

DOI: 10.5846/stxb202101110109

鲁钰, 赵银娣, 董霁红. 西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析. 生态学报, 2022, 42(4): 1354–1367.

Lu Y, Zhao Y D, Dong J H. Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint in Northwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1354–1367.

西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析

鲁钰¹, 赵银娣^{1,2,*}, 董霁红¹

¹ 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116

² 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710075

摘要: 西北地区生态脆弱, 进行生态安全评估和驱动力分析具有重要意义。选取土地利用影像和植被净初级生产力产品叠加细化均衡因子和产量因子, 利用三维生态足迹改进模型测算和空间刻画西北地区 2009—2017 年的足迹深度、足迹广度和区域三维生态足迹; 然后基于上述结果计算生态压力指数、生态协调系数、生态足迹多样性指数、流量资本占用率和存量资本流量利用比描述生态安全变化; 最后用 STIRPAT 扩展模型结合主成分回归模型分析三维生态足迹演变的主要驱动因素。结果表明: (1) 2009—2017 年研究区的区域足迹广度总体上呈现为先升后降的趋势, 2009 年最低为 3.116 hm²/人, 2016 年达到最高为 3.796 hm²/人; 区域足迹深度研究期内一直上升, 从 2009 年的 11.550 hm²/人上涨为 19.031 hm²/人; 三维生态足迹研究期内也一直增加, 由 6.006 hm²/人增加为 9.760 hm²/人。 (2) 研究区 2009—2017 年整体生态安全持续恶化, 生态压力不断增大, 其中宁夏生态安全形势严峻, 新疆和陕西生态环境脆弱, 甘肃生态安全程度相对较差, 青海生态安全良好; 不同地区地类的安全状况基本不同, 但共同点为林地最为安全, 化石能源用地最不安全。 (3) 驱动力分析模型表明, 研究区经济、社会和技术发展对资本的占用有传导机制。人均 GDP、城镇化率和人口是研究区增加生态资本占用的因素, 万元 GDP 能耗是除新疆外共有的缓解资本亏损的因素, 经济发展仍依靠消耗资本能源, 需加大科技水平投入, 提高能源利用效率; 产业需要加速转型, 完善经济体制, 降低对资本的依赖性。

关键词: 三维生态足迹; 生态安全; 驱动力分析; STIRPAT 扩展模型; 西北地区

Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint in Northwestern China

LU Yu¹, ZHAO Yindi^{1,2,*}, DONG Jihong¹

¹ School of Environment Science and Spatial informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

² Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Natural Resources, Xi'an 710075, China

Abstract: The eco-environment is fragile in the Northwestern China. It is of great significance to conduct ecological security evaluation and analysis of driving forces. This study selects land use images and net primary productivity products to refine equivalence factors and yield factors. The improved three-dimensional ecological footprint model is used to calculate footprint size, footprint depth, and three-dimensional ecological footprint of Northwestern China from 2009 to 2017. The footprint size and footprint depth from 2009 to 2017 are spatially visualized. We adopt the ecological pressure index, ecological footprint diversity index, ecological coordination index, occupancy rates of capital flows and use ratios of stock-flows to describe quantitatively changes in ecological security. Finally, the extended STIRPAT model combines with the principal component regression model to analyze the main driving factors that affect the evolution of the three-dimensional ecological footprint. The results showed that: (1) the ecological footprint size from 2009 to 2017 displayed the tendency declining at the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51874306); 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室开放基金课题 (SXDJ2019-4)

收稿日期: 2021-01-11; **网络出版日期:** 2021-11-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaoyd@cumt.edu.cn

beginning and rising up later. The lowest value was $3.116 \text{ hm}^2/\text{cap}$ in 2009, and the highest one in 2016 was $3.796 \text{ hm}^2/\text{cap}$. The ecological footprint depth has been increasing from $11.550 \text{ hm}^2/\text{cap}$ in 2009 to $19.031 \text{ hm}^2/\text{cap}$ in 2017. The three-dimensional ecological footprint has also been increasing from $6.006 \text{ hm}^2/\text{cap}$ to $9.760 \text{ hm}^2/\text{cap}$ during the study period. (2) From 2009 to 2017, the ecological security of the study area continued to deteriorate. Among them, the ecological security situation in Ningxia was severe, the ecological environment in Xinjiang and Shaanxi was fragile, the ecological security was relatively poor in Gansu, and the ecological security in Qinghai was good. The security status of the productive land types in different regions were different, but the similarity was that forest land was the safest and fossil energy land was the least safety. (3) The driving force analysis model indicated that the economic, social and technological development of the study area had a transmission mechanism for the occupation of capital. Per capita GDP, urbanization rate and population were the factors that increased the occupation of ecological capital. The energy consumption of per 10,000 yuan of GDP was a factor that alleviated capital losses except Xinjiang. Economic development still relied on the consumption of capital and energy. It needed to increase the level of investment in science and technology, improve the energy structure, and increase the efficiency of energy utilization. The industry should accelerate the transformation, improve the economic system, and reduce the dependence on capital.

Key Words: three-dimensional ecological footprint model; ecological security; driving force analysis; extended STIRPAT model; the Northwestern China

区域生态安全是促进生态文明建设并实现可持续发展的重要基础^[1],对区域社会、经济和环境的协调发展具有重要意义^[2-3]。生态安全评价采用的方法主要有压力-状态-响应模型^[4],系统聚类法^[5],生态足迹法^[6]、综合指数法^[7]、模糊综合评价法^[8]和神经网络模型^[9]。上述生态安全评价的定量方法中,生态足迹法从生态视角核算自然资本,衡量人类对地球再生能力的直接和间接需求,并将其与地球上现有的生物能力相比较^[10-11],是一种易于阅读的生态可持续性衡量工具^[12]。随着研究深入,传统生态足迹模型未能区分自然资本流量与存量,也无法反映生态赤字在时间上的累积,三维生态足迹模型^[13-15]更能体现出不可再生资源对生态稳定发展的重要性。方恺^[13-15]将三维生态足迹引入中国进行优化与完善,并评估全球 11 个国家的自然资本利用状况。陈蓓^[16]借助生态足迹模型利用生态压力指数、生态足迹多样性指数和生态协调系数对川西南高原地区进行生态安全评价,王涛^[17]利用千米尺度的净初级生产力(NPP)计算生态压力指数进行河南生态安全诊断,郑德凤^[18]基于足迹深度和广度分析了中国自然资本的时空演变和驱动力机制。目前三维生态足迹在足迹核算方面研究较多,对不同地区自然资本利用的深入研究不足,足迹的计算和空间刻画仍然需要优化,也缺乏从资本流量和存量方面评价生态安全,同时迫切需要深入探讨省际自然资本格局形成的驱动力。

西北地区作为我国重要的矿产和能源供应基地,生态环境脆弱,经济持续发展和资源的过度开发导致生态退化严重^[1],有必要进行生态安全评价和驱动力分析。西北地区的生态足迹研究比较缺乏且多集中在二维层面,研究区时空异质性大,基于 NPP 的均衡因子和产量因子研究多为千米尺度,导致足迹计算结果不够准确;其次,生态安全评价研究鲜有对自然资本利用存量和流量的分析;也少有省域生态安全评价的同时探讨三维生态足迹自然资本格局形成的驱动力。故本研究利用 2009—2017 年的 MCD12Q1 和 MOD17A3HGF 影像合并的 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的格网单元进一步细化均衡因子和产量因子,采用三维生态足迹改进模型定量估算和可视化西北地区足迹深度、足迹广度以及区域三维生态足迹,然后计算生态压力指数、生态协调指数、生态足迹多样性指数、流量资本占用率和存量资本流量利用比描述生态安全变化,最后基于 STIRPAT (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology) 扩展模型^[19]结合主成分回归模型^[20],在多重共线性严重存在的情况下^[21]加强对影响三维生态足迹自然资本格局演变的主要驱动因素的分析,为西北地区生态安全发展提供科学依据和决策支撑,研究技术路线如图 1 所示。

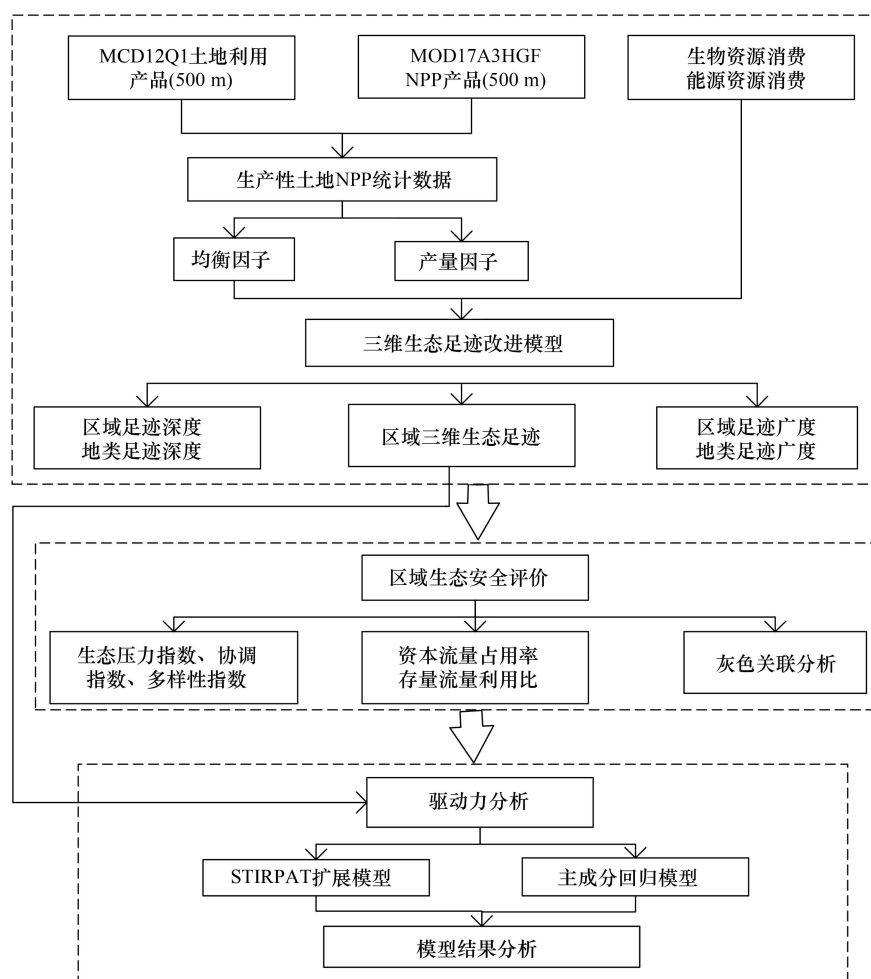


图1 研究技术路线图

Fig.1 The technology roadmap of this study

NPP: 净初级生产力 Net primary productivity

1 数据来源及处理

1.1 研究区概况

西北地区(73°3′—111°14′E, 31°42′—49°6′N)行政区划包括陕西省、宁夏回族自治区、甘肃省、青海省和新疆维吾尔自治区,图2为研究区2017年生态型土地利用图。研究区主要属于温带大陆性气候,气候干旱,降水稀少,地形多为盆地、山地和沙漠,植被由东向西为草原、荒漠、戈壁流沙、内流河和绿洲,人口多为少数民族,矿产资源丰富,生态环境脆弱。

1.2 数据准备及处理

本研究所用统计数据来源于统计年鉴,遥感数据为2009—2017年的MCD12Q1土地利用数据和MOD17A3HGF的NPP数据。生态足迹计算时分为生物资源账户与能源资源账户,耕地、草地、林地和水域对应生物资源账户,化石能源用地和建设用地对应能源资源账户。生物资源的各类指标消费数据包括农产品、畜牧产品、林产品和水产品等,这些数据来源于2010—2018年的《陕西统计年鉴》、《宁夏统计年鉴》、《甘肃发展年鉴》、《青海统计年鉴》、《新疆统计年鉴》和《中国统计年鉴》;原煤、原油、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油消费量以及电力和热力消费量等能源资源来源于《中国能源统计年鉴》,全球平均生物产量和全球平均能源足迹来自联合国粮食及农业组织。MCD12Q1土地利用数据选取IGBP方案,影像数据的缺失值进行Majority分析;NPP数据将无效值剔除,与比例因子相乘。根据全国和西北地区的行政区划边界矢量图用ArcGIS 10.5

裁剪得到全国和研究区的土地利用数据和 NPP 数据,叠加合并,得到 2009—2017 年 500 m×500 m 的格网的各种生产性土地类型的 NPP 数据。

2 研究方法

2.1 三维生态足迹改进模型

三维生态足迹^[15]在传统的生态足迹模型中加入表征资本存量消耗情况的足迹深度和表征资本流量占用情况的足迹广度,但无法准确表达生态损益值,积累不同类型的土地时,自然资本供需的矛盾可能被弱化,改进的三维生态足迹模型公式如下^[22-23]:

$$EF_{size,region} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, EC_i\} \quad (1)$$

$$EF_{depth,region} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max\{EF_i - EC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^n EC_i} \quad (2)$$

式中, $EF_{size,region}$ 代表区域足迹广度, $EF_{depth,region}$ 代表区域足迹深度, EF_i 代表第 i 种生态生产性土地的生态足迹, EC_i 代表第 i 种生态生产性土地的生态承载力。

相应地,区域的三维生态足迹以及地类尺度的足迹广度和足迹深度的公式^[13]如下:

$$EF_{3D,region} = EF_{size,region} \times EF_{depth,region} \quad (3)$$

$$EF_{size,i} = \min\{EF_i, EC_i\} \quad (4)$$

$$EF_{depth,i} = 1 + \frac{\max\{EF_i - EC_i, 0\}}{EC_i} \quad (5)$$

式中, $EF_{3D,region}$ 代表区域三维生态足迹, $EF_{depth,i}$ 为第 i 种生产性土地的足迹深度, $EF_{size,i}$ 第 i 种生产性土地的足迹广度。

全国生态足迹时空异质性较大,为了使三维生态足迹模型的结果更加准确,生态安全评价更具有针对性,对模型中的均衡因子和产量因子进行细化。均衡因子指区域内某种生产性土地的年均 NPP 与所有生产性土地的年均 NPP 的比值,化石能源用地本指吸收 CO_2 的用地,但森林是吸收 CO_2 的主要贡献者,化石能源用地的均衡因子用林地的均衡因子替代。由于建筑用地占用的是耕地,建筑用地的均衡因子用耕地的均衡因子代替。产量因子是指区域内某种生产性土地的年均 NPP 与全国相应的生产性土地的年均 NPP 的比值。化石能源的产量因子为 0,建设用地的产量因子等同于耕地的产量因子,公式如下:

$$r_i = \frac{p_i}{p}, y_i = \frac{f_i}{F_i} \quad (6)$$

式中, r_i 是均衡因子, p_i 为第 i 种生产性土地的年均 NPP, p 为 4 类生产性土地的年均 NPP。 y_i 是产量因子, f_i 是第 i 种生产性土地的年均 NPP, F_i 为全国第 i 种生产性土地的年均 NPP。

2.2 生态安全评价指标

根据上述三维生态足迹模型计算结果,计算生态压力指数(ecological pressure index, EPI)^[24]、生态协调系数(ecological coordination coefficient, ECC)^[25]、生态足迹多样性指数(ecological footprint diversity index, EFDI)^[26]、资本流量占用率和存量流量利用比^[27]对研究区进行生态安全评估。

生态压力指数可反映区域范围内的生态环境承压能力的强弱^[24],公式如下:

$$EPI = ef'/ec \quad (7)$$

式中, EPI 为生态压力指数, ef' 为可更新资源的人均生态足迹, ec 为人均生态承载力。

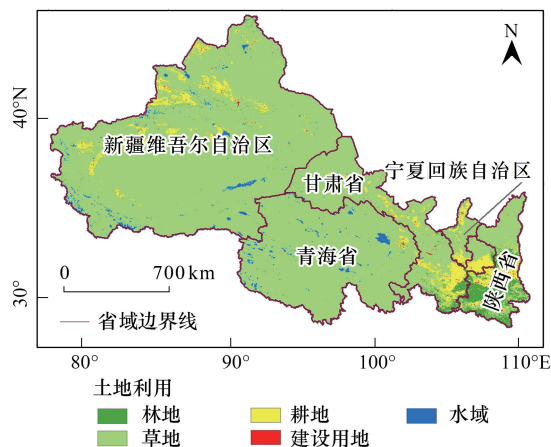


图2 研究区域图

Fig.2 Study area

生态赤字只是一个差值,不能反映要素禀赋与区域发展间的关系,因此引入生态协调系数,其可反映区域生态环境和社会经济发展间的协调程度,ECC 的数值越接近与 1.414,协调性越好,相反地,ECC 数值越接近与 1,协调性越糟糕^[25],公式如下:

$$ECC = \frac{(ef' + ec)}{\sqrt{(ef')^2 + ec^2}} = \frac{\left(\frac{ef'}{ec} + 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{ef'}{ec}\right)^2 + 1}} = \frac{(EPI + 1)}{\sqrt{EPI^2 + 1}} \quad (8)$$

式中, ef' 为可更新资源的人均生态足迹, ec 为人均生态承载力, ECC 为生态协调系数。

生态足迹多样性指数包含两个方面:丰富度和公平度,分别反映不同土地利用类型的比例情况和生态足迹的分配情况,采用 Shannon-Weaver 公式^[28]计算,公式如下:

$$EFDI = - \sum (p_i \times \ln p_i) \quad (9)$$

式中, EFDI 为生态足迹多样性指数, p_i 是第 i 类土地利用类型的生态足迹在总生态足迹中所占的比例。

存量流量利用比是指在资本流量完全被占用,存量资本开始逐渐被消耗的情况下,人类利用自然资本中存量和流量之间的大小关系^[27],公式如下:

$$R_{\text{flow}}^{\text{stock}} = \frac{EF - EF_{\text{size, region}}}{EF_{\text{size, region}}} = EF_{\text{depth, region}} - 1 \quad (10)$$

式中, $R_{\text{flow}}^{\text{stock}}$ 代表存量流量利用比, $EF_{\text{size, region}}$ 代表区域的足迹广度, $EF_{\text{depth, region}}$ 代表区域的足迹深度, EF 代表生态足迹。

资本流量占用率是指当处于生态盈余时能够准确表征对自然资本的实际占用情况^[27],公式如下:

$$OR_{\text{flow}} = \frac{EF_{\text{size, region}}}{EC} \times 100\% \quad (11)$$

式中, OR_{flow} 代表资本流量占用率, $EF_{\text{size, region}}$ 代表区域的足迹广度, EC 代表生态承载力。

2.3 灰色相关分析

灰色相关分析是依据灰色系统理论定量研究事物间的关联程度,计算出参考序列和若干比较序列间的关联系数和关联度,查看系统因素的主要关系^[29]。灰色关联度越大,说明发展趋势越相近,表明两数列的影响越大。该方法主要包括以下 4 个步骤^[30]:

(1) 选择比较序列和参考序列:可表征系统行为特征的序列为参考数列,对系统行为因素产生影响的序列为比较序列。

(2) 数据无量纲化处理:系统中因素的物理意义大不相同,数据的量纲也可能不同,因此数据需要无量纲化处理。

(3) 计算关联系数:关联程度是曲线几何形状间的差别程度,其衡量尺度可用曲线间差值大小来表示。

$$\xi_i = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{oi}(k) + \rho \Delta(\max)} \quad (12)$$

式中, ξ_i 为关联系数, $\Delta(\min)$ 是第二级最小差, $\Delta(\max)$ 是两级最大差, $\Delta_{oi}(k)$ 为各比较数列与参考数列每个数值绝对差值, ρ 为分辨系数,一般在 0—1 之间,通常取 0.5。

(4) 求得关联度:关联系数有多个值,且信息过于分散,整体性比较效果差,将曲线中的各点的关联系数求取平均值,作为关联程度的数量表示。

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (13)$$

式中, r_i 为关联度, N 为值的个数。

2.4 驱动力分析方法

2.4.1 驱动力指标的选取

本研究的初始模型从经济、社会和技术三方面选择驱动力指标。随着人民生活水平的提高,消费能源增多,生态环境影响加大,而人均 GDP 是国民生活水平的重要体现,同时研究区第二产业发达,所以采用人均 GDP 和第二产业增加值作为经济层面指标。人口数量的增加对环境造成着影响,随着城市化进程的加快,必然促使基础设施和建筑等必需品的快速发展,因此在社会层面采用人口、城市化水平和城镇就业人员作为反映城市化程度的指标。能源的消费量和利用效率是生态环境的重要影响因素,所以技术层面的指标选取能源终端消费量和万元 GDP 能耗。

2.4.2 STIRPAT 扩展模型方法

STIRPAT 是一种随机的环境影响评估模型,将人类驱动力与环境问题的核心因素结合起来,形成一个分析框架,由于其良好的扩展性可以灵活地定量分析环境问题^[19]。本研究基于传统 STIRPAT 模型,利用其可扩展性从社会、经济和技术三方面选择驱动力指标,筛选检验后构建适合当地实际的 STIRPAT 扩展模型框架,选取的 STIRPAT 扩展模型公式如下:

$$I = N \times A^b \times C^c \times U^d \times P^e \times T^f \times E^g \times R^h \times \xi \quad (14)$$

式中, I 代表三维生态足迹, A 代表人均富裕程度即人均 GDP, C 代表第二产业增加值, U 代表人口规模即城乡结构, P 代表城镇就业人员, T 代表技术能力即万元 GDP 能耗, E 代表能源终端消费量指标, R 代表人口, N 为模型系数(常数), b, c, d, e, f, g, h 分别为 A, C, U, P, T, E, R 的驱动力指数; ξ 为随机误差项。为了确定模型中各参数,对两边分别取对数,公式如下:

$$\ln I = a + b \ln A + c \ln C + d \ln U + e \ln P + f \ln T + g \ln E + h \ln R + \xi \quad (15)$$

2.4.3 主成分回归模型

主成分回归模型是通过降维技术把主成分作为回归因子的线性回归模型^[20],在多重共线性严重存在的情况下可加强对某些综合因素的分析并拟合到回归方程,保持原始变量的大量信息^[21],这种方法得出的结果精确可靠同时具有代表性。该方法主要可分为 6 个步骤,在 SPSS 26.0 软件中进行:

(1) 对原始变量进行标准化。

(2) 相关性分析:为了进一步确定驱动力因子的准确性,对驱动力因子和三维生态足迹的时间序列数据进行皮尔逊相关性检验,以甘肃省为例,结果见表 1,驱动力因子与三维生态足迹的相关性系数均在 0.05 水平上显著相关(双侧)。

表 1 甘肃三维生态足迹与驱动力因子相关性检验(双侧)

Table 1 Correlation test between three-dimensional ecological footprint and driving force indexes in Gansu (bilateral)

指标 Item	三维生态足迹	人均 GDP	第二产业增加值	城乡结构	城镇就业人员	万元 GDP 能耗	能源终端消费量	人口
三维生态足迹 Three-dimensional ecological footprint	1	0.906 **	0.942 **	0.828 **	0.876 **	-0.906 **	0.951 **	0.691 *
人均 GDP Real GDP per capita	0.906 **	1	0.851 **	0.982 **	0.946 **	-0.992 **	0.959 **	0.922 **
第二产业增加值 Value added by the secondary industry	0.942 **	0.851 **	1	0.746 *	0.805 **	-0.852 **	0.925 **	0.6
城乡结构 Dual urban-rural economical structure	0.828 **	0.982 **	0.746 *	1	0.931 **	-0.972 **	0.909 **	0.976 **
城镇就业人员 Urban employed persons	0.876 **	0.946 **	0.805 **	0.931 **	1	-0.905 **	0.953 **	0.869 **
万元 GDP 能耗 Energy consumption per unit of GDP	-0.906 **	-0.992 **	-0.852 **	-0.972 **	-0.905 **	1	-0.936 **	-0.907 **
能源终端消费量 Final consumption of energy	0.951 **	0.959 **	0.925 **	0.909 **	0.953 **	-0.936 **	1	0.809 **
人口 Resident population	0.691 *	0.922 **	0.6	0.976 **	0.869 **	-0.907 **	0.809 **	1

GDP:国内生产总值 Gross Domestic Product

(3) 共线性诊断:回归模型中的一些解释变量若存在精确或高度相关关系会导致模型失真。

(4) 计算特征值,得到相应的因子载荷矩阵。

(5) 求主成分和特征向量:根据方差贡献率选取主成分的个数,根据特征值得到标准正交化特征向量。

(6) 线性回归:对选取的主成分做关于中心化因变量的最小二乘回归分析。

以甘肃省份为例,本研究每个省份均提取两个主成分,且两个主成分累计贡献率均达到 90%,表明可代替原始变量达到令人满意的效果,得出 $\ln I$ 与两个主要成分 ($F1$ 和 $F2$) 间的最小二乘回归结果,最终得到 STIRPAT 扩展模型公式为: $I = NA^{0.059} C^{0.186} U^{0.026} P^{-0.01} T^{-0.056} E^{0.181} R^{1.023}$ 。

同理,可以得到研究区其余省份的 STIRPAT 扩展模型的计算公式(表 2)。

表 2 STIRPAT 扩展模型回归结果

Table 2 Regression results of the STIRPAT extended models

地区 Region	STIRPAT 扩展模型回归结果 Regression results of the STIRPAT extended models	地区 Region	STIRPAT 扩展模型回归结果 Regression results of the STIRPAT extended models
陕西	$I = NA^{0.05} C^{0.035} U^{0.223} P^{0.145} T^{-0.067} E^{0.126} R^{2.936}$	青海	$I = NA^{0.033} C^{-0.048} U^{0.318} P^{0.204} T^{-0.077} E^{0.031} R^{1.493}$
宁夏	$I = NA^{0.232} C^{0.079} U^{0.639} P^{-0.039} T^{-1.125} E^{-0.019} R^{2.082}$	新疆	$I = NA^{0.107} C^{0.083} U^{0.386} P^{0.148} T^{0.129} E^{0.069} R^{0.597}$

3 结果与分析

3.1 三维生态足迹的动态分析过程

生态问题的出现是随时间动态累积的过程,采用时间序列方法,结合三维生态足迹模型对生态状况进行分析,并利用 ArcGIS 10.5 的空间可视化功能对 2009—2017 年研究区的耕地、林地、草地、建设用地和水域进行空间分析。

3.1.1 足迹广度演变

足迹广度反映资源的占有程度,区域足迹广度在 2009—2017 年总体上呈先升后降的趋势,人口密度低且资源富饶的区域一般是高值区,人口稠密区大都是低值,数值大小排序为:青海>新疆>甘肃>宁夏>陕西,如图 3 所示;甘肃 2014 年达最大值 $0.767 \text{ hm}^2/\text{人}$,宁夏 2015 年达到最大值 $0.455 \text{ hm}^2/\text{人}$,陕西、青海和新疆 2016 年达到最大,可能是由于产业结构升级转型和调整土地利用结构等造成足迹广度波动性变化。不同地类的空间足迹广度变化如图 4 所示,呈现出地区差异性,但研究区的气候干燥,水资源匮乏,水域足迹广度贡献普遍小。研究区区域足迹广度由南向北,从东向西逐渐增加,西北方的自然资本的流动性要大于东南方。青海和新疆地区草地面积广,资源占有度大,农牧业发达,草地足迹广度贡献大,带动了青海和新疆的足迹广度。甘肃在研究区内属于中值区,草地和耕地资源的贡献率较大,研究期间资源占用稳定。宁夏的耕地足迹大,但是地区面积小,为了发展经济进行地区资源开发,使自然资本流量占用增加,当资源开发到一定程度时,生态环境的调节能力下降,资本流量的利用开始加快,资本的更新程度赶不上消耗程度,最终又导致足迹广度的下降。陕西是我国的林业发展大省,林地足迹广度占比大,秦岭是中国顶级生态空间,被誉为中华绿芯,陕北地区以能源工业作为主导产业,近几年来正在向高端能源产业基地发展,导致区域足迹广度出现波动变化。

3.1.2 足迹深度演变

足迹深度表示资源的消耗程度,处于生态赤字的地区转为消耗资本存量。图 3 可以看出研究区 2009—2017 年除宁夏显著增加外,其余省份区域足迹深度持续平稳增加,数值大小排序为:宁夏>陕西>新疆>甘肃>青海,且均大于 $1 \text{ hm}^2/\text{人}$,表明资源流量不能支撑资源的消费。资源富足且发展缓慢的地区足迹深度较低,宁夏是足迹深度最大的省份,存量资本消耗最快;青海属于最小的省份,地区的可持续性发展较强。从地类的足迹深度上看(图 5),研究区水资源稀少,水域的足迹深度大,水域流量资本基本不能满足消费需求。宁夏的水资源稀少,只有黄河支流,且附近人迹活动频繁,资源消耗大,导致水域的足迹深度最大;其次是建设用地和草地,说明奶类、肉类和农产品的需求加大,生活水平逐渐提高,加上城市的不断扩张,资源过度消耗造成的累积效应日益突出。陕西的陕北土地贫瘠,畜牧业较为发达,资源消耗地很快,生态环境复杂而且脆弱,草地和

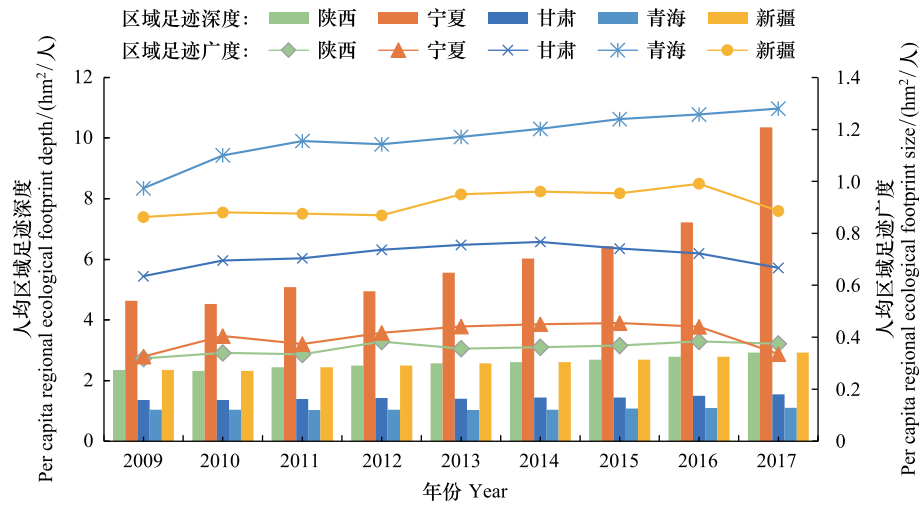


图3 2009—2017年西北地区人均区域足迹深度和区域足迹广度变化

Fig.3 Changes of regional footprint depth and footprint size per capita in Northwestern China from 2009 to 2017

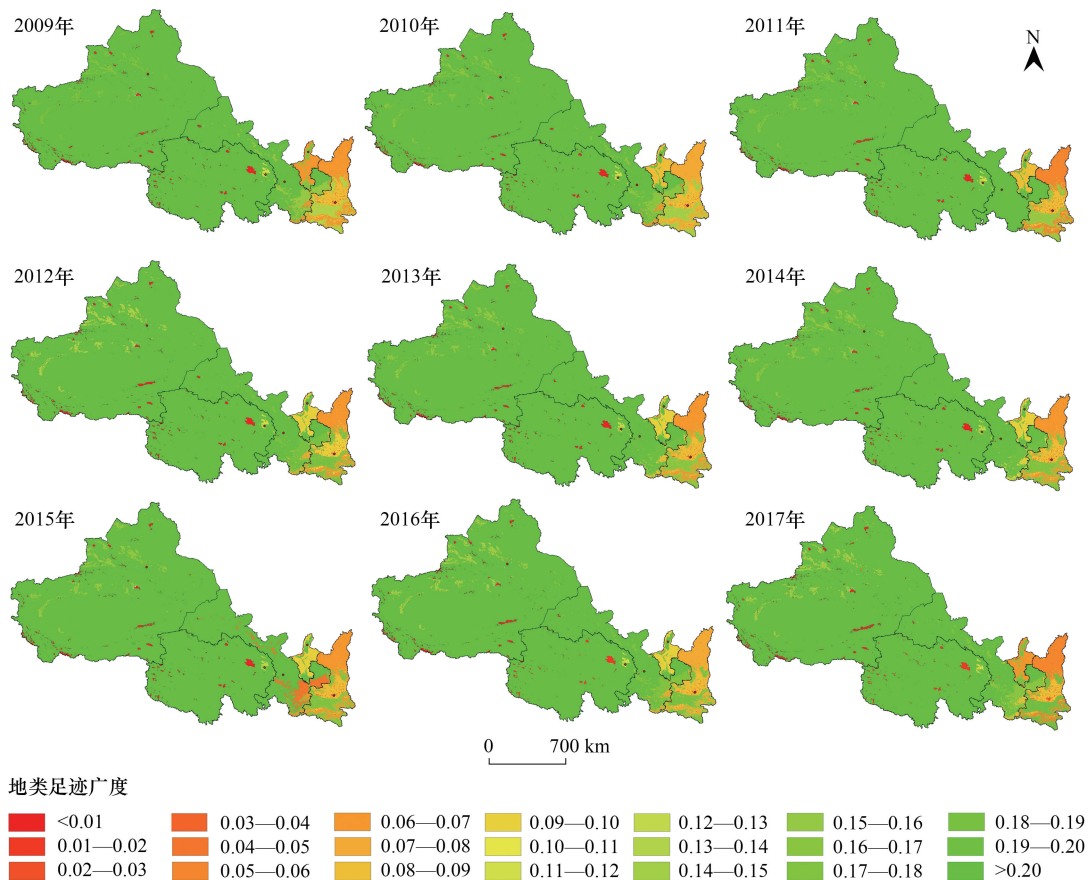


图4 2009—2017年西北地区地类人均足迹广度变化

Fig.4 Changes of footprint size per capita of land types in Northwestern China from 2009 to 2017

水域的足迹深度较大,在国家实施“退耕还林,退牧还草”战略后有所改变。甘肃是我国的五大牧区之一,随着城镇化水平的增加和经济的增长,建设用地和草地的足迹深度贡献逐渐增大。新疆和青海的建设用地和耕

地是足迹深度的重要组成部分,草地次之,表明人类活动强度增大,城市化进程正在加速。青海的草地的足迹深度为 $1 \text{ hm}^2/\text{人}$,表明该地类资本流量能支撑起资源的消费。另外,研究期内的林地的足迹深度都是 $1 \text{ hm}^2/\text{人}$,说明研究区林地都处于可持续发展状态。

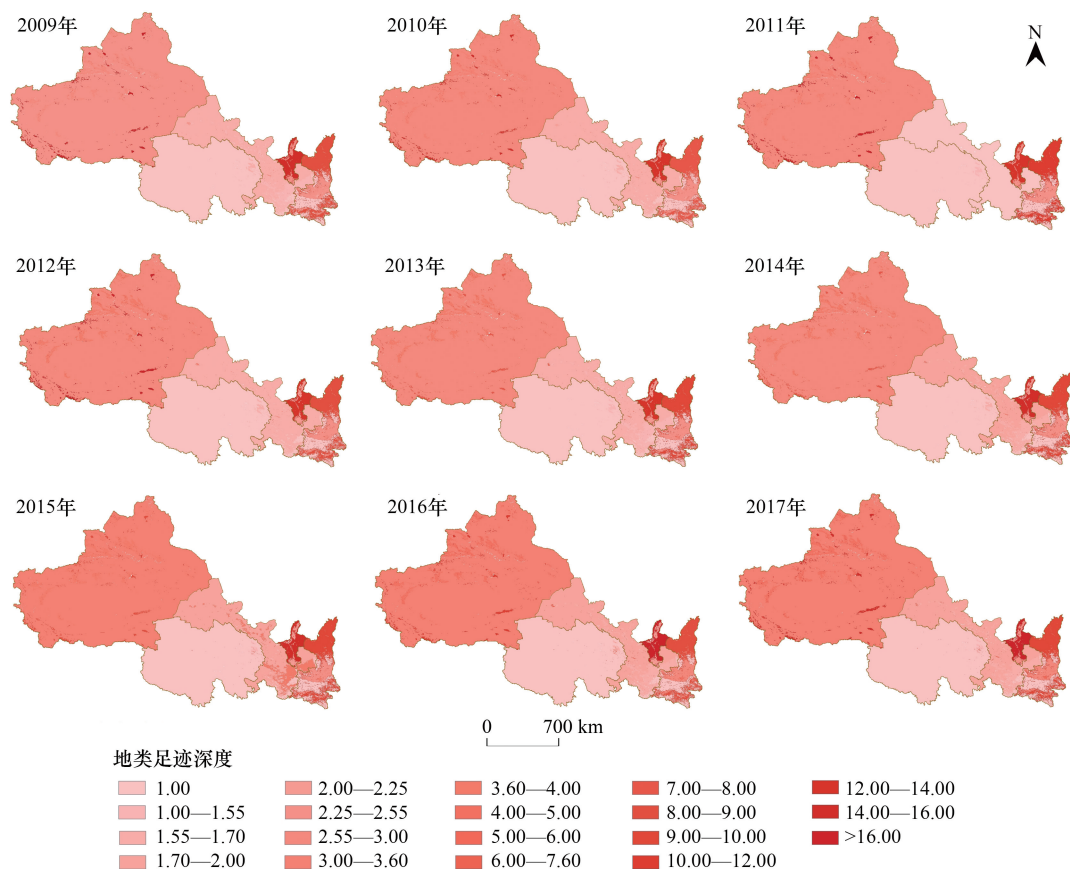


图5 2009—2017年西北地区地类人均足迹深度变化

Fig.5 Changes of footprint depth per capita of land types in Northwestern China from 2009 to 2017

3.1.3 三维生态足迹分析

区域三维生态足迹由足迹深度和广度共同决定,表现区域资源的整体的利用状况,图6为研究区2009—2017年的三维生态足迹。研究区的三维生态足迹分布不平衡,整体趋势为波动上升,新疆从 $1.868 \text{ hm}^2/\text{人}$ 显著增加至 $2.748 \text{ hm}^2/\text{人}$,宁夏从 $1.509 \text{ hm}^2/\text{人}$ 急剧增加至 $3.469 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。青海、甘肃和陕西三个区域的经济主要依靠传统的农业和畜牧业,发展比较平稳,加上国家实施的“退耕还林”“退牧还草”政策,三维生态足迹的变化较小。新疆在2018年之前仍属于中期工业化时期,经济建设需要消耗大量的资本能源,且当地工业存在“高投入,低产出”和“高污染,低效率”的现象;此外,产业和水资源分布不均,城市化进程加快,导致新疆的三维足迹逐年增加。宁夏处于西北内陆高原地带,区

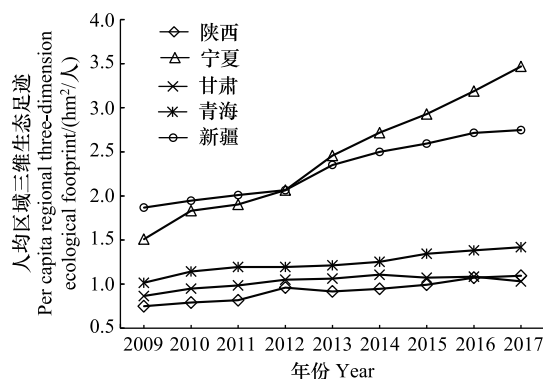


图6 2009—2017年西北地区人均区域三维生态足迹变化

Fig.6 Changes of regional three-dimensional ecological footprint per capita in Northwestern China from 2009 to 2017

域面积小且人口多,产业结构不合理,地区经济以工业为主,研究期内资本存量无法满足资源需求,资本消耗速度大于资本的更新速度,环境压力巨大,随着时间的积累,区域生态承载力逐渐下降,为了对消耗的资源缺口进行弥补,足迹深度不断增加,增大了地区的三维生态足迹。

3.2 生态安全动态分析

测算生态足迹多样性指数(表3)、压力指数(图7)、协调系数(图7)从生态供需方面分析,研究区2009—2017年EPI变化整体上与生态赤字/盈余一致,除青海外的四个省份的EPI都随着时间增加而增大,研究区的生态环境急需改善,可持续发展面临考验。研究期内,青海EPI指数小,EFDI指数的上下波动最大,ECC数值在1.25和1.33之间,表明生态环境较安全,虽然生态足迹分布不均匀,与经济发展并不协调,但可合理开发资源促进经济发展,有广阔的发展前景。甘肃9年间3个指数变化轻微,EPI指数大于0.8,EFDI和ECC有增大的趋势,表明生态安全程度相对较差,区域经济和环境正在向协调的方向发展,资源的分配还需要调整,应该引起重视。陕西和新疆3个指数大小和变化趋势相似,EFDI和ECC数值都在减小,表明各种生态资源的利用越来越不均匀,资源的需求增大,供需失调渐渐严重,生态环境与经济发展间的协调程度下降,生态压力变大,生态环境脆弱。宁夏的EPI指数最大,EFDI在2011年急剧增加,ECC数值较低还持续下降,表明生态足迹逐年均匀,但其发展是利用自然资源来弥补生态承载力的薄弱,生态环境与经济发展失衡越来越严重,生态存在严重问题。

表3 2009—2017年西北地区的生态足迹多样性指数(EFDI)变化

Table 3 Changes of ecological footprint diversity index in Northwestern China from 2009 to 2017

地区 Region	年份 Years								
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
陕西	0.945	0.898	0.882	0.876	0.785	0.777	0.770	0.734	0.706
宁夏	0.661	0.677	0.608	0.646	0.722	0.773	0.803	0.850	0.912
甘肃	0.882	0.870	0.833	0.850	0.837	0.856	0.844	0.870	0.852
青海	0.745	0.783	0.713	0.670	0.616	0.670	0.795	0.758	0.770
新疆	0.926	0.906	0.860	0.810	0.814	0.806	0.808	0.792	0.764

资本流量占有率与存量流量利用比(图8)是生态建设评价重要的支撑,可再生资源禀赋约束着流量资本的占用水平,而存量资本消耗则更倾向于经济发展的驱动。青海 OR_{flow} 和 R_{flow}^{stock} 在研究区均最低,表明地区存量资本消耗低,流量资本占用高,自然资本利用可持续性最强,经济发展潜力大,生态较安全。甘肃 OR_{flow} 在60%上下波动,研究期内 R_{flow}^{stock} 稳定增加到0.55左右,表明地类存在生态盈余,地区的资源禀赋条件好但资本存量消耗仍然增多,环境压力较弱,生态安全相对较差。研究期内陕西的 OR_{flow} 在65%以上且呈波动增加趋势, R_{flow}^{stock} 由1.34增长至1.92,生态安全状况次于甘肃。新疆 OR_{flow} 一直在75%以上且研究期间波动增加, R_{flow}^{stock} 逐年上涨,由1.16增长至2.10,虽然新疆的可再生资源丰富,但流量资本已经不能满足当前发展的需要,生态环境脆弱。宁夏的 OR_{flow} 最高,研究期内一直处于80%以上,2009年最低为81.39%,2017达最高为106.40%,且 R_{flow}^{stock} 最大且逐年急剧增长,说明流量资本不能满足需求,宁夏面积狭小,资源极度有限,面对人口扩张、经济发展的现实需求,需加大存量资本进行弥补流量资本,同时资本存量的大幅占用已经严重阻碍了流量资本的更新,生态安全面临着严重威胁。

需要注意的是,三维生态足迹改进模型扣除了化石能源用地,化石能源消耗所排放的气体具有扩散性,不仅仅由研究地承担,化石能源足迹没有与之对应的生态承载力^[29],但根据灰色关联分析的结果(表4)可知,化石能源地类消费与EF的关联度最大,说明化石能源消费对EF影响最大,是导致生态赤字和资本存量减少的主要因素。研究区的变化趋势如图9,新疆和陕西的化石能源用地的EF逐年增加,分别到8.198 hm²/人和4.924 hm²/人;甘肃相对来说比较平稳,宁夏在2011年突增到9.074 hm²/人后又逐渐下降;青海波动变化,在2013年最大为4.794 hm²/人。

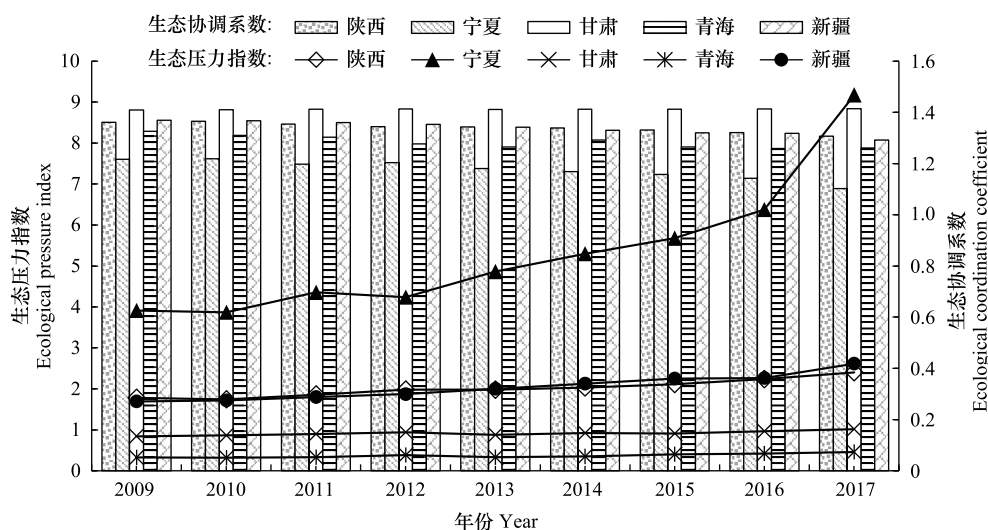


图7 2009—2017年西北地区生态压力指数(EPI)和生态协调系数(ECC)变化

Fig.7 Changes of ecological pressure index and ecological coordination coefficient in Northwestern China from 2009 to 2017

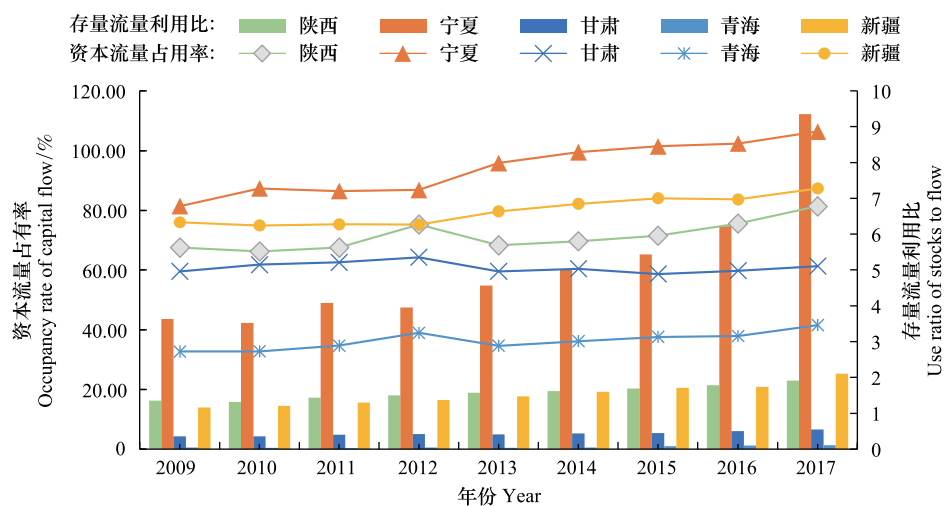
图8 2009—2017年西北地区资本流量占用率(OR_{flow})和存量流量利用比(R_{flow}^{stock})变化

Fig.8 Changes of occupancy rates of capital flows and use ratios of stock-flows in Northwestern China from 2009 to 2017

表4 生产性土地消费与生态足迹的关联度

Table 4 Grey correlation degree between ecological productive land consumption and ecological footprint

地区 Region	地类 Land types					
	耕地 Cultivated land	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Waters	化石能源用地 Fossil energy land	建设用地 Building land
陕西	0.547009	0.607266	0.611921	0.654284	0.850588	0.672396
宁夏	0.830465	0.904336	0.8923	0.72237	0.946317	0.814341
甘肃	0.867906	0.832061	0.86417	0.499029	0.956816	0.821396
青海	0.817595	0.78733	0.887025	0.621609	0.950767	0.605953
新疆	0.650037	0.78326	0.65812	0.580042	0.826087	0.74735

结合两种评价方式结果可以得出,研究区 2009—2017 年整体生态安全持续恶化,生态压力不断增大,其中宁夏生态安全形势严峻,新疆和陕西生态环境脆弱,甘肃生态安全程度相对较差,青海生态安全良好。不同地区地类的安全状况基本不同,但共同点为林地最为安全,化石能源用地最不安全。为了响应国家的经济政

策,推进经济发展,加速城镇化和工业化的进程,必须要消耗大量的资源能源,由于地形和气候等环境因素,不同类型的资源利用不均衡,大部分区域生态供给和需求可能存在失衡,可以通过增加土地利用的多样性,均衡使用不同类型土地资源并提高资源利用效率来提高生态系统的发展能力。

3.3 三维生态足迹驱动力分析

在对 STIRPAT 模型扩展的基础上,结合主成分回归模型分析研究区的三维生态足迹演变的主要驱动因素,研究发现人均 GDP、城镇化率和人口是研究区增加生态资本占用的因素,万元 GDP 能耗是除新疆外共有的缓解资本亏损的因素。青海地广人稀,资源丰富,适量地增加第二产业可增加资本存量,提高万元 GDP 能耗,减少能源终端消费量可减轻环境压力。甘肃国民富裕程度的提高、第二产业产值的增加和城市化规模的扩

大都会加大生态供给占用和资源的消耗,而城镇就业以及万元 GDP 能耗的提高可以对资本亏损进行缓解,能源终端消费量的增加说明研究期内甘肃省正进行产业结构优化,并且加大科技投入减弱资本占用,向可持续发展迈进。陕西万元 GDP 能耗为负向驱动因素,人口、社会消费和经济发展加大了资本利用,产业模式转变收效甚微。本研究所选的指标因素对新疆的三维生态足迹均为正向驱动因素,人口增长,经济规模扩大,能源消耗总量增加和效率降低都加大对资本的占用,可持续性降低,应该提高资源的利用效率,优化产业结构。宁夏地区面积狭小,人口、城镇化水平和富裕程度的增加需要通过消耗资本来实现,城镇就业、万元 GDP 能耗以及能源终端消费量的回归系数为负值,说明宁夏虽增加科技投入,加速产业升级转型,仍需加大资本输出消耗来满足人们的生态供给需求。

4 讨论与结论

4.1 讨论

利用细化的均衡因子和产量因子计算三维生态足迹改进模型进行生态安全评估,测算出的自然资本结果与已有的研究相比^[18,31-37],资本均存在亏损,自然资本结果数值存在差异但总体趋势变化一致,原因可能与研究时序、均衡因子和产量因子的细化以及计算足迹账户的项目有关。从资本的利用追踪来看,研究区水资源自然资本占有少且消耗大,需要响应国家水资源管理的号召,合理开发利用水资源;另需要优化产业结构,生态保护与资源开发并重,提高资本流动性的同时可减少存量的消耗;建立相关的环境保护的政策法规和环保机制,促进生态的可持续发展。从三维生态足迹自然资本演变的驱动机理来看,研究区经济、社会和技术发展对资本的占用有传导机制,经济发展仍依靠消耗资本能源,需加大科技水平投入,改善能源结构,提高能源利用效率,促进经济绿色发展;产业结构需要加速转型,完善经济体制,发展培育有潜力地区,降低对资本的依赖性。综上所述,本研究很好地对研究区的生态安全进行评估和驱动力分析计算,但仍然存在一些不足,未来研究应选择更长的时间序列,足迹账户项目和驱动力因素的选择需要更加全面。此外,研究区的水资源缺乏,改进的水域均衡因子的结果总体偏小,导致水资源的生态足迹整体偏小,后续需加大对水资源足迹的测算。

4.2 结论

本研究基于三维生态足迹理论采用时间序列,定量估算和可视化生态系统的动态演化,计算生态压力指数、生态足迹多样性指数、生态协调系数、资本流量占用率和存量流量利用比对研究区的自然资本进行生态安全评估,并探讨三维生态足迹自然资本格局形成的驱动力,主要结论如下:

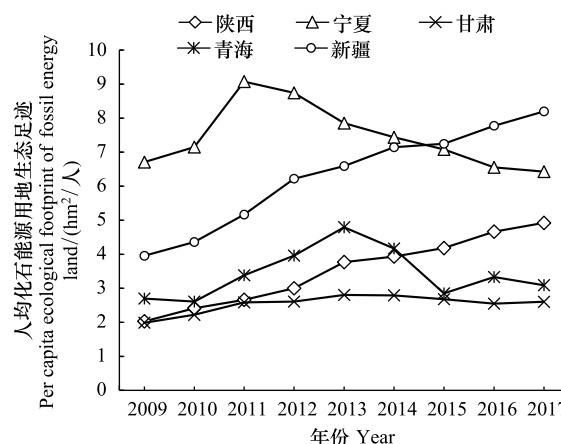


图9 2009—2017年西北地区化石能源用地人均生态足迹变化

Fig.9 Changes of ecological footprint per capita of fossil energy land in Northwestern China from 2009 to 2017

(1) 2009—2017 年研究区的区域足迹广度总体上呈现为先升后降的趋势, 2009 年最低为 $3.116 \text{ hm}^2/\text{人}$, 2016 年达到最高为 $3.796 \text{ hm}^2/\text{人}$; 区域足迹深度呈现一直上升的趋势, 从 2009 年的 $11.550 \text{ hm}^2/\text{人}$ 上涨为 $19.031 \text{ hm}^2/\text{人}$; 三维生态足迹研究期内也一直增加, 由 $6.006 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加为 $9.760 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。宁夏的三维生态足迹上升最快, 其次是新疆, 陕西、甘肃和青海增长平缓, 数值大小排序为青海>甘肃>陕西。

(2) 研究区 2009—2017 年整体生态安全持续恶化, 从区域上分析, 研究区 2009—2017 年整体生态安全持续恶化, 生态压力不断增大, 其中宁夏生态安全形势严峻, 新疆和陕西生态环境脆弱, 甘肃生态程度相对安全较差, 青海生态安全良好; 不同地区地类的安全状况基本不同, 但共有点为林地最为安全, 化石能源用地最不安全。

(3) 驱动力分析模型表明, 研究区经济、社会和技术发展对资本的占用有传导机制。人均 GDP、城镇化率和人口是研究区增加生态资本占用的因素, 万元 GDP 能耗是除新疆外共有的缓解资本亏损的因素, 经济发展仍依靠消耗资本能源, 需加大科技水平投入, 改善能源结构, 提高能源利用效率; 产业需要加速转型, 完善经济体制, 降低对资本的依赖性。

(4) 研究区整体的生态资源压力大, 资源的利用效率低, 环境污染较为严重, 生态环境与经济发展协调性差, 应该积极响应国家号召, 提高资源的利用效率, 促进经济的绿色发展, 建立相关的环境保护的政策法规和环保机制, 保障研究区的生态与经济的协调可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 鄢继尧, 赵媛. 近三十年我国生态脆弱区研究热点与展望. 南京师大学报: 自然科学版, 2020, 43(4): 74-85.
- [2] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 林乃峰, 徐梦佳. 生态安全格局研究的主要内容与进展. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [3] Vetrova N, Shtofer G, Gaysarova A, Ryvkina O. Regional ecological security assessment in the environmental management//Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering 2019. E3S Web of Conferences. Paris: EDP Sciences, 2020, 164: 07004.
- [4] 全川. 环境指标研究进展与分析. 环境科学研究, 2000, 13(4): 53-55.
- [5] Lundquist J E, Sommerfeld R A. Use of fourier transforms to define landscape scales of analysis for disturbances: a case study of thinned and unthinned forest stands. Landscape Ecology, 2002, 17(5): 445-454.
- [6] Wackernagel M, Yount J D. The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability. Environmental Monitoring and Assessment, 1998, 51: 511-529.
- [7] Bartel A. Analysis of landscape pattern: towards a 'top down' indicator for evaluation of landuse. Ecological Modelling, 2000, 130(1/2): 87-94.
- [8] Onkal-Engin G, Demir I, Hiz H. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation. Atmospheric Environment, 2004, 38(23): 3809-3815.
- [9] Chen K P, Jacobson C, Blong R. Artificial neural networks for risk decision support in natural hazards: a case study of assessing the probability of house survival from bushfires. Environmental Modeling & Assessment, 2004, 9(3): 189-199.
- [10] Galli A, Kitzes J, Niccolucci V, Wackernagel M, Wada Y, Marchettini N. Assessing the global environmental consequences of economic growth through the Ecological Footprint: a focus on China and India. Ecological Indicators, 2011, 17: 99-107.
- [11] Miao C L, Sun L Y, Yang L. The studies of ecological environmental quality assessment in Anhui Province based on ecological footprint. Ecological Indicators, 2016, 60: 879-883.
- [12] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfón I S L, Garcia 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.
- [13] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析——选取 11 个国家为数据源. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [14] Niccolucci V, Galli A, Reed A, Neri E, Wackernagel M, Bastianoni S. Towards a 3D national ecological footprint geography. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [15] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, Wackernagel M, Marchettini N. How deep is the footprint? A 3D representation. Ecological Modelling, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [16] 陈蓓. 基于生态足迹模型的川西南高原地区生态安全评价——以甘孜藏族自治州为例. 中国农业资源与区划, 2019, 40(6): 185-190.
- [17] 王涛, 邵田田, 李登辉, 梁晓文, 卢楠楠. 基于净初级生产力生态足迹的河南省生态安全诊断. 遥感信息, 2020, 35(4): 133-140.
- [18] 郑德凤, 刘晓星, 王燕燕, 吕乐婷. 基于三维生态足迹的中国自然资本利用时空演变及驱动力分析. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1328-1339.

- [19] Dietz T, Rosa E A. Effects of population and affluence on CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1997, 94(1): 175-179.
- [20] Massy W F. Principal components regression in exploratory statistical research. *Journal of the American Statistical Association*, 1965, 60(309): 234-256.
- [21] 张凤莲. 多元线性回归中多重共线性问题的解决办法探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [22] 方恺, Reinout H. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(12): 1700-1707.
- [23] 方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较. *地理研究*, 2013, 32(9): 1657-1667.
- [24] 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.
- [25] 刘义军, 卢武强, 李荣. 湖北省生态足迹计算与分析. *华中师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 38(2): 259-262.
- [26] 徐中民, 张志强, 程国栋, 陈东景. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. *应用生态学报*, 2003, 14(2): 280-285.
- [27] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标. *生态学报*, 2013, 33(1): 267-274.
- [28] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication. *M. D. Computing: Computers in Medical Practice*, 1997, 14(4): 306-317.
- [29] 李艳玲, 戴冠中, 朱烨行. 基于类别空间模型的文本倾向性分类方法. *计算机应用*, 2007, 27(9): 2194-2196.
- [30] 曾光明, 杨春平, 曾北危. 环境影响综合评价的灰色关联分析方法. *中国环境科学*, 1995, 15(4): 247-251.
- [31] 杨屹, 樊明东. 中国丝绸之路经济带沿线省份生态足迹时空差异及公平性分析. *生态学报*, 2019, 39(14): 5040-5050.
- [32] 陈晨, 夏显力. 基于生态足迹模型的西部资源型城市可持续发展评价. *水土保持研究*, 2012, 19(1): 197-201.
- [33] 马彩虹, 赵晶. 基于足迹家族的青海省资源环境压力定量评估. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1248-1256.
- [34] 皮泓漪, 祖拜代·木依布拉, 夏建新. 基于生态足迹理论的宁夏可持续发展研究. *中央民族大学学报: 自然科学版*, 2017, 26(4): 78-85.
- [35] 杨屹, 加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化. *生态学报*, 2015, 35(24): 7987-7997.
- [36] 于洪涛. 新疆生态足迹动态变化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆财经大学, 2015.
- [37] 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.