
城市生态发展评估研究

——维度、方法与不确定性

王宁^{1,2,4} 温正^{1,2} 郭占强³ 李兆耀^{1,41}

(1. 北京信息科技大学 经济管理学院, 北京 100192;

2. 绿色发展大数据决策北京市重点实验室, 北京 100192;

3. 中国循环经济协会, 北京 100037;

4. 北京市知识管理研究基地, 北京 100192)

【摘要】: 中国生态文明建设与全球可持续发展历程相辅相成, 在生态文明引领下重构城市发展方向, 有助于实现城市发展的可持续性。以生态文明先行示范区为研究对象, 构建全面且具有实践性的指标体系, 基于改进熵权模型和多样本分析计算城市生态建设指数(urban ecological index, UEI), 归纳出生态文明引领下城市发展的未来方向。研究发现: (1) 2012—2017 年间, 经过国家对生态建设示范区的大力推进, 城市生态发展水平不断提高; (2) 城市在经济、自然、社会、制度四个维度发展趋势并不均衡, 在推动四个维度的协调发展的同时, 也要侧重于生态社会和制度建设维度发展; (3) 不确定性分析发现, 水源地水质达标率、用水总量、禁止开发区域面积是城市生态发展中敏感性比较高的指标。最后, 提出了三项提升城市生态建设水平的建议。

【关键词】: 生态文明 城市生态 改进熵权模型 不确定性分析

【中图分类号】: F291.1 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)01-084-08

人类对有限资源的过度开发和对自然生态系统的破坏, 导致一系列生态危机, 凸显了生态文明建设和可持续发展的紧迫性。坚持人与自然和谐共生、建设美丽中国, 是中国特色社会主义建设的基本方略之一, 我国始终把生态文明建设放在治国理政的重要战略位置, 作为统筹推进“五位一体”总体布局和协调推进“四个全面”战略布局的重要举措。生态文明建设不仅是中国的发展战略, 也是全球层面可持续发展的必要手段。随着全球城市化进程, 生态城市成为生态文明建设的重要组成部分, 联合国在《人与生物圈计划》的报告中提出生态城市之后, 世界各地的学者对其进行了理论和实践研究^[1]。

随着中国城市化进程的加快和新发展理念的提出, 城市的生态建设在国家建设中发挥着愈来愈大的作用。不同于其他国家,

¹**作者简介:** 王宁, 博士, 副研究员, 研究方向为循环经济智能决策与资源环境管理。E-mail: wn@bistu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划“水足迹量化、评价和认证方法学及关键共性技术研究”(2018YFF0215701); 北京市教委科研项目“城市循环发展指数、模式及路径”(SM201811232002)

中国的生态文明建设拥有从上而下的针对各级区域详细的生态文明建设规划、实施方案等。2012 年，里约 20 国首脑会议承诺制定可持续发展综合目标——到 2030 年实现经济发展、社会包容和环境之间可持续的和谐关系^[2]；2016 年，中国加入《巴黎气候变化协定》，并承诺 2030 年二氧化碳排放量达到峰值；2020 年 2 月，国家发改委等印发《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》，各级政府部门积极推进生态文明建设，以期在生态文明建设引领下实现城市体系重构，实现城市的可持续发展。

生态文明是一种社会愿景，它的特征是具有资源意识的人采取生态可持续的资源开采、生产和贸易模式^[3]。国际上对于生态文明的实践与研究主要聚焦在生态环境与可持续发展领域^[4]，相关研究主要以可持续评价为中心，其中对于生态工业园区的研究比较多，比如，利用灰色德尔菲法构建评级指标体系，对五个具有代表性的生态工业园区进行综合效益排序^[5]；运用工业园区资源、经济等相关指标对中国 40 个工业园区的生态效率水平进行评价^[6]；利用多准则可持续发展评价框架，通过生命周期分析北京的低碳高新技术园区^[7]。相对来说，对于生态城市的研究较少，比较典型的有 Tsolakis & Anthopoulos^[8]提出了基于系统动力学 (SD) 仿真技术的生态城市可持续性评价方法和可持续发展的整体方法学框架；Lin^[9]以北九州和天津生态城为例，比较了日本和中国生态城市发展的政策和策略，重点研究了他们的关键绩效指标体系；Wang & Wang^[10]计算分析了西安市 1999—2014 年的生态足迹值。中国的学者对于生态文明的研究多集中于指标体系、评价方法、区域差异及生态文明与其他领域的耦合关系展开讨论，例如，周宏春等^[11]提出了改进与完善生态文明建设评价指标体系的优化路径及指标筛选的原则；张智光^[12]创立指标-指数耦合链方法，通过计算生态文明测度的阈值和绿值二步指数分析出生态文明问题的根本原因；张欢等^[13]利用 PSR 模型及主成分分析法对东部、中部、西部 30 个省份进行分析；毕国华等^[14]利用耦合协调度模型分析生态文明与城镇化之间的耦合关系。

当前生态城市建设处在高速发展时期，不同国家和地区的政府都积极投入到该项建设当中，虽然当前缺乏广为认可的生态城市模式，但众多实践为生态城市建设实践提供了宝贵的参考。但是在学术研究层面存在的问题主要有：一是指标体系方面，指标体系多为文献频度统计筛选，生态文明建设实践性不足；二是对于指标的不确定性分析较少，对敏感性指标把握不足；三是研究案例样本分析容量不足，研究深度不够，如在生态文明引领下如何把握城市发展方向等问题未得到及时解决。

本文基于生态文明先行示范区的多样本研究，构建侧重实践层面的城市生态文明建设评估体系，采用改进熵权评估模型计算城市生态建设指数，利用不确定性分析模型找出敏感性指标，以期对城市生态文明发展提供有益的思考。

1 评估维度与指标

1.1 现有评估体系分析

20 世纪 60 年代以来国际上建立的可持续发展、宜居城市等评价指标体系对于我国生态文明建设及评价具有重要的参考价值。联合国环境规划署 (UNEP) 采用一系列指标，对 20 世纪 70 年代以来自然资源变化及其消费模式进行审视，评价人们的生产和生活方式对人类生存的地球产生的影响。UNEP 在《绿色经济：迈向绿色经济的测度》中，从环境主题、政策干预、政策对更广泛的人类福祉和社会公平三方面构建含 14 个二级指标 40 个三级指标的指标体系，该指标体系具有一定的标准化和可比性，可用以衡量各国绿色经济转型情况。经济合作与发展组织 (OECD) 构建了“驱动力—压力—状态—影响—响应” (DPSIR) 框架来评价可持续发展状况。1999 年后，联合国可持续发展委员会 (UNCSD) 对其进行了修改，新框架包括 15 类 39 项指标，用来评价可持续发展状况^[4]。

随着国内生态文明理论和实践研究的深入，国内学者提出了省域、区域、城市等多层次的生态文明评价指标体系。2007 年，在中国，关琰珠等^[15]第一个选取涵盖可持续发展度、环境状况、生态平衡、文明程度等四方面的 16 项指标对厦门市生态文明进行了测度评价。2010 年，北京师范大学等研究机构联合发布了《2010 中国绿色发展指数年度报告——省级比较》，构建了中国绿色发展指标体系框架，用以评价中国各省份或区域的绿色发展状况，该指标体系包括经济增长绿色化度、资源环境承载潜力、政府政策支持度 3 个一级指标，共遴选了 9 个二级指标 55 个基础指标，是一种广义的绿色发展指标体系^[16]。2013 年，李勇和周学馨^[17]首次将国土空间优化度引入生态文明评价中构建了基于国土空间优化度、资源节约合理度、生态环境保护度、制度建设完善度

的 20 个指标的指标体系。2013 年，原环保部公布了《生态文明试点示范县(含县级市、区)建设指标》，该指标体系由生态经济、生态环境、生态人居、生态制度、生态文化五方面共计 29 个二级指标构成，评选出中国第一批生态文明示范区。2016 年，王雪松等^[18]从生态环境、生态经济、生态社会、生态政治、生态文化五个方面建立了由 39 个指标构成的三级指标体系来评估生态文明的发展。现有城市生态发展评价指标体系如表 1 所示。

表 1 现有城市生态发展评价指标体系

来源	指标内容
OECD《迈向绿色增长：监测进展——经合组织指标》 ^[4]	以经济活动中的环境和资源生产率、自然资源基础、生活质量的环境因素、经济机遇和政策应对等四类相互关联的核心要素为一级指标，共 14 个二级指标、23 个三级指标
联合国可持续发展委员会 (UNCSD) ^[4]	UNCSD 对 (DPSIR) 框架进行了修改，新框架包括 15 类 39 项指标来评价可持续发展
《国家生态文明先行示范区建设方案(试行)》 ^[19]	包含经济发展质量、资源能源节约利用、生态建设与环境保护、生态文化培育、体制机制建设等 5 类一级指标和 51 个二级指标
《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》 ^[20]	美丽中国建设评估指标体系包括空气清新、水体洁净、土壤安全、生态良好、人居整洁 5 类指标，细化提出 22 项具体指标
关琰珠等 ^[15]	选取涵盖可持续发展度、环境状况、生态平衡、文明程度等四方面的 16 项指标对厦门市生态文明进行了测度评价
李勇、周学馨 ^[17]	包括国土空间优化度、资源节约合理度、生态环境保护度、制度建设完善度 4 个一级指标和 20 个二级指标
王雪松等 ^[18]	从生态环境、生态经济、生态社会、生态政治、生态文化五个方面建立了包含 39 个指标的三级指标体系

总体来看，生态文明指标体系通常包括生态环境、生态经济、生态社会、生态政治、生态文化等其中的几个方面，这些指标体系为生态文明建设提供了量化依据，在引导生态文明建设不断深入和完善上产生了积极的作用。但由于评价对象的局限，这些指标体系难以全面反映当前城市生态环境与社会经济发展的突出矛盾和共性问题，很难通过评价结果指导城市生态文明建设。

1.2 城市生态发展维度与评价体系

为了更好地评估城市生态系统的生态发展变化，有必要建立适合生态建设实践的评估框架、指标体系及评价方法。根据数据的可获得性原则，本研究确定城市生态发展的四个维度为生态经济、生态社会、生态自然、生态制度。选用现有统计口径和统计范围的成熟指标，构建生态城市发展评价指标体系(表 2)，每个三级指标均至少在第一批生态文明先行示范区的评价指标体系(2014 年版)中被使用。

表 2 城市生态发展评价指标体系

一级指标	二级指标	指标	代码	单位	属性
------	------	----	----	----	----

城市生态发展水平	生态经济	人均 GDP	R ₁	万元	正指标
		单位建设用地生产总值	R ₂	亿元/平方千米	正指标
	生态社会	无公害、绿色、有机农产品种植面积比例	R ₃	%	正指标
		水功能区水质达标率	R ₄	%	正指标
		城镇供水水源地水质达标率	R ₅	%	正指标
		人均公共绿地面积	R ₆	平方米	正指标
		新建绿色建筑比例	R ₇	%	正指标
		生态文明知识普及率	R ₈	%	正指标
		公共交通出行比例	R ₉	%	正指标
		二级及以上能效家电产品市场占有率	R ₁₀	%	正指标
		节水器具普及率	R ₁₁	%	正指标
		城区居住小区生活垃圾分类达标率	R ₁₂	%	正指标
	生态自然	水资源开发利用率	R ₁₃	%	正指标
		万元工业增加值用水量	R ₁₄	吨	逆指标
		农业灌溉水有效利用系数	R ₁₅	—	正指标
		用水总量	R ₁₆	亿立方米	逆指标
		工业固体废物综合利用率	R ₁₇	%	正指标
		农作物秸秆综合利用率	R ₁₈	%	正指标
		主要再生资源回收利用率	R ₁₉	%	正指标
		GDP 能耗	R ₂₀	吨标准煤/万元	逆指标
		国土开发强度	R ₂₁	%	正指标
		GDP 二氧化碳排放量	R ₂₂	吨/万元	逆指标
		非化石能源占一次能源消费比重	R ₂₃	%	正指标
		能源消费总量	R ₂₄	万吨标准煤	逆指标
		城镇(乡)污水集中处理率	R ₂₅	%	正指标
		耕地保有量	R ₂₆	万公顷	正指标
		城镇(乡)生活垃圾无害化处理率	R ₂₇	%	正指标
		林地保有量	R ₂₈	万公顷	正指标

		森林覆盖率	R ₂₉	%	正指标
		森林蓄积量	R ₃₀	万立方米	正指标
		湿地保有量	R ₃₁	万公顷	正指标
		禁止开发区域面积	R ₃₂	万公顷	正指标
		水土流失面积	R ₃₃	万公顷	逆指标
	生态制度	党政干部参加生态文明培训的比例	R ₃₄	%	正指标
		有关产品政府绿色采购比例	R ₃₅	%	正指标
		生态文明建设占党政绩效考核的比重	R ₃₆	%	正指标
		资源节约和生态环保投入占财政支出比例	R ₃₇	%	正指标
		R&D 经费占 GDP 比重(财政投入)	R ₃₈	%	正指标
		环境信息公开率	R ₃₉	%	正指标

2 研究方法 with 评估模型

2.1 基于改进熵权模型的 UEI

构建城市生态发展指数(urban ecological index, UEI)框架的方法可以分为三个部分^[21]：原始数据标准化、组合权重计算和 UEI 计算。

2.1.1 原始数据标准化

为了消除原始数据间的量纲差异，需要构建一个矩阵 R 对原始数据进行标准化处理。假设有 n 个城市，m 个评价指标，第 i 个城市的第 j 个指标值记为 a_{ij} ($i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, m$)，构成初始矩阵 A：

$$A=\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \cdots \\ A_n \end{bmatrix}=\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{pmatrix} \tag{1}$$

缺失的数据用相同类型城市的算术平均值进行插值，缺失数据集记录为 M_k^x ，缺失数据 a_{ij} 的插值算法为：

$$a_{ij}=\frac{1}{c-x} \sum_{i=1, i \in M_k^x}^c a_{ij} \tag{2}$$

式中：k 是第 k 类城市发展类型，x 是缺失数据的数量，c 是 k 型城市的数量。

由于指标数据量纲不统一，需要对初始矩阵 A 做出以下的标准化：我们选取两个不同的衡量标准来处理不同波动水平的指标数据：(1) 根据指标对生态文明的影响分为正逆指标，用不同的公式来计算；(2) 当数据标准差 σ 小于或等于 200 时，指标的样本数值分布均匀，采用最大和最小标准化方法；(3) 当指标值变化较大且 σ 大于 200 时，采用对数法消除较大变化的不利影响。公式如下所示：

$$r_{ij}^{t^+} = \begin{cases} \frac{a_{ij}^t - \min a_j^T}{\max a_j^T - \min a_j^T}, & \sigma \leq 200 \\ \frac{\log a_{ij}^t - \log \min a_j^T}{\log \max a_j^T - \log \min a_j^T}, & \sigma > 200 \end{cases},$$

$$r_{ij}^{t^-} = \begin{cases} \frac{\max a_j^T - a_{ij}^t}{\max a_j^T - \min a_j^T}, & \sigma \leq 200 \\ \frac{\log \max a_j^T - \log a_{ij}^t}{\log \max a_j^T - \log \min a_j^T}, & \sigma > 200 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, t \in T$, σ 为标准差， t 和 T 为年际间隔， $r_{ij}^{t^+}$ 为第 t 年第 i 个城市第 j 个指标的标准化值。

2.1.2 计算组合权重

利用改进熵权模型为指标赋予权重。熵权法能客观地反映数据的隐含信息，增强指标的分辨意义与差异性。基本内涵是评价数值之间的差异，差异越大，对应的权重也越大。

计算第 t 年第 i 个城市第 j 项指标值的比重 f_{ij} ：

$$f_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^n r_{ij} \quad (4)$$

计算指标的信息熵 H_j ：

$$H_j = -k \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (5)$$

其中： k 为波尔兹曼常量，且有 $k=1/\ln n$ 。利用改进熵权模型计算权重 w_j^H ：

$$\begin{cases} w_j^H = [(1 - H_j) / (m - \sum_{j=1}^m H_j)] \\ \sum_{j=1}^m w_j^H = 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中： H_j 为第 j 个指标的熵；由于熵权法的客观性较强，同时，评估过程中也应参考专家的意见，因此引入专家评分调整权重 w^s ，组合权重为：

$$w_j = \alpha w_j^H + \beta w_j^s \quad (7)$$

式中： w_j 是指标 j 的组合权重， w^s 是专家评分调整权重， w^H 是熵权重， α 和 β 是指标 j 的熵权权重调整参数和专家权重调整参数，分别为 $\alpha=0.7$ 、 $\beta=0.3$ 。

2.1.3UEI 计算

第 i 个城市的 UEI 计算公式为：

$$UEI_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} w_j \quad (8)$$

城市生态建设经济($UEI_{eco \cdot i}$)、社会($UEI_{soc \cdot i}$)、自然($UEI_{nat \cdot i}$)、制度($UEI_{gov \cdot i}$)各维度的发展指数计算公式如下：

$$UEI_{eco \cdot i} = \sum_{j=1}^m r_{ij} w_j, m=2 \quad (9)$$

$$UEI_{soc \cdot i} = \sum_{j=3}^m r_{ij} w_j, m=12 \quad (10)$$

$$UEI_{nat \cdot i} = \sum_{j=13}^m r_{ij} w_j, m=33 \quad (11)$$

$$UEI_{gov \cdot i} = \sum_{j=34}^m r_{ij} w_j, m=39 \quad (12)$$

2.2 案例城市与数据来源

2014 年 6 月，国家发展改革委等六部委联合发布《关于生态文明先行示范区建设名单(第一批)的公示》，将北京密云等 55 个地区作为生态文明先行示范区建设地区(第一批)。本研究跟踪被列入示范名单的地区，鉴于部分数据可获得性不强且地区间的可比性不高，未考虑江西、贵州、云南、青海等 4 个地区。研究涉及的 2012—2017 年国家生态示范区的统计数据，主要来自各个城市的《中国城市统计年鉴》、地方统计年鉴、统计公报，以及对城市编制实施方案的梳理等。

3 实证分析与结果解释

使用熵权法[公式(1)~(6)]来计算权重，并引入专家评分的权重，利用公式(7)将两者结合取加权平均值，表 3 显示了 2012 年和 2017 年的权重。利用公式(8)计算 51 个样本城市的 UEI 如表 4 所示。本节将对 2012—2017 年城市生态发展的趋势做出分析。

3.1 城市生态发展效果显著

城市的生态化发展在研究期间成效显著。对 2012—2017 年样本城市 UEI 相关数据做以下处理：以 2017 年的 UEI 值作为 X

轴，以 UEI 年均增长率为 Y 轴，并以其各自的平均值作为原点做出图 1。x 值越大，代表在 2017 年的时间节点该城市生态发展水平越高，反之，则表示城市生态发展水平越低；y 值越大，代表过去 5 年的增长越快，反之则增长越慢。UEI 处于较高水平并且在过去的 5 年保持较高增长趋势的共有 10 个生态文明示范区域。以甘肃定西、山西娄烦等为代表的生态文明示范区，拥有较高的 UEI 增长率，但其生态发展绝对水平有待提高。UEI 的最大增长率达 28.26%，最大年均增长率为 5.65%。虽然个别城市的 UEI 值有所下降，但值得注意的是，其 UEI 的绝对值已经达到了样本城市的较高水平。从整体看，江苏淮河流域一直位于前列，其 UEI 值在 2017 年达到了 0.5466。2012 年至 2017 年超过 20 个区域的 UEI 提高了 10%以上，这表明经过国家对生态建设示范区的大力推进，城市生态文明水平不断提高。

表 3 指标组合权重计算表

指标	熵权		专家权重	组合权重	
	2012 年	2017 年		2012 年	2017 年
R ₁	0.0321	0.0338	0.0862	0.0483	0.0496
R ₂	0.0546	0.0630	0.0517	0.0537	0.0596
R ₃	0.0154	0.0107	0.0172	0.0159	0.0126
R ₄	0.0113	0.0065	0.0172	0.0130	0.0097
R ₅	0.0051	0.0054	0.0172	0.0088	0.0090
R ₆	0.0302	0.0336	0.0172	0.0263	0.0287
R ₇	0.0880	0.0439	0.0172	0.0668	0.0359
R ₈	0.0094	0.0040	0.0172	0.0118	0.0079
R ₉	0.0312	0.0309	0.0172	0.0270	0.0268
R ₁₀	0.0119	0.0154	0.0172	0.0135	0.0160
R ₁₁	0.0118	0.0080	0.0172	0.0134	0.0108
R ₁₂	0.0480	0.0296	0.0172	0.0388	0.0259
R ₁₃	0.0174	0.0192	0.0172	0.0173	0.0186
R ₁₄	0.0051	0.0049	0.0345	0.0139	0.0138
R ₁₅	0.0201	0.0139	0.0345	0.0244	0.0201
R ₁₆	0.0036	0.0054	0.0172	0.0077	0.0089
R ₁₇	0.0070	0.0146	0.0172	0.0101	0.0154
R ₁₈	0.0089	0.0089	0.0172	0.0114	0.0114
R ₁₉	0.0062	0.0050	0.0172	0.0095	0.0086
R ₂₀	0.0099	0.0119	0.0517	0.0224	0.0238

R ₂₁	0.0582	0.0700	0.0172	0.0459	0.0542
R ₂₂	0.0073	0.0106	0.0517	0.0207	0.0230
R ₂₃	0.0344	0.0297	0.0517	0.0396	0.0363
R ₂₄	0.0195	0.0246	0.0172	0.0188	0.0224
R ₂₅	0.0064	0.0048	0.0172	0.0096	0.0086
R ₂₆	0.0812	0.0966	0.0172	0.0620	0.0728
R ₂₇	0.0072	0.0078	0.0345	0.0154	0.0158
R ₂₈	0.0689	0.0849	0.0172	0.0534	0.0646
R ₂₉	0.0289	0.0349	0.0172	0.0254	0.0296
R ₃₀	0.0128	0.0161	0.0172	0.0142	0.0165
R ₃₁	0.1085	0.1371	0.0172	0.0811	0.1012
R ₃₂	0.0046	0.0056	0.0172	0.0084	0.0091
R ₃₃	0.0090	0.0118	0.0345	0.0167	0.0186
R ₃₄	0.0176	0.0039	0.0172	0.0175	0.0079
R ₃₅	0.0159	0.0107	0.0172	0.0163	0.0127
R ₃₆	0.0200	0.0185	0.0517	0.0295	0.0284
R ₃₇	0.0280	0.0262	0.0172	0.0248	0.0235
R ₃₈	0.0384	0.0285	0.0172	0.0320	0.0251
R ₃₉	0.0059	0.0090	0.0345	0.0145	0.0166

表 4 样本城市 UEI

序号	城市/区域	2012 年	2017 年	序号	城市/区域	2012 年	2017 年
C1	北京密云	0.4249	0.4221	C27	河南南阳	0.3115	0.4007
C2	北京延庆	0.3921	0.3987	C28	湖北十堰	0.3156	0.3384
C3	天津武清	0.3308	0.3871	C29	湖北宜昌	0.3363	0.3641
C4	河北承德	0.3502	0.4111	C30	湖南永州	0.3241	0.3438
C5	河北张家口	0.3959	0.4075	C31	湖南武陵山区	0.3765	0.4253

C6	山西芮城	0.3001	0.3463	C32	湖南梅州	0.2915	0.3372
C7	山西娄烦	0.2551	0.3212	C33	广东韶关	0.3406	0.3725
C8	内蒙古鄂尔多斯	0.4026	0.4340	C34	广西玉林	0.2844	0.3191
C9	内蒙古巴彦淖尔	0.3723	0.4005	C35	广西富川	0.2377	0.2526
C10	辽河流域	0.4030	0.4421	C36	海南万宁	0.4328	0.4369
C11	抚顺大伙房保护区	0.3309	0.4128	C37	海南琼海	0.3840	0.3949
C12	吉林延边	0.3717	0.4192	C38	重庆武陵山区	0.3007	0.3429
C13	吉林四平	0.3059	0.3597	C39	三峡库区	0.3339	0.3891
C14	黑龙江伊春	0.4709	0.5144	C40	四川成都	0.3938	0.4238
C15	黑龙江五常	0.2841	0.3115	C41	四川雅安	0.3505	0.3722
C16	上海闵行	0.4882	0.4887	C42	西藏山南	0.4200	0.4932
C17	上海崇明	0.3904	0.3817	C43	西藏林芝	0.3579	0.3717
C18	江苏镇江	0.3423	0.4038	C44	陕西西咸	0.3542	0.4378
C19	江苏淮河流域	0.5018	0.5478	C45	陕西延安	0.4014	0.4110
C20	浙江杭州	0.4849	0.4433	C46	甘肃甘南	0.3121	0.3382
C21	浙江丽水	0.4555	0.4485	C47	甘肃定西	0.2326	0.2989
C22	安徽巢湖流域	0.3762	0.4403	C48	宁夏永宁	0.4133	0.3864
C23	安徽黄山	0.3614	0.3774	C49	宁夏吴忠利通	0.3602	0.3520
C24	山东临沂	0.3906	0.3960	C50	新疆玛纳斯	0.3089	0.3609
C25	山东淄博	0.3551	0.3749	C51	新疆特克斯	0.3201	0.3678
C26	河南郑州	0.3317	0.3834	—	—	—	—

以陕西西咸为例分析城市生态水平高的原因。西咸以战略性新兴产业、现代服务业和都市农业的融合发展为产业发展方向，调整优化能源结构。在企业层面，清洁生产替代原有生产模式，推进节能低碳技术研发和应用；在园区层面，优化产业结构，以低碳产业为主，循环经济产业链逐渐完善；在社会层面，绿色低碳出行方式及消费理念深入人心。西咸通过建立生态文化体系，注重引导培育生态文明企业和建立生态文明教育基地，把经济发展质量提升工程、资源能源节约利用工程、生态环境与环境保护工程、生态文化培育工程和体制机制建设工程作为重点工程。同样，通过对黑龙江五常、宁夏永宁、浙江杭州、上海闵行的对比分析可以看出，生态文明范式下城市的产业结构趋于优化，以战略新兴产业、现代服务业等为产业发展方向，以清洁生产模式为主，健全体制机制，这不仅能促进经济质量提升，而且有利于生态建设。

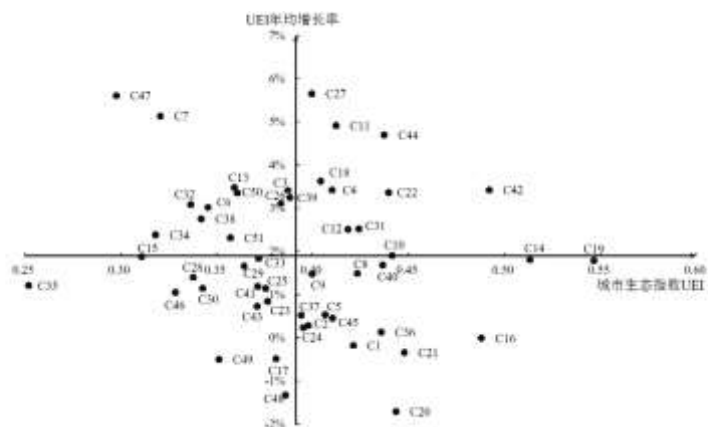


图 1 样本城市的 UEI 及其年均增长散点图

同时发现部分城市的生态发展水平相对偏低，以广西富川为例，其产业结构以第二产业为主，第三产业占比最小，工业结构仍以初级加工工业为主导，发展实力有限；企业规模较小，自主创新能力弱，生态和绿色发展技术推广难度较大；生态保护和节能减排基础设施比较落后，市场机制和市场体系尚未健全，农产品生产加工标准化程度较低，体制机制与生态建设的要求不相适应，城市发展范式亟须改变。

生态的提升得益于四个维度的协调发展。西藏山南与抚顺大伙房水源保护区在生态建设方面的优势明显，分析其存在的优势有助于为其他城市在进行生态文明建设的过程中提供借鉴。西藏山南的经济发展迅速，有良好的政策机制，生态建设成效显著。在研究期间，山南呈现出经济快速发展、社会和谐稳定、民生持续改善、生态环境良好的大好局面，经济社会发展步入了快车道，主要经济指标总量或增速位居示范区前列。山南生态建设体制机制起到了很大的保障作用，山南高度重视生态建设，确立了“生态优先、保护优先，在保护中开发、在开发中保护”的原则；坚持走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路，突出生态建设与经济、政治、文化、社会建设的深度融合，协调推进生态建设；建立了生态效益补偿长效机制。本文从经济、社会、生态、制度维度的分析印证了这一判断。

3.2 四个维度发展的不平衡性

从经济、自然、社会、制度四个维度考虑，各城市生态发展存在明显的差异。图 2 为经济—社会—自然—制度四个维度的变化折线图，可以发现经济方面，各地区的经济水平实际上均有增加，大多数城市经济增长率处于相对较高水平，以湖南梅州与西藏山南为代表，这与其政策保障是分不开的；生态社会建设方面，以甘肃定西为代表，其增加率为 51.5%，得益于生态文明知识普及率的提升；生态自然维度，所有的区域均保持增长，其中宁夏吴忠利通区增长率最大，为 25.35%；生态制度建设方面，抚顺大伙房水源保护区增长率最大，为 79.86%，得益于政府采购绿色产品比例的提升。

综合经济—社会—自然—制度四个维度考虑，各城市增加 UEI 的因素存在明显差异。图 3 为经济—社会—自然—制度四个维度的 UEI 变化堆积图。图 3 进一步验证了大多数区域的城市生态建设水平有所提高，并且可以看出，不同区域的经济、社会、自然、制度四个维度对 UEI 的影响有所不同。各区域在生态自然维度的提升对区域生态建设水平影响颇大。2012—2017 年，样本城市在自然维度的指标得分均有所提升，并且对 UEI 值的增加有很大影响。在生态文明示范区建设期间，各示范区能够因地制宜，保护和合理利用自然资源，与自然保持和谐的关系。

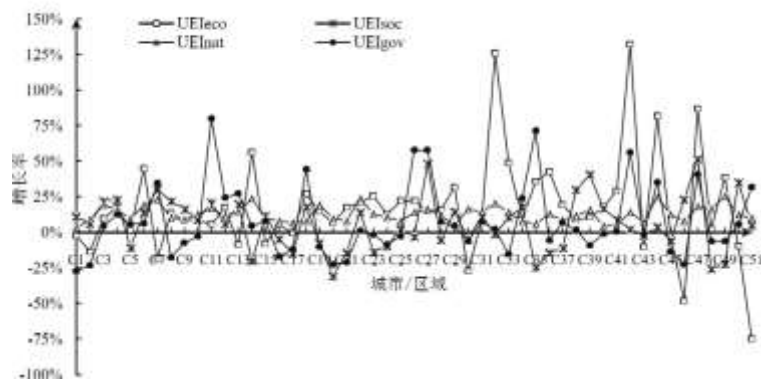


图2 UEI_{eco}、UEI_{soc}、UEI_{nat}、UEI_{gov} 增长率折线图(以2012年为基准)

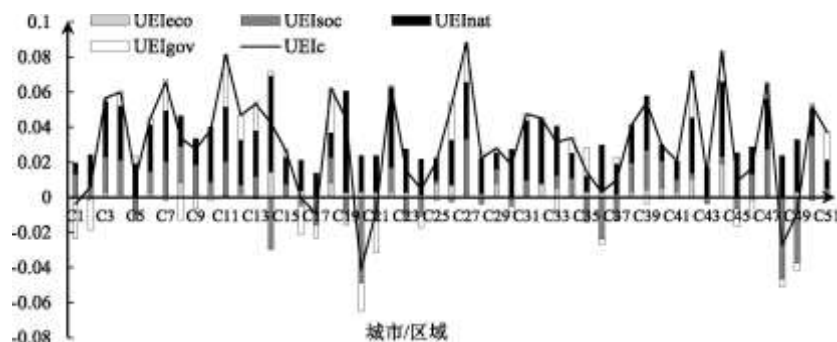


图3 UEI_{eco}、UEI_{soc}、UEI_{nat}、UEI_{gov} 变化堆积图

注：UEI_c 为2012—2017年UEI总的变化值。

3.3 城市生态建设的不确定性分析

基于2012—2017年的城市生态发展指标进行指标敏感性变化分析,如图4所示,识别对城市生态水平影响最大的指标因素,其中,城镇供水水源地水质达标率、用水总量、禁止开发区域面积是对城市生态发展水平影响最大的三个指标,并且其生态敏感性值均在300以上,一个城市或地区对这三个指标的改善将有利于提高该地区的城市生态文明发展水平。相较于2012年,城镇供水水源地水质达标率指标敏感性、用水总量指标敏感性值变化在10倍以上,禁止开发区域面积一直保持较高的敏感性指数,在以后城市生态建设的过程中应着重考虑合理利用水资源、降低用水总量,保持合理的禁止开发区域面积有助于使城市生态发展水平进一步提升。值得注意的是,生态制度维度包含的所有指标的敏感性值一直保持在较低水平,截至2017年,部分指标敏感性值达到了极低水平,如党政干部参加生态文明培训的比例敏感性指数为0.55,有关产品政府绿色采购比例敏感性指数为0.07,生态文明建设占党政绩效考核的比重敏感性指数为0.61,表明中国的政策在城市生态建设方面比较稳定和保守。

4 结论与建议

研究发现,2012—2017年间,经过国家对生态建设示范区的大力推进,城市生态文明水平不断提高。同时应注重城市在各维度的协调发展,未来城市生态建设也应侧重于生态社会和制度建设维度。通过对城市生态发展指标敏感性发现,城镇供水水源地水质达标率、用水总量、禁止开发区域面积是对城市生态发展影响最大的三个指标。论文根据研究结果提出三项促进城市生态建设的建议:

(1)在生态文明建设背景下优化城市发展体系。在美丽中国及碳中和目标引领下,城市发展体系应在经济发展方式、产业结构和体制机制等方面做出改变,着重考虑资源和生态系统等外部问题,增强城市发展的可持续性。参考杭州等生态发展水平较高的城市,相对落后的城市应该明确产业发展方向,通过优化产业结构,使用清洁生产方式,促进循环经济产业链完善;优化能源结构,提高能源利用率;完善生态文明体制机制以规范生态建设进程。(2)注重经济、社会、自然、制度四个维度的协调发展,尤其应加强在生态社会和生态制度维度的建设。研究表明,像南阳、西咸等四个维度协调发展区域均有很好的发展态势,这为其他城市提供了借鉴,比如宁夏的相关城市在发展经济的同时,应更加注重保护自然生态,普及生态文明理念,建立完善的生态体制机制,为绿色低碳发展和生态社会建设提供保障。(3)注重监控不确定性较高的生态发展指标。城镇供水水源地水质达标率、用水总量、禁止开发区域面积指标不确定性较高,在生态城市的建设过程中应持续控制水资源污染、提高城镇供水水源地水质达标率,降低城市用水产出率。禁止开发区域是保护自然文化资源的重要区域,在政策的制定与实施过程中对禁止开发区域的保护要有持续性。

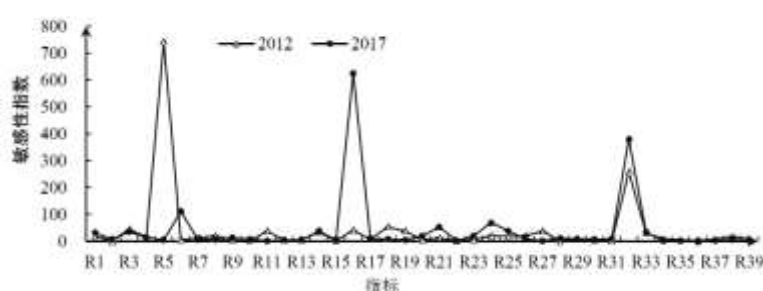


图 4 2012—2017 年城市生态文明指标敏感性指数

参考文献:

- [1]Shi S X,Tong P S.Evaluation system and spatial distribution pattern of ecological city construction-based on dpsirtopsis model[J].Applied Ecology and Environmental Research,2019,17(1):601-616.
- [2]Schmidt-Traub G,Kroll C,Teksoz K,et al.National baselines for the sustainable development goals assessed in the SDGindex and dashboards[J].Nature Geoscience,2017,10(8):547-555.
- [3]Hansen M H,Li H T,Svarverud R.Ecological civilization:Interpreting the Chinese past,projecting the global future[J].Global Environmental Change,2018,53:195-203.
- [4]廖冰,张智光.生态文明评价的文献综述及其未来研究趋势[J].资源开发与市场,2018(10):1354-1361.
- [5]Zhao H S,Guo S,Zhao H R.Comprehensive benefit evaluation of eco-industrial parks by employing the best-worst method based on circular economy and sustainability[J].Environment,Development and Sustainability,2018,20(3):1229-1253.
- [6]Fan Y P,Bai B Y,Qiao Q,et al.Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis[J].Journal of Environmental Management,2017,192:107-115.
- [7]Yang J,Chen B,Qi J,et al.life-cycle-based multicriteria sustainability evaluation of industrial parks:A

case study in China[J].The Scientific World Journal,2012(8):917830.

[8]Tsolakis N,Anthopoulos L.Eco-cities:An integrated system dynamics framework and a concise research taxonomy[J].Sustainable Cities and Society,2015,17:1-14.

[9]Lin Z J.Ecological urbanism in East Asia:A comparative assessment of two eco-cities in Japan and China[J].Landscape and Urban Planning,2018,179:90-102.

[10]Wang F Y,Wang K Y.Assessing the effect of eco-city practices on urban sustainability using an extended ecological footprint model:A case study in Xi' an,China[J].Sustainability,2017,9(9):1591.

[11]周宏春,宋智慧,刘云飞,等.生态文明建设评价指标体系评析、比较与改进[J].生态经济,2019(8):213-222.

[12]张智光.生态文明阈值和绿值二步测度:指标-指数耦合链方法[J].中国人口·资源与环境,2017(9):212-224.

[13]张欢,成金华,陈军,等.中国省域生态文明建设差异分析[J].中国人口·资源与环境,2014(6):22-29.

[14]毕国华,杨庆媛,刘苏.中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展[J].经济地理,2017(1):50-58.

[15]关琰珠,郑建华,庄世坚.生态文明指标体系研究[J].中国发展,2007(2):21-27.

[16]李晓西,潘建成.中国绿色发展指数的编制——《2010 中国绿色发展指数年度报告——省际比较》内容简述[J].经济研究参考,2011(2):36-64.

[17]李勇,周学馨.基于模糊灰色统计的生态文明建设综合评价研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2013(3):35-38.

[18]王雪松,任胜钢,袁宝龙.我国生态文明建设分类考核的指标体系和流程设计[J].中南大学学报(社会科学版),2016(1):89-97.

[19]国家发展改革委,财政部,国土资源部,等.关于印发国家生态文明先行示范区建设方案(试行)的通知[EB/OL].(2013-12-13).http://www.gov.cn/zwjk/2013-12/13/content_2547260.htm.

[20]国家发展改革委.国家发展改革委关于印发《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》的通知[EB/OL].(2020-02-28).https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202003/t20200306_1222531.html?code=&state=123.

[21]Wang N, Lee J, Zhang J, et al. Evaluation of urban circular economy development: An empirical research of 40 cities in china[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 180: 876-887.

[22]Delman J. Ecological civilization politics and governance in Hangzhou: New pathways to green urban development? [J]. The Asia-Pacific Journal: Japan Focus, 2018, 16(17): 1-21.