

西安生态城市的水平测度、收敛趋势与长期预测

叶文显¹, 曾绍龙²

(1. 陕西国际商贸学院 管理学院, 咸阳 712046;
2. 杭州师范大学 经济学院, 杭州 311121)

摘要: 生态城市建设是实现城市可持续发展目标的重要举措。选取西安市及其13个区县的面板数据, 实证分析结果表明: 西安城市生态化水平呈现明显的空间依赖性、集聚性与稳步提升趋势, 中心城区优于外围区县趋势明显, 其生态城市建设逐渐由空间集聚模式转向空间溢出模式和空间均衡模式; 各区县常住人口增长有利于城市生态水平的提升, 当常住人口超过100万时, 其生态改善红利将逐渐减弱; 13个区县的城市生态化水平存在 σ 收敛、绝对 β 收敛和条件 β 收敛。中心城区表现为生态环境滞后型区域, 而外围区县表现为社会经济滞后型区域; 2021—2035年, 西安城市生态化水平将保持平稳增长趋势, 2035年达到中等等级, 新城、雁塔和未央的生态水平处于“较高等级”。

关键词: 生态城市; 综合评价; 收敛模型; TOPSIS模型; 长期预测

中图分类号: X171.4; F129.9

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022090017

The level measurement, convergence trend and long term prediction of Xi'an's eco-city

YE Wenxian¹, ZENG Shaolong²

(1. School of management, Shanxi Institute of International Trade & Commerce, Xianyang 712046, China;
2. School of economics, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: Eco-city construction is an important measure to achieve sustainable urban development goals. Panel data from Xi'an City and its 13 districts were selected for empirical analysis. The results indicated that the ecological level of Xi'an city showed an obvious trend of spatial dependence, agglomeration and steady improvement. The trend of "central urban area" was obviously better than that of "peripheral districts and counties", and its eco-city construction had gradually shifted from spatial agglomeration mode to spatial overflow mode and spatial equilibrium mode. The growth of resident population in all districts and counties was conducive to the improvement of urban ecological level. However, the ecological benefits derived from population growth gradually diminish when the resident population exceeds one million. The urban ecological level of the 13 districts shows σ convergence, absolute β convergence, and conditional β convergence. The central urban area exhibited characteristics of an ecological environment lagging, while the peripheral districts showed characteristics of a socio-economic lagging. From 2021 to 2035, the ecological level of Xi'an city is expected to maintain a stable growth trend and reach a moderate level by 2035, with the ecological levels of the Xin Cheng, Yan Ta, and Wei Yang districts being at a relatively high level.

Keywords: eco-city; comprehensive evaluation; convergence model; TOPSIS model; long term forecast

CLC number: X171.4; F129.9

生态城市建设是实施生态文明战略, 实现城市可持续发展与高质量发展目标的重要举措。自20世纪初霍华德提出了田园城市理论后, 现代生态城市思想开始启蒙^[1], 在随后的两次城市生态学研究浪潮推动下, 国内外学者对生态城市研究产生了

浓厚兴趣, 形成了较为丰富的研究成果^[2]。国外研究成果主要包括: 环境治理与可持续发展^[3]、案例分析与经验总结^[4]、人文生态与绿色设施^[5]、指标体系与研究方法^[6]、自然景观与生物系统等^[7]; 国内成果主要包括: 学科属性与概念内涵^[8]、建设策略与城市

收稿日期: 2022-09-08 录用日期: 2022-12-01

基金项目: 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目(2021ND0013); 教育部人文社会科学研究一般项目(18YJCGJW001); 陕西国际商贸学院科技创新团队建设项目(SSY20TD01)

作者简介: 叶文显(1982—), 男, 硕士、副教授。研究方向: 环境经济。E-mail: 179072635@qq.com

通信作者: 曾绍龙(1979—), 男, 博士、副教授。研究方向: 经济金融。E-mail: 15971987@qq.com

引用格式: 叶文显, 曾绍龙. 西安生态城市的水平测度、收敛趋势与长期预测[J]. 环境保护科学, 2023, 49(5): 114-122.

规划^[9]、指标体系与生态评价^[10]和可持续发展研究等^[11]。国外研究呈现明显的阶段化特征,而国内研究则呈现明显的模块化特征。整体上生态城市的研究目标已从弱可持续发展转向强可持续发展,其研究内容已从空间形态与交通出行转向社会生态环境,但其研究仍存在一些局限性。一方面,生态城市的理论构建需要加强跨学科融合研究和实践应用研究;另一方面,城市生态系统的非线性、复杂性特征仍需进一步研究。此外,生态城市建设不仅要关注当前的城市生态化水平,还应该关注未来的收敛趋势、长期预测与规划工作,而已有文献较少涉及上述内容。作为关中城市群的核心城市、西北五省(区)唯一的特大城市以及黄河经济带的重要节点城市,西安城市生态化水平不仅影响了关中城市群的可可持续发展与人民的生活质量,还会对西北五省(区)及黄河经济带的生态保护与高质量发展产生重大影响。文章选取西安市及其13个区县2010—2020年的面板数据,定量测度了城市生态化水平及其变动趋势,以期为西安当前生态城市建设、后续精准治理与未来中长期规划提供科学依据。

1 研究区概况与指标选取

1.1 研究区概况

西安地处关中平原中部,是陕西省省会和关中城市群的核心城市,也是西北五省(区)中唯一的特大城市和副省级城市。2018年,西安在“第五届绿色发展峰会”上获得“首批生态型城市”和“绿色发展示范城市”荣誉称号,浐灞生态区获得“生态文明建设典范开发区”荣誉称号,成为西北地区首个国家绿色生态示范城区和国家级生态区。2020年西安GDP为10 020.39亿元,常住人口1 296万人,城镇化率79.2%,土地面积10 108 km²,下辖11个区、2个县以及代管1个国家级新区。具体管辖的11个区为碑林区、灞桥区、雁塔区、临潼区、高陵区、新城、莲湖区、未央区、阎良区、长安区和鄠邑区,2个县为周至县和蓝田县,1个国家级新区为西咸新区。鉴于西安市从2017年才代管西咸新区,相关数据大量缺失,故研究范围仅限于西安市及其所管辖的13个区县。

1.2 指标选取

参考已有文献成果,分别从社会文化、生态环境与经济发展3个一级指标,人均GDP、三产比重

等18个二级指标构建西安生态城市评价指标体系。所选指标的数据来源于《西安统计年鉴》《陕西区域统计年鉴》以及13个区县的年度统计公报和政府工作报告,数据区间为2010—2020年,少量缺失值采用插值法补充,见表1。

2 研究方法

2.1 综合权重-TOPSIS模型

采用熵值权重与AHP权重相结合的组合平均权重(表1),结合TOPSIS模型分析西安城市生态化水平。TOPSIS模型是一种常用的多目标决策评价方法,它通过对原始数据归一化处理得到规范化矩阵,在此基础上找出各指标的正负理想解,并计算各方案与正负理想解的距离(即贴近度),最后根据贴近度的大小关系进行方案优劣排序,计算方法见文献[18]。

2.2 收敛分析

收敛分析是一种常用的衡量指标变动趋势的检验方法,一般可以分为 σ 收敛和 β 收敛, σ 收敛主要衡量指标差异是否会随时间推演而出现下降态势。当出现 $\sigma_{t+1} < \sigma_t$ 时,表明存在 σ 收敛,反之,则存在发散现象。 β 收敛包括条件 β 收敛与绝对 β 收敛,其中条件 β 收敛主要衡量指标是否收敛于自身的稳态,而绝对 β 收敛主要衡量低值区是否拥有比高值区更快的增长速度,采用双向固定效应模型进行条件 β 收敛检验,相关计算方法见文献[19]。

2.3 预测模型

定量预测是一种使用数学工具预测事物发展趋势的科学方法,常用的定量预测方法有回归分析法、系统分析法、模糊数学法、时间序列法等。分别选取线性回归模型、半参数模型、GM(1,1)模型和ARMA模型,探究城市生态化水平与社会文化、生态环境、经济发展的函数关系,并对西安市及其13个区县2021—2035年的城市生态化水平进行长期预测,相关预测模型的计算方法见文献[20]。

3 结果分析

3.1 西安城市生态水平的时空演变

运用综合权重-TOPSIS模型计算2010—2020年西安及其13个区县的城市生态化水平,见表2。

表 1 西安城市生态水平评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of urban ecological level in Xi'an

一级指标	AHP权重	熵值权重	综合权重	二级指标	参考文献	AHP权重	熵值权重	综合权重
经济发展	0.437	0.366	0.402	人均GDP	[12]	0.093	0.045	0.069
				三产比重	[13]	0.066	0.021	0.044
				人均财政收入	[12]	0.079	0.050	0.065
				人均消费品零售总额	[12]	0.066	0.079	0.072
				地均工业总产值	[12]	0.079	0.163	0.121
				GDP增长率	[14]	0.054	0.008	0.031
生态环境	0.313	0.196	0.254	工业万元产值SO ₂ 排放量	[12]	0.063	0.004	0.033
				工业万元产值COD排放量	[15]	0.063	0.005	0.034
				建成区绿化覆盖率	[14]	0.045	0.016	0.030
				万元工业GDP能源消耗量	[13]	0.053	0.007	0.030
				环保投资占GDP比重	[15]	0.036	0.159	0.098
				人均二氧化硫排放量	[16]	0.053	0.005	0.029
社会文化	0.250	0.438	0.344	万人医院卫生院床位数	[15]	0.056	0.048	0.052
				万人卫生技术人员数	[14]	0.042	0.070	0.056
				人口密度	[13]	0.035	0.152	0.093
				教育事业费占GDP比重	[17]	0.028	0.088	0.058
				城市化率	[15]	0.048	0.042	0.045
				城乡居民收入比	[12]	0.041	0.038	0.040

表 2 2010—2020 年西安城市生态水平
Table 2 The urban ecological level in Xi'an from 2010 to 2020

地区	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	年均增速/%
全市	0.257	0.269	0.288	0.303	0.312	0.319	0.324	0.317	0.329	0.331	0.327	2.44
新城	0.473	0.502	0.510	0.536	0.556	0.567	0.571	0.563	0.517	0.542	0.552	1.55
碑林	0.424	0.459	0.417	0.437	0.455	0.463	0.474	0.475	0.474	0.469	0.447	0.52
莲湖	0.507	0.519	0.531	0.530	0.532	0.542	0.542	0.559	0.578	0.549	0.508	0.01
灞桥	0.252	0.280	0.304	0.336	0.360	0.370	0.354	0.352	0.358	0.354	0.326	2.59
未央	0.284	0.321	0.334	0.348	0.362	0.369	0.376	0.404	0.413	0.426	0.394	3.33
雁塔	0.345	0.360	0.386	0.399	0.429	0.428	0.428	0.442	0.443	0.458	0.448	2.64
阎良	0.252	0.258	0.276	0.288	0.294	0.305	0.307	0.304	0.308	0.306	0.302	1.85
临潼	0.210	0.220	0.242	0.250	0.257	0.260	0.273	0.272	0.286	0.298	0.303	3.72
长安	0.220	0.246	0.253	0.264	0.267	0.278	0.281	0.285	0.292	0.294	0.286	2.67
高陵	0.256	0.273	0.295	0.310	0.319	0.319	0.320	0.335	0.353	0.348	0.351	3.19
鄠邑	0.139	0.150	0.182	0.187	0.194	0.249	0.322	0.285	0.323	0.318	0.278	7.17
蓝田	0.246	0.262	0.244	0.232	0.237	0.246	0.259	0.271	0.275	0.311	0.320	2.66
周至	0.251	0.266	0.297	0.271	0.277	0.285	0.286	0.291	0.322	0.385	0.331	2.82

从时间序列的变化趋势看,西安的城市生态水平呈现明显的提升趋势,其生态水平值由 2010 年的 0.257 增到 2020 年的 0.327,年均增速为 2.44%。13 个区县的测度结果显示,新城和莲湖的城市生态水平较高,2020 年其生态水平值分别为 0.552 和 0.508,远高于其他区县;紧随其后的是雁塔和碑林,其生态水平值均接近 0.45;城市生态化水平较低的区县主要是鄠邑、长安、阎良和临潼,2020 年其生态水平值均低于全市测度值 0.327。13 个区县 2020 年城市生态化水平排名与 11 年间排名均值差异不大,表明各区县的生态水平排名相对稳定。从各区县生态水平的年均增速看,13 个区县都出现了不同幅度的增长,且大部分区县的年均增速超过

2.5%;除个别年度发生了一定的降幅外,整体上鄠邑、临潼、未央和高陵的城市生态水平发生了较大幅度的增长,年均增速均超过 3%;尽管新城、碑林和莲湖的年均增速分别仅有 1.55%、0.52% 和 0.01%,但 3 个城区的生态水平基数较大,同时上述城区在 2017 或 2018 年之前也呈现明显的增长趋势。

依据 TOPSIS 模型测算出的贴进度数值,将西安生态城市的建设水平划分为低、较低、中等、较高和高 5 个等级,对应贴进度的区间范围分别为: <0.25、[0.25,0.35)、[0.35,0.5)、[0.5,0.75)、 ≥ 0.75 。选择 2010、2015 和 2020 年作为典型年份,借助 ArcGIS10.2 绘制西安生态城市空间格局的变化趋势,见图 1。

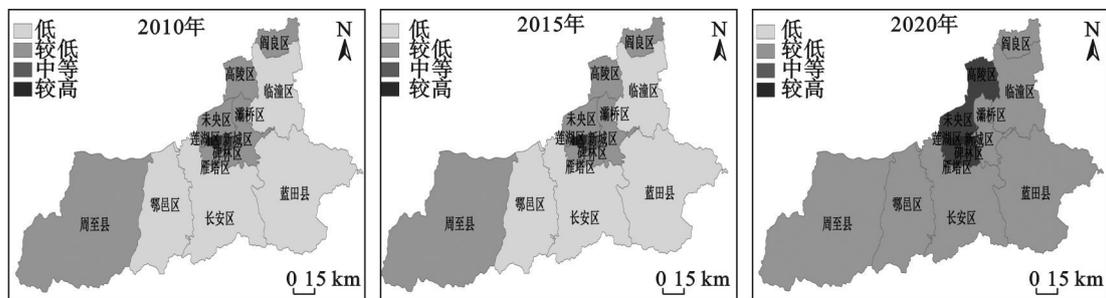


图 1 典型年份西安城市生态水平的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of urban ecological level in Xi'an in typical years

图 1 可知,西安未出现高生态等级区县,其贴进度均小于 0.75,各区县生态水平呈现一定的空间依赖性和空间集聚性,总体特征“中心城区优于外围区县”趋势明显。生态水平较高等级区县主要为主城区的新城和莲湖,中等等级区县仍然为主城区的碑林、未央、雁塔和灞桥,较低及以下等级区县主要为城市外围的鄠邑、蓝田、长安和临潼。2010 年,形成以“莲湖为单中心、新城和碑林为两翼”的主城中高等级生态区,以及以“鄠邑—临潼—长安—蓝田”为中心的外围低等级生态区,雁塔、未央、灞桥、高陵、阎良和周至为较低等级生态区,总体上 13 个区县的平均贴进度只有 0.297,处于较低等级生态区;2015 年,形成以“莲湖和新城为双中心,碑林、雁塔、灞桥和未央协调发展”的主城中高等级生态区,以及以“鄠邑和蓝田为双中心”的外围低等级生态区,高陵、阎良、周至、长安和临潼为较低等级生态区,总体上 13 个区县的城市生态水平提升明显,其平均贴进度由 2010 年的 0.297 增至 2015 年的 0.360,其生态等级由较低等级上升到中等等级;2020 年形成以“莲湖和新城为双中心,碑

林、未央、雁塔和高陵协调发展”的主城中高等级生态区,其他区县均为较低等级生态区,无低等级和高等级生态区,总体上 13 个区县的平均贴进度由 2015 年的 0.360 缓慢提升到 2020 年的 0.373,仍然处于中等等级生态区。3 个典型年份的空间演变过程表明,西安生态城市建设由典型的空间集聚模式逐渐向空间均衡模式和空间溢出模式转变,各区县城市生态水平差距呈缩小化趋势。

从各区县常住人口与生态水平的相关系数看,蓝田和周至两个县城的相关系数显著为负,表明常住人口与生态水平之间呈反向变动关系,见图 2。

出现反向变动关系可能是因为蓝田和周至等外围区县具有 GDP 规模小、经济增长缓慢、社会资源相对较少等特征,近年来常住人口出现了下降趋势,而人均 GDP、人均财政收入、人均消费品零售总额、人口密度等指标增长,导致城市生态水平的显著上升。雁塔、碑林等其余 11 个城区的相关系数为正,表明常住人口与生态水平之间存在正向变动关系,尤其是未央、临潼、雁塔、长安、阎良和高陵,相关系数均通过 5% 的检验水平,灞桥通过

10% 的检验水平,表明这些区县的城市规模等级与生态水平之间成正比关系,即人口规模扩张有利于提升城市生态水平。尽管新城、鄂邑、莲湖和碑林

的相关系数为正,但没有通过 10% 的检验水平,表明这些城区的人口规模扩张并不能显著提升本地的城市生态水平。

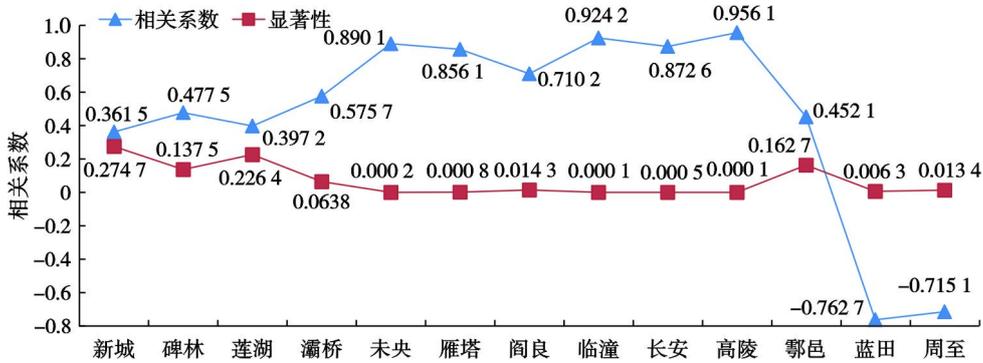


图 2 生态水平与常住人口的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between ecological level and permanent population

绘制 13 个区县 2010—2020 年城市生态水平与常住人口的散点图,根据散点图将常住人口分为 (25,45]、(45,100] 和 (100,205)3 个数据区间,见图 3。

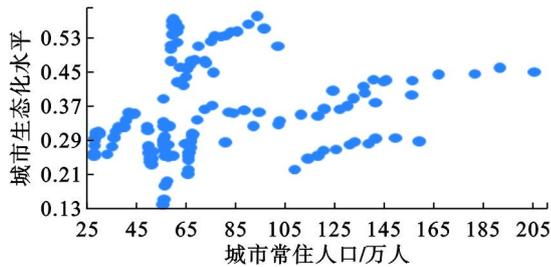


图 3 生态水平与常住人口的散点图

Fig. 3 Scatterplot of ecological level and resident population

图 3 可知,人口介于 25 万到 45 万的区县较少,但该区间的常住人口与生态水平呈明显的正向变动关系;介于 45 万到 100 万的区县较多,该区间的常住人口与城市生态水平之间呈现明显的空间异质性,大部分区县仍然存在明显的正相关性,少数区县的正相关性不明显,甚至出现负向变动关系;人口超过 100 万的区县也较多,尽管该区间也存在明显的正向变动关系,但人口增长所导致的边际生态水平增量出现明显的放缓趋势,即人口增长所引发的城市生态改善红利逐渐减弱。

选择 2010、2015 和 2020 年作为典型年份,从 3 个一级指标分析 13 个区县的城市生态水平,见表 3。

表 3 可知,3 个一级指标得分增长趋势明显,经济发展水平均值由 0.266 增加到 0.345,生态环境水平均值由 0.369 增加到 0.464,社会文化水平均值由 0.255 增加到 0.325。各区县在 3 个一级指标方

面的得分值存在明显差异,总体上城市主城区在经济发展和社会文化方面表现出色,在生态环境方面表现稍差,为典型的生态环境滞后型区域,而城市外围区县则刚好相反,在生态环境方面表现出色,在经济发展和社会文化方面表现稍差,为典型的社会经济滞后型区域。经济发展方面,主城区新城、雁塔、莲湖和碑林得分较高,而城市外围区县蓝田、临潼、鄂邑、周至则得分较低;生态环境方面,各区县得分出现了一定的波动,总体上城市外围区县周至、蓝田、鄂邑和临潼的得分较高,主城区碑林、莲湖、灞桥、未央在部分年度得分较低;社会文化方面,主城区碑林、新城、莲湖和雁塔得分较高,城市外围区县临潼、长安、鄂邑、高陵则得分较低。

3.2 西安城市生态水平的收敛分析

计算 2010—2020 年西安城市生态水平及 3 个一级指标的 σ 收敛值,见图 4。

整个研究期间,尽管在部分年度西安城市生态化水平的变异系数出现小幅上升,但总体下降趋势明显,其 σ 值从 2010 年的 0.367 降到 2020 年的 0.239,降幅 34.9%,呈现明显的 σ 收敛趋势。与西安生态城市的变动趋势类似,社会文化水平也经历了 2012—2014 年及 2016—2017 年的短暂提升,总体上仍然呈现明显的 σ 收敛趋势。经济发展水平的 σ 值变动幅度不大,自 2011 年开始呈现典型的持续下降态势, σ 收敛趋势明显。生态环境水平则发生了频繁的上下波动,收敛与发散交替出现的趋势明显,说明西安 13 个区县的生态环境差异具有明显的不稳定性,环境整治工作任重道远。

以 2015 年为分界线, 分别计算 2010—2020 年的 β 收敛值, 见表 4。
 年、2010—2015 年和 2016—2020 年城市生态水平

表 3 西安城市生态水平一级指标得分及其排名
 Table 3 Score and ranking of the first level indicators of urban ecological level in Xi'an

城市	经济发展			生态环境			社会文化		
	2010年	2015年	2020年	2010年	2015年	2020年	2010年	2015年	2020年
新城	0.494	0.711	0.655	0.386	0.405	0.403	0.523	0.532	0.555
碑林	0.436	0.498	0.471	0.386	0.388	0.402	0.441	0.464	0.446
莲湖	0.596	0.687	0.645	0.394	0.403	0.413	0.489	0.501	0.433
灞桥	0.237	0.372	0.310	0.285	0.481	0.390	0.249	0.296	0.290
未央	0.295	0.391	0.397	0.315	0.406	0.418	0.241	0.306	0.369
雁塔	0.307	0.470	0.481	0.395	0.401	0.418	0.349	0.402	0.434
阎良	0.187	0.278	0.253	0.390	0.407	0.430	0.170	0.234	0.232
临潼	0.140	0.161	0.193	0.365	0.431	0.553	0.099	0.197	0.215
长安	0.169	0.227	0.238	0.349	0.403	0.419	0.134	0.201	0.189
高陵	0.191	0.307	0.362	0.397	0.411	0.430	0.155	0.231	0.250
鄠邑	0.128	0.147	0.154	0.175	0.427	0.459	0.127	0.248	0.247
蓝田	0.140	0.145	0.165	0.479	0.416	0.643	0.167	0.199	0.273
周至	0.139	0.147	0.164	0.482	0.496	0.655	0.172	0.266	0.289
平均值	0.266	0.349	0.345	0.369	0.421	0.464	0.255	0.314	0.325

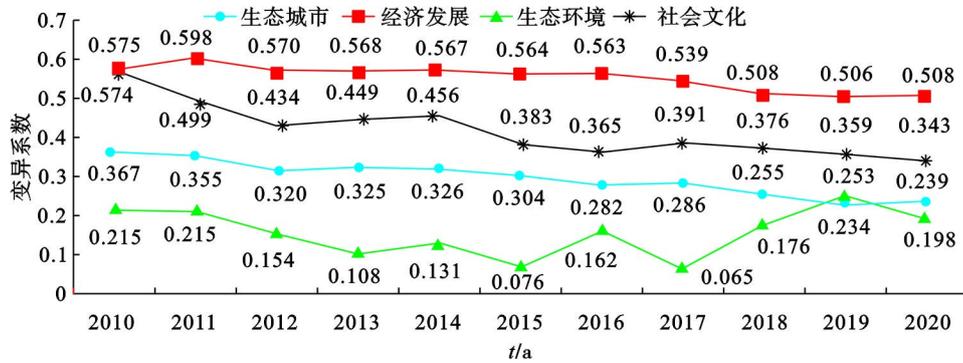


图 4 西安城市生态水平的 σ 收敛示意图

Fig. 4 Schematic diagram of σ -convergence of urban ecological level in Xi'an

表 4 西安城市生态水平的 β 收敛检验
 Table 4 β convergence test of urban ecological level in Xi'an

	绝对 β 收敛						条件 β 收敛					
	2010—2020年		2010—2015年		2016—2020年		2010—2020年		2010—2015年		2016—2020年	
	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ	β	λ
	-0.049***	0.068	-0.048***	0.067	-0.050**	0.069	-0.251***	0.348	-0.250***	0.347	-0.659***	0.914

表 4 可知, 绝对 β 收敛的回归系数 β 始终显著为负, 说明 13 个区县的城市生态水平在 3 个时间段均存在绝对 β 收敛。随着时间的推移, 低水平生态城市具有明显的“追赶效应”, 并逐渐向高生态城

市靠拢, 最终 13 个区县的城市生态水平趋于同一稳态, 并实现均衡发展。此外, 3 个时间段的收敛系数 β 始终显著为负, 且收敛系数与收敛速度在不同的时间段测度结果差异较小, 说明 13 个区县的城

市生态水平相对平稳,回归结果具有良好的稳健性。条件 β 收敛的测度结果表明,3 个时间段的系数估计值 β 均显著为负,说明 13 个区县的城市生态水平存在条件 β 收敛,各个区县都收敛于自身的稳态。3 个时间段的测度结果表明,整体时段与 2010—2015 年的收敛趋势十分类似,且收敛速度均慢于 2016—2020 年。3 个时间段的条件 β 收敛系

数始终显著为负,表明回归结果也具有良好的稳健性。

3.3 西安城市生态水平的预测分析

分别运用 GM(1,1) 模型、线性回归模型、半参数模型和 ARMA 模型模拟西安 2010—2020 年的生态水平 Y , 自变量为社会文化 X_3 、生态环境 X_2 、经济发展 X_1 等一级指标得分,见表 5。

表 5 2010—2020 年西安城市生态水平的模拟值及差异率

Table 5 Simulated values and variation rates of urban ecological level in Xi'an from 2010 to 2020

t/a	实际值	GM(1,1)模型 拟合度: 0.973		线性回归模型 拟合度: 0.998		半参数模型 拟合度: 0.986		ARMA模型 拟合度: 0.979	
		模拟值	差异率/%	模拟值	差异率/%	模拟值	差异率/%	模拟值	差异率/%
2010	0.257	NA	NA	0.257	0.16	0.265	2.97	NA	NA
2011	0.269	0.287	6.54	0.270	0.13	0.276	2.58	0.282	4.64
2012	0.288	0.292	1.30	0.288	0.05	0.289	0.14	0.290	0.47
2013	0.303	0.298	1.72	0.303	0.06	0.301	0.51	0.302	0.13
2014	0.312	0.303	2.85	0.313	0.40	0.311	0.26	0.312	0.03
2015	0.319	0.309	3.33	0.321	0.35	0.32	0.09	0.318	0.43
2016	0.324	0.315	3.02	0.323	0.28	0.322	0.81	0.323	0.43
2017	0.317	0.320	0.94	0.317	0.26	0.313	1.26	0.326	2.76
2018	0.329	0.326	0.79	0.329	0.11	0.323	1.70	0.322	2.24
2019	0.331	0.332	0.39	0.331	0.02	0.325	1.79	0.329	0.58
2020	0.327	0.339	3.55	0.326	0.28	0.323	1.19	0.331	1.12
均值	0.307	0.312	2.44	0.307	0.19	0.306	1.21	0.313	1.28

注: 实际值和模拟值均保留了3位小数, 差异率根据原始数据计算, 差异率=|模拟值-实际值|÷实际值×100%。NA表示当年无预测数据, 由于GM(1,1)模型和ARMA模型的计算特点, 从第2年(即2011年)才有预测数据。

GM(1,1) 模型的拟合结果为 $Y^{(1)}(k+1)=15.372 \times e^{0.0185k}-15.115$, 拟合度为 0.973; 线性回归的拟合结果为 $Y=0.499X_1+0.203X_2+0.258X_3+0.020$, 拟合度为 0.998; 半参数模型中将社会文化 X_3 和经济发展 X_1 作为线性部分, 生态环境 X_2 为非线性部分, 最终拟合结果为 $Y=0.223X_1+0.249X_3+0.1$, 拟合度为 0.986; ARMA 模型中通过查看偏自相关图和自相关图确定模型形式为 ARMA(1,1), 回归的拟合结果为 $Y_t=0.112+0.661Y_{t-1}+\varepsilon_t-0.984\varepsilon_{t-1}$, 拟合度为 0.979。单位根 ADF 检验后发现, 生态水平 Y 和经济发展 X_1 均为平稳序列, 社会文化 X_3 和生态环境 X_2 分别为一阶差分和二阶差分平稳序列。4 个模型的模拟结果表明, 各模型都具有非常高的拟合度, 其数值均大于 0.97, 尤其是线性回归模型的拟合度最优, 预测差异率均值仅为 0.19%, 说明线性回归模型更

适合做进一步的预测分析。

运用线性回归模型预测 2021—2035 年西安及其 13 个区县的城市生态水平, 见表 6。

预测期间, 西安的城市生态水平保持了平稳增长趋势, 其生态水平值由 2021 年的 0.328 提高到 2035 年的 0.358, 增长 9%。依据前述生态城市的等级划分标准可知, 西安的生态城市建设发生了从“较低等级”到“中等等级”的演变。纵向比较 13 个区县, 预测期间各区县的生态水平介于 0.275 到 0.641, 无“低等级”和“高等级”生态区县。2035 年, 主城区新城、雁塔和未央的生态水平值超过 0.5, 处于“较高等级”; 莲湖、灞桥、临潼、高陵、鄠邑、周至和蓝田的生态水平值介于 0.35 到 0.50, 处于“中等等级”; 碑林、阎良和长安的生态水平值介于 0.25 ~ 0.35, 处于“较低等级”; 13 个区县中排名前

3的是新城、雁塔和未央,排名后3的是碑林、阎良和长安。横向比较13个区县,尽管碑林和莲湖的生态水平较高,但两者都出现了明显下降趋势,其余11个区县的生态水平均呈现不同幅度的增长,比较典型的区县有未央、雁塔、临潼和鄠邑,其增幅均超过28%。从预测期间各区县的生态城市等

级来看,灞桥、临潼、蓝田、鄠邑和周至的生态城市类型由“较低等级”提升到“中等等级”,雁塔和未央由“中等等级”提升到“较高等级”,而莲湖则由“较高等级”下降到“中等等级”,碑林由“中等等级”下降到“较低等级”,其余区县的生态城市类型在预测期间保持不变。

表6 2021—2035年西安城市生态水平的预测值

Table 6 Prediction value of urban ecological level in Xi'an from 2021 to 2035

t/a	西安	新城	碑林	莲湖	灞桥	未央	雁塔	阎良	临潼	长安	高陵	鄠邑	蓝田	周至
2021	0.328	0.556	0.436	0.504	0.327	0.406	0.457	0.306	0.315	0.290	0.353	0.275	0.325	0.344
2022	0.330	0.562	0.426	0.501	0.331	0.417	0.466	0.308	0.325	0.294	0.357	0.284	0.329	0.347
2023	0.332	0.568	0.417	0.498	0.335	0.429	0.476	0.311	0.335	0.299	0.362	0.292	0.333	0.351
2024	0.335	0.574	0.408	0.494	0.340	0.440	0.485	0.313	0.345	0.303	0.366	0.301	0.337	0.354
2025	0.337	0.580	0.398	0.491	0.344	0.451	0.495	0.315	0.354	0.307	0.370	0.309	0.341	0.358
2026	0.339	0.586	0.389	0.488	0.348	0.463	0.504	0.317	0.364	0.311	0.374	0.318	0.345	0.361
2027	0.341	0.592	0.379	0.485	0.353	0.474	0.513	0.320	0.374	0.316	0.378	0.326	0.349	0.365
2028	0.343	0.598	0.370	0.482	0.357	0.486	0.523	0.322	0.383	0.320	0.383	0.335	0.352	0.368
2029	0.345	0.604	0.360	0.479	0.361	0.497	0.532	0.324	0.393	0.324	0.387	0.344	0.356	0.372
2030	0.347	0.610	0.351	0.476	0.366	0.508	0.542	0.327	0.403	0.328	0.391	0.352	0.360	0.375
2031	0.349	0.616	0.341	0.473	0.370	0.520	0.551	0.329	0.413	0.333	0.395	0.361	0.364	0.379
2032	0.351	0.622	0.332	0.470	0.374	0.531	0.561	0.331	0.422	0.337	0.399	0.369	0.368	0.382
2033	0.353	0.628	0.322	0.467	0.379	0.543	0.570	0.334	0.432	0.341	0.403	0.378	0.372	0.386
2034	0.356	0.635	0.313	0.463	0.383	0.554	0.579	0.336	0.442	0.345	0.408	0.387	0.376	0.389
2035	0.358	0.641	0.303	0.460	0.387	0.565	0.589	0.338	0.451	0.349	0.412	0.395	0.379	0.393
均值	0.343	0.598	0.370	0.482	0.357	0.486	0.523	0.322	0.383	0.320	0.383	0.335	0.352	0.368

4 结论与启示

西安的城市生态水平呈明显的空间依赖性、空间集聚性以及稳步提升趋势,总体特征“中心主城”优于“外围区县”趋势明显,但并未出现高生态等级区县。研究期间,西安的生态城市建设发生了由“以莲湖为单中心”到“以莲湖和新城为双中心”城市格局演变,其生态城市发展模式由典型的空间集聚模式逐渐向空间均衡模式和空间溢出模式转变,各区县城市生态水平差距呈缩小化趋势;常住人口与城市生态水平之间存在明显的空间异质性,蓝田和周至为显著的反向变动关系,未央、临潼、雁塔、长安、阎良、高陵和灞桥为显著的正向变动关系。总体上,各区县常住人口增长有利于城市生态水平的提升,当常住人口超过100万时,其生态改善红

利将逐渐减弱;西安的城市生态水平、社会文化水平与经济发展水平总体呈 σ 收敛趋势,13个区县的生态水平存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛,低水平生态城市具有明显的“追赶效应”,并逐渐向高生态城市靠拢。总体上,中心城区在经济发展和社会文化方面表现出色,体现为生态环境滞后型区域,而城市外围区县则刚好相反,在生态环境方面表现出色,体现为社会经济滞后型区域;2021—2035年期间,西安的城市生态水平将保持平稳增长趋势,2035年达到中等等级。新城、雁塔和未央的生态水平处于较高等级,碑林、阎良和长安的生态水平为较低等级。

上述分析可知,西安的城市生态水平并不高,未来的生态城市建设任务仍然十分艰巨。要提高西安的城市生态水平,一方面应加快莲湖、新城、

碑林、未央、雁塔等中心城区的生态环境水平,大力提升其生态水平的同时,充分发挥这些中心城区的空间溢出效应;另一方面,应加快推动鄠邑、长安、蓝田、阎良等外围区县的社会经济水平提升,以维持较高的生态水平增速和较强的“追赶效应”,以此推动西安生态城市建设的空间均衡模式演变和提高西安整体的城市生态水平;另外,鉴于各区县常住人口与生态水平之间的空间异质性关系,我们认为,各区县应制订差异化的常住人口吸引政策。对于蓝田、周至等人口出现小幅下降的外围区县,应在提升社会经济水平的同时,提供更多的工作岗位和更优的人才激励政策,以抑制常住人口逐渐下降的不利态势;对于未央、临潼、雁塔、长安、阎良、高陵、灞桥等具有显著人口增长红利的区县,应在改善生态环境的同时,完善人才吸引政策,进一步适度扩大常住人口规模;对于新城、莲湖、碑林和鄠邑等人口增长而生态水平提升不显著的区县而言,要重点提高上述城区的生态环境水平,同时适度增加常住人口规模,提升人力资源的综合素质和人才技能结构,以促使生态水平的显著提升。

参考文献

- [1] 杨琰瑛,郑善文,逯非,等.国内外生态城市规划建设比较研究[J].生态学报,2018,38(22):8247-8255.
- [2] 时保国,田一聪,赵江美,等.生态城市的研究进展与热点——基于文献计量和知识图谱分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(3):76-84.
- [3] FLYNN A, YU L, FEINDT P, et al. Eco-cities, governance and sustainable lifestyles: the case of the sino-singapore tianjin eco-city[J]. *Habitat international*, 2016, 53: 78-86.
- [4] JOSS S, MOLELLA A P. The eco-city as urban technology: perspectives on caofeidian international eco-city(China)[J]. *Journal of Urban Technology*, 2013, 20(1): 115-137.
- [5] SHWAYRI S T. A model korean ubiquitous eco-city? the politics of making songdo[J]. *model korean ubiquitous eco-city? the politics of making songdo*[J]. *Journal of urban technology*, 2013, 20(1): 39-55.
- [6] DONG H, FUJITA T, GENG Y, et al. A review on eco-city evaluation methods and highlights for integration[J]. *Ecological indicators*, 2016, 60: 1184-1191.
- [7] WU Y, SWAIN R E, JIANG N, et al. Design with nature and eco-city design[J]. *Ecosystem health and sustainability*, 2020, 6 (1): 1781549.
- [8] 范育鹏,方创琳.生态城市与人地关系[J].生态学报,2022,42(11):4313-4323.
- [9] 孙江宁,汤姚楠,尚金玲.2000年后中外生态城市建设比较及实施路径研究[J].*城市发展研究*,2019,26(1):110-115.
- [10] 吴远征,张智光.林业生态安全效率及其影响因素的 DEA-Tobit 模型分析——基于生态与产业共生关系[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(1):76-86.
- [11] 杜海龙,李迅,李冰.绿色生态城市理论探索与系统模型构建[J].*城市发展研究*,2020,27(10):1-8.
- [12] 徐丽婷,姚士谋,陈爽,等.高质量发展下的生态城市评价——以长江三角洲城市群为例[J].*地理科学*,2019,39(8):1228-1237.
- [13] 彭定洪,黄子航.生态城市发展质量评价方法研究[J].*中国科技论坛*,2019(8):95-104.
- [14] 易平涛,李雪,周莹,等.生态城市评价指标的筛选模型及应用[J].*东北大学学报(自然科学版)*,2017,38(8):1211-1216.
- [15] 翁翎燕,张超,李伟霄.基于全排列多边形图示法的生态城市评价——以上海市为例[J].*地球与环境*,2017,45(3):356-362.
- [16] 付丽娜,贺灵.基于灰色关联分析的低碳生态城市评价研究[J].*湘潭大学学报(哲学社会科学版)*,2013,37(3):31-35.
- [17] 钱耀军.生态城市可持续发展综合评价研究——以海口市为例[J].*调研世界*,2014(12):54-59.
- [18] 叶文显.西安市科技创新能力及其绩效评价[J].*科技管理研究*,2017,37(11):86-91.
- [19] 李欠男,李谷成,尹朝静.中国农业绿色发展水平的地区差异及收敛性——基于地级市面板数据的实证[J].*中国农业大学学报*,2022,27(2):230-242.
- [20] 邹伏霞,邹冬生.基于五种模型比较的湖南省生态旅游需求预测研究[J].*长江流域资源与环境*,2020,29(11):2406-2416.