

DOI: 10.5846/stxb202101040030

徐智超, 刘华民, 韩鹏, 陆学岩, 王立新, 温璐. 内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力. 生态学报, 2021, 41(11): 4354-4366.

Xu Z C, Liu H M, Han P, Lu X Y, Wang L X, Wen L. Analysis of the characteristics and driving forces of the temporal and spatial evolution of ecological security in Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4354-4366.

内蒙古生态安全时空演变特征及驱动力

徐智超, 刘华民, 韩 鹏, 陆学岩, 王立新, 温 璐*

内蒙古大学生态与环境学院, 草原生态安全省部共建协同创新中心, 内蒙古自治区河流与湖泊重点实验室, 呼和浩特 010021

摘要:生态安全是平衡社会经济与自然环境协调发展的重要保障, 评价生态安全时空演变及驱动因素, 对区域生态安全格局构建及可持续发展意义重大。基于本土化参数的生态足迹模型对 1990—2018 年内蒙古地区各盟市生态足迹、生态盈亏及生态压力指数进行测算, 采用熵权法构建综合指标体系, 计算生态安全指数, 评价区域生态安全及可持续发展状况, 结合空间分析揭示其时空演化规律, 并解析驱动因素。结果表明: 1) 研究期间内蒙古总体上呈“供不应求”的生态赤字状态, 但生态承载增速大于生态足迹增速, 2018 年较 1990 年人均生态足迹和人均生态承载力分别提高了 0.9—5.8 倍和 1.5—10.8 倍, 生态安全指数由大于 5.0 的不安全状态转变为小于 4.0 的安全状态, 生态系统总体呈向好趋势发展。2) 研究期间内蒙古地区生态足迹呈“东高西低”分布, 生态承载力呈“中间高, 两翼低”分布, 生态安全重心向东北方向转移。3) 经济水平、消费支出、产业结构是内蒙古地区生态安全及可持续发展的驱动因素, 地理位置和气候因素是导致其空间差异的主导因子。

关键词:生态足迹; 生态承载力; 生态安全; 时空格局; 内蒙古

Analysis of the characteristics and driving forces of the temporal and spatial evolution of ecological security in Inner Mongolia

XU Zhichao, LIU Huamin, HAN Peng, LU Xueyan, WANG Lixin, WEN Lu*

School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Collaborative Innovation Center for Grassland Ecological Security, Hohhot 010021, China

Abstract: Ecological security is the basis and premise to ensure the sustainable development of human society and economy. Evaluating the temporal and spatial evolution and influencing factors of ecological security is of great significance to its ecological security pattern construction and regional sustainable development. Based on the localized ecological footprint model, we calculated the ecological footprint, ecological surplus and deficit and ecological stress index of twelve cities across the Inner Mongolia in China from 1990 to 2018. Entropy method was conducted to construct a comprehensive index system, calculating the ecological safety index, and evaluating the state of regional ecological safety and sustainable development. We also combined spatial analysis to reveal its temporal and spatial evolution and analyze the driving factors of temporal and spatial dynamic. The results showed that (1) during the study period, the Inner Mongolia was in a state of ecological deficit, but the growth rate of ecological carrying capacity was greater than that of ecological footprint. In 2018, the per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity increased by 0.9—5.8 times and 1.5—10.8 times respectively compared with 1990. The ecological safety index changed from an unsafe state to a safe state, and the value changed from over 5.0 to less than 4.0. The ecological station of whole study area improved. (2) The spatial distribution of ecological footprint indicated a “high in the east and low in the west” situation across the Inner Mongolia. However, the spatial variation of ecological carrying capacity indicated a “high in the middle and low in the two wings”

基金项目:国家自然科学基金项目(31960249, 31560146); 内蒙古科技重大专项项目(ZDZX2018054); 内蒙古科技计划项目(201802100); 国家重点研发计划项目(2017YFC0506701)

收稿日期: 2021-01-04; 修订日期: 2021-05-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wenlu5210@126.com

spatial distribution. During the study period, the ecological security center of the study area shifted to the northeast. (3) The economic level, consumption expenditure, and industrial structure are the driving factors for ecological security and sustainable development in the Inner Mongolia. Moreover, geographical location and climate factors are the leading factors for its spatial differences.

Key Words: ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological security; spatio-temporal pattern; the Inner Mongolia

生态安全是国家安全的重要基石^[1],在生态文明背景下,其已成为政府与学术界关注的焦点^[2-3]。生态安全是指人类生产、生活的基本保障以及适应环境变化的能力不受生态破坏与环境污染等威胁的状态^[4-5],它是维持区域可持续发展的基本前提^[6]。开展区域生态安全评价,可精确掌握区域生态环境状况与生态压力,揭示区域经济活动与生态环境间关系^[1, 7]。生态足迹作为一种非货币度量方法,通过衡量资源消费量与自然资源承载能力的平衡关系^[8],可表征区域生态安全状况^[3, 9-11]。生态足迹核算中,均衡因子和产量因子的标准化与本地化对生态安全评估至关重要^[12-14]。基于“国家公顷”生物生产性土地核算方法和基于植被净初级生产力计算均衡因子和产量因子,能够较好的反应不同生态系统的生产能力差异^[11, 15-16]。因此,本研究在准确核算研究区均衡因子和产量因子的基础上,运用生态足迹法量化区域生态安全与可持续发展水平,并分析其变化的驱动机理,拟为制定因地制宜的实施可持续发展战略提供理论依据。

目前研究生态安全的方法大多基于生态结构变化,通过建立景观生态模型或者数字地面模型评估生态环境的脆弱性^[17-19],或采用遥感手段监测地面生态系统的变化^[20-21],从而割裂了人与自然环境之间的关系,而生态足迹模型巧妙的将人类活动纳入生态安全的评价体系中^[22-23],并成为目前评价生态安全应用最广的方法^[11, 24]。但基于生态足迹评价生态安全的研究只局限于采用单一的生态压力指数评估生态安全^[3, 25],难以准确反应区域生态安全状况。本文基于生态足迹、生态盈亏及生态压力指数,采用熵权法构建综合指标体系对区域生态安全进行测算。内蒙古自治区是中国北方重要生态安全屏障,对华北地区乃至全国生态安全具有重要战略意义^[26],其地域辽阔,生态系统类型多样,是中国北方面积最大、种类最全的生态功能区^[27]。然而,该区域资源消耗日益增加,生态压力面临极大挑战,可持续发展面临威胁,准确评估该区域的生态安全时空动态,对于加快“生态优先,绿色发展”的区域特色高质量发展之路、构建中国北方重要生态安全屏障具有重要意义^[28]。鉴于此,本文以内蒙古为研究区,基于“国家公顷”的核算方法,立足于生态足迹的时空演变特征,采用熵权法核算 1990—2018 年内蒙古各盟市生态安全的时空演变特征,结合 GIS 空间分析将其生态安全的时空变化规律进行空间可视化分析,并探究其生态安全及可持续发展潜在的驱动因素,以期为优化区域生态空间格局提供科学参考,为筑牢我国北方生态安全屏障提供理论依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古(97°12'—126°04' E, 37°24'—53°23' N)地处内陆地区(图 1),东部区为温带季风气候,中西部地区以温带大陆性气候为主,全区降水量少而不均、寒暑变化剧烈,降水量自东向西由 500 mm 递减为 50 mm 左右,蒸发量自东向西由 1000 mm 增加到 3000 mm,由东向西主要分布有森林、草原和荒漠生态系统。境内有 12 个盟市,下设 101 个旗、县、市、区,总人口 2470.63 万人(2010 年人口统计数据)。

1.2 研究方法

为提高生态足迹核算的精确性,本研究中对研究区内各盟市计算其均衡因子和产量因子;根据本土化计算的均衡因子和产量因子核算 1990—2018 年各盟市人均生态足迹与生态承载力,通过计算生态赤字/盈余、生态压力指数、万元 GDP 生态足迹(表 1)评估区域生态安全,运用 ArcGIS 10.4 对其计算结果进行空间分析

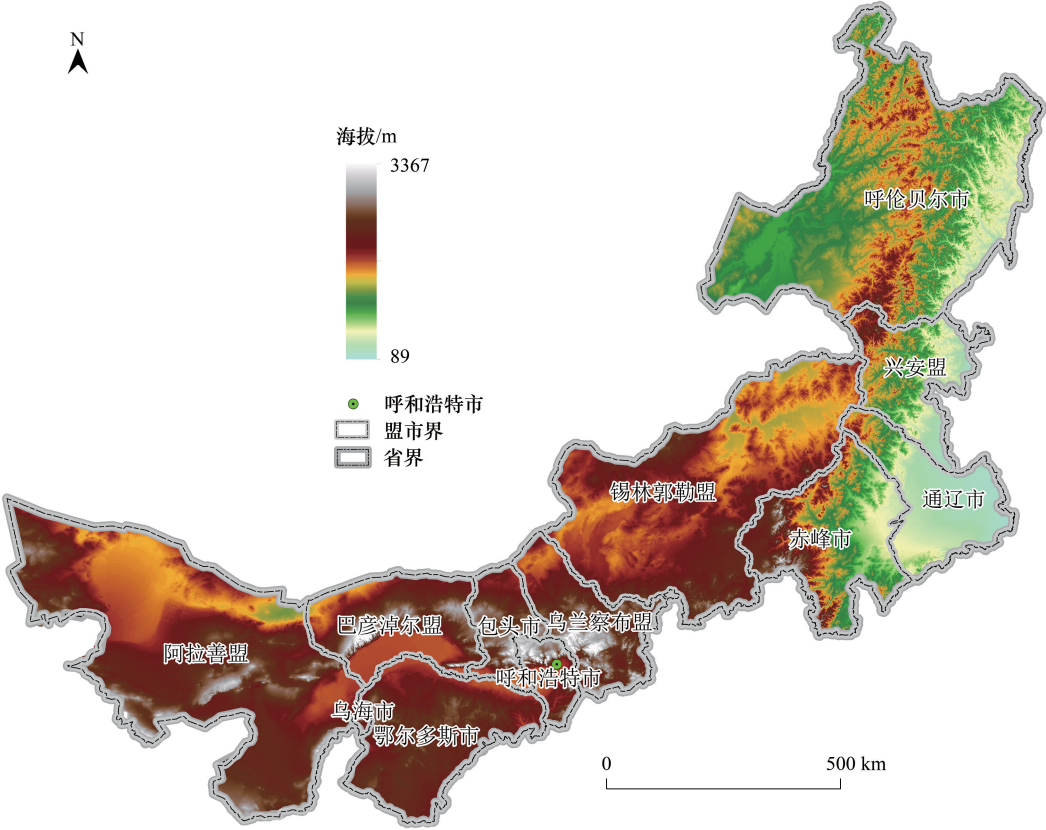


图 1 内蒙古自治区行政区划

Fig.1 Administrative divisions of Inner Mongolia Autonomous Region

表 1 生态安全计算方法

Table 1 The method of ecological security index

	计算公式 Calculation formula	意义 Implication
均衡因子 Equivalence factor	$r_i = \frac{P_i}{P}$	不同生物生产性土地生产力的转换系数 ^[29]
产量因子 Yield factor	$y_i = \frac{P_i}{P_i}$	地区和国家生物生产性土地生产力的转换系数 ^[30]
生态足迹 Ecological footprint	$EF = N \times ef = N \times r_i \times \sum aa_i = N \times r_i \times \sum \left(\frac{c_i}{p_i} \right)$ $EF = N \times ef = N \times r_i \times \sum aa_i = N \times r_i \times \frac{2}{3} \times \sum \left(\frac{c_i}{Y_i} \right)$	衡量生物资源下的人类消费水平和利用程度 衡量化石能源资源下的人类消费水平和利用程度 ^[31]
生态承载力 Ecological capacity	$EC = N \times ec = N \times \sum (a_i \times y_i \times r_i)$	衡量某一地区所能提供生物生产性土地面积的大小 ^[32]
生态赤字/盈余 Ecological deficit / profit	$ED = EC - EF$	反应某一区域可持续发展状态的指标
生态压力指数 Ecological tension index	$ETI = ef'/ec$	反应某一区域生态环境的承压能力 ^[33]
万元 GDP 生态足迹 Ecological footprint of per 10 000 yuan GDP	$WEF = EF/GDP$	反应某一区域社会经济发展与资源利用之间的关系 ^[34]

N :某地区的总人口; ef :人均生态足迹; ef' :可更新资源的人均生态足迹; ec :人均生态承载力; aa_i :第*i*种消费项目的人均生态足迹; c_i :第*i*种消费项目的年人均消费量; p_i :第*i*种消费项目的全国年平均产量; Y_i :第*i*种化石能源消费项目的能地比

和空间统计分析^[35],得到生态安全重心变化轨迹及生态压力标准差椭圆。参考已有研究^[36-38],结合研究区概况,分别选取常住人口数量用于反映人口增长,城镇化率、居民消费支出和恩格尔系数用于反映城市化进程及居民的消费水平和消费结构,人均 GDP、固定资产投资和第一、二、三产业产值占比用于反映经济水平和产业结构,万元 GDP 能耗用于反映能源的利用效率,采用 R 语言 vegan 包进行 CCA 分析,解析研究区生态安全变化的驱动因素。

在区域生态足迹、生态承载力等指标的测算基础上,可进行生态安全的度量和分析。单一指标不能准确反映区域生态安全状况,本研究基于生态足迹、生态盈亏及生态压力指数,结合各盟市实际情况及各指数数值大小将其进行分级,采用熵权法确定各分级指数权重^[39],通过指标权重确定每个指标对区域生态安全的贡献率,从而计算生态安全指数。熵权法计算权重方法参考张继权^[40]等的研究。根据本文的计算结果并参考已有的研究资料,将生态安全分为 7 个等级,分别为:很安全 (<3.0)、安全 (3.0—4.0)、较安全 (4.0—4.5)、稍不安全 (4.5—5.0)、不安全 (5.0—5.5)、很不安全 (5.5—6.0)、恶劣 (>6.00)。

1.3 数据来源

统计数据来源于《内蒙古统计年鉴 1991—2019》、《中国统计年鉴 1991—2019》和《内蒙古政府工作报告》,以及国土、农业及林草等部门提供的专项调查数据。土地利用数据来源于中国自然资源部土地调查成果共享应用服务平台 (<http://tddc.mlr.gov.cn>)。数字高程模型 (DEM) 数据来源于中国科学院地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

2 结果与分析

2.1 生态足迹与生态承载力

2.1.1 人均生态足迹时空动态分析

1990—2018 年内蒙古各盟市人均生态足迹范围在 0.056—2.090 hm²/人之间,在时间序列上呈上升趋势,且多数盟市人均生态足迹与耕地生态足迹变化一致 (表 2)。其中,呼和浩特、乌海、赤峰、呼伦贝尔、锡林郭勒、鄂尔多斯和巴彦淖尔 7 盟市人均生态足迹年际变化波动较大,呈波浪式上升,如锡林郭勒由 1990 年 0.283 hm²/人上升至 2018 年的 1.731 hm²/人,升高了 6.12 倍。内蒙古各盟市 (除锡林郭勒外) 人均生态足迹在 2000 年之前变化较为缓慢,且保持在 0.5 hm²/人以下,在 2000 年之后显著提高,包头、呼伦贝尔、兴安盟、通辽、乌兰察布等地分别提高 2.35—4.18 倍。这可能因为 90 年代经济发达水平有限,区域居民对生活资源的消费需求较低,生态足迹变化缓慢;在 2000 年之后,随着经济的快速发展,居民生活水平的提高,消费支出增加致使生态足迹发生变化。

表 2 1990—2018 内蒙古各盟市人均生态足迹动态变化/(hm²/人)

Table 2 Dynamic changes of per capita ecological footprint for the cities of Inner Mongolia from 1990 to 2018												
年份 Year	呼和浩特	包头	乌海	赤峰	呼伦贝尔	兴安盟	通辽	锡林郭勒	乌兰察布	鄂尔多斯	巴彦淖尔	阿拉善盟
1990	0.139	0.100	0.056	0.260	0.284	0.529	0.604	0.283	0.351	0.274	0.437	0.172
1991	0.122	0.093	0.052	0.238	0.190	0.446	0.569	0.274	0.307	0.242	0.396	0.173
1992	0.126	0.120	0.050	0.330	0.132	0.349	0.639	0.426	0.353	0.334	0.420	0.184
1993	0.101	0.107	0.046	0.355	0.153	0.456	0.597	0.312	0.328	0.261	0.488	0.177
1994	0.220	0.127	0.029	0.360	0.136	0.436	0.542	0.369	0.277	0.349	0.470	0.191
1995	0.198	0.115	0.054	0.134	0.085	0.207	0.375	0.423	0.245	0.399	0.386	0.204
1996	0.139	0.129	0.036	0.305	0.231	0.445	0.534	0.579	0.330	0.475	0.447	0.217
1997	0.252	0.137	0.048	0.454	0.233	0.551	0.646	0.783	0.309	0.502	0.393	0.224
1998	0.242	0.104	0.062	0.434	0.206	0.655	0.867	0.664	0.477	0.539	0.375	0.244
1999	0.150	0.137	0.067	0.337	0.195	0.576	0.772	1.379	0.422	0.310	0.450	0.268
2000	0.163	0.125	0.057	0.351	0.479	0.472	0.581	1.028	0.665	0.359	0.412	0.294
2001	0.140	0.126	0.041	0.301	0.339	0.304	0.734	0.874	0.335	0.377	0.558	0.336
2002	0.276	0.241	0.093	0.378	0.768	0.589	0.672	0.997	0.563	0.459	0.564	0.365
2003	0.193	0.313	0.121	0.384	0.438	0.610	0.860	1.018	0.606	0.472	0.576	0.321

续表

年份 Year	呼和浩特	包头	乌海	赤峰	呼伦贝尔	兴安盟	通辽	锡林郭勒	乌兰察布	鄂尔多斯	巴彦淖尔	阿拉善盟
2004	0.210	0.335	0.125	0.405	0.552	0.489	0.890	0.676	0.791	0.560	0.728	0.334
2005	0.225	0.338	0.122	0.459	0.687	0.474	0.844	0.873	0.760	0.657	0.577	0.377
2006	0.273	0.350	0.207	0.300	0.678	0.538	0.953	0.741	0.626	0.652	0.638	0.440
2007	0.238	0.415	0.198	0.371	0.580	0.508	0.941	1.708	1.158	0.685	0.676	0.439
2008	0.287	0.418	0.189	0.491	0.575	0.761	1.045	1.159	1.118	0.705	0.577	0.489
2009	0.290	0.435	0.183	0.420	1.054	0.795	1.065	1.377	1.108	0.752	0.795	0.502
2010	0.215	0.396	0.167	0.480	1.067	0.750	0.952	1.609	1.101	0.652	0.631	0.518
2011	0.186	0.456	0.175	0.685	1.190	0.937	0.929	1.707	1.257	0.694	0.597	0.489
2012	0.203	0.462	0.191	0.741	1.261	0.996	0.937	1.569	1.246	0.708	0.633	0.484
2013	0.241	0.382	0.191	0.780	1.009	1.197	1.259	1.682	1.399	0.740	0.677	0.517
2014	0.240	0.667	0.211	0.482	1.204	1.461	1.371	1.164	1.291	0.743	0.818	0.491
2015	0.262	0.674	0.181	0.590	1.355	1.707	1.386	1.455	1.287	0.708	0.872	0.484
2016	0.242	0.627	0.178	0.550	1.042	1.634	1.324	1.800	1.441	0.685	1.052	0.443
2017	0.281	0.286	0.160	0.380	1.402	1.984	1.336	1.789	1.488	0.612	1.102	0.451
2018	0.311	0.477	0.176	0.490	1.185	2.090	1.425	1.731	1.447	0.792	1.089	0.432

内蒙古各盟市人均生态足迹呈现中东部高西部低的空间格局(图2),且在1990—2018年间中东部地区生态足迹变化趋势明显(图3)。其中,在1990—2018年间乌海、包头、呼和浩特、赤峰和阿拉善盟人均生态足迹变化较小,均保持在 $0.60 \text{ hm}^2/\text{人}$ 以下,其余各盟市均有大幅上升。且中东部地区人均生态足迹上升较西部地区更为明显,如乌兰察布、锡林郭勒、通辽和兴安盟人均生态足迹在2018年上升到 $1.41\text{—}2.10 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。

2.1.2 人均生态承载力时空动态分析

1990—2018年内蒙古各盟市人均生态承载力范围在 $0.007\text{—}4.197 \text{ hm}^2/\text{人}$ 之间,且呈波浪式上升(表3)。其中,除锡林郭勒和鄂尔多斯外,其余各盟市在1990—2000年间变化较小,如呼和浩特、包头、乌海人均生态承载力均保持在 $0.1 \text{ hm}^2/\text{人}$ 以下。在2000年之后,各盟市生态承载力显著提高,呼伦贝尔、兴安盟、锡林郭勒和乌兰察布分别提高 $4.86\text{—}11.82$ 倍,且呼伦贝尔和锡林郭勒生态承载力约有80%由草地承担,乌兰察布和兴安盟约有64%由耕地承担,可见内蒙古各盟市产业结构存在较大差异。赤峰、锡林郭勒、乌兰察布、鄂尔多斯和阿拉善盟人均生态承载力在2013年之后出现小幅下降,但总体高于90年代。

内蒙古各盟市人均生态承载在空间上呈现“中间高,两翼低”的分布格局(图2),且生态承载力乌兰察布、锡林郭勒和呼伦贝尔变化较大(图3)。在1990—2000年,中部地区乌兰察布和锡林郭勒人均生态承载力升高到 $2.01\text{—}3.00 \text{ hm}^2/\text{人}$,其他各盟市均保持在 $0.50 \text{ hm}^2/\text{人}$ 以下。在2010年,锡林郭勒人均生态承载力上升到 $3.10 \text{ hm}^2/\text{人}$,其次是乌兰察布上升到 $1.93 \text{ hm}^2/\text{人}$,到2010年,全区多数盟市人均生态承载力小于 $1.00 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。在2018年,位于中部区的乌兰察布和锡林郭勒人均生态承载力上升到 $3.01\text{—}4.20 \text{ hm}^2/\text{人}$,东部区通辽、兴安盟和呼伦贝尔在 $1.01\text{—}2.00 \text{ hm}^2/\text{人}$,西部各盟市和赤峰均小于 $1.00 \text{ hm}^2/\text{人}$,呈现“中间高,两翼低”的分布格局。

2.2 生态安全评价

在1990—2018年期间内蒙古各盟市生态赤字/盈余在空间上有很大差异,生态盈亏总体呈向好趋势发展(图2)。研究期间,乌兰察布和锡林郭勒生态承载力大于生态足迹,近30年间一直表现为生态盈余,且到2018年人均生态盈余达到 $1.51 \text{ hm}^2/\text{人}$ 以上。呼伦贝尔在1990—2000年人均生态赤字提高35.4%,而到2010年转为生态盈余($0.203 \text{ hm}^2/\text{人}$),并到2018年一直保持生态盈余。阿拉善在2010年左右处于生态盈余,其余年份均处于生态赤字并保持在 $-0.15 \text{ hm}^2/\text{人}$ 以内。呼和浩特、包头近30年生态足迹与生态承载力较为稳定,且人均生态赤字小于 $-0.15 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。赤峰、通辽、兴安盟在2000年左右生态赤字最大,达 $-0.30\text{—}-0.16 \text{ hm}^2/\text{人}$ 之间,且在2010年之后逐渐下降,并保持在 $-0.15 \text{ hm}^2/\text{人}$ 以下。但鄂尔多斯近30年一直处于生态赤字,并逐渐增大。可见,化石能源的大量施用是导致鄂尔多斯生态赤字的主要原因。

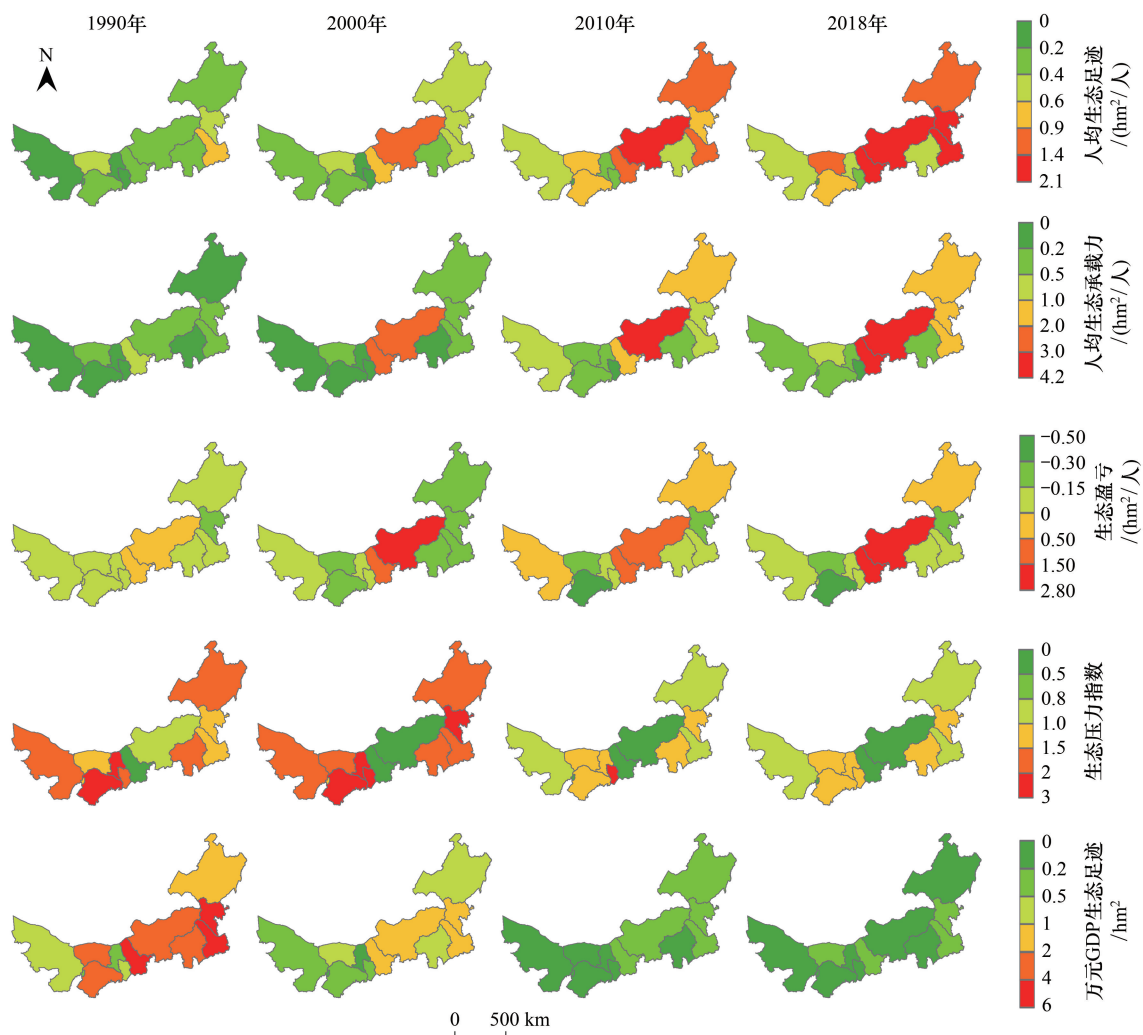


图2 1990、2000、2010、2018 年内蒙古各盟市人均生态足迹, 人均生态承载力, 生态盈亏, 生态压力指数和万元 GDP 生态足迹空间分布图
 Fig.2 Spatial distribution of the per capita ecological footprint, per capita ecological carrying capacity, the ecological surplus and deficit, the ecological stress index and per ten thousand (yuan) ecological footprint of the cities of Inner Mongolia in 1990, 2000, 2010, 2018

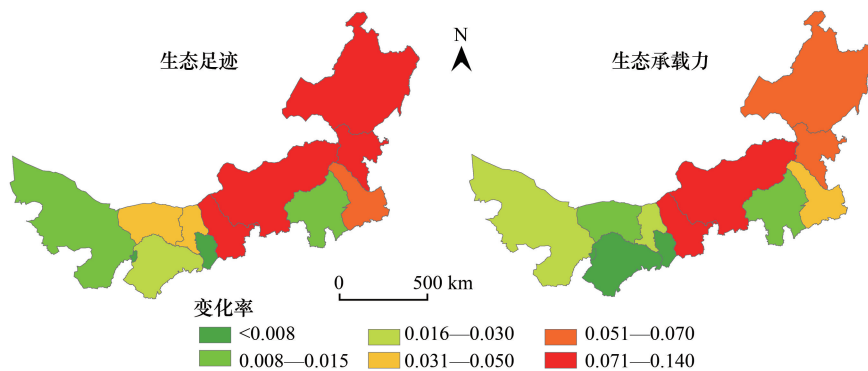


图3 1990—2018 年内蒙古各盟市生态足迹和生态承载力变化率

Fig.3 Rate of change of the ecological footprint and ecological carrying capacity of the cities of Inner Mongolia in 1990 to 2018

表 3 1990—2018 年内蒙古各盟市人均生态承载力动态变化/(hm²/人)

Table 3 Dynamic changes of per capita ecological carrying capacity for the cities of Inner Mongolia from 1990 to 2018

年份 Year	呼和浩特	包头	乌海	赤峰	呼伦贝尔	兴安盟	通辽	锡林郭勒	乌兰察布	鄂尔多斯	巴彦淖尔	阿拉善盟
1990	0.074	0.034	0.007	0.129	0.154	0.356	0.488	0.347	0.849	0.134	0.336	0.106
1991	0.072	0.026	0.009	0.123	0.123	0.313	0.484	0.363	0.645	0.106	0.335	0.109
1992	0.076	0.045	0.011	0.198	0.102	0.183	0.583	0.702	0.841	0.191	0.355	0.128
1993	0.067	0.042	0.009	0.228	0.120	0.296	0.498	0.567	0.760	0.114	0.421	0.114
1994	0.065	0.052	0.013	0.235	0.112	0.276	0.404	0.707	0.501	0.195	0.405	0.119
1995	0.068	0.051	0.015	0.059	0.118	0.091	0.302	0.872	0.449	0.237	0.337	0.137
1996	0.061	0.045	0.025	0.156	0.145	0.259	0.367	1.034	0.923	0.321	0.388	0.165
1997	0.069	0.038	0.028	0.233	0.164	0.263	0.444	1.789	0.622	0.266	0.239	0.142
1998	0.064	0.025	0.016	0.283	0.144	0.378	0.740	1.043	1.202	0.301	0.227	0.155
1999	0.064	0.038	0.033	0.179	0.161	0.295	0.598	3.102	0.914	0.089	0.259	0.166
2000	0.071	0.036	0.025	0.180	0.303	0.226	0.358	2.607	2.087	0.111	0.210	0.182
2001	0.059	0.034	0.022	0.150	0.274	0.094	0.573	1.810	0.509	0.109	0.312	0.231
2002	0.120	0.130	0.068	0.230	0.582	0.265	0.504	1.676	1.835	0.173	0.305	0.261
2003	0.086	0.189	0.091	0.224	0.461	0.350	0.767	1.845	2.055	0.182	0.331	0.180
2004	0.106	0.214	0.117	0.249	0.593	0.273	0.766	1.091	2.692	0.252	0.487	0.201
2005	0.114	0.262	0.090	0.326	0.782	0.351	0.759	1.544	1.626	0.356	0.415	0.266
2006	0.142	0.257	0.217	0.205	0.852	0.429	0.867	1.222	1.533	0.335	0.484	0.334
2007	0.094	0.352	0.172	0.244	0.700	0.420	0.856	3.615	1.744	0.377	0.477	0.361
2008	0.122	0.337	0.168	0.351	0.711	0.607	0.997	1.930	2.924	0.381	0.396	0.482
2009	0.127	0.358	0.168	0.263	1.264	0.593	0.986	2.450	1.551	0.420	0.550	0.533
2010	0.091	0.309	0.138	0.338	1.270	0.587	0.924	3.104	1.926	0.320	0.428	0.598
2011	0.073	0.358	0.116	0.568	1.388	0.765	0.933	3.325	2.282	0.268	0.400	0.564
2012	0.104	0.378	0.162	0.627	1.369	0.880	0.948	2.844	3.219	0.373	0.440	0.488
2013	0.137	0.274	0.171	0.682	1.062	1.174	1.382	3.252	4.833	0.400	0.494	0.522
2014	0.132	0.724	0.207	0.396	1.278	1.456	1.501	3.959	3.751	0.394	0.589	0.473
2015	0.130	0.718	0.171	0.454	1.544	1.640	1.435	3.799	3.302	0.339	0.594	0.459
2016	0.122	0.637	0.173	0.394	1.258	1.504	1.353	4.197	3.965	0.308	0.852	0.399
2017	0.148	0.677	0.136	0.270	1.644	1.726	1.180	4.162	3.667	0.242	0.871	0.416
2018	0.184	0.686	0.142	0.372	1.249	1.939	1.381	4.101	4.126	0.348	0.851	0.402

在 1990—2018 年间,内蒙古各盟市生态压力指数总体呈下降趋势(图 2)。其中,乌兰察布和锡林郭勒在近 30 年间生态压力指数一直保持较低状态,其余各盟市生态压力指数均有下降趋势。在 1990 年,巴彦淖尔、通辽和兴安盟生态压力指数在 1.01—1.50 之间,呼伦贝尔、赤峰、呼和浩特和阿拉善盟生态压力指数在 1.51—2.00 之间,只有鄂尔多斯和包头生态压力指数大于 2.00。在 2000 年,除乌海、乌兰察布和锡林郭勒外,其余各盟市生态压力指数均大于 1.50。在 2010 年,除呼和浩特生态压力较大外,其余各盟市生态压力指数均下降到 1.50 以下。到 2018 年,乌海、乌兰察布和锡林郭勒生态压力指数小于 0.50,其余各盟市生态压力指数在 0.81—1.50 之间,生态压力减小。这表明耕地和草地生态系统在维持区域社会经济可持续发展和资源高效利用中起到关键作用。

近 30 年间,内蒙古各盟市万元 GDP 生态足迹显著下降(图 2),表明随着高新技术的投入使用,以及生产方式的集约化使资源利用效率显著提升。在 1990 年,乌兰察布、通辽、兴安盟万元 GDP 生态足迹最大,达 4.00 hm²以上;其次是赤峰和巴彦淖尔,万元 GDP 生态足迹介于 2.01—4.00 hm²之间;呼伦贝尔、锡林郭勒和鄂尔多斯介于 1.01—2.00 hm²之间;其余各盟市均小于 1.00 hm²。到 2000 年,除锡林郭勒保持不变外,其余各盟市万元 GDP 生态足迹下降到 2.00 hm²以下,其中包头和乌海下降到 0.20 hm²以下,表明重工业区更加关注资源利用效率。到 2010 年,全区各盟市万元 GDP 生态足迹有显著下降,均下降到 0.50 hm²以下,呈现“东部

高,西部低”的分布格局,到 2018 年,仅有巴彦淖尔、乌兰察布、通辽、兴安盟 4 个盟市万元 GDP 生态足迹在 0.21—0.50 hm^2 之间,其余各盟市均在 0.20 hm^2 以下。

近 30 年间,内蒙古各盟市生态安全总体向好趋势发展,多数盟市由不安全状态向安全转移(图 4)。在 1990 年,兴安盟、通辽、锡林郭勒、乌兰察布和巴彦淖尔生态安全指数 <4.5 ,其生态系统处于安全状态,其他各盟市均处于不同程度的不安全状态;到 2000 年,除乌兰察布和锡林郭勒转变为安全状态外,其他各盟市均有不同程度的恶化,到 2010 年之后,全区各盟市生态安全均有好转,只有赤峰和呼和浩特为不安全状态(生态安全指数 >4.5);到 2018 年,除赤峰生态安全为稍不安全外(>4.5),其余各盟市均呈安全状态,生态安全指数均在 4.5 以下。

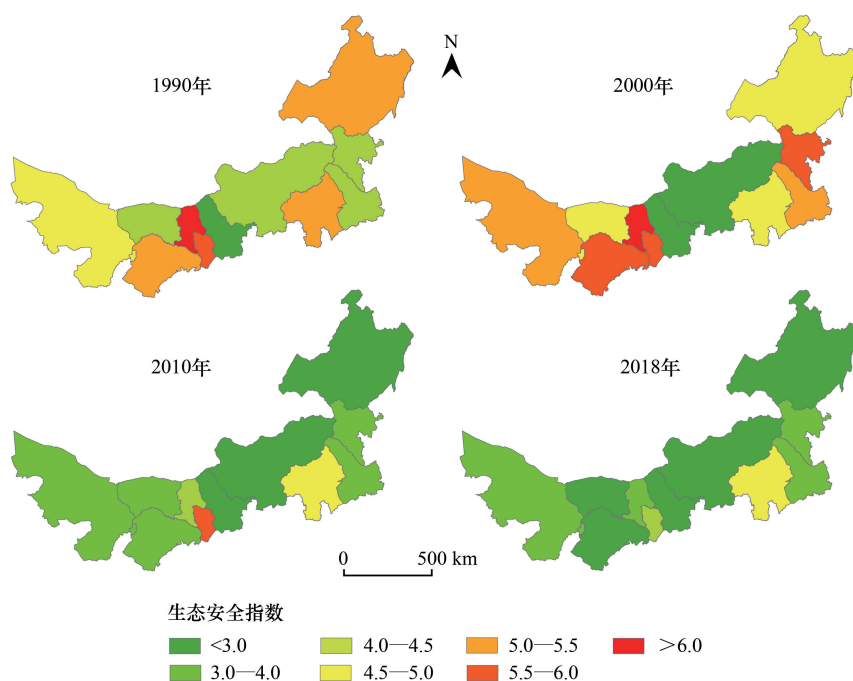


图 4 1990、2000、2010、2018 年内蒙古各盟市生态安全空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of ecological security of the cities of Inner Mongolia in 1990, 2000, 2010, 2018

2.3 生态安全重心变化特征

本文采用生态安全重心对内蒙古自治区 1990、2000、2010、2018 年生态安全的空间变化轨迹进行分析(图 5)。结果表明,近 30 年间内蒙古生态安全重心主要分布在锡林郭勒西端,在空间上分布较为集中,总体呈现“东北—西南”走向分布格局,生态安全重心在 1990—2018 年向东转移 36.4 km。但生态安全重心与内蒙古自治区几何中心不一致,且有先偏离后接近的趋势。在 1990—2000 年,生态安全重心向西南方向转移了 21.4 km,标准差椭圆的短轴缩小,长轴向西南方向偏移,表明在 1990—2000 年内蒙古自治区西南部生态问题较为突出,生态压力较 1990 年有所增加。这可能在 90 年代内蒙古各地的生产经营方式以粗犷为主,资源利用效率低,西南地区特殊的地理气候因素,生态问题较为严重;其次,能源的过度开采(如鄂尔多斯),造成西南地区生态压力增加,生态安全重心向西南移动。在 2000—2010 年,生态安全重心向东偏北方向移动了 39.4 km,标准差椭圆在长轴在西南方向缩短,表明自治区西南部生态得到恢复;到 2018 年,标准差椭圆在长轴和短轴均有增加,生态安全范围在东西和南北方向均有延伸,这表明全区生态问题有极大改善,生态压力减小。随着科学技术水平的提高,农业机械投入使用以及不同的改良恢复措施,使相同土地类型的生产力显著提升,生态压力减小;此外,内蒙古作为我国北方重要生态安全屏障,近年来开展了一系类生态恢复及生态保护措施,使全区各盟市生态环境得到了极大的改善。

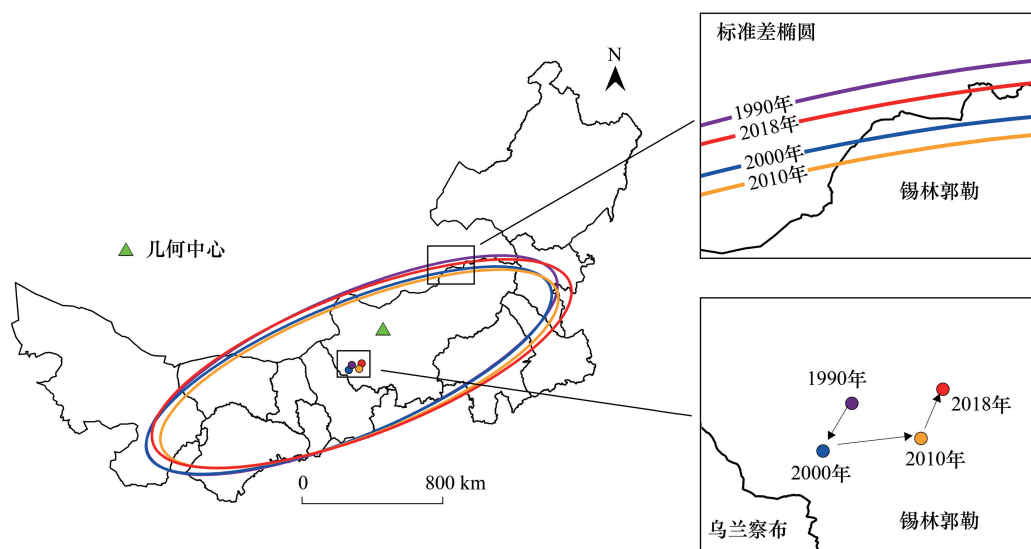


图5 内蒙古生态安全重心移动轨迹

Fig.5 The trajectory of the center of gravity of ecological security in Inner Mongolia

2.4 生态安全驱动因素

将生态足迹、生态盈亏及生态压力指数用作评价生态安全的指标,通过 CCA 分析,解析内蒙古各盟市生态安全的驱动因素。结果表明,内蒙古各盟市生态安全在时间序列上有显著差异,社会经济因素是驱动其生态安全的主导因子,且存在时空差异,但总体与经济水平、消费支出、产业结构显著相关(图 6)。从 1990 到 2018 年近 30 年间,内蒙古各盟市生态压力由生产型主导向消费型主导转变,第一轴主要反映了第一产业占比、人口数量和消费支出,解释了各盟市生态安全的 70% 以上。在 20 世纪 90 年代,全区多数盟市生态安全主要受第一产业产值占比和恩格尔系数影响,这表明期间居民的基本生活保障和消费结构是驱动其生态安全的主要因素。在 2000—2010 年,内蒙古各盟市经济社会由温饱型向消费型转变的过渡阶段,居民消费结构向高能耗方向发展,影响生态安全的社会经济因素也随之改变;到 2010 年之后,人均 GDP、消费支出与城镇化率成为生态安全的主导因子,这表明区域经济发展、居民的消费水平、对自然资源的占有及城镇化进程是当前内蒙古各盟市生态安全的主要驱动因素。

3 讨论

3.1 基于生态足迹的内蒙古地区生态安全评价

生态盈亏状况和生态压力可以共同反映区域生态安全状况。研究期间,内蒙古各盟市生态足迹与生态承载力总体呈上升趋势(图 2),生态赤字及生态压力指数呈下降趋势,全区生态安全整体呈向好趋势发展。这与杨海平等人的结果一致^[41],近年来,随着内蒙古城镇化和工业化进程的加快,以及国家脱贫攻坚战的实施,使内蒙古各盟市人均生活水平有极大的改善,对各类生产资料需求增加,生态足迹增加。其次,内蒙古主要的土地利用以草地和耕地为主^[26],是我国北方重要的畜牧业基地和粮食基地,其生态承载力主要由草地和耕地决定。随着科技的发展,生产方式由传统的粗放型向集约化精细型转变,机械的投入和化肥的大量施用也提高了农村牧区的生产力,其生态承载力大幅提高。在研究期间,虽然人均生态足迹仍大于生态承载力,但生态承载力的增加速度大于生态足迹,生态赤字减小,生态系统向可持续方向发展。加之,近年来全区各盟市第三产业收入占比不断增加,而第三产业的收入对自然资源的需求相对较小,三产比重对生态系统向好趋势发展具有积极作用^[42]。

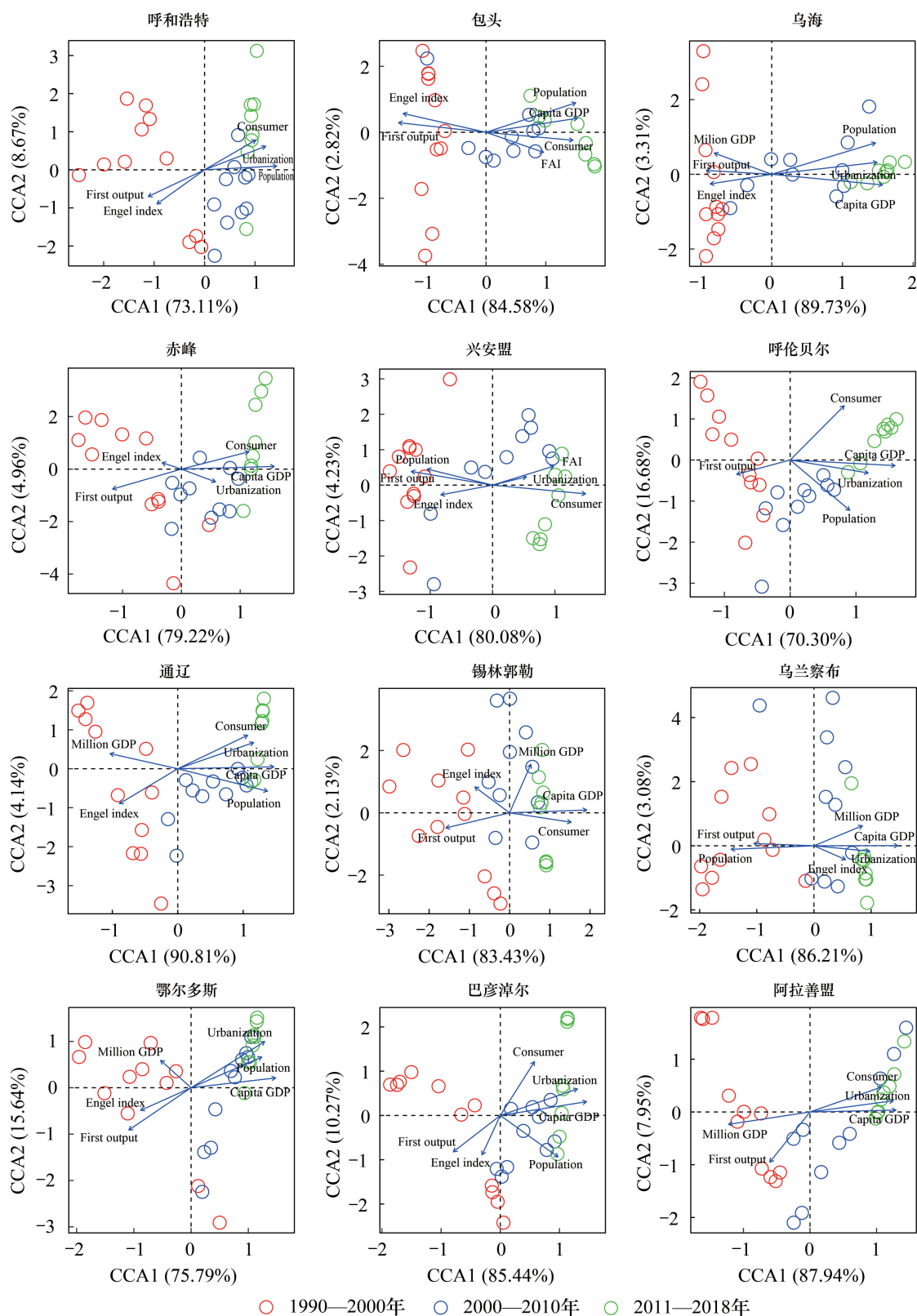


图6 内蒙古各盟市生态安全驱动力分析

Fig.6 Analysis of driving force of ecological security in Inner Mongolia

图中不同颜色的圆点表示不同时间段的生态安全指数,箭头代表影响生态安全的驱动因子;其中 First output 代表第一产业产值占比,Engle index 代表恩格尔系数,Million GDP 代表万元 GDP 能耗,Population 代表常住人口数量,Capita GDP 代表人均 GDP,Urbanization 代表城镇化率,Consumer 代表居民消费支出,FAI 代表固定资产投资

研究期间内蒙古各盟市生态足迹、生态承载力及生态安全和可持续发展状况存在空间差异。内蒙古自治区地域辽阔,横跨 4000 多公里,从东到西分布着森林、草原、荒漠生态系统类型,地貌特征和自然环境状况是影响区域生态足迹和生态承载力空间分布的基础因子^[43]。因此衡量内蒙古的生态安全及可持续发展状况需根据各地的实际情况。内蒙古自治区的人口数量呈现中东高西低的分布格局,且东西差异巨大,这使得其生态足迹也呈类似的分布格局,因此各盟市的人口数量是生态足迹的影响因子(图 6)。内蒙古各盟市生态承载力呈“中间高,两端低”的分布格局,其中,位于内蒙古中部的乌兰察布和锡林郭勒两盟市分别以农业和畜牧业为主,随着农业机械的投入以及牧场的合理利用,生产力有大幅提高,使得两地生态承载力近 30 年间显著增加。此外,两地人均占有自然资源比例较大,在研究期间一直处于生态盈余,可更新资源的生态足迹小于自然环境所提供的承载,生态压力最小,生态系统可持续性高。而其余各盟市均有不同程度的生态赤字及生态压力,生态安全问题不容忽视。

3.2 经济水平、消费支出、产业结构驱动内蒙古地区生态安全及可持续发展

研究期内,各盟市经济水平、消费支出和产业结构驱动内蒙古生态安全及可持续发展状况。生态安全问题不仅是生态学问题,社会经济因素也是影响生态安全动态演变的主要因素^[3, 44]。经济的发展对生态环境有很强的依赖性,进而影响生态安全的变化^[45]。当前城镇化改造及资源大肆开发利用的背景下,经济增长与自然资源消耗之间的矛盾日益突出,由此带来的生态环境问题也更加凸显^[46-47]。选取城镇化率和人均 GDP 分别代表经济发展水平和经济状况,研究发现,在 2000 年之后,城镇化率和人均 GDP 是内蒙古各盟市生态安全的主要驱动因素。此外,消费支出可以间接反映区域居民对生产资料的占有和消费程度,进而影响生态安全。在内蒙古各盟市生态足迹构成中,化石能源消费所占比重较大,特别是呼伦贝尔、鄂尔多斯等以化石能源的开采利用为主的盟市,其生态安全威胁主要来自化石能源消费。因此,内蒙古面临资源、环境与发展等多方面的挑战。而产业结构也是驱动内蒙古地区生态安全的重要因素,如何合理的调整产业结构是内蒙古地区可持续发展的关键问题。内蒙古作为我国北方重要的生态安全屏障,应加快落实新能源发展的战略布局,加大对风能、太阳能等绿色清洁能源的利用程度,并逐步降低石油等化石能源的开采消费。改善内蒙古地区生态安全及可持续发展状态,今后应当坚定地实施以生态保护与发展并重的政策方针^[18],加大科研力度并积极采用先进的技术,合理适度地开发土地资源,努力提高资源利用效率,大力推行可持续循环发展模式和生态产业链条,逐步建立资源节约型的社会生产及消费体系,促进内蒙古地区经济社会与生态环境全面协调地发展。

4 结论

本文运用生态足迹模型,将均衡因子和产量因子本地化,计算了内蒙古自治区各盟市 1990—2018 年生态足迹和生态承载力,分析其各盟市的空间差异;利用安全重心对其生态安全变化空间分布进行分析,并通过 CCA 分析其生态安全的驱动因素。研究结果如下:1)研究期间内蒙古各盟市生态足迹和生态承载力总体呈上升趋势,且生态承载上升大于生态足迹,生态赤字及生态压力减小,生态安全指数减小,生态系统整体向好发展。2)研究期间内蒙古各盟市生态足迹、生态承载力及生态安全存在明显的空间差异,生态安全重心呈“东北—西南”分布,生态不安全区域向西南方向转移。3)经济水平、消费支出、产业结构是内蒙古各盟市生态安全及可持续发展的驱动因素,地理位置和气候因素是导致其空间差异的主导因子。尽管内蒙古各盟市生态压力及生态安全状况向好趋势发展,除锡林郭勒外,其他各盟市均处于弱可持续发展状况,生态安全问题仍需重点关注,保证我国北方重要生态安全屏障。

参考文献(References):

- [1] Li X B, Tian M R, Wang H, Wang H, Yu J J. Development of an ecological security evaluation method based on the ecological footprint and application to a typical steppe region in China. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 153-159.
- [2] Peng J, Liu Y X, Li T Y, Wu J S. Regional ecosystem health response to rural land use change: a case study in Lijiang City, China. *Ecological Indicators*, 2017, 72: 399-410.

- [3] 杨雪获, 白永平, 车磊, 乔富伟, 周亮. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析. 生态学报, 2020, 40(14): 4785-4793.
- [4] 肖笃宁, 陈文波, 郭福良. 论生态安全的基本概念和研究内容. 应用生态学报, 2002, 13(3): 354-358.
- [5] Pirages D. Demographic change and ecological security. Environmental Change and Security Project, 1997, 3: 37-46.
- [6] Hou D Y, Ding Z Y, Li G H, Wu L H, Hu P J, Guo G L, Wang X R, Ma Y, O'Connor D, Wang X H. A sustainability assessment framework for agricultural land remediation in China. Land Degradation & Development, 2018, 29(4): 1005-1018.
- [7] 刘伟杰. 基于 GIS 和生态足迹方法的东北亚地区生态安全评价[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012.
- [8] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [9] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例. 生态学报, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [10] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型. 生态经济, 2000, (10): 8-10.
- [11] 魏黎灵, 李岚彬, 林月, 吴仪, 祁新华. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价. 生态学报, 2018, 38(12): 4317-4326.
- [12] 郭慧, 董士伟, 吴迪, 裴顺祥, 辛学兵. 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算. 生态学报, 2020, 40(4): 1405-1412.
- [13] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. Environment, Development & Sustainability, 2008, 10(4): 441-469.
- [14] 李金城, 严长安, 高伟. 基于本土参数的流域生态足迹评估与不确定分析. 生态学报, 2019, 39(2): 739-747.
- [15] 何爱红. 中国中部地区的生态足迹与可持续发展研究. 北京: 中国社会科学出版社, 2013.
- [16] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 基于生态足迹改进模型的叶尔羌河平原绿洲生态安全评价. 生态与农村环境学报, 2018, 34(9): 840-849.
- [17] 韩逸, 郭熙, 江叶枫, 饶磊, 孙凯, 李婕, 王澜珂. 南方丘陵区耕地景观生态安全影响因素及其空间差异. 生态学报, 2018, 39(17): 6522-6533.
- [18] Wang S D, Zhang X Y, Wu T X, Yang Y Y. The evolution of landscape ecological security in Beijing under the influence of different policies in recent decades. Science of the Total Environment, 2019, 646: 49-57.
- [19] Ma L B, Bo J, Li X Y, Fang F, Cheng W J. Identifying key landscape pattern indices influencing the ecological security of inland river basin: the middle and lower reaches of Shule River Basin as an example. Science of the Total Environment, 2019, 674: 424-438.
- [20] 张文强, 孙从建, 李新功. 晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1748-1758.
- [21] 施婷婷, 徐涵秋, 孙凤琴, 陈善沐, 杨绘婷. 建设项目引发的区域生态变化的遥感评估——以敖江流域为例. 生态学报, 2019, 39(18): 6826-6839.
- [22] Cotter M, Häuser I, Harich F K, He P, Sauerborn J, Treydt A C, Martin K, Cadisch G. Biodiversity and ecosystem services——a case study for the assessment of multiple species and functional diversity levels in a cultural landscape. Ecological Indicators, 2017, 75: 111-117.
- [23] 王金凤, 刘方, 白晓永, 代稳, 李琴, 吴路华. 西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测. 生态学报, 2018, 39(19): 7057-7066.
- [24] Yang Y, Ling S, Zhang T, Yao C X. Three-dimensional ecological footprint assessment for ecologically sensitive areas: a case study of the Southern Qin Ling piedmont in Shaanxi, China. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 540-553.
- [25] 党小虎, 吴彦斌, 刘国彬, 杨勤科, 余小涛, 贾银丽. 生态建设 15 年黄土高原生态足迹时空变化. 地理研究, 2018, 37(4): 761-771.
- [26] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 贾光普, 刘峰, 李涛, 贾宁. 内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值. 水土保持学报, 2020, 34(5): 244-250.
- [27] 黄麟, 翟俊, 祝萍, 郑瑜晗. 中国草畜平衡状态时空演变指示的草地生态保护格局. 地理学报, 2020, 75(11): 2396-2407.
- [28] 于成龙, 刘丹, 冯锐, 唐权, 郭春玲. 基于最小累积阻力模型的东北地区生态安全格局构建. 生态学报, 2021, 41(1): 290-301.
- [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. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1550-1559.
- [30] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597.
- [31] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [32] Wackernagel M, Rees W E, Testemale P. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Philadelphia: New Society, 1996.
- [33] 赵先贵, 马彩虹, 高利峰, 韦良焕. 基于生态压力指数的不同尺度区域生态安全评价. 中国生态农业学报, 2007, 15(6): 135-138.
- [34] 杨丹荔, 罗怀良, 蒋景龙. 基于生态足迹方法的西南地区典型资源型城市攀枝花市的可持续发展研究. 生态科学, 2017, 36(6): 64-70.
- [35] Cheng C, Liu Y L, Chen Y Y, Liu Y F, Zhang Y, Shen S S, Yang R F, Xu Z B, Hong Y S. Diagnosing cropland's allowable range and spatial

- allocation in China's typical mountainous plateau area: an evaluation framework based on ecological carrying capacity. *Science of the Total Environment*, 2019, 685: 1255-1268.
- [36] 吴心怡, 张燕. 江苏省自然资源利用时空变化特征及驱动力分析. *环境工程技术学报*, 2020, 10(2): 293-302.
- [37] Liu L N, Lei Y L, Ge J P, Yang K J. Sector screening and driving factor analysis of Beijing's ecological footprint using a multi-model method. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 330-338.
- [38] Gao C K, Jiang D H, Wang D, Yan J. Calculation of ecological footprint based on modified method and quantitative analysis of its impact factors—a case study of Shanghai. *Chinese Geographical Science*, 2006, 16(4): 306-313.
- [39] 米传民, 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色熵权聚类决策方法研究. *系统工程与电子技术*, 2006, 28(12): 1823-1825, 1844-1844.
- [40] 张继权, 伊坤朋, Tani H, 王秀峰, 佟志军, 刘兴朋. 基于 DPSIR 的吉林省白山市生态安全评价. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 189-195.
- [41] 杨海平, 温焜. 基于生态足迹理论的内蒙古生态承载力评价. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 152-157.
- [42] 甄翌, 麻学锋, 李志龙. 旅游城镇化不可转移生态足迹演变及驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(21): 7908-7920.
- [43] 张青, 任志远. 中国西部地区生态承载力与生态安全空间差异分析. *水土保持通报*, 2013, 33(2): 230-235.
- [44] Cuadra M, Björklund J. Assessment of economic and ecological carrying capacity of agricultural crops in Nicaragua. *Ecological Indicators*, 2007, 7(1): 133-149.
- [45] Wang J, Zhang Q M, Zou C J, Wang J X, Li Y S, Wang M C. Dynamic evolutions of ecological carrying capacity in poor areas using ecological footprint model at Ruyang County of China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(2): 140-150.
- [46] Lane M. The carrying capacity imperative: assessing regional carrying capacity methodologies for sustainable land-use planning. *Land Use Policy*, 2010, 27(4): 1038-1045.
- [47] 王振波, 梁龙武, 方创琳, 庄汝龙. 京津冀特大城市群生态安全格局时空演变特征及其影响因素. *生态学报*, 2018, 38(12): 4132-4144.