

基于参数修正的安徽省生态承载力 演化特征及影响因素

符琳蓉¹ 王咏¹ 陆林¹ 任以胜² 张潇¹ 李冬花¹¹

(1. 安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002;

2. 安徽师范大学 经济管理学院, 安徽 芜湖 241002)

【摘要】: 生态承载力状况是新时代生态文明建设研究的着眼点, 也是科学把控人与自然和谐发展的关键。以安徽省 16 个地级市为研究单元, 利用参数修正后的生态承载力模型测算安徽省及各城市整体与人均层面上的生态承载力, 运用数理统计分析比较 1998~2018 年安徽省生态承载力的演化特征, 并结合地理探测器探究各因素对安徽省生态承载力影响力的变化。结果表明: (1) 基于“省公顷”进行修正后的模型参数与其他尺度显著不同, 差异明显; (2) 全省生态承载力总体呈上升趋势, 全省人均生态承载力呈现显著下降趋势。各市生态承载力自身波动变化趋势显著, 与其他城市存在差距; 各市的人均生态承载力两极分化现象突出, 升降趋势与整体层面不同; (3) 各市生态承载力存在一定退化现象, 皖北地区状况较皖南地区优势突出, “南低北高”的空间格局特征鲜明; (4) 影响因素中环境治理能力、经济发展方式、社会发展水平等影响因素作用在增强, 人口压力状况作用削弱, 双因子交互作用的影响力要大于单因子作用。需要持续关注生态承载力的演化特征, 合理优化生态承载力区, 保证社会经济发展与其资源本底供给相适应。

【关键词】: 参数修正 生态承载力 演化特征 地理探测器

【中图分类号】: X24 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2021) 10-2438-14

生态承载力作为衡量生态系统供给水平的重要指标^[1], 是落实生态文明理念和制定区域可持续发展战略的重要依据^[2]。目前, 人口及城市化率增长增加了生态环境负荷, 支撑社会经济发展的资源环境本底面临严峻挑战, 生态承载能力长期处于高压状态^[3, 4], 这与可持续发展的目标严重相悖, 因此, 必须将经济社会发展的生态负荷控制在合理承载范围内, 探寻制约承载力的影响因素并因地制宜制定调控规划与保护措施。

目前学术界关于生态承载力的研究多聚焦于测度与综合评价^[5, 6]、生态安全评估^[7, 8]、动态监测模拟^[9, 10]与可持续发展^[11, 12]等方面。国外学者依据区域生态足迹与生态承载力的差值求得生态赤字, 将生态压力指数作为生态承载力区类型划分的科学依据, 以此评估区域生态安全^[13]。国内学者侧重于基于生态承载力理论框架构建生态承载力指标体系, 评估生态承载力嬗变情况并将其作为优化生态安全格局的主要依据^[14]。随着国内外学者对生态承载力概念和内涵的积极探索, 生态承载力评价方法日益多元化。已有的研究方法主要为运用生态承载力模型进行承载力测度, 但模型中的均衡因子与产量因子两大参数默认按照经验数值进行

作者简介: 符琳蓉 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域可持续发展. E-mail: fulinrong6610@163.com; 王咏, E-mail: yongw1020@126.com

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41930644); 安徽省哲学社会科学规划项目 (AHSKY2018D16)

设置,存在研究结果与实际情况存在较大误差的弊端,鲜见将二者进行修正并应用于实证研究。以往学者多采用截面数据进行生态承载力空间格局的静态评价,基于面板数据的时空演化特征分析较少,运用地理空间方法探究其影响因素也略显不足。随着区域人口和社会经济发展的动态性凸显,粗略的、静态的生态承载力评价结果已难以适应科学精确、动态的可持续发展研究需要。因此,本文将根据研究区实际情况逐年修正与细化不同类型土地的均衡因子和产量因子以体现其资源本底的时空异质性,刻画生态承载力的演化特征并根据面板数据深入探讨其社会经济影响因素的变化。修正长时间序列的模型参数能更精确地分析生态承载力演化特征,对于指导实践具有重要意义。

安徽省是我国长江流域中人口最密集、水土资源开发利用强度最高、生态环境压力最大的地区之一,同时安徽省各城市均存在不同程度的生态敏感区,约占全省总面积的 5.3%。因此,本文以安徽省 16 个地级市为研究单元,研究安徽省生态承载力的演化特征及影响因素,以期了解生态文明建设背景下安徽省生态承载力状况,为保护生态环境脆弱区提供依据。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

安徽省地处华东腹地,属我国中部地区,现辖 16 个地级市,总面积约 13.94 万 km²。水土资源丰富,水热状况优良,自然区位优势突出^[15]。省内城市作为长三角和长江中游城市群的重要成员,长三角高度一体化背景下依托长江水道辐射沿江地区对外经济发展,凭借“共抓大保护、不搞大开发”发展理念与周围省市生态大融合^[16]。与此同时,因承担打造沿江集聚产业带、促进东部地区产业转移的使命诱发重化工业密集发展,资源粗放利用致使生态承载压力巨大,整体上生态脆弱性暴露明显^[17],严峻的生态安全问题成为区域可持续发展的瓶颈,需要贯彻生态优先、绿色发展的科学理念,加强生态环境保护和生态文明建设力度。

1.2 数据来源与处理

鉴于数据的的可获得性,安徽省 16 个城市不同类型土地利用面积相关数据主要来源于资源环境数据云平台(www.resdc.cn),将土地利用遥感监测影像数据经裁剪处理并解译得到各市 1998~2018 的各类土地利用数据。生物量、热值、社会经济统计数据等所需要的数据来自于《农业技术经济手册》与《安徽统计年鉴》(1999~2019 年)。由于安徽省在 2015、2011、2000 年(“枞阳、寿县分别划归铜陵、淮南”、“巢湖撤市”、“涡阳-蒙城-利辛划归亳州”)分别经历过三次局部行政区划调整,为保证统计口径的一致性,按照 2015 年既定的安徽省现有行政区底图,将 2014 年以前涉及调整的县级相关生物量统计数据调整至相对应的现所属的行政单元,调整方法主要为拆分法与归并法(附录 1)。这部分数据主要来自《安庆市统计年鉴》《六安市统计年鉴》《巢湖市统计年鉴》《亳州市统计年鉴》等。对于部分缺失数据,采用替换缺失值中的临近点的线性趋势法加以补全;如插值结果为负,则改用临近值的平均值法。

1.3 研究方法

1.3.1 生态承载力模型

生态承载力测算方法最初由生态经济学家 Rees 于 1992 年提出并经 Wackernagel 进一步完善^[18],生态承载力模型将生态生产性土地划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地等 6 大类型^[19],各类土地生产力各异且能给予人类所需的生态产品及服务,又称为生态容量^[20]。通常区域生态承载力借助生态生产性土地面积总和进行表征,具体算法如下:

$$EC = \sum_{i=1}^n A_i b_i c_i \quad (1)$$

$$ec = \frac{EC}{N} \quad (2)$$

式中：EC 为某区域总生态承载力；ec 为区域人均生态承载力； A_i 为第 i 种土地的面积； b_i 和 c_i 分别为第 i 种土地的均衡因子 ($s\text{-nhm}^2/\text{hm}^2$) 和产量因子，产量因子无量纲； N 为区域常住人口。这里强调均衡因子主要是研究区内不同类型土地与平均均质土地转化的当量，通过各类土地平均生产能力与总平均生产能力的比值表征；产量因子是研究区内不同行政单元同类土地转化的当量，主要通过不同行政单元的同类土地产量与研究区内该土地平均产量的比值表征。

1.3.2 参数修正方法

已有研究习惯以经典的全球公顷模型、国家公顷模型中的生态生产性土地生产力为基准确定均衡因子和产量因子这两个参数^[21]，但这种大尺度模型由于各类土地生产潜力不同及同类土地生产力存在地区差异并不适用于中小尺度。因此，需要采用适用于较小尺度的研究方法，弥补由于存在系统偏差所导致的低估或高估生态承载力的缺陷。本文基于“省公顷”这一概念^[22]，这里的省公顷并非纯粹的土地面积单位，更是指单位省公顷土地的平均生产力，即耕地、林地等 6 大类土地的生产力平均值。此处生产力并非生物生产量比值而是指最大农业生产潜力，即相同面积高产量的土地比低产量土地具有更多的省公顷数。

由于“省公顷”模型中 6 类土地的生产力不同，需要运用均衡因子使其转化为可相较的标准面积以解决“横向不可比”的问题；由于不同地区同类土地生产力存在差异致使“纵向不可加”，需要产量因子辅以调整使之可以直接对比。因此，采用“省公顷”模型计算安徽省实际生态承载力需先根据实际情况细化并修正均衡因子和产量因子两个参数。参照当地实际情况核算由农产品、林产品、畜产品、水产品等 37 项组成的生物资源账户(附录 2)，采用能值法^[23]使全省各类土地的生产力能够直接相加，经汇总处理得出修正后的逐年的均衡因子和产量因子。修正后的均衡因子个数为研究年限的 6 倍，产量因子个数为研究年限的 96 倍。具体算法如下：

$$a_i = \frac{\sum_k \sum_l z_k^i * \gamma_k^i}{\sum S_i} \quad (3)$$

$$b_i = \frac{\bar{X}_i}{\bar{X}} = \frac{Y_i}{S_i} / \frac{\sum Y_i}{\sum S_i} = \frac{\sum_k z_k^i * \gamma_k^i}{S_i} / \frac{\sum_k \sum_l z_k^i * \gamma_k^i}{\sum S_i} \quad (4)$$

$$c_i^j = \frac{\bar{X}_i^j}{\bar{X}_i} = \frac{Y_i^j}{S_i^j} / \frac{Y_i}{S_i} = \frac{\sum_k (z_k^i)^j * \gamma_k^i}{S_i^j} / \frac{\sum_k z_k^i * \gamma_k^i}{S_i} \quad (5)$$

式中： a_i 为省公顷 ($s\cdot nhm^2$), b_i 为均衡因子 ($s\cdot nhm^2/hm^2$), c_{ij} 指安徽省内 j 市第 i 类土地的产量因子。 X_i^- 是指安徽省内第 i 类土地的平均生产力 ($10^5 J/hm^2$), X^- 是指安徽省内全部土地的平均生产力 ($10^5 J/hm^2$); Y_i 指的是安徽省内第 i 类土地总生物的产量 ($10^5 J$); S_i 是指安徽省内第 i 类的土地面积 (hm^2); z_{ki} 指安徽省内第 i 类土地第 k 种生物的产量 (Kg); γ_{ki} 指安徽省内第 i 类土地第 k 种生物的单位热值 ($10^5 J/Kg$); X_{ij}^- 指安徽省内 j 市第 i 类的土地平均的生产力 ($10^5 J/hm^2$); X_i^- 指安徽省内第 i 类的土地平均生产力 ($10^5 J/hm^2$); Y_{ij} 指 j 市第 i 类的土地总产出 ($10^5 J$); S_{ij} 指安徽省内 j 市第 i 类的土地面积 (hm^2); $(z_k^i)^j$ 指安徽省内 j 市第 i 类土地的第 k 种生物产量 (Kg)。需要指出建筑用地的均衡因子、产量因子与耕地一致, 化石能源用地的产量因子为 0^[5]。

1.3.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰团队开发的一种探测在空间上地理现象与潜在影响因素关系的模型, 早期应用于疾病风险的研究^[24]。若某项因素和地理事物的变化具有显著的空间一致性, 则说明该项因素对于地理事物的发展变化具有决定影响^[25]。由于安徽省各市生态承载力存在空间差异性且探究人均层面的影响因素更具科学性, 因此本文仅探究人均意义上的生态承载力影响因素。某影响因素对人均生态承载力的决定力大小为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{h=1}^l N_h \delta_h^2 \quad (6)$$

式中: q 为探测因子 X_i 的探测力值; l 为各因素的类型; N 和 N_h 分别为安徽省内所有样本数、影响因素 X_i 在类型 h 内的样本数; δ^2 为整个安徽省 16 个地市的离散方差; δ_h^2 为影响因素 X_i 在类型 h 内的样本离散方差。 q 值的范围为 0~1, q 值越大, 说明影响因素 X_i 对于人均生态承载力的影响越显著。

同时, 交互作用探测可用于准确评估影响因素 X_1 和 X_2 共同起作用时如何影响人均生态承载力 Y , 即探究影响因素 X_1 和 X_2 对人均生态承载力的影响 Y 是协同、拮抗还是独立, 具体可以分为单因子非线性减弱、非线性减弱、非线性增强、双因子增强和独立 5 种^[26]。

2 安徽省生态承载力的参数调整与分析

2.1 安徽省生态承载力的均衡因子

2.1.1 均衡因子

安徽省各类土地均衡因子差异明显。根据参数调整方法得出 1998~2018 年安徽省各类土地的均衡因子 (表 1)。均衡因子最大的是耕地和建设用地, 最小是林地和化石能源用地, 草地和水域较为接近。以 2018 年为例, 安徽每 $1hm^2$ 耕地相当于 1.582 单位省公顷土地的生产力, 分别为林地、草地和水域的 118.473、19.920 和 6.140 倍。林地面积占全省总面积的 26.59%, 但其使用较耕地严格, 全省积极推进封山育林, 限制林业产品的过度开发, 因此林地生产力较低。各类土地的均衡因子不稳定, 其中草地和水域变化不显著, 耕地和林地存在着小幅波动, 主要表现在 2002 年前农业减产致使的耕地均衡因子小幅下降和封山育林生物储量增多导致的林地均衡因子上升, 2002 年后二者朝着反向趋势变化并长时间保持稳定状态, 2016 年后再次出现反向波动, 耕地均衡因子表现为上升趋势, 林地则下降。

表 1 1998~2018 年安徽省各类生态生产性土地均衡因子

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地
----	----	----	----	----	------	--------

1998	1.504	0.114	0.233	0.188	1.504	0.114
1999	1.508	0.109	0.220	0.185	1.508	0.109
2000	1.514	0.078	0.224	0.252	1.514	0.078
2001	1.355	0.493	0.207	0.220	1.355	0.493
2002	1.505	0.108	0.231	0.236	1.505	0.108
2003	1.497	0.108	0.278	0.272	1.497	0.108
2004	1.529	0.056	0.242	0.191	1.529	0.056
2005	1.513	0.078	0.259	0.252	1.513	0.078
2006	1.525	0.065	0.243	0.241	1.525	0.065
2007	1.528	0.081	0.178	0.211	1.528	0.081
2008	1.524	0.090	0.177	0.217	1.524	0.090
2009	1.517	0.101	0.189	0.228	1.517	0.101
2010	1.513	0.111	0.190	0.233	1.513	0.111
2011	1.519	0.108	0.189	0.232	1.519	0.108
2012	1.515	0.119	0.188	0.231	1.515	0.119
2013	1.510	0.129	0.191	0.240	1.510	0.129
2014	1.508	0.139	0.180	0.235	1.508	0.139
2015	1.506	0.143	0.184	0.235	1.506	0.143
2016	1.516	0.148	0.191	0.237	1.516	0.148
2017	1.585	0.015	0.083	0.210	1.585	0.015
2018	1.582	0.014	0.079	0.258	1.582	0.014

2.1.2 不同尺度均衡因子比较

“省域”尺度与“全球”“国家”等尺度的均衡因子存在显著差异。从全球尺度看，1996年 Rees 团队提出的全球均衡因子目前运用较广^[27]，安徽省各类均衡因子较之大都偏小，林地、草地尤为显著，仅有水域偏高；与 WWF 发布的世界均衡因子相比^[5,28]，各类土地均衡因子全部偏小(表 2)；全国尺度上均衡因子较刘某承^[29]的计算结果较接近，与张可云的结果相差甚远^[30]。结果存在出入原因主要为研究尺度的差异：“省公顷”模型以安徽省省域内各类土地的平均生产力为基准，计算结果必然与其他模型存在偏差；“省公顷”模型计算方法更加科学，基于省域生物生产力和土地利用现状的精确数据，可以避免由于空间尺度过大所导致的数据获取受限和数据量大难以计算。生态承载力模型的自身属性使其与空间尺度密切相关，测算全球或全国尺度承载力值时更适合采用全球或全球统一的均衡因子和产量因子，但在进行省市级中小尺度生态承载力结果分析对比时，运用基于“省公

顷”的测算模型能真实刻画实际生产力状况和区域可持续发展特征。因此均衡因子修正后的模型更能反映出中小尺度的生态承载力现状，保证生态承载力模型的科学有效性。

表 2 各尺度均衡因子对比

尺度	耕地	林地	草地	水域	建设用地	化石能源用地	参考文献
ghm ²	2.80	1.10	0.50	0.20	2.80	1.10	[27]
ghm ²	2.19	1.38	0.48	0.36	2.19	1.38	[5]
ghm ²	2.39	1.25	0.51	0.41	2.39	1.25	[5]
ghm ²	2.51	1.26	0.46	0.37	2.51	1.26	[28]
nhm ²	1.74	1.41	0.44	0.35	1.74	1.41	[29]
nhm ²	4.69	0.19	0.06	0.40	4.69	0.19	[30]
s-nhm ²	1.58	0.01	0.08	0.26	1.58	0.01	本文结果

2.2 产量因子

安徽省 16 个城市各类土地产量因子显著不同。与基于不同的面积标准而导致的均衡因子差异相异的是，产量因子的不同主要源于安徽省内不同行政单元的资源禀赋差异而导致的土地生产力差异。因此，产量因子的对比主要为省内不同区域的各种类型土地之间的横向对比。由于文章篇幅有限，仅呈现 2018 年各市的各类土地产量因子(表 3)。2018 年，安徽省各市耕地产量因子相差较小，大都在全省平均水平左右波动，极值分别为蚌埠市和池州市；各市林地、草地产量因子差异明显，但其最大值均出现在亳州市和阜阳市，林草地生产力水平优势明显。蚌埠市林草地也与耕地相似，生产力优势较为明显；各地市水域产量因子存在两极分化现象，最大值与最小值为分别亳州市与黄山市，最值差距为 2.658。其中黄山市由于流域生态补偿政策的冲击，内河禁止网箱养鱼致使水生生物量大幅缩减，产量因子由补偿前最大值 1.104 锐减至补偿后 0.336, 为全省水域产量因子最低的区域。

表 3 2018 年安徽省各类生态生产性土地产量因子

地级市	耕地	林地	草地	水域	建设用地
合肥市	0.814	0.443	1.228	0.707	0.814
淮北市	1.245	13.143	3.018	1.308	1.245
亳州市	1.256	224.663	859.655	2.994	1.256
宿州市	1.133	7.378	5.806	2.284	1.133
蚌埠市	1.308	23.122	88.951	0.908	1.308
阜阳市	1.221	140.415	534.472	1.784	1.221
淮南市	1.281	3.319	13.735	1.278	1.281

滁州市	0.898	2.039	0.291	1.379	0.898
六安市	0.993	0.592	0.137	1.126	0.993
马鞍山市	0.763	0.306	1.302	0.763	0.763
芜湖市	0.753	1.558	0.166	1.257	0.753
宣城市	0.678	1.037	0.117	1.138	0.678
铜陵市	0.766	0.636	0.047	0.742	0.766
池州市	0.656	1.264	0.014	1.124	0.656
安庆市	0.821	0.585	0.206	0.681	0.821
黄山市	0.753	0.245	0.122	0.336	0.753

3 安徽省生态承载力演化特征分析

3.1 安徽省生态承载力的时序演化特征

3.1.1 安徽省整体时序演化特征分析

总体上全省生态承载力为上升趋势,全省人均生态承载力则呈现下降趋势。全省生态承载力由1998年的 $1.460 \times 10^7 \text{ s-nhm}^2$ 上升至2018年的 $1.496 \times 10^7 \text{ s-nhm}^2$,上升趋势显著(图1),但由于均衡因子和产量因子下降导致2000~2005年间存在波动较小的下降转折点;2006~2015年十年间较为稳定,波动平缓;2016~2018年呈显著上升趋势。全省人均生态承载力由1998年的 0.250 s-nhm^2 下降至2018年的 0.237 s-nhm^2 ,2001、2009和2011三个年份存在下降拐点,原因主要为人口增长过快,其常住人口从1998年的5844.4万人攀升至2018年的6323.6万人,增幅8.2%,人口增长冲淡了总体生态承载力逐渐增加的优势。

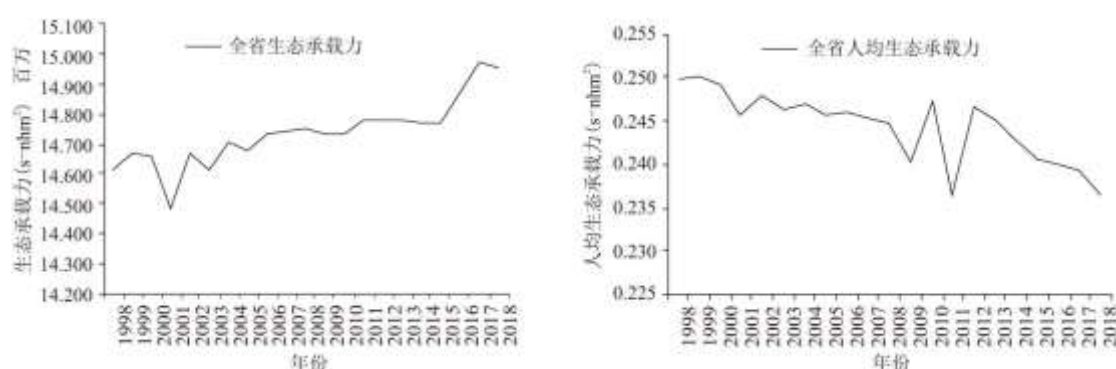


图1 1998~2018年安徽省生态承载力及人均生态承载力

3.1.2 安徽省各地市时序演化特征分析

各市生态承载力差距较大,上升或下降趋势交替出现。宿州市、亳州市、六安市、合肥市和滁州市等七市生态承载力普遍高于其他九市(图2)。总体上阜阳市生态承载力最高且呈上升趋势,黄山市最低但呈下降趋势。2002年前各城市生态承载力波动较

大，上升下降交替出现，其后波动较小保持稳定。池州市、宣城市演化特征较为接近，均呈“上升-稳定-下降”的发展趋势；与亳州、六安“先降后升”相反，宿州市为“先升后降”；淮南市、滁州市和蚌埠市均经历了“整体上升”的演化阶段；马鞍山市、芜湖市、合肥市和安庆市演化趋势大体上为“整体下降”；铜陵市、淮北市较稳定。

各市人均生态承载力存在两极分化现象，与整体层面差距较大。宿州市、宣城市、亳州市、六安市、池州市等九市人均生态承载力普遍高于其他七市。总体上滁州市最高并伴随下降趋势，铜陵市最低并呈整体上升趋势。2004 年前各城市人均生态承载力波动较大，演化特征较为复杂，其后较稳定。黄山市、芜湖市、宣城市和马鞍山市演化特征较为接近，均呈“先升后降”的发展态势；淮南市、亳州市则表现为“先降后升”的趋势；六安市和安庆市出现“整体下降”趋势，阜阳市、淮北市与之相反呈“整体上升”。



图2 1998~2018 年安徽省各地市生态承载力及人均生态承载力

3.2 生态承载力空间分异特征

安徽省整体上呈现出“南低北高”的生态承载力格局。基于 1998、2002、2006、2010、2014 和 2018 年的截面数据,运用 ArcGIS 自然断裂点分类法将安徽省 16 个城市的人均生态承载力依次根据 0.10~0.16、0.16~0.22、0.22~0.28、0.28~0.34 及 0.34 以上的间隔,划分由低到高 5 个等级生态承载力区类型^[31, 32, 33]。城市人均生态承载力演化存在明显空间分异,皖北地区大多为中等以上生态承载力区,状态较稳定;中部地区整体情况稍逊于北方;皖南地区生态承载力整体处于较低状态(图 3)。

图 3 1998~2018 年安徽省各地市生态承载力类型演化

4 安徽省生态承载力影响因素

借鉴已有生态承载力影响因素的研究成果,根据典型性、层次性、可统计量化等原则,分别从环境治理能力、经济发展方式、人口压力状况、社会发展水平、资源供给能力、生态环保观念 6 方面选取自变量,探讨影响因素对安徽省人均生态承载力的影响力变化^[32]。考虑到自变量均为连续型,因此采用非监督分类^[33]的方法进行离散化处理以克服任意性和主观性太强的弊端。采用相等间隔(EI)、自然断裂点分级法(NB)、分位数(QV)、几何间隔法(GI)四种方法对因子进行分层,按照取大原则选择解释力最大的分类方法和组数(表 4)。

自变量选取主要出于以下考虑:(1)环境治理能力是各地尊重环境自净能力的重要体现,各地产业发展不可避免地向环境中投放“三废”,环境治理水平的高低影响区域生态环境的质量和容纳能力^[32],决定承载主体的承载能力。(2)经济发展需要消耗大量能源,资源消耗与经济发展的耦合协调水平越高,资源依赖与经济发展脱钩越早实现,生态环境对社会经济的承载能力就越强,影响越显著^[34]。(3)人口压力提升会挤占各类资源,使生态承载力难以维系现有人口规模的生存需要继而引发生态安全问题^[35],也会削减由于技术、生物生产力提高带来的生态承载力增量,从而对其产生负面作用。(4)社会发展水平是生产、生活方式合理性的体现,是经济发展方式、制度和技术的总先驱,经济发展与资源利用的供给端与需求端关系是否适配直接与社会发展水平相关^[36],从根本上对生态承载力产生影响。(5)资源供给能力充裕、供需关系平稳是城市正常运作的基础物质保障,资源供不应求则会因需求过旺胁迫生境致使生态承载力不断降低^[32]。(6)生态环保等可持续发展理念越强,弱生态承载力导致的生态赤字意识越强烈,尤其在经济快速发展的关键时期,环境意识越强越能对其产生积极作用^[37]。

表 4 生态承载力影响因子选取及最佳分层方式

方面	影响因子	单位	分层(1998)	分层(2002)	分层(2006)	分层(2010)	分层(2014)	分层(2018)
环境治理能力	X ₁ 废水 处置率	(%)	(QV, 8)	(EI, 7)	(GI, 8)	(NB, 8)	(NB, 8)	(NB, 8)
经济发展方式	X ₂ 单位 GDP 能耗	(吨标准煤 /万元)	(GI, 8)	(EI, 8)	(GI, 8)	(EI, 7)	(NB, 8)	(NB, 8)
人口压力状况	X ₃ 人口 密度	(人/km ²)	(QV, 8)	(GI, 8)	(GI, 8)	(GI, 8)	(GI, 8)	(NB, 7)
社会发展水平	X ₄ 人均 GDP	(元/人)	(NB, 8)	(QV, 5)	(QV, 8)	(NB, 8)	(NB, 8)	(QV, 8)
资源供给能力	X ₅ 人均耕 地面积	(hm ² /人)	(GI, 7)	(GI, 8)	(EI, 7)	(NB, 8)	(NB, 8)	(NB, 8)
生态环保观念	X ₆ 万人高等学 校在校生数	(人/万人)	(NB, 8)	(QV, 8)	(QV, 5)	(EI, 8)	(QV, 8)	(NB, 8)

注:表内字母及数字为非监督分类法所选取的最优分层方式及最优分层数。字母(EI)、(NB)、(QV)和(GI)分别为相等间隔法、自然断裂点分级法、分位数法和几何间隔法。数字 5、6、7、8 为所选取的最优分层数。例如(QV, 8)为探究 1998 年废水处置率时影响力大小时,选取分位数法将其分为 8 个等级。

4.2 影响因子分析

人均耕地面积对生态承载力的重要影响力在不断增加。其决定力在各影响因子中最突出且整体呈上升趋势,至 2018 年达到

最大影响力 0.920(表 5),说明资源供给能力能直接影响生态承载力且影响不断递增。人均耕地面积越大,均衡因子和产量因子越高,生态承载力越高。研究期内耕地面积由 81557km² 降至 77241km²,人口却呈大规模上升趋势,由此人均耕地面积显著减少,资源本底供给相对不足。虽然技术进步导致均衡因子由 1.504 上升至 1.582,生物产量有所提高,但由于耕地面积减少且与之参数相同的建筑用地面积升幅难抵耕地面积降幅,无法弥补耕地面积下降对生态承载力带来的负面影响。因此较高的人均耕地面积、充足的资源本底是生态承载力提高的关键,其下降越明显则会产生越显著的制约作用。

社会发展水平对生态承载力的影响显著增加,最大值为 0.820。社会发展水平决定其经济发展方式,是其合理生产生活方式的体现。安徽省人均 GDP 由 1998 年的 4576 元/人上升至 2018 年的 47712/人,年增幅 52.133%,经历了脱贫致富的关键历史时期,从传统农业大省转入新兴工业大省。2018 年,工业对全省经济增长贡献率高达 48.9%,近 20 年来从传统农业向现代工业的发展模式转变决定其走资源依赖性的经济发展方式,势必会挤占部分耕地、掠夺占用资源,“掠夺式”的社会发展模式越明显对生态承载力提高的制约效果越明显。虽然在一定时期上有利于社会发展水平提高,但长此以往会造成生态承载力下降,供给侧与需求侧博弈未达到双赢的透支状态越明显,越不利于可持续发展。

表 5 基于地理探测器的安徽省各城市人均生态承载力影响因素结果

年份	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
1998	0.390	0.673	0.649	0.541	0.772	0.572
2002	0.500	0.525	0.461	0.720	0.635	0.663
2006	0.727	0.692	0.516	0.662	0.379	0.535
2010	0.400	0.450	0.675	0.603	0.601	0.616
2014	0.707	0.881	0.762	0.820	0.718	0.920
2018	0.572	0.688	0.566	0.616	0.920	0.604

经济发展方式对生态承载力的作用有所增强,影响力由 0.673 上升至 0.688。单位 GDP 能耗越小,资源消耗与经济产出脱钩越明显,生态环境对社会经济的承载能力就越强,越容易由“高消耗-低福利”过渡到“低消耗-高福利”的经济发展方式^[28]。2010 年皖江城市带因承接东部地区产业转移而普遍能耗偏大,能耗系数最大值为宣城市 2.599 吨标准煤/万元,过度的资源消耗、追求微观主体的眼前经济利益会突破地区生态承载力的阈值。在习近平生态文明思想基本理念指导下,安徽省将生态保护作为推动发展的前提,引导区域产业调整以形成绿色环保的经济发展方式。2018 年,宣城市能耗仅为 0.516 吨标准煤/万元,逐渐优化的经济发展方式对区域生态承载力影响力增大。因此,经济增长质量而不是速度影响着生态承载力。

生态环保观念对生态承载力的影响力略微增加,由 0.572 升至 0.604。生态环保观念越强,保护环境就是保护生态生产力的观念越深入人心。安徽省各级各类高校的建设使师资力量和义务教育素质明显提升,2018 年万人高校人数逐年攀升至 169 人/万人,高素质教育者能更好的接纳并践行保护环境的科学理念。2002 年推行退耕还林以来,省内各城市在自然资源可持续发展理念驱动下,积极参与封山育林工程,林地资源得以恢复。2010 年颁布的《安徽省环境保护条例》确立坚持以生态理念建设生态强省的发展目标,居民积极响应并采取绿色低碳的生产生活方式以履行生态保护义务。2017 年,《安徽省“十三五”旅游业发展规划》提出坚持发挥旅游在生态文明建设中的积极作用,将生态文明建设融入旅游开发规划等各个方面。此外,较高的教育水平、良好的文化氛围可以为研发生态治理与环境保护措施提供技术支撑,促进环境政策贯彻落实,进一步影响生态承载力。

环境治理能力对区域生态承载力的影响力显著增强,由 0.390 增长至 0.572。环境治理能力最能代表当地承载主体承载能

力, 环境治理能力越强, 越有利于维持生境稳定。污水处理率是当地污染抑制力的体现, 决定环境自净力能否恢复至污染前。2018 年, 安徽省各城市污水处理率均大于 90%, 水资源合理排放, 避免对其他水土资源的污染, 保护合理容纳能力并提高水域承载力。此外, 2012 年新安江流域生态补偿政策三轮试点工作实施以来, 沿岸“生态美”垃圾超市、河道清理等环境治理工作有序推进, 水污染动态监测制度完善, 联防联控取得明显成效, 环境质量与容纳能力明显提升, 缓解了区域的环境负荷, 利于当地生态安全, 环境治理能力对生态承载力的影响逐渐加大。

人口压力状况的影响力在逐渐减小, 由 0.649 降至 0.566。高人口密度会造成对资源的过度占用, 低人口密度则会使资源不能物尽其用, 因此适中的人口压力才有利于生态承载力的稳定发展。淮北市人口密度高达 750 人/km², 近 20 年来其生态承载力处于高压状态, 资源本底与其经济社会发展需要极不匹配; 滁州市人口密度最低为 312 人/km², 研究期内始终为高生态承载力、低经济发展区, 资源未有效利用。此为为寻求更好的发展机会, 省内外人口流动现象, 以省会合肥为主的皖中城市人口密度普遍偏大, 常住人口较生态承载力的增加速度快, 抵消由于技术、生产力提高累积的生态承载力增加值, 因此人均水平上的生态承载力并没有随着整体层面的增加而增加。近年来, 《安徽省流动人口居住登记办法》的出台加强了流动人口管控, 人口流动增长速率有所减缓, 此外人口密度过高带来的相对劣势可以通过转变经济发展方式、提高环境治理能力等弥补, 因此其影响力在逐渐缩小。

4.3 交互作用分析

任一因子对的交互作用大于单因子作用。存在双因子增强和非线性增强两种交互作用类型, 双因子增强作用较为显著(表 6)。1998 年, 环境治理能力和社会发展水平交互作用与生态承载力时产生非线性增强作用, 其他因子交互作用均为双因子增强。2002、2006 和 2018 年因子对的交互作用类型均为双因子增强作用。2010 年, 环境治理能力和生态保护观念、人口压力状况和生态保护观念为非线性增强作用, 其余均为双因子增强作用。2014 年, 除人口压力状况和生态保护观念交互作用产生非线性增强作用, 其他因子交互作用均为双因子增强。因此, 安徽省各市人均生态承载力水平的差异不是因子孤立起作用, 而是多个因子相互作用形成复杂作用机制, 任何一个因子的变化都会导致整体发生变化。

表 6 生态承载力影响因子交互作用探测结果

影响因素	1998	2002	2006	2010	2014	2018
$X_1 \cap X_2$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_1 \cap X_3$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_1 \cap X_4$	NE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_1 \cap X_5$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_1 \cap X_6$	BE	BE	BE	NE	BE	BE
$X_2 \cap X_3$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_2 \cap X_4$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_2 \cap X_5$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_2 \cap X_6$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_3 \cap X_4$	BE	BE	BE	BE	BE	BE

$X_3 \cap X_5$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_3 \cap X_6$	BE	BE	BE	NE	NE	BE
$X_4 \cap X_5$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_4 \cap X_6$	BE	BE	BE	BE	BE	BE
$X_5 \cap X_6$	BE	BE	BE	BE	BE	BE

注：NE 表示非线性增强型，表示两个因子相互作用的结果大于各单因子作用时的相加值， $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ ；BE 表示双因子增强型，表示两个因子相互作用的结果大于各单因子作用时的最大值， $q(X_1 \cap X_2) > \max(q(X_1), q(X_2))$ 。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文以安徽省 16 个地级市为研究单元，基于参数修正后的模型分析 1998~2018 安徽省生态承载力的时空演化特征，最后运用地理探测器研究其空间分异的影响要素。结论如下：

(1) 基于“省公顷”进行修正的生态承载力模型参数与其他尺度存在显著差异。1998~2018 耕地和建设用地的均衡因子最大且均大于 1，草地和水域的均衡因子较接近，林地和化石能源用地最小。不同城市各类土地产量因子差异显著，存在明显的上升或下降趋势。

(2) 全省与各城市生态承载力时序演化特征各异。安徽省整体生态承载力总体呈上升趋势，但全省人均层面却表现为下降趋势。各市生态承载力差距较大，呈显著地上升或下降趋势，各市的人均生态承载力演化特征也与市整体层面不一致，整体生态承载力较高的城市人均意义上并不具有同等优势。

(3) 安徽省呈现出典型的“南低北高”格局，存在生态承载力衰退现象。皖北地区整体情况较好，大多为较高生态承载力区，生态承载力状况较为稳定。皖中四市整体情况稍逊于北方，生态承载力优越区仅有滁州市，其余均为衰退显著区。皖南地区情况不容乐观，整体生态承载力最弱，全境退化为较低水平区。

(4) 环境治理能力、经济发展方式、资源供给能力、人口压力状况、社会发展水平、生态环保观念对安徽省生态承载力空间分异影响显著。除了人口压力的影响力在削弱，其他因子的影响力均增强，双因子交互作用的影响力大于单因子作用，存在双因子增强为主，非线性增强为辅两种作用方式。

5.2 讨论

综上所述，虽然转变经济发展方式、增强环境保护观念和提高环境治理能力已为促进生态承载力提高做出了微薄努力，但由于人口压力提升、工业比重较大、资源供给能力较弱等仍不可避免的导致了整体生态承载能力下降，为促进安徽省可持续发展，提出以下建议：

(1) 新城镇、宜居城市建设背景下，需要控制人口规模，促进人口有序增长。贯彻落实省内外流动人口管理条例，规范流动人口居住登记管理服务，稳步推进健康型城镇化，使人口规模与资源本底相适配；依托省内各级各类高校的优质教育资源提升人

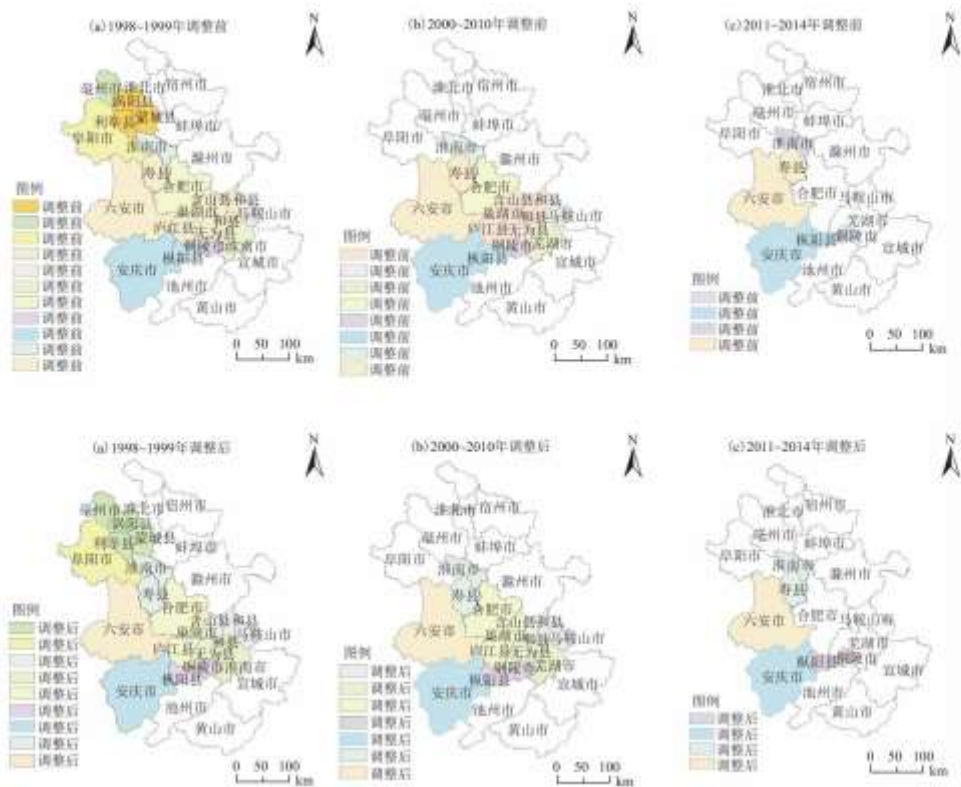
口素质，转变人口生产生活方式，将人口压力转化为人才红利，依靠科技创新提高生产效率。

(2)“一带一路”政策契机下，安徽省应凭借自身地缘优势深度融入建设，拓展对外贸易，促进以工业为主的产业结构绿色转型；利用承接东部地区产业转移的战略优势，通过技术创新建立低耗能产业体系以提高经济效率；依托以高质量生态环境为基础的旅游业打造高生态承载力区，提高第三产业旅游业对总产值的贡献比，保护环境的同时保护其经济效益。

(3)安徽省作为典型的生态脆弱区，合理运用生态补偿契机划定生态功能区提高其生态承载力更是未来发展的重要突破点，需要加大生态环境保护力度并对其低生态承载力区进行空间优化；贯彻执行耕地保护红线、控制城市扩张规模等措施，确保耕地资源可持续发展，通过技术创新提高生物产出量，提高资源本底对经济社会发展的支撑能力。

(4)科学把握生态承载力的时空属性，促进地域公平与代际公平。长三角一体化背景下，依托合作组织建立区域横向转移支持补偿制度，当年资本流量消耗殆尽的地区应向进口资本流量的地区给予补偿以促进区域公平；为实现世代永续发展，利用科技创新保育自然资本存量是解决人口扩张现实需求的必要手段，同时扩大资本流量，走可持续发展的生态之路。

党的十九大对生态文明建设作出新要求，关注生态问题就是关注民生福祉。诚然，本文也存在一定的研究空白：生态承载力作为一项系统工程，其开放性特质导致其不可避免地受周围区域影响，需要进一步探讨以增加模型的理论价值；安徽省各项环境保护、城市规划政策逐渐成为调控区域生态承载力的重要抓手，未来的研究可将其嬗变情况与政策紧密结合，为优化调控生态承载力、科学规划生态功能区提供重要科学依据。



附录 1 行政区划调整方法

参考文献:

-
- [1]封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3):379-395.
- [2]张学渊, 魏伟, 颀斌斌, 等. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11):2389-2402.
- [3]郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 等. 中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局[J]. 生态学报, 2019, 40(2):447-458.
- [4]岳东霞, 杨超, 江宝骅, 等. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. 生态学报, 2018, 39(6):120-130.
- [5]鲁凤, 陶菲, 钞振华, 等. 基于净初级生产力的省公顷生态足迹模型参数的计算——以江苏省为例[J]. 地理与地理信息科学, 2016, 32(2):83-88.
- [6]PENG B, LI Y, ELAHI E, et al. Dynamic evolution of ecological carrying capacity based on the ecological footprint theory: A case study of Jiangsu province[J]. Ecological Indicators, 2019, 19(9):19-26.
- [7]曹威威, 孙才志, 杨璇业, 等. 基于能值生态足迹的长山群岛人地关系分析[J]. 生态学报, 2020, 40(1):89-99.
- [8]ZHANG S, MUNOZ R, FRANCESC. Assessing and mapping ecosystem services to support urban green infrastructure: The case of Barcelona, Spain[J]. Cities, 2019, 92:59-70.
- [9]纪学朋, 白永平, 杜海波, 等. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性[J]. 生态学报, 2017, 37(17):5861-5870.
- [10]HOU J, MAO H, LI J, et al. Spatial simulation of the ecological processes of stormwater for sponge cities[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232:574-583.
- [11]YANG Q, LIU G, HAO Y, et al. Quantitative analysis of the dynamic changes of ecological security in the provinces of China through emergy-ecological footprint hybrid indicators[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184:678-695.
- [12]朱松丽, 刘嘉, 高翔, 等. 国土空间开发格局相适应的低碳发展区域分类初探[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(10):99-105.
- [13]MARTINS, ORNELAS N. Ecosystems, strong sustainability and the classical circular economy[J]. Ecological Economics, 2016, 129:32-39.
- [14]郭付友, 吕晓, 于伟, 等. 山东省绿色发展水平绩效评价与驱动机制——基于 17 地市面板数据[J]. 地理科学, 2020, 40(2):200-210.
- [15]周扬, 李寻欢. 平原农区贫困地理格局及其分异机制——以安徽省利辛县为例[J]. 地理科学, 2019, 39(10):1592-1601.
- [16]曹玉红, 陈晨, 张大鹏, 等. 皖江城市带土地利用变化的生态风险格局演化研究[J]. 生态学报, 2019, 39(13):4773-4781.
- [17]王芳, 张运, 黄静, 等. 基于 MODIS 数据的安徽省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境,

2019, 38(6):1314-1323.

[18]ZHANG L,DZAKPASU M,Chen R,et al.Validity and Utility of Ecological Footprint Accounting:A State-of-the-Art Review[J].Sustainable Cities and Society,2017,32:411-416.

[19]LIU L,LEI Y.An accurate ecological footprint analysis and prediction for Beijing based on SVM model[J].Ecological Informatics,2018,44:33-42.

[20]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,2017,27(9):212-224.

[21]ZHANG M,LIU Y,WU J,et al.Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization[J].Environmental Impact Assessment Review,2018,68(1):90-97.

[22]YI Y,SUN L,TING Z,et al.Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas:A case study of the Southern Qin Ling piedmont in Shaanxi,China[J].Journal of Cleaner Production,2018,194:540-553.

[23]向秀容,潘韬,吴绍洪,等.基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测[J].地理研究,2016,35(5):875-884.

[24]王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[25]文琦,施琳娜,马彩虹,等.黄土高原村域多维贫困空间异质性研究——以宁夏彭阳县为例[J].地理学报,2018,73(10):1850-1864.

[26]王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.

[27]WILLIAM E.REES.Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity:What Urban Economics Leaves Out[J].Focus,1992,4(2):121-130.

[28]龙亮军,王霞,郭兵.生态福利绩效视角下的上海市可持续发展评价研究[J].长江流域资源与环境,2016,35(1):9-15.

[29]刘某承,李文华.基于净初级生产力的中国生态足迹均衡因子测算[J].自然资源学报,2009,24(9):1550-1559.

[30]张可云,傅帅雄,张文彬.基于改进生态足迹模型的中国31个省级区域生态承载力实证研究[J].地理科学,2011,31(9):1084-1089.

[31]李岩,王珂,才琪,等.浙江省县域森林生态承载力评价及时空演变分析[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):64-74.

[32]沈威,鲁丰先,秦耀辰,等.长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素[J].生态学报,2019,39(11):3937-3951.

[33]王学义,熊升银.中国经济发展方式转变综合评价及时空演化特征研究[J].地理科学,2020,40(2):220-228.

-
- [34]王琦, 汤放华. 洞庭湖区生态—经济—社会系统耦合协调发展的时空分异[J]. 经济地理, 2015, 35(12):161-167+202.
- [35]周宏浩, 陈晓红. 东北地区可持续生计安全时空分异格局及障碍因子诊断[J]. 地理科学, 2018, 38(11):1864-1874.
- [36]熊建新, 陈端吕, 彭保发, 等. 洞庭湖区生态承载力时空动态模拟[J]. 经济地理, 2016, 36(4):164-172.
- [37]王维, 张涛, 王晓伟, 等. 长江经济带城市生态承载力时空格局研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12):1963-1971.