

吴玉彬,高文倩,姜丽莎.西北寒旱区城市生态韧性的水平测度、时空演进与组态路径[J].中国沙漠,2026,46(4):398-410.

西北寒旱区城市生态韧性的水平测度、 时空演进与组态路径

吴玉彬,高文倩,姜丽莎

(兰州财经大学会计学院,甘肃 兰州 730020)

摘要:西北寒旱区城市生态韧性的提升,既关乎西北寒旱区水文平衡与可持续发展,又关乎中国生态安全屏障建设和国土空间开发布局。以西北寒旱区城市生态韧性为研究对象,基于抵抗—适应—恢复三维动态视角构建西北寒旱区城市生态韧性测度框架。在此基础上,利用熵权法对2014—2024年西北寒旱区城市生态韧性展开测度,并采用核密度估计函数与模糊集定性比较分析方法刻画其动态演进及组态路径。结果表明:(1)西北寒旱区城市生态韧性整体水平较低,各维度发展不均衡成为西北寒旱区城市生态韧性提升的瓶颈。(2)当前西北寒旱区城市生态韧性呈两极分化加剧的演进态势,且不同日照时数区之间的韧性差异持续扩大,其中强日照区城市的内部不均衡问题尤为突出。(3)生态韧性并非依赖单一要素的线性叠加,而是存在财政宽松引领模式、技术创新赋能模式、社会需求驱动模式和耦合提升模式4类组态路径。

关键词:西北寒旱区城市;生态韧性;时空演进;核密度估计;模糊集定性比较分析

文章编号: 1000-694X(2026)04-398-13

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00128

中图分类号: X22

文献标志码: A

0 引言

西北寒旱区生态系统脆弱性与人地协调发展失衡问题是制约区域可持续发展的根源,也是阻碍中国生态安全格局优化的重要因素^[1]。近年来,受全球气候变化的影响,水土流失、植被退化等问题进一步加剧^[2],直接威胁西北寒旱区城市生态系统安全。针对西北寒旱区风沙治理、水源涵养与水土保持等重点生态修复任务,国家先后实施“三北”工程、祁连山生态修复等治理举措,但早期治理侧重单一生态要素修复,对区域生态系统抗扰动能力与自适应演化规律关注不足,致使生态系统保护成本高昂与区域经济发展滞后之间的结构性冲突持续凸显^[3]。基于生态系统脆弱性与人地发展的现实矛盾,党的二十大报告中明确提出“坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,全方位、全地域、全过程加强生态环境保护”。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》提出“统

筹推进重要生态系统保护和修复重大工程”,进一步强调“加强青藏高原等地区生态屏障建设”。作为生态安全与可持续发展的核心概念,生态韧性的提升有助于实现经济与环境的协同共进,既是应对寒旱区极端气候、土地退化等生态风险的客观需要,也是统筹寒旱区生态治理与特色产业发展的主动选择,更是夯实中国西部生态安全屏障的必然要求^[1]。然而,受制于先天脆弱的自然本底与后发赶超进程中高强度人类活动的双重压力,当前西北寒旱区生态韧性建设正陷入生态负重—发展承压的结构性困境,导致区域生态治理效能难以内化为经济发展的新动能,阻碍生态治理与经济发展的良性循环,逐步凸显为新发展阶段统筹西北寒旱区生态安全与区域经济发展亟待破解的关键议题。

在此背景下,如何提升城市生态韧性成为学界和业界共同关注的重要话题。已有研究围绕生态韧性的量化测度与时空演进展开了丰富探索,并在此基础上考察了生态韧性的驱动因素。在测度方

收稿日期:2026-06-18; 改回日期:2026-07-10

资助项目:甘肃省科技厅软科学专项项目(25JRZA082);甘肃省科技厅软科学专项青年项目(25JRZA096)

作者简介:吴玉彬(1982—),男,河南周口人,博士,副教授,研究方向为财务理论、资本市场与公司治理。E-mail: wuyb@lzu.edu.cn

通信作者:姜丽莎(E-mail: llishaa@163.com)

面,既有研究主要依托演化韧性理论^[4]与适应性循环理论^[5],结合PSR^[6]、DPSIR^[7]等模型构建了差异化生态韧性测度框架,通过熵值法^[4-10]、主成分分析法^[11]与等权赋值法^[6]等方法确定指标权重,据此对各研究区生态韧性发展水平展开测度。在时空演进方面,既有研究综合运用核密度估计^[6,10,12-13]、空间自相关模型^[7]、传统和空间马尔科夫链^[4]与重心—标准差椭圆^[13]等方法,对黄河流域^[4,6,12]、长江经济带^[9,13]、环渤海海岸^[14]、鄱阳湖流域^[5]、山地城市^[10]与河西走廊^[11]等不同地理单元的城市或县域生态韧性时序演变进行分析,并依据地理区位进一步解析生态韧性的差异化空间格局。在驱动因素方面,既有研究认为生态韧性是多重影响因素相互作用的结果,多采用STIRPAT模型^[8]、空间杜宾模型^[6]、XGBoost-SHAP模型^[12]与时空地理加权回归模型^[9]等方法,进一步从社会经济和自然禀赋两个维度解构影响生态韧性的核心因素,以探索各要素对生态韧性的复杂驱动机制。

近年来学术界对生态韧性量化测度、时空演进与驱动因素进行了有益探索,为本文的研究提供了重要的理论参照与逻辑起点。然而,仍存在尚待完善之处:第一,现有文献通过多元化理论体系和计量模型,对经济活动密集活跃城市或县域的生态韧性展开测度,但西北寒旱区城市作为独特的生态脆弱单元尚未被纳入独立的评估框架,缺乏针对寒旱区城市生态韧性水平的系统性量化评估。第二,现有生态韧性时空演进的文献侧重揭示全域整体的时序演变规律,并依托传统地理区位划分逻辑开展区域内部生态韧性差异分析,缺乏依据区域核心资源禀赋开展的空间分异研究。第三,现有文献对生态韧性驱动因素的研究以传统回归、障碍度模型与空间计量等方法为主,鲜有研究从组态视角探究寒旱区城市生态韧性提升的多元组合路径,难以精准刻画寒旱区特殊生态底蕴下城市生态韧性提升的复合型实现路径。

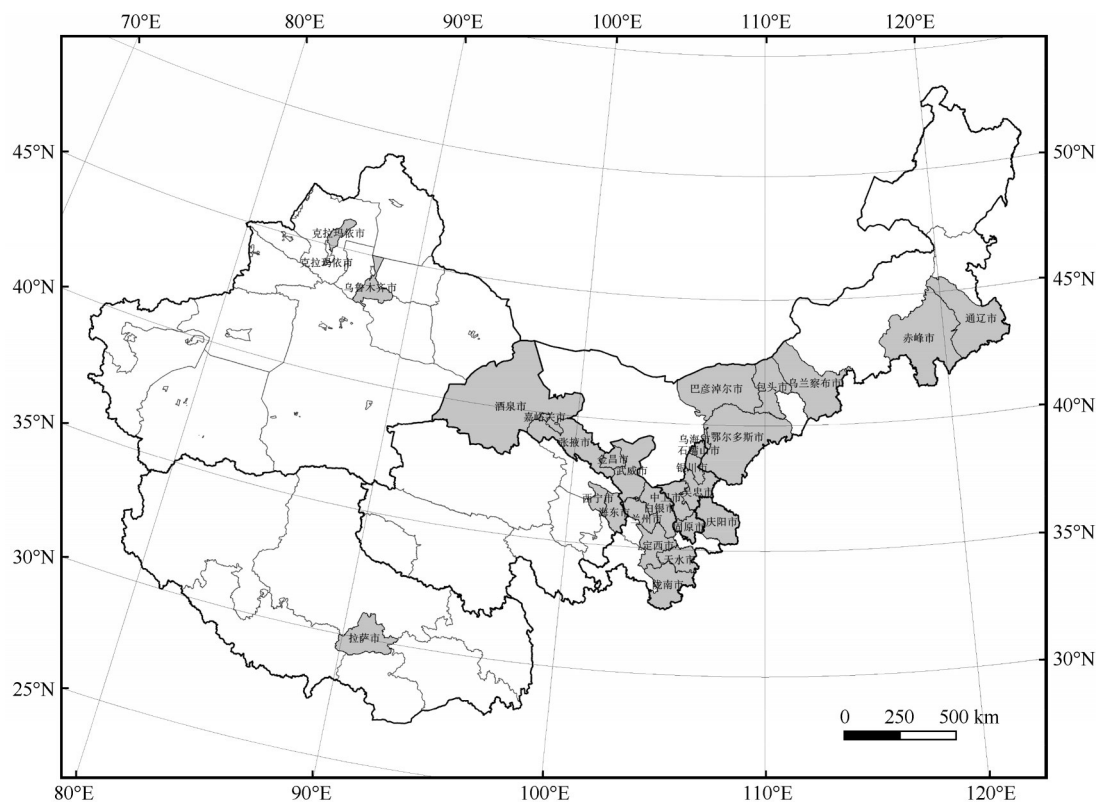
鉴此,本文立足于西北寒旱区的生态禀赋与发展现状,从动态视角对城市生态韧性开展量化测度、时空演进及驱动因素的针对性研究。相较于既有文献,本文的边际贡献在于:(1)依托社会生态系统理论,构建适配寒旱区城市的生态韧性评价指标体系,为寒旱区生态韧性提升提供经验证据。(2)引入核密度估计深入剖析西北寒旱区城市生态韧性时序演变特征,并依据年日照时数将样本城市划分

为强日照寒旱区和弱日照寒旱区,以考察不同寒旱资源禀赋条件下城市生态韧性的差异化特征,弥补当前区域划分忽视资源禀赋的缺憾。(3)借助模糊集定性比较分析(fsQCA)方法,识别驱动西北寒旱区城市生态韧性提升的多元组合路径,为制定区域生态保护与城市高质量协同发展的政策组合体系与优化路径提供学理支撑与现实参考。

1 研究区概况

西北寒旱区(26.85°—53.34°N,73.51°—126.07°E)横跨黄土高原、青藏高原与蒙古高原三大地理单元,总面积为526.52万km²,主要覆盖西北干旱半干旱区以及青藏高原高寒区(图1)。高寒、干旱气候是研究区的核心特征,受地形格局影响,区域整体兼具温带大陆性气候、温带季风气候、高原山地气候等多种气候类型,降水匮乏且集中于夏季。土地沙化严重是该区域典型的生态问题,干旱少雨的气候特征与复杂分布的地形交叠,使得研究区沙尘天气频发,全域沙化土地总面积为16 198.60万hm²,强烈的风沙侵蚀加剧土地退化进程。水资源短缺是寒旱区生态修复的瓶颈,全域水资源总量7 095.19亿m³,无稳定的大气降水补给,区域生产生活高度依赖冰川和积雪融水。高强度人为开发压力加剧区域生态脆弱性,作为“一带一路”建设、新时代西部大开发等的核心区域,研究区承载着区域经济发展、农牧生产与基础建设等多重人类活动压力,2017年寒旱区农用地和建设用地面积分别为28 927.23万hm²、507.67万hm²。人为开发、水资源消耗等干扰活动不断逼近寒旱区生态系统承载阈值,导致区域水土流失加剧、河湖湿地萎缩,2017年自然保护区总面积约10 483.5万hm²,相较于2014年减少了25.5万hm²;2017年湖泊总面积约为21 732 km²,相较于2012年减少了905.4 km²(数据来源于《中国环境统计年鉴》和《中国水利统计年鉴》)。

鉴于内蒙古、西藏、甘肃、青海、宁夏及新疆6个省(自治区)地处中国西北内陆与青藏高原的核心区域,整体兼具高寒、干旱、半干旱的典型气候特征,同属中国西北地区典型的寒旱生态地理单元,本文将其作为西北寒旱区城市研究的区域范围。进一步地,综合考虑数据的可得性、完整性与连续性,最终选取六省(自治区)内共28个地级及以上城市作为研究样本:包头市、乌海市、赤峰市、通辽市、



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)6727号的标准地图制作,底图边界无修改

图1 西北寒旱区城市研究范围

Fig.1 Research scope of the cold and arid regions of northwest China

鄂尔多斯市、巴彦淖尔市、乌兰察布市、拉萨市、兰州市、嘉峪关市、金昌市、白银市、天水市、武威市、张掖市、酒泉市、庆阳市、定西市、陇南市、西宁市、海东市、银川市、石嘴山市、吴忠市、固原市、中卫市、乌鲁木齐市与克拉玛依市。

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 数据来源

研究期为2014—2024年,旨在测度28个西北寒旱区城市的生态韧性水平。各指标及条件变量原始数据均来源于《中国统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及六省(自治区)相关地级市的统计年鉴。对于个别年份存在的数据缺失值,采用线性插值法予以补齐。

2.1.2 指标体系构建

城市生态韧性的本质在于城市面临多重自然扰动与人为胁迫时,维持自身生态功能稳定并持续支撑人类社会发展的动态能力^[3],强调城市生态系统依托既有生态基底,保障物质循环与生态服务的

持续供给。在韧性视角下,生态环境体系突破了自然生态的边界,外延至社会—经济—生态协同演进的城市全生命周期,既需应对自然风险,也需适配人为压力,并兼具灾后修复与功能升级的能力,从而形成动态调适、良性迭代的生态发展模式。据此,本文借鉴Francis等^[15]提出的韧性三能力框架,从抵抗—适应—恢复三维动态视角构建生态韧性评价指标体系。

抵抗力指生态系统在常态运行时,通过自然资源储备降低潜在风险发生概率的能力^[16]。西北寒旱区城市抵抗力测度的核心逻辑,在于衡量风险发生前城市所拥有的缓冲资源存量。具体而言,水资源总量直接决定西北寒旱区城市的水文生态稳定性,人均水资源拥有量可反映生态资源的储备水平。建成区绿化覆盖率可衡量西北寒旱区城市生态系统的抗干扰能力,覆盖率越高,气候调节功能越强。人均公园绿地面积(市辖区)聚焦居民的生态缓冲空间,可用于衡量极端天气下生态服务的持续供给能力。人均建成区面积(市辖区)可用于衡量生态系统对人类活动的容纳能力,充裕的城市建设空间有助于分散生态系统承载压力。鉴此,选取

人均水资源拥有量、建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积(市辖区)和人均建成区面积(市辖区)4个指标衡量抵抗力。

适应力指外部冲击发生时,生态系统能迅速调动各类资源,缓冲并吸收扰动带来的负面影响、避免功能瘫痪的能力^[17]。西北寒旱区城市的生态本底以戈壁荒漠、冰川冻土等脆弱资源为主,其对工业化、城镇化引发的污染扰动较为敏感。具体而言,人均工业废水排放量能有效反映出西北寒旱区城市水体受工业污染的扰动程度,体现了西北寒旱区水生态的承压能力。工业二氧化硫和氮氧化物易引发大气酸化等生态问题,可用于测度生态系统对气态污染物的适配能力。工业烟尘会沉积在戈壁、荒漠地表,通过改变土壤微生物结构加剧土地沙化与植被退化,人均工业烟尘排放量能够反映工业颗粒物对生态环境的冲击程度。鉴此,选取人均工业废水排放量、人均工业二氧化硫排放量、人均氮氧化物排放量和人均工业烟尘排放量4个指标衡量适应力。

恢复力指扰动消退后,生态系统通过修复生态环境、重建生态网络,使生态系统功能不低于原有水平甚至优于原先状态的能力^[18]。水资源损耗与土地荒漠化的不可逆性,表明生态系统难以完全实现自主修复。恢复力测度的核心逻辑,在于衡量风险发生后城市如何通过人工治理实现生态功能“升级式恢复”。具体而言,生活垃圾无害化处理率,能够反映西北寒旱区城市对固体废物的末端处理能力。污水处理厂集中处理率是西北寒旱区城市核心水资源循环稳定性的重要保障,有助于反映城市人工修复受污水体的能力。降低资源消耗有助于优化生态修复质量,一般工业固体废物综合利用率能够刻画循环利用对缓解生态系统修复压力的贡献。生态系统的恢复升级依赖制度供给与资金投入,政府环保支出占一般财政支出比例能够刻画政府保障生态系统主动优化升级的能力。鉴此,选取生活垃圾无害化处理率、污水处理厂集中处理率、一般工业固体废物综合利用率和政府环保支出占一般财政支出比例4个指标衡量恢复力。

基于上述分析,本文借鉴丁煜莹等^[18]、陶洁怡等^[8]与楚尔鸣等^[19]的研究,从抵抗力、适应力、恢复力3个维度出发,构建包含3个一级指标和12个二级指标的城市生态韧性评价指标体系(表1)。

表 1 城市生态韧性评价指标体系			
Table 1 Urban ecological resilience evaluation index system			
一级指标	二级指标	指标属性	权重
抵抗力	人均水资源拥有量	+	0.6295
	建成区绿化覆盖率	+	0.0167
	人均公园绿地面积(市辖区)	+	0.0875
	人均建成区面积(市辖区)	+	0.2664
适应力	人均工业废水排放量	-	0.2099
	人均工业二氧化硫排放量	-	0.2712
	人均氮氧化物排放量	-	0.2284
	人均工业烟尘排放量	-	0.2905
恢复力	生活垃圾无害化处理率	+	0.0197
	污水处理厂集中处理率	+	0.0358
	一般工业固体废物综合利用率	+	0.3704
	政府环保支出占一般财政支出比例	+	0.5715

2.1.3 条件变量选取

为探究多重驱动因素以何种组合方式影响生态韧性的生成路径,本文引入模糊集定性比较分析方法进行系统解构。以西北寒旱区城市生态韧性(UER)为基础,将影响生态系统吸收扰动、维持功能并实现重组恢复的关键因素作为条件变量的选取准则。本文依托 TOE 理论框架^[20],结合寒旱区特殊的自然禀赋,构建社会技术—行政治理—自然底蕴三维分析体系,社会诉求提供内在动力,技术创新优化治理模式,财政约束影响资源配置,环境规制划定政策标准,生态本底决定基础能力。5个变量相互联动,共同驱动西北寒旱区城市生态韧性的提升。

(1) 社会诉求(SD)。社会诉求反映公众对城市生态保护的主观期望^[21],在西北寒旱区城市面临生态退化威胁时,公众意愿形成的舆论压力可精准传导环保诉求,在社会层面形成生态共治,为生态韧性持续提升奠定社会基础。鉴此,本文借鉴祁毓等^[22]的研究,采用百度指数中的“生态”词频数衡量社会诉求。

(2) 技术创新(TI)。技术创新通过技术赋能生态韧性迭代升级^[23],绿色低碳与生态修复技术的广泛应用有助于修复受损生态,从技术层面破解生态修复难度大的痛点,推动生态韧性从被动恢复向主动防御跃升。鉴此,本文借鉴金华丽等^[24]的研究,

采用绿色专利授权量衡量技术创新。

(3) 财政约束(*FC*)。财政约束是城市生态韧性稳步提升的核心保障^[25],较低的财政约束有助于优化城市生态资源与财政资源的适配度,稳固生态韧性基础。鉴此,本文借鉴李军^[26]的研究,采用政府一般财政收入占一般财政支出的比重衡量财政约束。

(4) 环境规制(*ER*)。常态化环境规制有助于规范区域生态开发行为^[27],通过维系生态系统稳定性和完整性,为生态环境脆弱、资源承载力有限的西北寒旱区城市夯实制度基础。鉴此,本文借鉴邓慧慧等^[28]的研究,采用地级市政府工作报告中“环保”词频数占报告总字数的比重衡量环境规制力度。

(5) 生态本底(*EB*)。作为西北寒旱区城市抵御外界冲击的物理基础和天然屏障,生态本底直接决定生态系统的初始抵抗力和自我修复上限^[29],良好的生态格局可有效规避不可逆的退化风险,筑牢生态韧性根基。鉴此,本文借鉴李涛等^[30]的研究,采用植被归一化指数衡量生态本底。

2.2 研究方法

2.2.1 熵权法

作为客观赋权方法,熵权法的基本原理强调,指标观测值的离散程度越大,该指标蕴含的信息量越多,相应的权重也越高;反之,离散程度越小,权重越低。相较于主观赋权法,熵权法能有效避免个人主观偏好对权重分配的影响,有助于更科学准确地挖掘数据本身的差异化信息,强化评价结果的客观性与可重复性。鉴此,本文借鉴吴玉彬等^[31]的研究,采用熵权法测度西北寒旱区城市生态韧性水平。

2.2.2 核密度估计

核密度为非均衡分布中最常用的一种估计方法,其原理是利用数据自身对其分布概率建立核密度曲线。该方法通过核函数平滑处理样本数据,可以直观呈现研究对象的分布集聚特征、极化差异与动态演变轨迹。为进一步厘清西北寒旱区城市生态韧性的动态演化特征,本文借鉴谭海波等^[20]的研究,采用核密度估计方法精准识别寒旱区、强日照区和弱日照区内生态韧性的梯度差异与演变规律。本文用Eviews10.0绘制核密度分布图。

2.2.3 模糊集定性比较分析

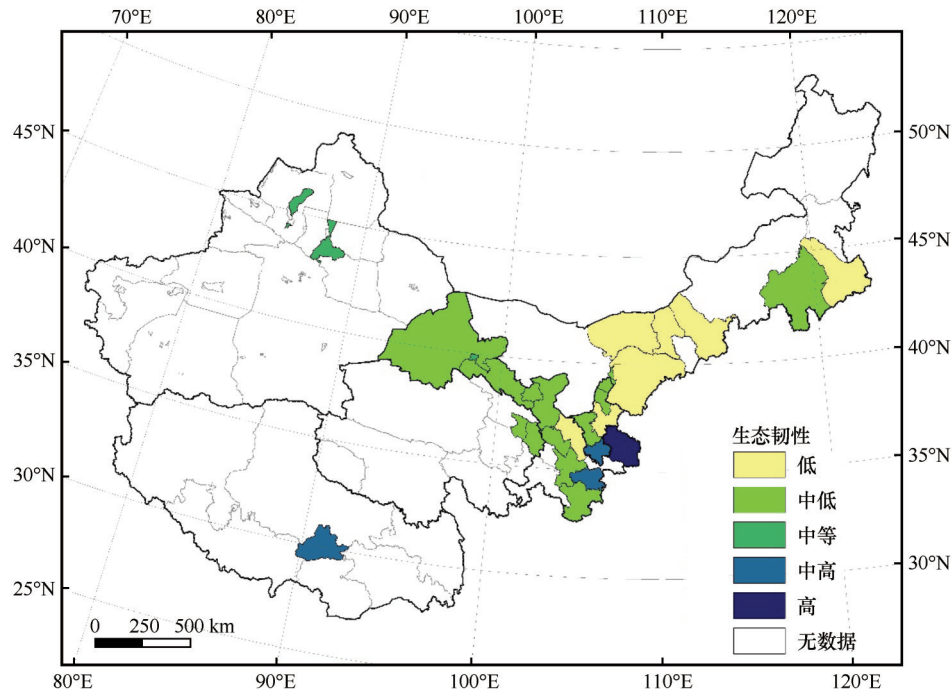
模糊集定性比较分析(fsQCA)是一种基于集合论与布尔代数的组态分析方法,能有效揭示变量之间的非线性关系与多重并发因果关系^[32],尤其适用于探究多变量协同作用对结果变量的复杂驱动机制。在使用fsQCA时,首先要明确结果变量与研究案例,筛选出能解释结果变量变化的前因条件。其次依据理解或经验确定校准锚点,对所有变量进行校准,以此构建真值表用于对比不同案例的前因条件组合。最后进行模糊集分析,以检验单个前因条件的必要性或多条件组合的充分性,从而识别出影响结果变量的多因素组态路径。鉴于本文旨在探究西北寒旱区城市生态韧性的提升路径,而该问题涉及多因素的复杂交互作用,传统回归模型难以刻画此类非线性组态效应。因此,本文采用fsQCA方法,结合架构理论与布尔代数运算,系统分析各前因条件的组合效应,以揭示西北寒旱区城市生态韧性的多元并发因果机制。

3 结果与分析

3.1 西北寒旱区城市生态韧性空间格局

3.1.1 综合分析

为全面把握西北寒旱区城市生态韧性的空间分异,本文采用ArcGIS软件并利用自然间断点法划分各层级的区间范围,将西北寒旱区城市生态韧性划分为低生态韧性、中低生态韧性、中等生态韧性、中高生态韧性、高生态韧性,各区间取值范围分别为(0.00–0.05]、(0.05–0.10]、(0.10–0.15]、(0.15–0.35]、(0.35–0.73]。西北寒旱区城市生态韧性整体呈现全域梯度分异、东西两极分化的非均衡格局(图2)。庆阳是西北寒旱区内唯一断层领先的高生态韧性城市,依托子午岭林区的原生林地与固沟保塬等系统性治理措施,人类活动的胁迫效应被该市控制在可调节阈值内,生态系统卓越的自我调节与恢复能力得以保持。中高韧性城市呈点状分布,包括天水、拉萨和固原,这些城市存在原生植被作为缓冲空间,但水土承载能力较弱导致生态系统天然缓冲空间有限,环境治理投入难以完全消解气候波动与生产生活带来的胁迫,整体生态韧性仅次于庆阳市。中等韧性城市在工矿地带连片分布,乌鲁木齐、克拉玛依、嘉峪关为典型城市,这些城市具备一定的生态防御基础与环境治理能力,但人类活动强



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)6727号的标准地图制作，底图边界无修改

图2 2024年西北寒旱区城市生态韧性空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecological resilience in the cold and arid regions of northwest China, 2024

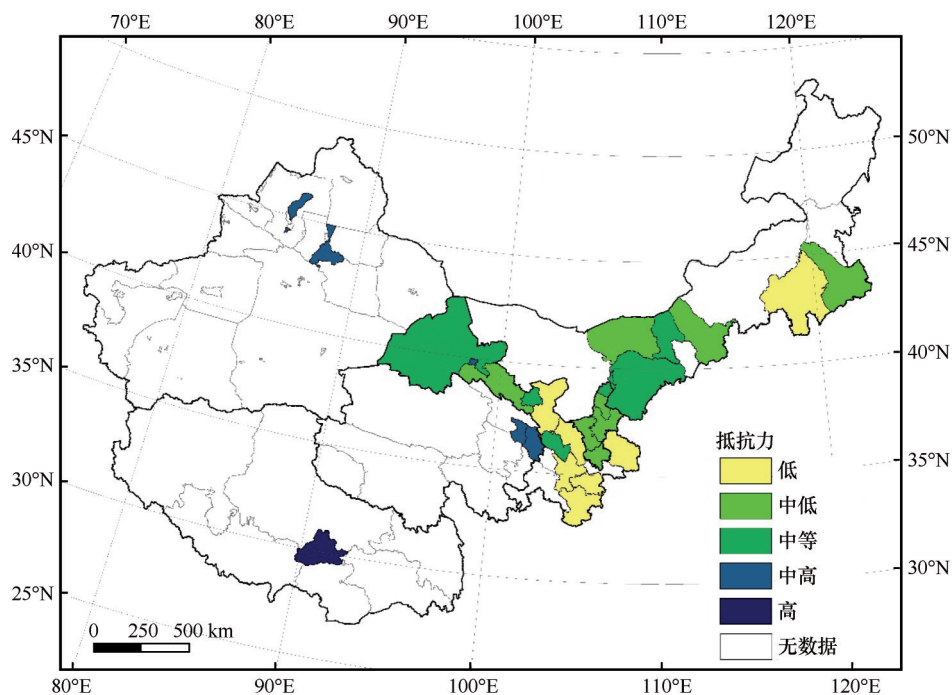
度未能匹配有效的生态保护措施,高强度的资源开发和污染物排放导致缓冲空间有限,生态系统维稳能力位于中游。中低韧性城市沿黄河干流、河套平原大面积存在,涵盖定西、赤峰、陇南等14座城市,普遍存在资源开发与生态管护错配问题,原生自然缓冲空间持续压缩,易出现韧性短板,是生态安全形势较为复杂的群体,也是西北寒旱区生态韧性均衡提升的核心调控单元。低韧性城市集中于河套平原、黄河沿线等地区,以吴忠市为例,该市位于草地与荒漠的过渡地带,工矿生产与过度放牧导致植被覆盖度低、水资源匮乏等生态短板,生态系统抗干扰能力与自我修复机制持续衰退,导致韧性水平落入全域低值区间。

3.1.2 分维度分析

3个维度的空间梯度格局存在显著差异。抵抗力维度整体呈现北高南低、西高东低的梯度格局(图3),这种差异主要是由资源禀赋、城镇建设决定的。西北寒旱区内部地貌单元复杂,高原、绿洲、丘陵等地貌使得水土资源差异悬殊,各市抵御外界扰动的基础能力呈鲜明的层级落差。拉萨是唯一断层领先的高值城市,青藏高原腹地充足的水源供给与原生植被为其构筑了风险抵御基底。嘉峪关、克拉玛依、乌鲁木齐、海东、西宁依托重工业积淀的财

政储备和成熟的资源调配体系,在面对人为扰动或气候波动时不易发生系统性退化。中等抵抗力水平城市的自然禀赋和经济存量均衡适配,可以缓冲常规强度的外界扰动,如兰州和鄂尔多斯。兰州依托黄河干流和南北两山环城防护林形成缓冲带,鄂尔多斯凭借库布其治沙工程不断完善城市生态环境,二者的生态系统可平稳应对常规冲击。中低抵抗力城市受制于脆弱的生态本底、有限的产业承载力,对复合型冲击的缓冲消解能力有限,以固原市为例,地处黄土高原沟壑区地形破碎,受限于水资源匮乏、植被覆盖度低,该市长期遭受水土流失、土地沙化等多重生态胁迫侵扰,生态系统的稳定性较差。而低抵抗力区域因缺少高原、大型绿洲等天然屏障以及完善的人工屏障抵抗扰动,薄弱的抵抗力进一步加剧了干旱环境下生态系统的存续压力,如定西黄土丘陵沟壑纵横、水土流失严重,城镇建设空间局促且人工生态缓冲体系薄弱,干旱滑坡等扰动发生后的恢复难度显著高于绿洲城市。

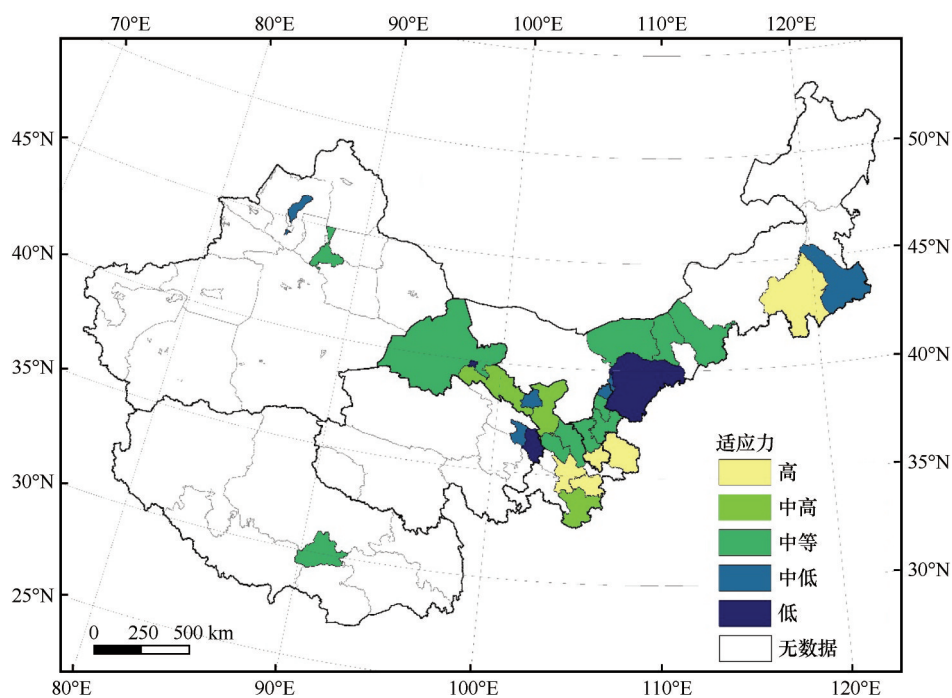
适应力是得分跨度最小的子系统,整体呈交错分布态势(图4)。高适应力梯队城市的产业布局与水土条件高度适配,生态系统在面对水土流失、极端干旱等生态胁迫时呈现较强的灵活性。以庆阳



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)6727号的标准地图制作,底图边界无修改

图3 2024年西北寒旱区城市生态韧性抵抗力空间格局

Fig.3 Spatial pattern of resistance capacity in cold and arid regions of northwest China, 2024



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)6727号的标准地图制作,底图边界无修改

图4 2024年西北寒旱区城市生态韧性适应力空间格局

Fig.4 Spatial pattern of adaptability capacity in cold and arid regions of northwest China, 2024

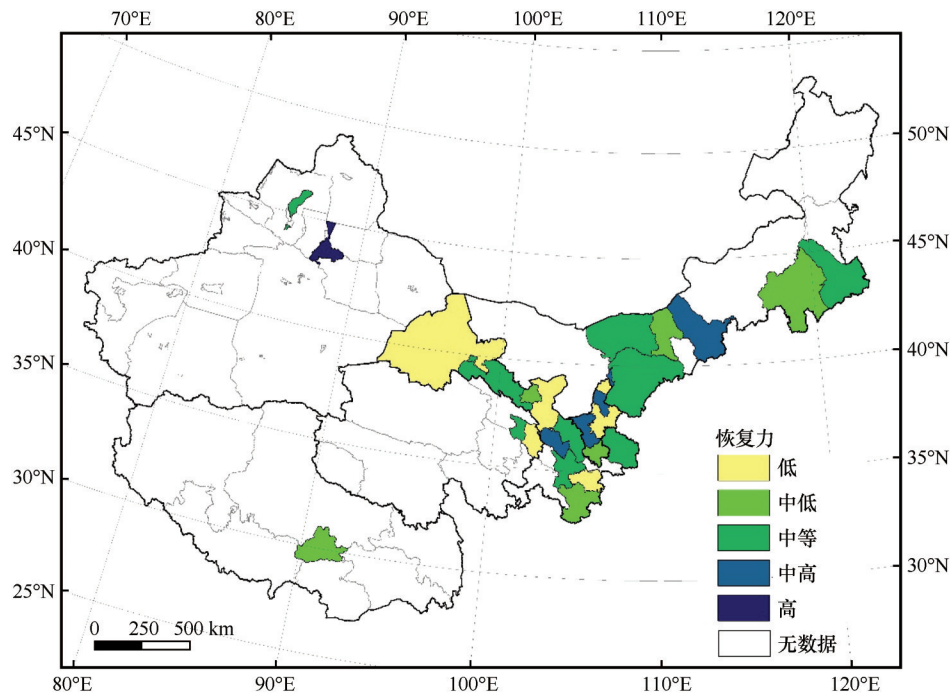
市为例,其主导产业多为低污染行业且林地覆盖度高,生态系统可以有效消解人为干扰,城市适应力居全区首位。陇南、武威、张掖位于中高水平,境内水资源供给相对充足且生态本底良好,生态系统可

为常规环境波动提供缓冲空间。相比之下,11个中等适应力城市多为交通枢纽型城市,如兰州作为多元产业集聚城市,稳定径流与人工治理缓解了河谷地形易聚集大气污染物的特征,污染产出与治理能

力基本平衡,使城市维持中等适应力。中低适应力水平的生态系统虽保持基本的响应能力,但响应强度与修复效率难以完全抵消外部扰动对生态功能的损耗,如戈壁地带的乌海市,其煤炭开采加工产业持续生成污染物,干旱少雨的气候大幅降低污染物稀释效率,环境负荷持续增加。鄂尔多斯、海东、嘉峪关因产业结构无法适配寒旱区水源承载力,单一的水资源供给和薄弱的水文基底导致生态系统缺乏缓冲空间,适应力位于低水平梯队。

恢复力得分跨度最大且存在显著极值差异(图 5)。乌鲁木齐是唯一的高恢复力城市,依托稳定供给的地下水与冰雪融水、完善的基础建设与先进的修复技术储备,生态系统遭受风沙灾害、水土流失等扰动后恢复周期短、修复效率高。中卫、银川、乌兰察布、乌海和兰州组成中高水平梯队,依托绿洲或黄河径流稳定的水源补给,可高效完成受损生态系统的恢复升级,但恢复上限与乌鲁木齐相比存在

一定差距。中等梯队城市分布范围最广,多为能源、矿产、农牧业等核心节点城市,自然条件优劣参半,虽然产业开发强度大,生态治理结合环境管护使其具备基本修复能力,但无法有效应对持续性复合冲击。以鄂尔多斯为例,该市长期面临资源开采、草场退化、水资源短缺等复合生态压力,常态化生态治理仅能修复表层损伤,生态系统恢复力徘徊在中等水平。中低水平梯队城市普遍存在地表径流稀缺、水土保持能力薄弱等问题,系统修复周期被大幅拉长,如包头作为老牌工业城市,工业排污与矿产开发遗留的生态损伤难以依靠短期生态治理恢复。低水平梯队多以传统资源型发展模式为主,城市生态建设投入不足,面对持续人为开发与自然生态损耗,脆弱的地质本底在遭受生态损伤后难以重返原有稳态,如海东市地处黄土高原与青藏高原过渡地带,地形破碎且水土流失严重,生态系统自我修复能力极差。



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)6727号的标准地图制作,底图边界无修改

图 5 2024 年西北寒旱区城市生态韧性恢复力空间格局

Fig.5 Spatial pattern of recovery capacity in cold and arid regions of northwest China, 2024

城市间横向对比显示,西北寒旱区城市生态韧性三个维度的高值区域多数呈错位分布,当前暂无城市实现三维协同领先。例如,高和中高韧性梯队的庆阳和天水均存在明显短板,庆阳同时存在高水平的适应力与低水平的抵抗力,两个维度呈现显著的两极分化态势;天水适应力位于高水平区域,但

抵抗力和恢复力同属低水平。上述结果说明即使是高和中高韧性城市,其内部子系统之间亦未形成协同共振。子系统的空间格局进一步揭示了西北寒旱区城市生态韧性提升的核心障碍在于子系统之间的非均衡发展,整体韧性需通过补齐短板、优化内部耦合实现实质性跃升。

3.2 西北寒旱区城市生态韧性的动态演进

鉴于日照强度与水汽条件、气候地貌等寒旱资源密切相关,本文以3 000 h的年日照时数为分界点,将西北寒旱区进一步划分为强日照区和弱日照区两组进行探究,以突破传统行政区划边界,捕捉不同寒旱资源下生态韧性的变化特征。强日照区包括西藏自治区和宁夏回族自治区;弱日照区包括内蒙古自治区、甘肃省、青海省和新疆维吾尔自治区。

3.2.1 全域动态演进特征

如图6所示,研究期内,西北寒旱区城市生态韧性的核密度曲线呈波峰下降、宽度变大的态势,表明城市间生态韧性总体离散程度加剧,非均衡性逐步扩大。就分布位置而言,峰值中心右移幅度较小,表明研究期内整体韧性水平仅有小幅提升,整体改善速度较为缓慢,尚未出现跨越式增长。就分布形态而言,研究期内一直保持“一主峰一小峰”态势,“小峰”位置逐渐靠右,说明次级梯队的生态韧性持续提升,正逐步向高韧性水平靠拢,城市间的层级分化持续存在,但次级城市的追赶态势明显。就分布延展性而言,曲线存在明显右拖尾且逐渐增长,表明高韧性城市群体正逐步扩大,部分城市正在实现突破,高韧性城市的空间聚集和引领作用日益显现。

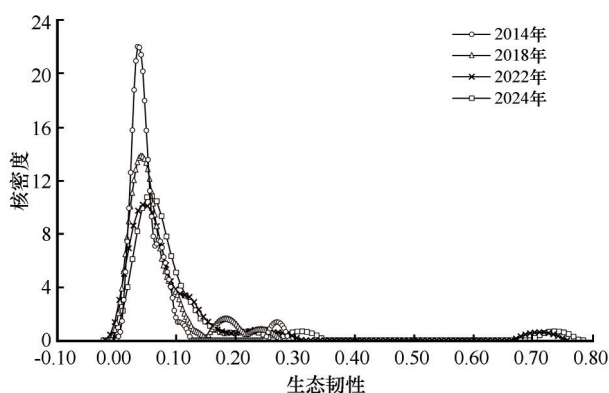


图6 西北寒旱区城市生态韧性核密度曲线

Fig.6 Core density curve of urban ecological resilience in the cold and arid regions of northwest China

3.2.2 分日照区动态演进特征

强日照区呈波峰高度下降、宽度增大的态势,说明生态韧性的离散程度逐步增大,区域内部生态韧性两极分化加剧。波峰右移幅度相对较小,表明韧性提升速度相对缓慢,尚未形成系统性突破。波峰形态由“一主峰一小峰”逐步演变为“单峰”,2022

年后高值聚集区域逐渐消解为右拖尾,说明区域内高韧性和中高韧性城市逐渐回落至中等韧性区间,但全域样本分布区间持续扩宽,城市生态韧性的空间分异程度持续提升。除此之外,2022年与2024年的核密度曲线几乎重叠,表明强日照区的生态韧性提升进程陷入停滞,城市间分化程度在短期内未出现明显的优化或重构(图7)。

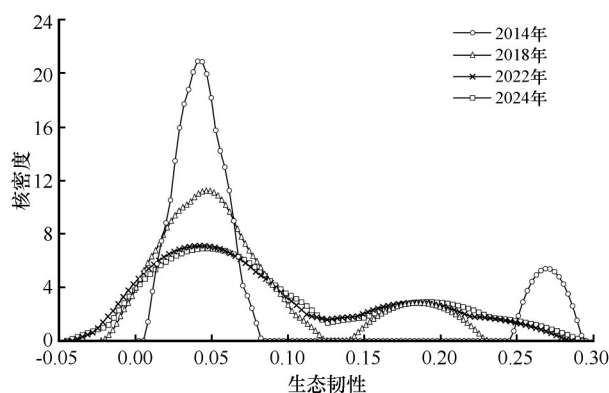


图7 强日照区生态韧性核密度曲线

Fig.7 Ecological resilience core density curve in the cold and arid regions of northwest China with strong sunshine

弱日照区的核密度曲线形态与整体生态韧性曲线形态相似,这是因为弱日照区的生态基底与气候条件高度契合区域整体特征,进一步表明弱日照区是西北寒旱区城市生态韧性演进的核心载体(图8)。与西北寒旱区整体生态韧性水平相比,弱日照区的波峰顶点较低,表明弱日照区内生态韧性水平梯度较大,多数城市尚未形成稳定的韧性提升态势。2014年弱日照区的“小峰”并不明显,2018年“小峰”逐渐出现,但与寒旱区整体韧性核密度曲线相比较不明显,说明区域内次级城市的韧性提升动

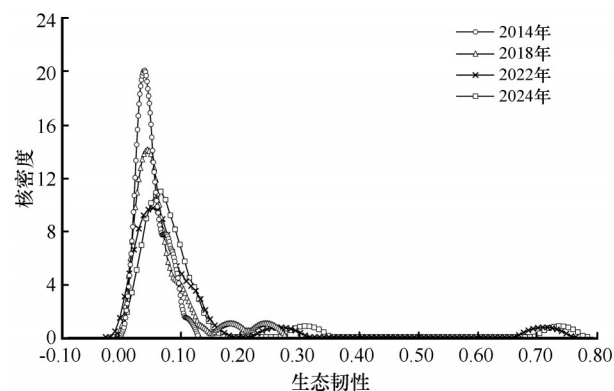


图8 弱日照区生态韧性核密度曲线

Fig.8 Ecological resilience core density curve in the cold and arid regions of northwest China with weak sunshine

力不足,高韧性城市的层级跃升节奏较为平缓,区域内高韧性水平城市的培育进程滞后于全域水平。

3.3 西北寒旱区城市生态韧性组态路径

3.3.1 条件变量的数据校准与必要性

在进行fsQCA分析之前,需将原始数据转换为0到1之间的集合隶属度,以满足布尔代数运算的逻辑要求。鉴此,借鉴陈元等^[33]的校准方法,本文以90%、50%、10%作为完全隶属、交叉点与完全不隶属的校准锚点,通过SPSS软件对数据进行隶属度赋值。校准后,为避免隶属分数为0.5的案例在fsQCA真值表分析中被自动删除,本文将其微调为0.501^[32]。各变量校准锚点如表2所示。

表 2 条件变量的校准锚点

Table 2 Calibration anchor points of condition variables

变量	完全隶属点	交叉点	完全不隶属点
西北寒旱区城市生态韧性(UER)	0.1479	0.0495	0.0291
社会诉求(SD)	22.2918	2.9685	0.4685
技术创新(TI)	326.2	72	10
财政约束(FC)	9.4034	4.3681	1.3603
环境规制(ER)	0.0048	0.0033	0.0020
生态本底(EB)	0.3826	0.2126	0.1205

必要性分析旨在识别某一前因条件是否为结果变量的必要条件。若某一条件的一致性水平不低于0.9,且覆盖度较高,可视为必要性条件。为检验高生态韧性是否为某一前因条件集合的子集,本文对单个条件进行必要性分析。表3的必要性检验结果表明,所有前因条件及其非集的一致性水平均低于0.9,表明不存在能够单独解释高生态韧性的必要条件。因此,高韧性水平的实现是多条件协同作用的结果,需借助组态分析探究其因果组合机制。

3.3.2 提升路径

fsQCA结果表明,存在6条组态路径可实现高生态韧性,总体解一致性水平为0.5970、覆盖度为0.8408,说明6条路径可解释84.08%的案例,具有广泛的代表性,可涵盖绝大多数西北寒旱区城市实现高生态韧性的成功经验(表4)。稳健性检验方面,本文将PRI水平分别提升至0.75与0.80,将频数阈值提升至2^[32],所得组态路径与表4结果一致,表明结果稳健。

表 3 单个条件变量的必要性检验结果
Table 3 Necessity test results of a single condition variable

前因条件	变量解释	高生态韧性(UER)	
		一致性	覆盖度
SD	高社会诉求	0.5333	0.5618
~SD	低社会诉求	0.7050	0.6071
TI	高技术创新	0.5637	0.5991
~TI	低技术创新	0.6906	0.5905
FC	高财政约束	0.5601	0.5749
~FC	低财政约束	0.6672	0.5872
ER	高环境规制	0.5579	0.5403
~ER	低环境规制	0.6866	0.6369
EB	高生态本底	0.6777	0.6173
~EB	低生态本底	0.6048	0.5972

上述6条路径可归纳为4类驱动模式。(1)财政宽松引领模式。该模式包括组态1-A($\sim FC*\sim ER$)和组态1-B($\sim FC*\sim EB$),其共同特征是拥有充裕的财政预算空间,这是支撑寒旱区城市构建高生态韧性的基础保障。组态1-A表明在环境监管约束尚不严格的前提下,财政自主权成为弥补制度短板的关键。以嘉峪关为例,酒钢集团的稳定税收保障该市财政相对宽松,政府自主统筹专项资金开展戈壁防护林建设、矿山生态修复等工程,通过财政补贴引导钢铁企业更新绿色生产设备,持续增强城市生态系统的抗干扰能力。组态1-B受财政约束低但生态本底脆弱,此路径精准适配西北寒旱区自然基底薄弱、生态系统修复能力弱的发展现状,如克拉玛依坐落于准噶尔盆地,干旱少雨导致区域植被覆盖度长期处于低位,但依托油气产业的税收使得该市财政灵活度高,政府得以将财政资源持续投入盐碱地改良、油田开采水土保持等项目,持续修复受损荒漠生态。

(2)技术创新赋能模式。该模式包括组态2($\sim SD*TI$),其核心存在条件为技术创新,辅助缺失条件为社会诉求。该模式摆脱了生态韧性提升对外部压力驱动的依赖,构建以技术迭代为核心的内生型绿色发展机制。拉萨市作为西藏高原文旅核心城市,本地居民诉求集中于文旅增收,但依托高原生态保护专项政策,该市持续布局高原生态修复、高寒植被培育等科创项目,区域技术创新水平突出,从源头减少生产经营对脆弱高原生态的扰动。相较于政府与社会协同驱动的治理模式,技术

表 4 高生态韧性的组态路径

Table 4 Configuration path with high ecological resilience

前因条件	1-A	1-B	2	3-A	3-B	4
社会诉求(<i>SD</i>)			■	●	●	
技术创新(<i>TI</i>)			●			
财政约束(<i>FC</i>)	■	■				●
环境规制(<i>ER</i>)	■				●	●
生态本底(<i>EB</i>)		■		●		●
原始覆盖度	0.5019	0.5449	0.4104	0.4040	0.3658	0.3194
唯一覆盖度	0.0209	0.0280	0.0154	0.0306	0.0083	0.0485
一致性	0.7125	0.6916	0.7500	0.6361	0.6216	0.6863
总体解的一致性			0.5970			
总体解的覆盖度			0.8408			

注：●表示核心条件存在，●表示辅助条件存在，■表示核心条件缺失，■表示辅助条件缺失，空白格表示该条件可存在亦可缺失。

创新赋能可从产业根源上破解粗放式发展对生态韧性的冲击,为寒旱区城市实现经济发展与生态保护协同共进提供动力。

(3) 社会需求驱动模式。该模式包括组态 3-A (*SD*EB*)和组态 3-B(*SD*ER*),其核心存在条件均为社会诉求,表明公众日益高涨的环境诉求是驱动城市提升韧性水平的核心引擎。组态 3-A 的代表城市为西宁,该市地处核心生态屏障区,全民生态保护与广泛分布的天然林地,促使该市严格管控城市开发边界、优化生态布局。组态 3-B 表明,严格的环境规制划定生态治理的制度框架,强烈的社会诉求为制度落地提供监督保障,如银川市民长期关注黄河滩涂退化、水污染等问题,同时该市政府针对黄河流域出台一系列排污许可考核、荒漠化管控等制度,形成制度约束—社会监督双重驱动格局,促使生态韧性提升由应急治理转向常态保护。

(4) 耦合提升模式。该模式包括组态 4 (*FC*ER*EB*),该组态的核心存在条件为环境规制和生态本底,财政约束为辅助条件。该模式的典型城市为定西,该市作为黄河上游水土保持的重点管控区域,国家强制实施退耕还林、坡耕地改造,经过数十年大规模生态修复,当地林草植被覆盖率大幅提升。该市严格的环境规制精准规范生产开发活动,生态本底为生态系统提供承载空间,二者联动既保障生态系统功能稳定,又为人为治理提供政策抓手。在此基础上,适当的财政约束规范政府资金利用行为,三者协同发力共筑城市生态安全屏障,为寒旱区城市在资源有限的制约下稳步提升生态

韧性提供双重支撑。

4 结论与建议

4.1 结论

2024 年西北寒旱区城市生态韧性整体呈非均衡发展格局。断层领先的庆阳市与低水平区间的城市形成鲜明对比,半数城市集中于中等韧性梯队,总体呈现清晰的层级分化格局。城市生态韧性三大子系统错位分布,全域暂无城市实现抵抗力、适应力和恢复力高位协同发展,子系统发展失衡是制约西北寒旱区城市生态韧性跃升的核心短板。

2014—2024 年西北寒旱区城市生态韧性提升进程缓慢。高韧性城市群规模逐步扩大,正向牵引西北寒旱区城市提升整体生态韧性,但多数城市仍停留在中等水平,因此全域尚未形成协同共进的均衡发展格局。弱日照区与西北寒旱区整体演化态势高度契合,是决定其生态韧性发展节奏的核心载体;强日照区内少数中等韧性水平城市呈稳步追赶态势,但区域内城市间发展差距持续扩大,整体提升进程趋于停滞。

高生态韧性是多要素协同作用的结果,可将其归纳为 4 类发展模式。财政宽松模式强调充裕的财政预算空间可支撑政府灵活配置生态治理资源,以弥补自然禀赋或政策规制短板;技术创新赋能模式通过构建内生型绿色发展机制,从产业根源破解粗放式发展对生态系统的冲击;社会需求驱动模式将公众环境诉求与扎实的生态基底、严

格的环境规制相结合,以自下而上的监督压力弥补单一行政管控的局限。耦合提升模式中,严格的环境规制和优良的生态本底可联动保障生态系统功能稳定,形成生态托底、规制护航的双向提升格局。4类路径共同揭示了西北寒旱区城市在不同制度环境、社会治理和资源禀赋下实现高生态韧性的差异化路径。

4.2 不足与展望

首先,在指标体系构建方面,受限于寒旱区生态相关数据的可得性,本文未将荒漠化面积占比等可体现西北寒旱区城市生态脆弱性的相关指标纳入评价体系,可能导致测度结果存在局部偏差;其次,在条件变量选取方面,组态模型虽满足了必要性检验的要求,但当前条件变量的覆盖范围对整体解拟合表现的解释存在一定局限,未能全面揭示驱动西北寒旱区城市实现高生态韧性水平的多元化组态路径。

后续我们将构建更贴合寒旱区生态特征的评价指标体系,从而提升测度结果的科学性、准确性。同时,在原有组态分析的基础上,通过优化样本观测结构、拓展条件变量选取范围、多路径校验组态结果的递进式研究思路,系统地识别影响西北寒旱区高生态韧性的多重诱因。

4.3 建议

基于4条组态路径,提出以下建议:(1)立足财政宽松赋能生态建设的核心路径,允许城市结合自身生态短板灵活调整资金用途,避免经济发展与生态保护产生资金博弈。(2)针对技术赋能的内生型发展模式,引导企业以降本增效、可持续发展为目标,从生产源头减少生态扰动。(3)依托社会需求驱动模式,开通公众诉求反馈渠道,保障公众监督权限,同时将公众诉求作为城市生态规划的重要参考,实现多元共治模式。(4)立足环境规制与生态本底耦合模式,细化寒旱区差异化生态管控细则,精准管控生产开发活动。

参考文献:

- [1] 王宇昕,赵文智,刘鹄.生态系统突变及其在寒旱区生态系统管理中的应用展望[J].应用生态学报,2024,35(7):1997-2005.
- [2] 吴玉彬,何非洋,王永瑜,等.基于冰冻圈背景的中国西部五省(区)旅游生态效率测度及其影响因素分析[J].冰川冻土,

2024,46(1):325-334.

- [3] 李晴,李墨,丁森,等.湟水河着生藻类群落结构特征及影响因素分析[J].环境科学与技术,2024,47(1):43-51.
- [4] 王松茂,牛金兰.黄河流域城市生态韧性时空演变及其影响因素[J].生态学报,2023,43(20):8309-8320.
- [5] 王文慧,钟业喜,马宏智,等.鄱阳湖水陆交错带生态韧性时空变化及影响因素[J].生态学报,2023,43(22):9514-9526.
- [6] 张明斗,任衍婷,周亮.黄河流域城市生态韧性时空演变特征及影响因素分析[J].干旱区地理,2024,47(3):445-454.
- [7] 刘志华,袁帅,张家乐,等.中国生态环境韧性综合测度、空间分异与影响效应[J].环境科学,2026,47(7):4810-4822.
- [8] 陶洁怡,董平,陆玉麒.长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2022,31(9):1975-1987.
- [9] 鲁方圆,张彬,贾添羽,等.长江经济带城市生态韧性时空演化特征及其驱动机制[J].环境科学,2025,46(7):4592-4601.
- [10] 李斌,陈伽伽,潘捷,等.山地城市生态韧性空间特征及其影响因素:以重庆市为例[J].环境科学,2026,47(7):4836-4845.
- [11] 李亚赧,杨亮洁,李雪婷.基于“抵抗力-适应力-恢复力”模型的河西走廊城市生态韧性评价[J].生态学杂志,2025,44(10):3227-3238.
- [12] 韩燕,崔馨方.基于XGBoost-SHAP模型的黄河流域生态韧性时空格局及影响因素分析[J/OL].环境科学,1-22(2026-03-06)[2026-07-06].<https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202509214>.
- [13] 程莉,黄兰稀,严月岑,等.长江经济带乡村生态韧性测度及影响因素研究[J].中国农业资源与区划,2024,45(5):11-23.
- [14] 李德,刘百桥,孟伟庆,等.基于多维数据的环渤海海岸带地区生态韧性评价及其尺度依赖性分析[J].生态学杂志,2025,44(3):1038-1047.
- [15] Francis R, Bekera B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems[J].Reliability Engineering & System Safety,2014,121:90-103.
- [16] Kong X, Xu B, Orr J A, et al. Ecosystems have multiple interacting processes that buffer against co-occurring stressors [J]. Trends in Ecology & Evolution,2025,40(5):479-488.
- [17] Wu T, Liu Y, Chen L, et al. Human pressure and biodiversity modify forest resilience after extreme multi-year droughts [J]. Nature Ecology & Evolution,2026,10(5):880-892.
- [18] 丁煜莹,杨习铭.河南省城市韧性评价及障碍因子诊断分析[J].兰州财经大学学报,2021,37(5):109-123.
- [19] 楚尔鸣,孙红果,李逸飞.智慧城市建设对生态环境韧性的影响研究[J].管理学报,2023,36(6):21-37.
- [20] 谭海波,范梓腾,杜运周.技术管理能力、注意力分配与地方政府网站建设:一项基于TOE框架的组态分析[J].管理世界,2019,35(9):81-94.
- [21] 卢春天,卫子昊,范丽娟.长三角地区公众环保评价的变迁趋势:基于年龄-时期-世代效应的研究[J].苏州大学学报(哲学社会科学版),2025,46(6):42-52.
- [22] 祁毓,杨春飞,陈诗一.绿色转型发展中的财政激励与协同治理:来自“山水工程”试点的证据[J].经济研究,2024,59(10):132-150.

- [23] Zhou Y, Wu N, Zhang C, et al. How green technological innovation shapes urban ecological resilience: structural, governance, and fiscal pathways in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2026, 543: 147607.
- [24] 金华丽, 杨骞. 现代农业产业园建设对农业新业态创业活动的影响研究: 基于产业集聚视角的经验分析 [J]. *财贸研究*, 2026, 37(2): 84-100.
- [25] Lan C, Li X, Peng B, et al. Unlocking urban ecological resilience: the dual role of environmental regulation and green technology innovation [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2025, 128: 106466.
- [26] 李军. 失业保险稳岗返还如何影响企业用工: 基于成本与流动性双重视角 [J]. *经济与管理*, 2026, 40(2): 63-73.
- [27] Xiao Y, Xiao C, Li L, et al. Impact mechanism of environmental regulation on regional ecological security: mediation based on ecological environment quality [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2026, 28(6): 1-21.
- [28] 邓慧慧, 杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型 [J]. *中国工业经济*, 2019(10): 118-136.
- [29] 徐光华, 杨俊杰, 李国庆. 生态稳定性概念的理论重构: 对抵抗力、耐受力和恢复力的界定 [J]. *生态学报*, 2026, 46(4): 2149-2162.
- [30] 李涛, 郑华, 王宽, 等. 生态系统质量变化及生态系统生产总响应研究: 以浙江省德清县为例 [J]. *经济地理*, 2025, 45(4): 123-132.
- [31] 吴玉彬, 李晓冬. “双循环”发展水平的地区差异及空间收敛性研究: 基于马克思主义政治经济学视角 [J]. *哈尔滨工业大学学报(社会科学版)*, 2024, 26(4): 142-151.
- [32] 张明, 杜运周. 组织与管理研究中QCA方法的应用: 定位、策略和方向 [J]. *管理学报*, 2019, 16(9): 1312-1323.
- [33] 陈元, 贺小刚. 何种公司治理促进了家族企业新质生产力: 研发联盟中介下的组态分析 [J]. *外国经济与管理*, 2025, 47(12): 59-78.

Level measurement, spatiotemporal evolution, and configuration path of urban ecological resilience in the cold and arid regions of northwest China

Wu Yubin, Gao Wenqian, Jiang Lisha

(School of Accounting, Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The improvement of urban ecological resilience in the cold and arid regions of northwest China is not only related to the hydrological balance and sustainable development of the northwest region, but also to China's ecological security pattern and the implementation of major strategies. This article takes urban ecological resilience in the cold and arid region of northwest China as the research object and constructs a measurement framework for urban ecological resilience in the cold and arid region of northwest China based on the three-dimensional dynamic perspective of "resistance-adaptation-recovery". On this basis, the entropy weight method was used to measure urban ecological resilience in the cold and arid regions of northwest China from 2014 to 2024, and the kernel density estimation function and fuzzy set qualitative comparative analysis were used to describe its dynamic evolution and configuration path. The results show that: (1) The overall level of urban ecological resilience in the cold and arid regions of northwest China is low, and uneven development in various dimensions has become a key bottleneck that restricts the improvement of ecological resilience in cities in the cold and arid regions of northwest China. (2) The current ecological resilience of cities in the cold and arid regions of northwest China is showing an uneven evolution trend with increasing polarization, and the differences in resilience between different sunshine hours continue to expand. Among them, the internal imbalance problem in cities in areas with strong sunshine is particularly prominent. (3) Ecological resilience does not rely on the linear superposition of a single factor, but there are four configuration paths: fiscal easing leading model, technological innovation empowerment model, social demand-driven model and coupling improvement model.

Key words: cities in the cold and arid regions of northwest China; ecological resilience; spatiotemporal evolution; kernel density estimation; fuzzy set qualitative comparative analysis