Advances in Applied Mathematics 应用数学进展, 2026, 15(5), 405-417
Published Online May 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/aam
https://doi.org/10.12677/aam.2026.155239

Hans汉斯

气候变化对广西北部湾经济区城市韧性的影响

林宇茵，徐庆娟*，黎克红

南宁师范大学数学与统计学院，广西 南宁

收稿日期：2026年4月19日；录用日期：2026年5月13日；发布日期：2026年5月22日

摘 要

本文基于2015~2024年广西北部湾经济区南宁市、钦州市、北海市和防城港市的面板数据，构建城市韧性评价指标体系，运用熵权法测算城市韧性，并基于双向固定效应面板数据模型，实证研究气候变化(年平均气温、最高气温、平均风速及降水量变化)对城市韧性的影响。研究结果显示：第一，城市韧性呈现“首府显著领先，沿海三市趋近”的空间格局。第二，经济发展、生态环境与人力资本等控制变量呈弱负向影响，既可能源于指标测量偏差，也折射出临港重化工业的高气候敏感性、绿化质量滞后与人才专业错配等区域特征。第三，气候变化的影响存在维度差异。平均气温与风速呈显著负向效应，反映气候冲击的实质性抑制；最高气温与降水变化率呈弱正向效应，可能部分源于生态与设施维度的测量捕获偏差，且具有阈值依赖性。

关键词

城市韧性，评价指标体系，熵权法，气候变化，双向固定效应

Analysis of the Impact of Climate Change on Urban Resilience in the Beibu Gulf Economic Zone of Guangxi

Yuyin Lin, Qingjuan Xu*, Kehong Li

College of Mathematics and Statistics, Nanning Normal University, Naning Guangxi

Received: April 19, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 22, 2026

Abstract

Based on the panel data of Nanning, Qinzhou, Beihai and Fangchenggang in the Guangxi Beibu Gulf

*通讯作者。

文章引用: 林宇茵, 徐庆娟, 黎克红. 气候变化对广西北部湾经济区城市韧性的影响[J]. 应用数学进展, 2026, 15(5): 405-417. DOI: 10.12677/aam.2026.155239

Economic Zone from 2015 to 2024, this paper constructs an urban resilience evaluation index system, measures urban resilience using the entropy weight method, and empirically investigates the impact of climate change (annual average temperature, maximum temperature, average wind speed, and precipitation change) on urban resilience through a two-way fixed effects panel data model. The findings are as follows: First, urban resilience exhibits a spatial pattern characterized by "the capital city significantly leading, while the three coastal cities show converging trends". Second, the control variables—economic development, ecological environment, and human capital—exhibit weak negative effects, which may be partly attributable to measurement bias in the indicators, while also reflecting regional characteristics such as the high climate sensitivity of the port-led heavy chemical industry, the quantity-oriented approach to greening construction, and the mismatch in talent specialization. Third, the impact of climate change varies by dimension. Average temperature and wind speed show significant negative effects, reflecting the substantive inhibiting impact of climate shocks; maximum temperature and the rate of precipitation change show weak positive effects, which may be partly due to measurement capture bias in the ecological and infrastructure dimensions, and are subject to threshold dependence.

Keywords

Urban Resilience, Evaluation Index System, Entropy Weight Method, Climate Change, Two-Way Fixed Effect

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

工业革命以来，人类活动显著加剧了以全球变暖为主要特征的全球气候变化进程。在此背景下，城市作为人口与产业高度集聚的空间载体，其所面临的气候变化风险日益凸显且更为复杂严峻。城市韧性作为衡量城市系统适应气候变化、有效抵御并应对相关灾害风险的综合能力，已成为推动城市高质量发展与可持续发展的关键维度。2021 年，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出“建设韧性城市”以促进区域高质量协调发展[1]；同年《关于推动城乡建设绿色发展的意见》要求“提升城市防灾减灾能力与韧性”[2]。同年 6 月，《国家适应气候变化战略 2035》明确提出“构建有利于应对气候变化的财政政策体系，有效应对气候变化不利影响和风险”，将城市韧性提升纳入全国性气候适应战略框架[3]。2024 年，《关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见》明确要求通过市政设施智能化改造、城市信息模型平台建设、应急体系完善等举措，强化城市设施韧性与管理韧性[4]。2025 年，《中国适应气候变化进展报告（2024）》显示，我国 39 个试点城市正深化气候适应型城市建设，适应气候变化已从战略规划逐步转向精准实践[5]。因此，在气候变化背景下提升城市韧性，是实现可持续发展的热点议题之一。

自 Holling (1973) [6]将韧性概念引入生态学后，该理论于 20 世纪 90 年代末逐渐应用于城市规划领域。2002 年，倡导地区可持续发展国际理事会(ICLEI)在联合国可持续发展全球峰会上首次将“韧性”概念系统引入城市建设与防灾减灾讨论，标志着城市韧性研究进入实践探索阶段。随着理论发展与实证积累，城市韧性被逐步定义为城市系统在经济、社会、生态与基础设施等维度抵御外部冲击、实现快速恢复并持续适应变化的综合能力。在这一概念演进过程中，城市韧性评价体系也经历了系统性发展。其评价框架从早期侧重物理维度的简单叠加，逐步发展为 Bruneau 等人(2003) [7]提出的“技术－组织－社会

－经济”(TOSE)四维体系，并最终形成当前广泛应用的“经济－社会－生态－基础设施”多系统协同框架。这一演进过程不仅拓展了评价维度，更体现了对城市作为复杂适应系统特性的认知深化[8] [9]。国外学者 Desouza 等(2013) [10]与 Meerow 等(2016) [11]均明确将经济、社会、生态与基础设施作为核心评估维度。国内研究也广泛采纳这一体系[12]-[16]，如邓育洲(2023)与彭浩(2024) [12] [13]均从上述四个维度构建城市韧性评价指标，进一步验证了该框架在国内语境下的适用性与延续性。

鉴于此，本文尝试基于上述四个理论维度构建城市韧性评价体系，并与北部湾经济区的具体地域特征相适配。其一，经济功能差异化适配。南宁市作为首府承担区域经济中心职能，第三产业与财政支撑力突出，而钦州、北海、防城港以港口经济、临港工业为核心，需重点关注气候风险对产业链与港口运营的冲击，这与农雪雯[16]针对广西沿海城市防灾减灾的研究导向一致；其二，社会结构多元化适配。南宁市汇聚多民族人口与流动人口，需侧重公共服务均等化、社区协同治理等社会维度，而钦州、北海、防城港依托港口形成涉海就业群体集中的社会结构，需重点关注职业保障、灾害应急科普等针对性社会服务，这与彭浩[13]关于沿海城市社会韧性需匹配产业人口特征的研究逻辑相契合；其三，生态屏障特殊性适配。北部湾经济区拥有红树林、滨海湿地等独特生态系统，生态韧性需兼顾生态保护与灾害缓冲双重功能，契合宋甘霖等[17]对广西城市生态韧性以水环境与绿地系统为核心的研究结论；其四，设施服务梯度化适配。南宁市市政设施与公共服务资源集中，三市则侧重港口基础设施与临港配套服务，韧性评价需体现基础设施与服务体系的区域梯度特征，这与高伟等[15]对广西城市韧性对于区域梯度特征的研究发现相呼应。

大量研究发现：国内一些城市尤其是沿海城市面临的气候风险呈现多维度叠加、子系统关联紧密的特征[18]-[22]：生态层面，海平面上升与极端天气频发损害关键生态系统的自然防护功能；设施层面，高温高湿与强风侵蚀会加剧生命线系统的运行风险；经济层面，高度依赖港口的产业结构易受到气候扰动的冲击；社会层面，热浪导致的健康风险与渔民收入波动会加剧公共服务系统压力[18]-[22]。这些多维度气候风险，通过不同路径深刻影响着城市系统的韧性水平。大量实证研究显示气候变化对城市韧性的作用机制：在气温方面，刘玲娜等学者研究表明，气温升高会加速建筑材料老化(工程韧性)并增加医疗资源需求(社会韧性)，验证了高温的短期抑制效应[23]。在风速方面，有学者认为，强风天气会破坏滨海生态系统稳定性(生态韧性)并对经济活动(经济韧性)造成直接损失[15]，跨区域比较研究进一步证实，风速增加会显著提升沿海地区基础设施(设施韧性)维护成本[24] [25]。在降水方面，高伟等学者发现，适度降水有助于维持生态系统健康(生态韧性)，但部分学者指出当降水量超过城市系统承载阈值时，排水系统(设施韧性)将面临巨大压力，导致韧性水平显著下降[15]-[24]。此外，丁宇刚和马永喜等学者在农业领域的研究，为降水影响的阈值效应提供了有力佐证[26] [27]。总之，气温、风速和降水三大气候要素通过作用于城市系统的不同维度，对其韧性产生影响：气温表现为抑制与促进并存的双重效应，风速带来多维度冲击，而降水则呈现明显的阈值效应。上述机制共同构成了气候变化影响城市韧性的理论框架，为后续实证研究奠定了坚实基础。

面板数据模型凭借其捕捉个体异质性与动态演变的优势，已成为学界重要研究工具。近年来，丁宇刚、孙祁祥(2022)基于 1995~2018 年 288 个地级市面板数据，通过固定效应面板数据模型揭示了气温波动和台风频次对农业经济的影响[26]。刘玲娜(2022)基于 1998~2017 年中国 30 个省级行政区城市面板数据，应用面板向量自回归模型(PVAR)模型实证分析了气候因素对城市韧性的动态影响，发现降水量增加对城市韧性具有波动性的正向促进作用，而气温升高在前 2.5 年呈现显著的负向冲击[23]。马永喜等(2025)基于 2004~2020 年县级面板数据应用固定效应面板模型，证实升温对农业经济韧性产生负向影响[27]。这些研究显示，利用面板数据模型对研究气温、降水等气候因素对城市韧性、农业经济韧性的影响效果显著，为本文基于北部湾经济区面板数据，量化分析气温、风速和降水等气候要素对城市韧性的影响提供

了重要的方法论参考。

基于此，本文基于广西北部湾经济区(南宁市、钦州市、北海市、防城港市) 2015~2024 年的面板数据，从经济、社会、生态和基础设施四个维度构建城市韧性评价指标体系，运用熵权法确定指标权重，测算城市韧性综合指数，并利用面板数据模型研究气候变化(年平均气温、最高气温、平均风速及降水量变化)对该区域的影响机制与潜在风险。

2. 研究方法与数据来源

2.1. 模型设定

基于广西北部湾经济区样本的个体差异性特征，本文采用固定效应计量框架，实证检验气候变化对城市韧性的影响，模型如下：

$$URI_{i,t} = \beta CLIM_{i,t} + \gamma X_{i,t} + \theta_i + \delta_t + \varepsilon_{i,t} \tag{1}$$

式中：β 表示气象因子系数，反映气候变化对城市韧性的影响；$X_{i,t}$ 表示控制变量向量，包括经济发展水平、政府支出规模、生态环境水平、人力资本水平；θ_i 和 δ_t 分别城市和年份固定效应；$\varepsilon_{i,t}$ 表征随机误差项。

2.2. 变量选取

本研究以广西北部湾经济区的南宁、钦州、北海和防城港市为对象，选取其 2015~2024 年期间的城镇居民人均可支配收入、社会保障指数、污水年排放量及人均城市道路面积等指标数据。对于部分年份存在的缺失值，采用线性插补法进行了补充。上述社会经济数据主要来源于相应年份的各地级市统计年鉴、政府公报、人力资源和社会保障事业发展统计公报、水资源公报、广西统计网站、《广西统计年鉴》等。同时期的区域气象数据，包括年平均温度、最高气温、平均风速和降水量，均获取自中国气象资料共享平台。

2.2.1. 被解释变量：城市韧性(*URI*)

基于城市韧性理论框架，采用熵值法[24]-[28]构建广西北部湾经济区城市韧性综合指数(*URI*)。首先进行指标归一化处理，采用极值法统一量纲，通过方向指示函数 $\mathbb{I}_j$ 区分指标属性($\mathbb{I}_j = 1$ 表示正向指标，$\mathbb{I}_j = 0$ 表示负向指标)，其计算表达式为：

$$S_i = \sum_{i \in I} \left(\frac{1-e_i}{\sum(1-e_i)} \right) \left[\mathbb{I}_i \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} + (1-\mathbb{I}_i) \left(1 - \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)} \right) \right] \omega \tag{2}$$

式中 x_i 为指标原始观测值，$\min(x_i)$ 和 $\max(x_i)$ 分别表示全样本最小值和最大值，ω 为公式固有乘积符号。其次采用熵权法确定权重，计算指标信息熵 e_i 和子系统权重 w_k，其计算过程为：

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\hat{x}_i}{\sum \hat{x}_i} \ln \frac{\hat{x}_i}{\sum \hat{x}_i} \right) \omega \tag{3}$$

$$w_k = \frac{1-e_k}{\sum_{k=1}^{4}(1-e_k)}, e_k = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{S_k}{\sum S_k} \ln \frac{S_k}{\sum S_k} \right) \omega \tag{4}$$

其中 $\hat{x}_i$ 为归一化处理后的指标值，S_k 表示子系统得分。最后通过线性加权合成韧性综合指数：

$$URI = \sum_{k=1}^{4} w_k S_k \omega \tag{5}$$

该指数值域为[0, 1]，数值越接近于 1 表示城市韧性越强，反之，数值 y 越接近于 0 代表城市韧性越

弱。

2.2.2. 解释变量：气候变化(*CLIM*)

本文选取年平均气温(TEMP)、最高气温(TMAX)、平均风速(WS)和降水量(PERC)表示气候变化。考虑到广西北部湾经济区的地形与局地气候等因素可能对上述指标产生干扰，若直接采用原始年均值，将难以有效剥离地理背景，可能无法有效识别气候变化的影响。既有研究指出，降水量的短期波动对城市韧性产生即时冲击效应，而气温、气压等指标的长期异常通过累积机制影响韧性系统。因此本文借鉴马勇喜、刘洋等学者的研究成果[26] [27]，对年均气温、最高气温与平均风速进行处理，构建反映气候波动的标准化指标，并以降水变化率表征其短期波动特征。气候指标的标准化计算通过下式实现：

$$CLIM_{i,t}^{std} = \frac{CLIM_{i,t} - \mu_{CLIM,i}}{\sigma_{CLIM,i}}, \forall t \in T_t \tag{6}$$

式中：$CLIM_{i,t}$ 表示城市 i 在目标年份 t 的气象观测值；$\mu_{CLIM,i}$ 为城市 i 在基准期 $T_b = [t_0, t_0 + w - 1]$ 的气候平均状态；$\sigma_{CLIM,i}$ 为基准期内气候自然变化率；w 为滞后期窗宽(基准期长度)，本文设置 $T_b = [1979, 2009]$ 为基准期，则 $w = 30$。气候基准态与变率分别按照下式计算：

$$\mu_{CLIM,i} = \frac{1}{w} \sum_{t=t_0}^{t_0+w-1} CLIM_{i,t} \tag{7}$$

$$\sigma_{CLIM,i} = \sqrt{\frac{1}{w-1} \sum_{t=t_0}^{t_0+w-1} \left(CLIM_{i,t} - \mu_{CLIM,i}\right)^2} \tag{8}$$

既有研究表明，广西沿海地区降水量序列存在 56~57 年主周期及 10~35 年次周期等非平稳性波动特征[29]。因此，为避免标准化处理掩盖其年际波动，从而更敏感地捕捉短期水资源变化对城市韧性的冲击，本文故采用差分法计算降水变化率，其计算公式如下：

$$\mathrm{PERC}_t = \frac{P_t - P_{t-1}}{P_{t-1}} \times 100\% \tag{9}$$

其中，P_t 与 P_{t-1} 分别表示第 t、$t-1$ 年降水量。

2.2.3. 控制变量

为准确识别气候变化对城市韧性的净效应并控制经济社会系统的潜在混杂影响，本文借鉴张建刚、马原野的研究[28]，选取以下控制变量：经济发展水平(Eco)，以人均 GDP 的增长率表征；政府支出规模(Gov)，定义为财政支出占 GDP 的百分比；生态环境水平(Env)，采用建成区绿化覆盖度；人力资本水平(Hum)，通过高校在校生数与总人口的比值计算。

3. 实证分析

3.1. 城市韧性评价指标体系构建

本节在既有中国城市韧性综合评价体系[12]及广西地区相关研究[14]-[16] [30] [31]基础上，针对传统评价体系普遍存在的结论趋同、地域适配性不足与构建过程不透明等问题，重点结合广西北部湾经济区在功能定位、生态特征与设施梯度等方面的情境，对指标体系进行重构与调整。

在指标补充方面，经济维度引入“第三产业占 GDP 比重[14]-[16] [30] [31]”与“城镇居民人均可支配收入[14] [15] [30] [31]”，旨在精准刻画首府城市南宁的服务业优势与沿海港口城市的经济特征；生态

维度新增“污水年排放量[15] [16]”，响应北部湾作为重要滨海生态区对水环境质量的特殊要求；设施维度补充“人均日生活用水量[15] [16] [30]”与“电信业务总量[14]”，以量化评估沿海城市在生活资源与信息基础设施支撑方面的服务能力。在指标删减方面，鉴于“二三产业占 GDP 比重[12]”与新增指标存在信息重叠，且“规模以上工业企业数[12]”等指标难以有效表征临港产业在气候风险下的脆弱性，故予以剔除。最终删减了冗余或与区域韧性核心诉求关联度较弱的指标，从而强化了指标体系的代表性与针对性。

最终从经济、社会、生态与设施四个维度构建的广西北部湾经济区城市韧性评价指标体系(见表 1)，并通过熵值法确定各指标权重，其结果见表 1。

Table 1. Urban resilience evaluation index system of the Guangxi Beibu Gulf economic zone
表 1. 广西北部湾经济区城市韧性评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标单位	属性	指标权重
城市韧性	经济韧性	人均地区生产总值[14]-[16] [31]	元	正	0.148
		第三产业占 GDP 比重[14]-[16] [30] [31]	%	正	0.1868
		当年实际使用外资金额[14]	万美元	正	0.2036
		地方一般公共预算收入[15]	亿元	正	0.2829
		城镇居民人均可支配收入[14] [15] [30] [31]	元	正	0.1786
	社会韧性	医院、卫生院床位数[14] [15] [30] [31]	张	正	0.2029
		人均城乡居民储蓄存款余额[16] [31]	元/人	正	0.0963
		普通高等学校在校学生数[14] [15] [31]	万人	正	0.3182
		城镇登记失业率[14]-[16] [31]	%	负	0.1029
		社会保障指数[14]-[16]	%	正	0.2798
	生态韧性	人均公园绿地面积[14]-[17] [30] [31]	平方米	正	0.4656
		污水处理厂集中处理率[15] [16]	%	正	0.2675
		污水年排放量[14] [15] [30]	万吨	负	0.2668
	设施韧性	建成区排水管道密度[14]-[16] [30] [31]	公里/平方公里	正	0.193
		人均日生活用水量[15] [16] [30]	升	负	0.1274
		电信业务总量[14]	亿元	正	0.3165
		互联网用户数[16] [31]	万户	正	0.2199
		人均城市道路面积[15] [16] [30] [31]	平方米	正	0.1432

由图 1 分析可知，南宁市韧性整体处于较高水平，2014~2016 年小幅度上升，后续虽有波动但基本维持在 0.6 以上，显示其具备较强的韧性与波动恢复能力；钦州市和北海市韧性整体处于中等区间，两市均在 2018 年后呈现稳步上升趋势；防城港市韧性整体偏低，2014~2018 年小幅度上升，随后呈下降态势，韧性提升速度相对滞后。

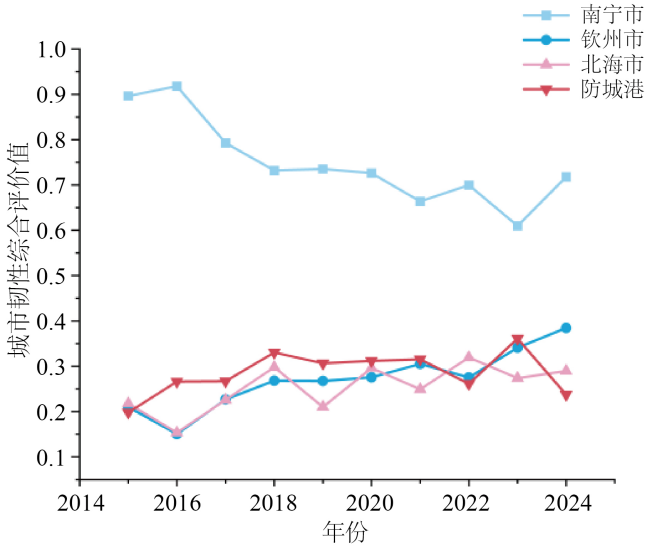

Figure 1. Trend chart of comprehensive evaluation of urban resilience in the Guangxi Beibu Gulf economic zone
图 1. 广西北部湾经济区城市韧性综合评价趋势图

3.2. 面板回归模型设定

3.2.1. 多重共线性检验

为检验变量间是否存在多重共线性问题以确保模型估计的有效性，本文采用方差膨胀因子(VIF)方法对全部变量进行多重共线性检验，结果如表 2 所示。

Table 2. VIF test results
表 2. VIF 检验结果

Variable	VIF	1/VIF
平均风速 StWs	4.26	0.234572
人力资本水平 Hum	3.31	0.302493
政府支出规模 Gov	2.59	0.385569
平均气温 StTemp	2.09	0.479185
生态环境水平 Env	1.76	0.566948
最高气温 StTmax	1.64	0.608826
降水量变化 StPerc	1.64	0.609007
经济发展水平 Eco	1.58	0.632967
Mean VIF	2.36	

所有变量的 VIF 值均分布在 4.26~1.58 区间内，远低于临界阈值 10，并且平均 VIF 值 2.36 显著低于经验阈值 5，表明多重共线性不影响估计的有效性。

3.2.2. 豪斯曼检验

基于公式(1)，判断是否选用固定效应模型。首先，通过 F 检验判断时间效应的显著性。结果显示，F 统计量为 244.83 ($p = 0.0000$)，在 5%的显著性水平下拒绝了无时间效应的原假设，表明存在显著的时间

效应。随后，进行 Hausman 检验以甄别个体效应的存在。如表 3 所示，检验结果在 5%的显著性水平下拒绝了随机效应模型适用的原假设。这证实了数据中存在显著的个体效应，即不同城市间的异质性对城市韧性具有重要影响。综上所述，应选择固定效应模型。

Table 3. Hausman test results
表 3. 豪斯曼检验结果

检验方法	检验结果	适用模型
豪斯曼检验	chi2(8) = 244.83 Prob > chi2 = 0.0000	固定效应模型

3.3. 基准回归

固定效应回归模型结果如表 4 所示，本文分别对“未加入年份固定效应”和“加入年份固定效应”的模型进行回归分析，并对比了有无控制变量时的结果差异。

Table 4. Baseline regression results
表 4. 基准回归结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
	URI	URI	URI	URI
StTemp	−0.0133	−0.0114*	−0.0247	−0.0175***
	(0.00852)	(0.00389)	(0.0115)	(0.00117)
StTmax	−0.0177	−0.00373	−0.0100	0.0115*
	(0.00779)	(0.00403)	(0.00535)	(0.00398)
StWs	−0.0218	−0.0121	−0.0327	−0.0208**
	(0.0196)	(0.0158)	(0.0139)	(0.00633)
StPerc	0.00111	0.00103	0.00201**	0.00129*
	(0.000598)	(0.000523)	(0.000600)	(0.000545)
Eco		−0.00474**		−0.00285**
		(0.00137)		(0.000507)
Gov		−0.0179		−0.00344
		(0.00889)		(0.00939)
Env		−0.000805		−0.00434**
		(0.00313)		(0.00115)
Hum		−0.00603***		−0.00860***
		(0.000737)		(0.000351)
_cons	0.421***	0.852**	0.425***	0.738**
	(0.0231)	(0.230)	(0.0343)	(0.184)
Fixed effect of region	YES	YES	YES	YES
Fixed effect of year	NO	NO	YES	YES
N	40	40	40	40
R^2	0.218	0.619	0.408	0.832

Standard errors in parentheses; * p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01.

模型(1)和模型(2)为未加入年份固定效应的回归结果。模型(1)未纳入控制变量，各气候因子对城市韧性的影响均未通过显著性检验。模型(2)加入控制变量后，平均气温的系数在 10%水平显著为负，降水量变化的系数在 5%水平显著为正。模型的拟合优度从 0.218 提升至 0.619，说明加入控制变量后拟合度得到显著提高。

模型(3)和模型(4)为同时控制地区与年份固定效应的回归结果，以控制不随时间变化的地区特征和年度共同趋势的影响。模型(3)未纳入控制变量时，平均风速的系数在 5%水平显著为负，降水量变化的系数在 5%水平显著为正。模型(4)进一步加入控制变量后，各气候因子的影响更为稳健：平均气温系数为−0.0175，在 1%水平显著为负，显示气温每升高 1 单位，韧性下降约 0.0175 单位；平均风速系数为−0.0208，在 5%水平显著为负；最高气温系数为 0.0115，在 10%水平显著为正；降水量变化系数为 0.00129，在 10%水平显著为正。控制变量中，经济发展水平、生态环境水平与人力资本均呈现显著负向关系。模型拟合优度进一步提升至 0.832，拟合效果更佳。

基准回归结果表明，气候变化对城市韧性的影响呈现差异影响。平均气温与平均风速表现出负向效应，出现该现象可能是持续高温会加速基础设施老化并增加维护成本；由于风速增大可能会加剧极端天气事件进而威胁城市安全。与之相反，最高气温与降水量变化率对城市韧性呈现弱正向效应。一方面，这一结果可能反映了特定气候波动触发适应性响应的作用机制：其一，工程适应路径：极端高温事件频发促使城市提升建筑隔热标准、增设公共降温设施与应急避暑场所；其二，管理适应路径：降水波动加剧倒逼城市完善排水系统运维、内涝应急响应与跨部门协同机制；其三，生态调节路径：降水增加与高温并存可缓解土壤水分亏缺，对红树林、滨海湿地等关键生态系统形成正向水分补给。另一方面，这一正向效应也可能部分源于韧性指标体系的测量捕获偏差，如生态维度中人均公园绿地面积等指标与降水量存在天然耦合，设施维度中电信业务总量等指标与高温消费行为存在关联。需要指出的是，上述效应具有明确的阈值依赖性，超出城市系统承载能力后可能会转为负面冲击。

控制变量中，经济发展水平、生态环境水平与人力资本均呈现显著负向关系。这一结果没有达到理论预期，可能部分源于控制变量与韧性指标之间的测量偏差，但也同时反映出区域发展模式与韧性目标之间的深层张力。经济发展水平的负向效应(−0.00285)表明，以临港重化工业为主导的增长模式具有高气候敏感性，经济扩张期放大了气候冲击下的潜在损失；生态环境水平的负向效应(−0.00434)反映出建成区绿化覆盖率存在“重数量、轻质量”倾向，难以发挥防风、调蓄等关键缓冲作用；人力资本水平的负向效应(−0.0086)则指向人才供需的结构性错配，高校专业设置与防灾减灾、气候适应等关键领域脱节，导致人才存量难以支撑韧性建设需求。

3.4. 稳健性检验

为进一步检验基准回归结果的稳健性，本文采用如下方法再次进行回归。

3.4.1. 改变滞后期窗宽

在基准回归基础上，为验证研究结论的可靠性，本文通过改变滞后期窗宽和更换韧性评估方法进行稳健性检验。首先，将标准化气候因子的滞后期窗宽由基准模型的 30 年调整为 20 年，重新进行回归分析，结果见表 5 的模型(1)。

模型(1)所示，各气候因子的系数方向和显著性水平与基准回归结果保持一致：平均气温和平均风速的系数仍在 5%水平上显著为负，最高气温和降水量变化的系数分别在 5%和 10%水平上显著为正。控制变量的显著性特征也与基准模型基本一致。同时，模型拟合达到 0.838，高于基准回归的 0.832，表明模型解释力良好。这一结果说明，改变滞后期窗宽设置并未影响基准回归的主要结论，研究结果具有较好的稳健性。

3.4.2. 更换韧性评估方法

借鉴陈建刚等学者所采用的熵权-AHP 方法框架[32]，本研究通过层次分析法(AHP)确定主观权重，利用熵值法计算客观权重，进而采用组合赋权法融合二者；基于融合权重对标准化后的指标数据进行加权计算，直接得出城市韧性综合评价值，从而构建新的韧性评估体系。通过重新回归估计，以消除因韧性评估方法差异导致的潜在偏误。具体方法如下：

$$\sum_{j=1}^{n}\beta_j = 1 \tag{10}$$

$$W_j = \alpha_1 \cdot w_j + \alpha_2 \cdot \beta_j \tag{11}$$

$$URI = \sum_{k=1}^{4} w_k \cdot \left(\sum_{j=1}^{n_k} w_j \cdot \hat{x}_{kj} \right) \tag{12}$$

式中各参数含义如下：w 为熵值法客观权重向量(公式(10))，β 为 AHP 法主观权重向量。城市综合韧性指数 URI 系首先根据公式(11)求得子系统得分，继而代入公式(4)，利用子系统熵权进行加权汇总后得出。其中，$\hat{x}_{kj}$ 指第 k 个子系统的第 j 项标准化指标值，n_k 为第 k 个子系统的指标数量；下标 k 从 1 到 4，依次代表经济、社会、生态、设施四个子系统。

更换韧性评估方法后的回归结果如表 5 中模型(2)所示：标准化平均气温、最高气温和平均风速的回归系数分别为−0.0167、0.0105 与−0.0205，均在 5%或 10%水平下显著，且系数方向与数值大小与基准回归模型(3)中对应的−0.0175、0.0115 与−0.0208 高度接近；标准化降水量变化率的回归系数为 0.00114，在 10%水平下显著，虽略低于基准回归的 0.00129，但仍保持一致的显著性特征与影响方向。

Table 5. Robustness test results
表 5. 稳健性检验结果

	改变滞后期窗宽	更换韧性评估方法
	模型(1)	模型(2)
StTemp	−0.0193**	−0.0167***
	(0.00562)	(0.00232)
StTmax	0.00782**	0.0105***
	(0.00208)	(0.00154)
StWs	−0.0156**	−0.0205*
	(0.00486)	(0.00864)
StPerc	0.00148*	0.00114*
	(0.000627)	(0.000446)
Eco	−0.00396*	−0.00284**
	(0.00150)	(0.000858)
Gov	0.0142	0.00758
	(0.0147)	(0.0108)
Env	−0.00212	−0.00377
	(0.00210)	(0.00213)

续表

Hum	−0.00816***	−0.00791***
	(0.000774)	(0.000686)
_cons	0.481*	0.594**
	(0.200)	(0.178)
N	40	40
R^2	0.838	0.847

Standard errors in parentheses; * p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01.

上述稳健性检验表明，改变滞后期窗口和更换韧性评估方法后，核心气象变量对城市韧性的影响依然稳健，其估计结果与基准回归之间未出现系统性偏差，表明本文的基准回归结果与结论具有稳健性。

3.5. 内生性检验

为检验解释变量间的内生性问题，本文采用杜宾－豪斯曼(DWH)检验以识别核心变量的内生性。其原理是先将内生怀疑变量对工具变量回归得到残差，再将残差纳入原模型。若残差系数显著，则证实内生性存在。

Table 6. Endogeneity test results
表 6. 内生性检验结果

被检验变量	残差项系数	t 值	p 值	结论
StTemp	0.0202917	0.65	0.4953	不存在内生性
StTmax	0.0004974	0.024	0.1745	不存在内生性
StWs	−0.0098891	0.01	0.0652	不存在内生性
StPerc	−0.0008895	0.0016	0.5223	不存在内生性

检验结果由表 6 可知，所有气候变量的残差项系数均未通过显著性检验(p 值均大于 0.05)，表明各核心解释变量与扰动项无显著关联，不存在内生性问题。

4. 结论与建议

4.1. 结论

本文基于 2015~2024 年广西北部湾经济区(南宁、钦州、北海、防城港四市)的面板数据，从经济、社会、生态和基础设施四个维度构建了广西北部湾经济区城市韧性评价指标体系，运用熵权法确定指标权重，对其城市韧性进行测度。在此基础上，采用双向固定效应面板模型实证研究气候变化对广西北部湾经济区城市韧性的影响，并进行了稳健性检验和内生性检验。主要结论如下：

第一，南宁市显著领先于钦州、北海、防城港市，长期处于区域高位；钦州、北海、防城港市之间的韧性水平差异相对较小，整体发展态势较为接近排序依次为南宁市、北海市、钦州市、防城港市。

第二，经济发展、生态环境与人力资本等控制变量呈弱负向影响。这一结果既可能源于控制变量与韧性指标之间的测量偏差，也折射出临港重化工业的高气候敏感性、绿化建设的质量滞后以及人才专业结构错配等区域发展特征。

第三，不同气候要素对城市韧性的作用方向和强度存在差异。平均气温与平均风速对城市韧性产生显著抑制作用：在北部湾区域背景下，持续升温可能加速基础设施老化并增加能源系统负荷，而风速增强则可能威胁港口运营安全与临港产业稳定。上述负向效应是本文的核心结论，部分变量的“反常”表现也为韧性评价体系的进一步优化提供了重要参考。相比之下，最高气温与降水变化率呈现弱正向效应，这一结果既可能源于工程、管理与生态三条适应性响应路径，也可能部分受到生态与设施维度测量捕获偏差的影响，且具有明确的阈值依赖性。

4.2. 建议

基于上述研究结论，本文提出如下政策建议：

第一，实施差异化韧性策略，推动区域协同治理。南宁市应发挥高韧性基础优势，重点布局气候适应型产业，通过技术辐射带动区域整体提升。钦州、北海、防城港等沿海城市需协同加强港口、临港产业区等重点经济单元的气候防护标准，共同推进沿海防护设施、智慧排水系统的联防联控建设，并重视滨海湿地等生态屏障的修复与保护，系统性降低沿海地带的气候脆弱性。同时，可建立跨市应急联动与信息共享机制。

第二，精准应对关键气候因子影响。针对气温上升的负向效应，强制推广耐热建材，科学规划生态通风廊道，以缓解热岛效应。针对风速增强的威胁，建设沿海防风林带，全面提升港口设施抗风等级。针对最高气温与降水变化率呈现的弱正向效应，一方面，可通过工程、管理与生态三条路径协同发力：在工程层面推广耐热建材与公共降温设施，在管理层面健全内涝应急响应与跨部门协同机制，在生态层面将海绵城市设施、雨水收集系统与红树林、湿地保护修复工程统筹推进；另一方面，需注意韧性评价体系的测量偏差问题，避免对有限正向效应的过度解读，持续完善指标体系以更准确地反映城市韧性的真实水平。

第三，优化韧性建设的结构性支撑。推动经济增长与生态建设的“韧性转型”，重点发展抗气候风险的绿色产业，提升生态系统的调节服务功能。针对人力资本的负向影响，优化高等教育与职业培训体系，增设防灾减灾、气候适应等专业方向，建立人才向关键领域流动的激励机制，切实解决供需错配问题。

此外，未来研究可在以下方面进一步深化：一是控制变量的审慎选取，避免将人均 GDP、人力资本存量等与韧性指标体系存在重叠的变量纳入回归，以消除控制变量导致的估计偏误；二是引入气候变量的平方项与滞后项，检验非线性关系与动态效应；三是采用工具变量法或系统广义矩估计方法，缓解内生性问题。上述改进将有助于更准确地识别气候变化对城市韧性的影响机制，为韧性城市建设提供更坚实的实证支撑。

参考文献

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[EB/OL]. 2021-03-13. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm, 2025-07-18.

[2] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于推动城乡建设绿色发展的意见[EB/OL]. 2021-10-21. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5649730.htm, 2025-07-18.

[3] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发《国家适应气候变化战略 2035》的通知[EB/OL]. 2022-05-10. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-06/14/content_5695555.htm, 2022-06-14.

[4] 中共中央办公厅, 国务院办公厅. 关于推进新型城市基础设施建设打造韧性城市的意见[EB/OL]. 2024-11-26. https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6991171.htm, 2024-12-05.

[5] 中华人民共和国生态环境部. 中国适应气候变化进展报告（2024）[EB/OL]. 2025-06-24. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202506/W020250624798282455900.pdf, 2025-10-26.

[6] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245

[7] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., Lee, G.C., O'Rourke, T.D., Reinhorn, A.M., *et al*. (2003) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752. https://doi.org/10.1193/1.1623497

[8] Cutter, S.L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., *et al*. (2008) A Place-Based Model for Understanding Community Resilience to Natural Disasters. *Global Environmental Change*, **18**, 598-606. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013

[9] Wilbanks, T.J. and Kates, R.W. (1999) Global Change in Local Places: How Scale Matters. *Climatic Change*, **43**, 601-628. https://doi.org/10.1023/a:1005418924748

[10] Desouza, K.C. and Flanery, T.H. (2013) Designing, Planning, and Managing Resilient Cities: A Conceptual Framework. *Cities*, **35**, 89-99. https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.06.003

[11] Meerow, S., Newell, J.P. and Stults, M. (2016) Defining Urban Resilience: A Review. *Landscape and Urban Planning*, **147**, 38-49. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011

[12] 邓育洲. 中国城市韧性综合评价研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 江苏大学, 2023.

[13] 彭浩. 海绵城市建设对城市韧性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东政法大学, 2023.

[14] 刘祖容, 郭慧娟. 城市韧性与土地利用效益耦合协调研究——以广西壮族自治区地级市为例[J]. 科技通报, 2023, 39(5): 29-41+124.

[15] 高伟, 张理浩. 城市韧性水平测度及建设路径研究——以广西为例[J]. 北京城市学院学报, 2023, 15(3): 10-19.

[16] 农雪雯. 韧性视角下广西城市防灾减灾策略研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西民族大学, 2020.

[17] 宋甘霖, 罗晓茜, 唐伊雯. 城市规模对生态韧性影响效应及相关关系研究——基于 2016-2020 年广西城市数据的实证分析[C]//中国城市规划学会. 人民城市, 规划赋能——2022 中国城市规划年会论文集(01 城市安全与防灾规划). 武汉: 中国城市规划学会, 2023: 75-86.

[18] 李梁. 海平面上升威胁正在加剧[J]. 生态经济, 2020, 36(2): 5-8.

[19] 黄雪松, 陈燕丽, 莫伟华, 等. 近 60 年广西北部湾红树林生态区气候变化及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 5026-5033.

[20] 兰向宇, 王曼君. 气候变化对城市给排水系统的影响及设计应对策略[J]. 居舍, 2023(21): 91-93+105.

[21] 杨荣. 气候变化影响下的韧性城市建设管理初探——以浙江宁波为例[J]. 中国投资(中英文), 2023(Z8): 86-89.

[22] 王玉洁, 林欣. 京津冀城市群气候变化及影响适应研究综述[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(6): 743-755.

[23] 刘玲娜, 雷涯邻. 中国省会城市韧性变化及影响因素研究[J]. 科技与经济, 2022, 35(1): 1-5.

[24] 罗紫元, 曾坚. 城市化品质、城市韧性与"台风-暴雨"灾害风险分析——以 7 个东南沿海省市为例[J]. 科技导报, 2021, 39(15): 124-134.

[25] Intergovernmental Panel on Climate Change (2012) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Adaptation. Cambridge University Press, 1-239.

[26] 丁宇刚, 孙祁祥. 气候风险对中国农业经济发展的影响——异质性及机制分析[J]. 金融研究, 2022(9): 111-131.

[27] 马永喜, 刘洋, 俞书傲. 气候变化对农业经济韧性的影响效应研究——财政支农的调节作用[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2025, 33(1): 166-177.

[28] 张建刚, 马原野. 气候变化风险与城市韧性提升——基于海绵城市和气候适应型城市试点政策协同视角[J]. 城市学刊, 2024, 45(4): 65-74.

[29] 魏炜, 李程程, 莫崇勋, 等. 广西沿海城市近 65 年降水演变特征及归因分析[J]. 广西水利水电, 2021(2): 47-51.

[30] 王儒鑫. 旅游业高质量发展与城市韧性耦合协调的动态演化及驱动因素研究——以广西为例[J]. 重庆科技大学学报(社会科学版), 2025(4): 1-21.

[31] 李芷皓. 城市韧性度量及其提升策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2023.

[32] 陈建刚, 龚应安, 郑凡东, 等. 基于 AHP 和熵权法的北京水务韧性评价体系构建[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(5): 782-788.