦川,等. 变暖背景下南宁市气候承载力定量评价[J]. 气象研究与应用,2022,43(2):52-57.
- [13] 李妍君,何洁琳,秦川,等. 2000—2017年山地城市百色气候承载力定量评价[J]. 气象与环境学报,2021,37(5):100-106.
- [14] 张强,朱飙,杨金虎,等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报,2021,66(Z2):3757-3771.
- [15] 高宇星,刘峰,刘瑞芳,等. 基于稠密观测资料的近10年西安地区暴雨特征[J]. 陕西气象,2024(1):29-36.
- [16] 高宇星,王瑞英,杜萌萌,等. 西安一次突发性短时暴雨环境条件及成因分析[J]. 陕西气象,2023(6):26-32.
- [17] 杨雯倩,史培军,张钢锋,等. 西安高温热害人口

- 暴露量及其受灾指数预估研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(1): 29-39.
- [18] 陈慕琳, 蔡红艳. VIIRS/DNB 夜间灯光月度产品插补方法对比——以北京为例[J]. 地理科学进展, 2019, 38(1): 126-138.
- [19] 高吉喜, 史园莉, 张宏伟, 等. 中国区域 250 米归一化植被指数数据集(2000—2024)[DS/OL]. 国家青藏高原数据中心(2025-07-24)[2025-04-15]. <https://cstr.cn/18406.11.Terre.tpdc.300328>
- [20] 邹沁垚, 杨丽慧, 郑凯端, 等. 武夷山市气候承载力的定量评估[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2024, 53(4): 556-562.
- [21] 胡亚男, 李红梅, 刘彩虹, 等. 基于多源数据的青海东部城市群气候承载力评估与时空格局分析[J]. 西部林业科学, 2024, 53(2): 45-55.