

DOI: 10.5846/stxb201903200523

杨雪荻,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).

Yang X D, Bai Y P, Che L, Qiao F W, Zhou L. Spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological security pattern in Gansu Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14).

甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析

杨雪荻¹, 白永平^{1,*}, 车磊², 乔富伟¹, 周亮³

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093

3 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070

摘要:生态安全是维持经济社会与生态可持续发展的重要保障。西部大开发与“一带一路”倡议实施以来,西部城镇发展迅速,经济效益大幅提高,生态环境却面临极大挑战。因此,以西北地区重要生态屏障区甘肃省为研究对象,基于“省公顷”概念改进传统生态足迹模型,评价2005—2015年甘肃省生态环境演变特征和生态安全状况,定量解析其驱动因素。结果表明:(1)2005—2015年甘肃省人均生态足迹与人均生态承载力分别由0.51 hm²/人和0.22 hm²/人增加至0.69 hm²/人和0.47 hm²/人,生态承载力增加速度较快,但自然资源依旧呈“供小于求”的状态。(2)甘肃省人均生态赤字由-0.20 hm²/人变化至-0.33 hm²/人,生态恶化程度不断加深。生态压力也由2.07升至2.74,生态安全处于很不安全状态,总体“西北高、东南低”的格局与城镇化布局相一致。(3)各影响因素对生态安全变化的决定力存在明显差异,其中人均GDP对生态安全扰动最强,其余因素影响程度依次为“人均能源消费>第二产业占GDP比重>城镇化率>人口密度>科教支出占总支出比”。

关键词:生态安全;“省公顷”;时空格局;地理探测器;甘肃省

Spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological security pattern in Gansu Province

YANG Xuedi¹, BAI Yongping^{1,*}, CHE Lei², QIAO Fuwei¹, ZHOU Liang³

1 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3 Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Ecological security is an important guarantee for maintaining economic, social and ecological sustainable development. Since the implementation of the Western Development and the “One Belt, One Road” strategies, the western cities and towns have developed rapidly and the economic benefits have been greatly improved. However, the ecological environment is facing great challenges. Therefore, this paper takes Gansu Province, an important ecological barrier area in the northwestern region, as the research object. By improving the traditional ecological footprint model based on the concept of “provincial hectare”, we evaluated the ecological environment evolution characteristics and ecological security status from 2005 to 2015 and quantitatively analyzed its driving factors. The results showed that (1) the per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity of Gansu Province increased from 0.51 hm²/person and 0.22 hm²/person to 0.69 hm²/person and 0.47 hm²/person from 2005 to 2015, respectively. The ecological carrying capacity increased at a faster rate, but the natural resources were still in a state of “supply less than demand”. (2) The per capita ecological deficit in

基金项目:国家自然科学基金(40771054);甘肃省重点研发计划(18YF1FA052);高等学校博士学科点专项科研基金联合资助课题(20106203110002)

收稿日期:2019-03-20; **网络出版日期:**

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 963849917@qq.com

Gansu Province changed from $-0.20 \text{ hm}^2/\text{person}$ to $-0.33 \text{ hm}^2/\text{person}$, and the degree of ecological deterioration increased continuously. The ecological pressure also rose from 2.07 to 2.74, and the ecological security was in a very unsafe state. The overall pattern of “northwest high and southeast low” was consistent with the urbanization layout. (3) There were significant differences in the decision-making power of various influencing factors on ecological security change. Among them, per capita GDP had the strongest disturbance to ecological security. The other factors affected the degree of per capita energy consumption > the proportion of secondary industry to GDP > urbanization rate > population Density > Science and education expenditure as a percentage of total expenditure.

Key Words: ecological security; “sub-national hectare”; spatio-temporal pattern; GeoDetector; Gansu Province

生态安全是国家安全体系的重要基石。黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带,其河源流域位于西北生态脆弱地区。因此,西北地区的生态安全状态将对我国主要河流及流经省份的生态与经济发展产生巨大影响^[1]。西北地区尤其是西北干旱内陆地区在追逐城市化和工业化带来经济利益的同时,逐渐加重了生态安全的压力。由于自然资源开采消耗导致的一系列环境污染问题不断威胁着人类生存空间和人体健康,因此,如何防止生态环境恶化,减少自然资源消耗,平衡生态保护—经济发展成为了生态安全的关注重点。

生态安全是基于“土地健康”的概念延伸出来的评价指标^[2]。随着生态安全研究的不断深入,其研究方法在结合相关学科的研究成果上日益完善,已从简单的定性描述,发展到现在的定量评价^[3]。传统上研究者往往基于生态系统结构变化进行生态安全评价,通过建立景观生态模型评价生态脆弱性^[4-6],利用遥感手段检测生态系统变化^[7-8]。然而,关注生态变化割裂了人与自然的耦合关系,生态文明建设是关系人民福祉的长远大计,应以人为本考虑生态安全问题。近年来,一些研究开始将人类活动纳入生态安全评价体系中,基于人地关系的分析逐渐受到关注。有学者从经济学角度量化生态产品价值,并基于人类福祉角度建立生态系统服务模型,刻画生态安全空间异质性^[9-10],也有学者构建 PSR 模型识别引起生态安全变化的驱动因素^[11-13]。但较少学者考虑生态空间供给与生态系统服务需求之间的联系及其在区域生态安全中的作用,基于此,本文旨在通过资源供给能力和人类消耗总量分析,有机链接生态脆弱区和人类需求空间,直观分析生产生活对生态压力状况的影响。

目前,基于供需视角评价生态安全应用最广泛的是生态足迹法^[14-17],该方法侧重于研究自然资源供给与利用问题产生的资源性短缺,以及由此带来的生态安全问题。甘肃省地处我国西北干旱内陆地区,且位于长江、黄河上游地区^[18],不仅是《全国主体功能区规划》确定的“两屏三带”区,在全国生态安全战略格局中又是“青藏高原生态屏障”、“黄土高原—川滇生态屏障”和“北方防沙带”的重要组成部分,也是国家重要生态功能区,在西北乃至全国有非常重要位置。由于特殊的地理位置导致的资源稀缺和资源利用不当导致的生态脆弱,使得甘肃省成为生态足迹研究最早的区域,已有了大量研究结果:包括基于能值足迹的可持续研究、基于水足迹的植被研究、基于碳足迹的农业发展研究^[19-22]等。与已有研究不同的是,本文基于传统生态足迹对甘肃省的产量因子和均衡因子进行了本地化修正,以“省公顷”为计量单位,立足于区域生态足迹的时空演变特征,建立生态安全评价体系,进而把握影响区域生态安全的因素,从理论上补充、完善生态足迹在大尺度、时空分析方面的不足。以期为甘肃省生态安全提供决策支撑,对于干旱区生态可持续发展提供科学借鉴与理论指导。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

本文涉及甘肃省 86 个县(市、区)生物资源消费和能源资源消费共选取小麦、玉米、油料等 21 种生物资源消费项目以及原煤、石油、天然气、电力 4 种能源消费项目,数据均来自《甘肃省统计年鉴》(2006、2011、2016 年)和《中国统计年鉴》(2006、2011、2016 年)。由于使用“省公顷”需要对因子重新计算,涉及生物产品

单位热值均来自《农业技术经济手册(修订本)》,个别没有的生物产品单位热值以近似生物产品的热值代替。影响机制中涉及的数据均来源于《中国城市统计年鉴》(2006、2011、2016年)。

1.2 研究方法

本文基于“省公顷”对传统的生态足迹方法进行改进,重新计算研究区的产量因子和均衡因子,能更准确地反映生态盈亏情况^[23-24]。对甘肃省 2005 年、2010 年和 2015 年的计算结果进行空间分析和空间统计分析,得到生态压力标准差椭圆,并对研究区压力中心的空间动态变化进行分析,并结合地理探测器^[25]解析甘肃省生态安全变化的驱动力。甘肃省生态安全的测度方法包括:人均生态足迹、人均生态承载力、生态盈亏、生态可持续(Ecological sustainability index, ESI)、生态压力指数(Ecological tension index, ETI)这 5 个指标。具体计算方法如表 1 所示。

表 1 生态安全计算方法

Table 1 The methods of ecological security index

名称 Name	计算方法 Computing methods	意义 Significance
人均生态足迹 Ecological footprint per capita	$ef = \sum_{j=1}^6 \times \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{c_j}{p_j} \right) \times r_i \right]$	衡量人类对能源消耗和自然资源利用度
人均生态承载力 Ecological capacity per capita	$ec = (1 - 0.12) \times \sum_{j=1}^6 a_j \times r_i \times y_i$	指一个区域可利用的自然资源能够承载的极限人口
均衡因子 Equivalence factor	$r_i = p/p_i$	表示不同生产性土地的生产力差异
产量因子 Yield factor	$y_i = \bar{p}_i/p_i$	表示当地和全国生产性土地生产力的差别
生态赤字 Ecological deficit	$ed = ec - ef$	用来判断区域生态安全状态
生态可持续指数(ESI) Ecological sustainability index	$ESI = ec / (ec + ef)$	表示某一地区生态可持续发展的状况。
生态压力指数(ETI) Ecological tension index	$ETI = ef / ec$	代表了区域承压程度

j 为所消费商品的生产土地类型, c_j 第 j 类产品人均年消费量, p_j 为 i 种消费商品平均生产力, a_j 为人均某类生产性土地面积, p_i 为全国第 i 类生物生产性土地的平均生产能力, p 为全国生产性土地的生产力, \bar{p}_i 为地区第 i 类生产性土地生产力

采用上述均衡因子和产量因子的计算方法,对“省公顷”生态足迹法中的两个关键参数均衡因子和产量因子进行本地化处理,最终得到甘肃省耕地、林地、草地、水域、建设用地和化石能源用地的修正结果,详见表 2。

表 2 省公顷生态足迹均衡因子和产量因子

Table 2 Ecological footprint equilibrium factor and yield factor in province hectare

	均衡因子 Equilibrium factor			产量因子 Yield factor		
	2005 年	2010 年	2015 年	2005 年	2010 年	2015 年
耕地 Plough	1.88	2.21	1.40	0.81	1.03	1.32
林地 Woodland	0.14	0.08	0.05	0.60	1.15	0.43
草地 Grassland	0.12	0.18	0.27	0.10	0.09	0.11
水域 Water area	0.58	0.34	0.19	0.74	0.89	0.92
建设用地 Construction land	1.88	2.21	1.40	0.81	1.03	1.32
化石能源地 Fossil land	0.14	0.08	0.05	—	—	—

根据本文计算结果并参考以往资料文献将安全等级 T 分为 7 个级别^[26]: 很安全 (<0.50)、安全 (0.51—1.00)、较安全 (1.01—1.50)、稍不安全 (1.51—2.00)、不安全 (2.01—2.50)、很不安全 (2.51—3.00)、恶劣 (>3.01) 六个等级。

2 结果与分析

2.1 人均生态足迹

甘肃省人均生态足迹变化较显著。从生态足迹构成上来看(图1),2005—2015年化石能源及建筑用地比重逐渐上升,分别从9.6%和11.13%上升至13.87%和15.62%。生态用地比重总体呈下降趋势,其中林地降幅最大(3.11%),草地次之(2.1%),耕地降幅最小(1.8%)。从生态足迹总体变化趋势来看(图2),2005—2010年全省人均生态足迹由0.51hm²/人上升至0.62 hm²/人,涨幅21.5%。2010—2015年人均生态足迹涨幅11.4%,上涨至0.69hm²/人。从区域来看,2005—2010年,四大区域生态足迹涨幅大小依此为“高原边缘地区>陇中地区>陇东南地区>河西地区”,其中仅河西地区呈下降趋势,下降至0.32 hm²;2010—2015年各区域人均生态足迹中高值区整体增多,涨幅变化明显,呈现出“河西地区>陇东南地区>陇中地区>高原边缘地区”的特征。

2.2 人均生态承载力

甘肃省人均生态承载力变化整体也呈线性增长趋势(图2)。2005—2010年甘肃省人均生态承载力由0.

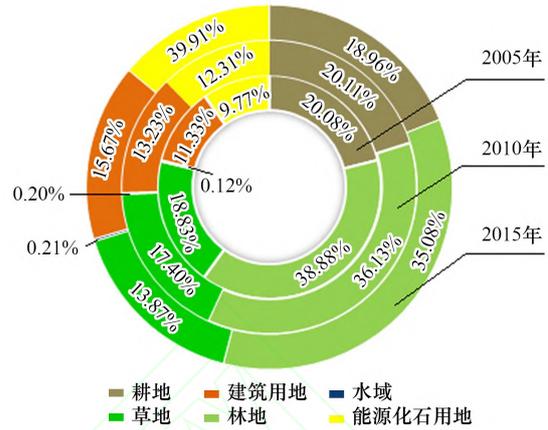


图1 甘肃省生态足迹构成

Fig.1 Composition of ecological footprint in Gansu Province

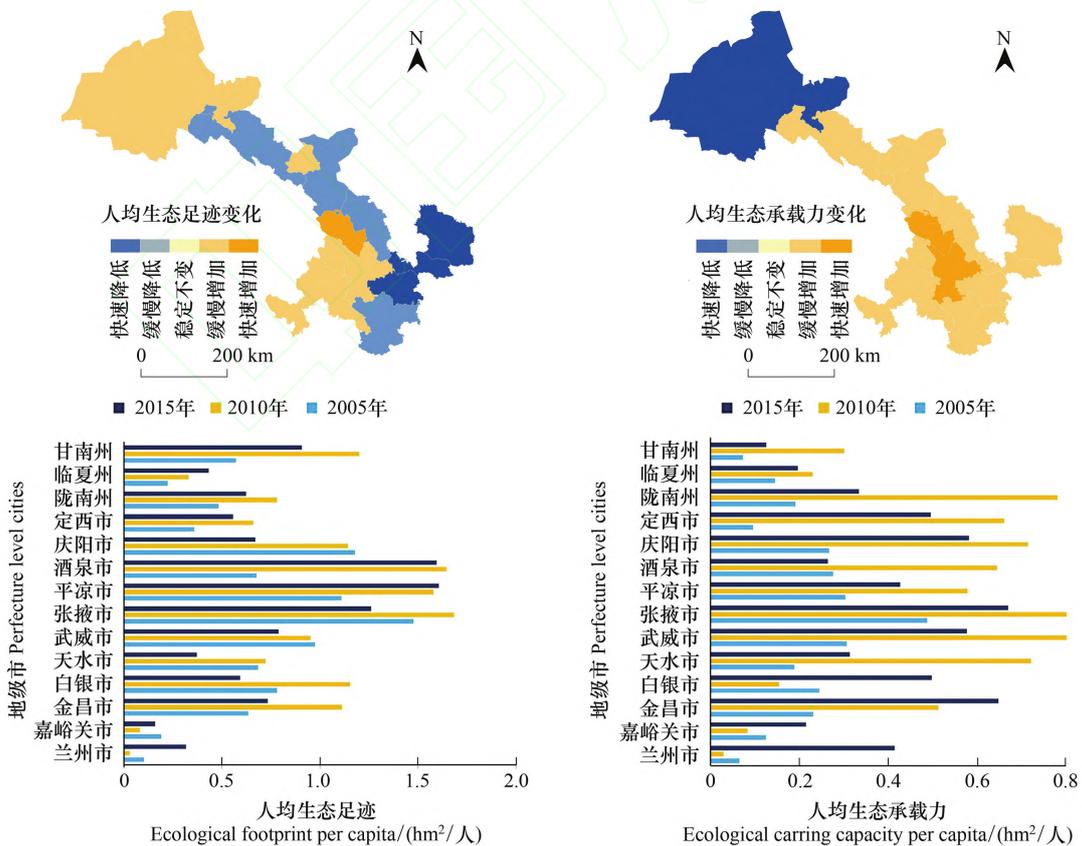


图2 2005—2015年人均生态足迹和人均生态承载力变化

Fig.2 Per capita ecological footprint and per capita ecological carrying capacity change during 2005—2015

29 hm²/人上升至 0.38 hm²/人,涨幅 31.8%。2010—2015 年人均生态承载力涨幅 23.7%,上升至 0.47hm²/人。四大区域人均生态承载力差异明显。2005—2010 年,生态承载力涨幅大小依次为“陇东南地区>陇中地区>高原边缘地区>河西地区”,与生态足迹变化相同,仅河西地区呈下降状态;2010—2015 年各区域生态人均承载力整体呈上升趋势,涨幅变化依次为“高原边缘地区>河西地区>陇东南地区>陇中地区”。2010 年以后,可更新资源提高,导致人均生态承载力有所上升且在一定时间内逐渐恢复。

2.3 生态安全评价

2.3.1 时空分布特征

利用生态盈亏状况和生态压力可以共同反映出生态安全状况。研究期内,甘肃省生态盈亏状态一直呈赤字,较不安全状态且时空变化明显(图 3)。具体表现为:2005—2010 年甘肃省生态赤字从-0.20 变至-0.23,2010—2015 年全省生态赤字程度进一步加深至-0.33。这表明随着城市化的发展,研究区能源消耗速度较快,可利用资源减少,生态恢复较慢,造成生态需求和供给不平衡。这一现象也可从甘肃省生态足迹的构成比重得到印证,即能源化石用地、建设用地比重不断上升,生物资源用地比重不断下降。2005—2015 年,甘肃省建设用地增加较多,增幅高达 1.59 倍,远远高于全国平均增幅(1.48)。研究区年均人口增长 3.85%,低于全国增长水平(4.99%),空间的城市化速度快于人口的城市化,大量建筑用地占用生态用地,导致生态生产性土地生产力直接损失。能源化石用地比重在研究期间上涨了 42.3%,人均生态足迹从人均生态承载力的 1.16 倍增加到 3.12 倍,而人均生态承载力变化较小,导致生态赤字加剧。可见化石能源大幅增长是导致生态赤字增加的主要原因。特别是河西地区的酒泉市和陇中大部分地区生态赤字均呈较快上涨趋势,生态赤字逐年加深,主要是由于其作为工业发展的核心区域,煤炭、天然气、石油等能源的消耗都会向自然环境排放 CO₂,而这需要大量相应的化石能源用地来“吸收”。同时,工业化程度的不断加深导致占用生态用地不断减少,依靠能

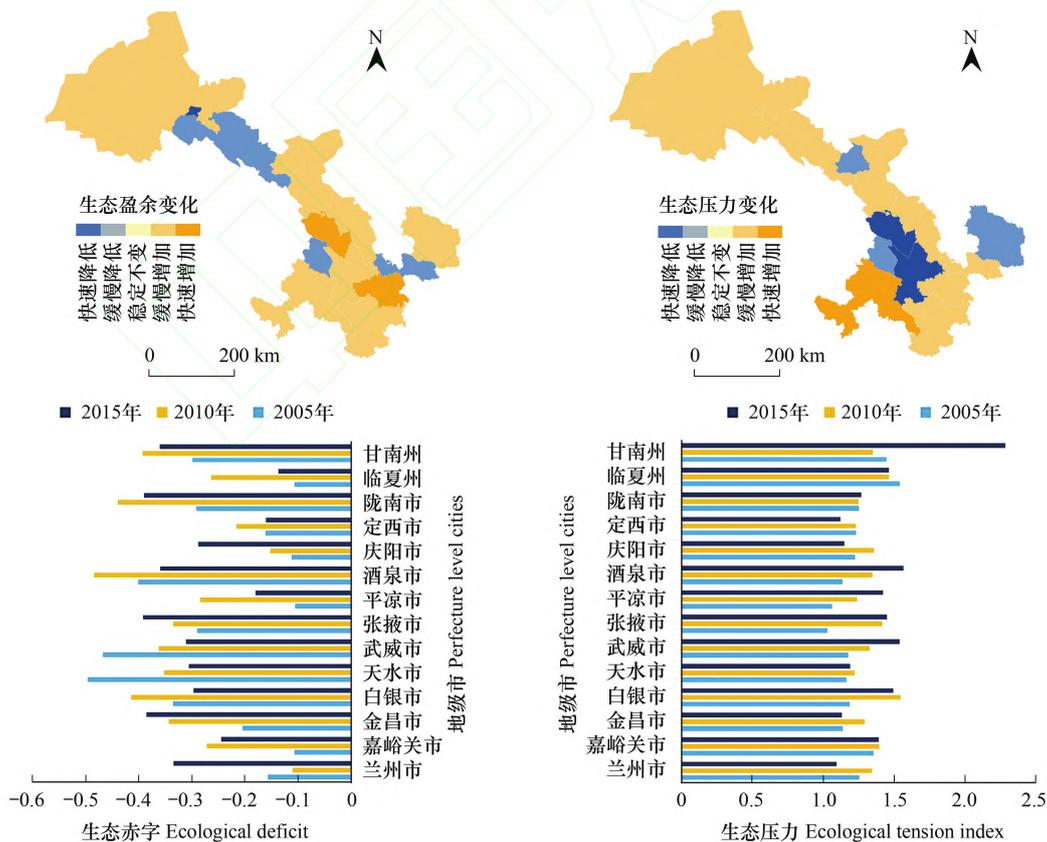


图 3 2005—2015 年生态盈余和生态压力变化

Fig.3 Changes in ecological deficit and ecological tension during 2005—2015

源消耗和工业化的经济发展模式也严重破坏了生态环境,且区域内环境承载力与开发强度的矛盾十分突出。

为了直观反映生态安全状态,利用生态压力对甘肃省生态安全进行评价。对比分析 2005—2010 年甘肃省生态压力指数,可知全省生态压力虽然区域性明显(图 3),分布不均但整体呈上升趋势,生态压力从 1.27 升至 1.40,生态安全等级仍为不安全;2010—2015 年生态压力变化至 1.64,处于很不安全状态。即人类活动超过了自然环境的承载能力,其中高原边缘地区影响显著,生态压力从 1.42 升至 1.97,属于快速增长,高原边缘地区虽然有太子山自然保护区、祁连山自然保护区、尕斯库勒湖—则岔自然保护区等 14 个自然保护区,但是保护区周围的生态压力相反高于其他地区,生态安全较差。主要由于保护区周围人口密集程度高于其他地区,传统放牧业导致草场退化严重,生产生活对自然生态资源依赖较大,自然保护区就成为了当地居民的“生态银行”。

2.3.2 时空转移特征

利用安全重心对 2005、2010 和 2015 年甘肃省生态变化轨迹进行空间分布制图(图 4)。由此可知,安全重心在空间分布上较集中,总体呈现“西南—东北”走向的空间分布格局,重心转移距离 12.9 km。受人类活动的影响,重心逐渐向西北方转移,2010—2015 年标准差椭圆的短轴与长轴均有所增加,且短轴增长幅度大于长轴,这表明研究区生态安全范围在东西方向和南北方向延伸,横向延伸趋势强于纵向延伸趋势。生态安全重心在 2010—2015 年向西南转移了 7.2 km,这种转移趋势说明生态安全后期变化程度比前期明显。由于 2005—2010 年研究区西南部遭到大量开垦,耕林地面积明显减少,农田和建筑面积逐渐增加,同时随着机械化程度的提高与交通条件的发展,生态压力和人为活动成正相关关系,人类活动频繁导致生态压力不断增高,从而致使生态安全等级降低。2010—2015 年研究区西南部围绕建设环境友好型社会,开展了一系列节约生态资源,保护生态环境,抓好生态文明等措施,西南部生态得到了极大恢复。相比于此,研究区西北部自然生态环境问题本就突出,外加长期过度开采,使得西北部人地环境破坏严重,生态环境问题显著,生态安全等级降低。因此造成甘肃省西北部的生态压力指数超过东南部,生态安全重心向西北移动。

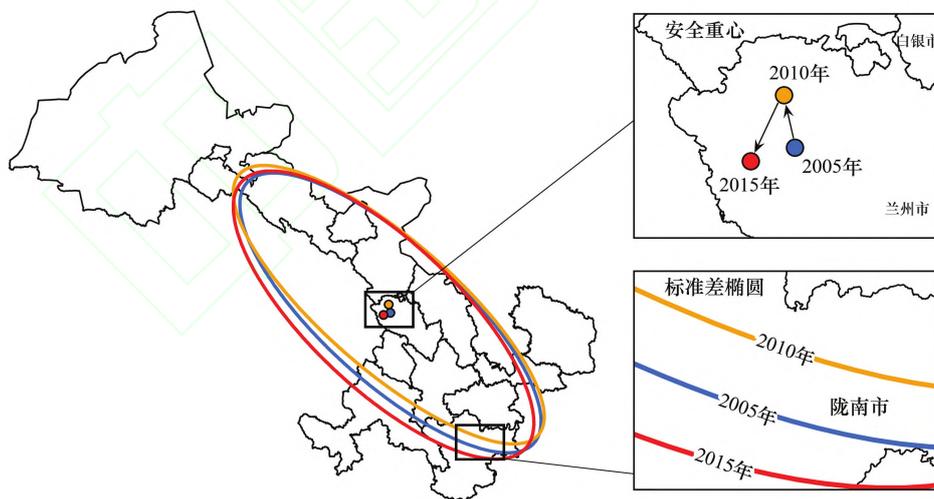


图 4 甘肃省生态安全重心移动轨迹

Fig.4 The trajectory of the center of gravity of ecological security in Gansu Province

2.3.3 驱动因素

生态安全变化不仅是生态问题,经济社会因素也是其动态演变的深层驱动因素。同时,由于自然因素的变化具有刚性,短期内影响生态足迹变化的主要是经济社会因素,因此,本文从经济社会角度对生态安全的驱动因素进行研究。自变量选取考虑了以下三个方面:首先,由于经济发展对生态环境有很强的依赖性,从而会对生态安全变化产生重要影响。基于此,选取城镇化率和人均 GDP,分别表示经济发展水平和经济状况。其

次,人口数量决定了生态需求的高低^[27],故选取人口密度作为代表。最后,“资源—生产—消费—废物—资源”不仅是生态足迹的研究视角还是一个连锁反应,会对区域内生态系统产生较大影响^[28]。选取第二产业占 GDP 比重,科教支出占总支出比和人均能源消费,分别代表产业结构变化,高新技术产业的发展水平^[29]和消费结构变化。地理探测器的结果显示,各因子的决定力有明显差异,由高到低依次为:人均 GDP(0.62)、人均能源消费(0.60)、第二产业占 GDP 比重(0.55)、城镇化率(0.51)、人口密度(0.35)、科教支出占总支出比(0.31)。

经济发展(GDP)是影响生态安全的主要因素,经济增长导致建设用地需求增加,引起大规模土地开发。同时,甘肃省经济发展主要依靠传统化工企业,以陇中地区为例,作为经济发展的核心区,兰石、兰化等企业 2018 年底带动经济环比增长 5.4%,成为经济总量扩张的龙头企业。传统化工企业资源回收利用程度很低,污染物生产量和排放量较多,对生态环境影响较大。能源消费对生态安全影响次之,原因主要体现两方面,一方面是甘肃省重利用轻建设的生产方式,作为传统的资源型工业发展地区,高能耗产业是经济发展的基础。另一方面是居民消费结构也逐渐向高耗能方向发展,各种家用电器、私人交通工具数量大幅增长都使能源消耗增加,生态压力不断加深。产业结构转变可以体现自然资源的利用程度。第二产业会排放大量 CO₂、废水和消耗一定数量的不可再生能源,因此第二产业结构比重的变化,特别是重化工行业的发展可以直接导致化石能源用地和污染物排放量增加,进而影响生态环境,威胁生态安全。

甘肃省城镇化率从 2005 年的 28.61% 增长至 2015 年的 43.19%,建筑业总产值增加 7%。随着城市化规模持续扩大,人类对自然资源空间占用增多,再加上甘肃省前期以占用牺牲自然资源为代价推动城镇化发展,都促使了生态环境恶化,这也与甘肃省生态压力研究结果相一致。人口密度对甘肃省生态安全影响较小,主要是由于人口密度不是直接影响区域生态安全的因素,多以农业生产、工业发展等间接对区域产生影响。科教支出占比属于“软产业”主要依靠技术信息,对生态安全影响最小。但研究期内甘肃省对产业技术创新扶持力度较小,对生态产业重视程度较弱,总体成果较不显著。

3 讨论

3.1 生态可持续发展状态

实现可持续发展是 21 世纪全球发展的共识,也是全球需要面临的重要挑战之一。可持续发展意味着自然资本存量不能减少,因此为了进一步刻画甘肃省全省资源利用状况,本文运用可持续指数(Ecological sustainability index, ESI)进一步分析地区生态可持续利用程度,并对可持续程度进行划分^[29-31],其结果如表 3 所示。2005—2010 年甘肃省 4 个地区生态可持续程度不同:陇东南地区上涨幅度最大,上升 24%,呈不可持续状态;其次是陇中地区上涨幅度较大,上升 14%,呈弱不可持续状态;河西地区上涨幅度最小同样也处于弱不可持续状态;高原边缘地区不增反降,下降 6%,呈中等不可持续状态。2010—2015 年甘肃省部分地区生态可持续性趋好,陇中地区和陇东南地区略有上升,但仍处于弱不可持续状态;河西地区和高原边缘地区则均有下降,呈中等不可持续状态。这表明甘肃省在 2005—2010 年的城市化发展对生态系统造成了较大压力,即城市或城镇扩大侵占了大量的绿色生态空间,但资源和能源消耗持续增加,自然环境很难代谢掉工业化、城市化产生污染导致生态不可持续。而 2010—2015 年,随着“坚持人与自然和谐共生”这一科学自然观的不断深化,城市化发展中对生态环境的关注不断提升,自然资源的承载压力有所减轻,生态可持续度逐渐提高。

表 3 生态可持续性等级划分标准

Table 3 The classification standard of ecological sustainability

等级 Level	I	II	III	IV	V	VI
生态可持续指数 ESI	ESI ≥ 0.8	0.65ESI < 0.8	0.5ESI < 0.65	0.35 ≤ ESI < 0.5	0.2 ≤ ESI < 0.35	ESI < 0.2
生态可持续程度 Ecological sustainability	强可持续	中等可持续	弱可持续	弱不可持续	中等不可持续	强不可持续

3.2 不确定性和局限性

从生态足迹法的视角探讨生态安全问题,在自然资源需求与供给两方面评估区域内生态系统结构、功能和过程,可以从宏观上对西北干旱区整体生态状况进行了解。因此,进一步的研究应集中在以下三个方面。首先,基于“省公顷”的生态足迹相比传统的生态足迹已经在算法上有所提升,但是由于资料限制以及甘肃省原本的产业情况,对水产品的讨论较少,使得生态足迹的水域部分有一定影响;另外,生态足迹中建设用地的部分仅用电力数据代表,建设用地部分数值可能偏小。其次,生态足迹可以揭示自然资源的消耗和供给,有利于加深对生态安全状况的认识。但研究方法侧重于地球陆地生物生产量而忽略了地下水资源、全球气候变化、臭氧层破坏等一系列其他生态效应对生态安全的影响,应加入水足迹、能源足迹等全面量化分析,以表征人类活动对不同自然资源的影响。最后,论文采用地理探测器探寻生态安全,由于影响因子的可获取性,对驱动力分析不够全面。此外,通过模拟未来生态状况有效预防和保证生态安全、在不同环境政策视角下制定多样的生态保护工程、以生态可持续为前提寻求经济和社会发展的新方案等均是未来研究需要关注与克服的领域。

4 结论

生态安全和人类生活联系紧密,在改善传统生态足迹的基础上对甘肃省 15 年生态安全进行评估,并引入地理探测器定量探究不同经济社会因素和自然基底要素对生态安全的影响,对比不同区域差异,深入解析其驱动机理。研究结论如下:1)2005—2015 年,甘肃省生态压力指数从 1.18 升至 1.54,变化幅度较大,生态安全形势呈现恶化趋势,生态安全问题亟待解决;2010—2015 年生态压力指数下降为 1.44,虽得到了缓解,但生态安全等级依旧属于较不安全状态,生态安全问题依然突出,不容乐观。2)随着“一体两翼”发展工业空间布局发展,生态不安全区域从甘肃省的南部边缘地区,逐渐扩展至西北部边缘地区,15 年间生态安全重心也呈“西北—东南”分布。因此,应坚持生态优先,做好河西和高原边缘地区的生态建设工作,提高生态安全程度。3)研究期内,除了 GDP 增长引起的生态安全隐患外,能源消费、第二产业占 GDP 比重、城镇化率、人口密度、科技支出占总支出的比重等也不同程度的影响了生态安全,为了有效的改善甘肃省生态环境,进而减少生态隐患,加快甘肃省经济和生态共同发展,可以建立多样的生态工程系统,差别化制定管理措施。

参考文献 (References):

- [1] 幸赞品, 颜长珍, 冯坤, 修丽娜, 钱大文, 谢家丽. 1975—2015 年甘肃省白龙江流域自然保护区生态系统服务价值及其时空差异. 中国沙漠, 2019, 39(3): 172-182.
- [2] 高卿, 骆华松, 王振波, 宋金平. 美丽中国的研究进展及展望. 地理科学进展, 2019, 38(7): 1021-1033.
- [3] 陈利顶, 景永才, 孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [4] 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研究. 生态学报, 2019, 39(17): 6522-6533.
- [5] 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.
- [6] Ma L B, Bo J, Li X Y, Fang F, Wen C 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Cotter M, Häuser I, Harich F K, He P, Sauerborn J, Treyde 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.
- [10] 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, 2019, 39(19): 7057-7066.
- [11] 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.
- [12] 田璐, 邱思静, 彭建, 胡熠娜, 贾靖雷, 毛祺. 基于 PSR 框架的内蒙古自治区沙漠化敏感性评估. 地理科学进展, 2018, 37(12):

1682-1692.

- [13] 修春亮,魏冶,王绮.基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估.地理学报,2018,73(12):2315-2328.
- [14] 杨屹,胡蝶.生态脆弱区榆林三维生态足迹动态变化及其驱动因素.自然资源学报,2018,33(7):1204-1217.
- [15] 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.
- [16] 张志强,徐中民,程国栋,陈东景.中国西部12省(区市)的生态足迹.地理学报,2001,56(5):599-610.
- [17] Yi Y, Sun L, 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.
- [18] 纪学朋,白永平,杜海波,王军邦,周亮.甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性.生态学报,2017,37(17):5861-5870.
- [19] 刘松,王效琴,胡继平,李强,崔利利,段雪琴,郭亮.施肥与灌溉对甘肃省苜蓿碳足迹的影响.中国农业科学,2018,51(3):556-565.
- [20] 赵先贵,赵晶,马彩虹,肖玲,李爱英.基于足迹家族的甘肃省生态文明建设评价.干旱区研究,2016,33(6):1254-1261.
- [21] 潘竟虎,冯娅娅.甘肃省潜在生态承载力估算.生态学杂志,2017,36(3):800-808.
- [22] 侯庆丰.基于水足迹的甘肃省农作物种植结构优化分析.中国沙漠,2013,33(6):1921-1927.
- [23] 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.
- [24] 李姣,周翠烟,张灿明,刘富国,汪杰.基于生态足迹的湖南省洞庭湖生态经济区全要素生态效率研究.经济地理,2019,39(2):199-206.
- [25] 周亮,周成虎,杨帆,王波,孙东琪.2000-2011年中国PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素解析.地理学报,2017,72(11):2079-2092.
- [26] 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.
- [27] 王贝贝,丁明军,管琪卉,艾嘉会.基于格网的南昌市生态环境脆弱性评价.生态学报,2019,39(15):5460-5472.
- [28] 臧正,郑德凤,孙才志.区域资源承载力与资源负荷的动态测度方法初探——基于辽宁省水资源评价的实证.资源科学,2015,37(1):52-60.
- [29] 朱道才,任以胜,徐慧敏,陆林.长江经济带空间溢出效应时空分异.经济地理,2016,36(6):26-33.
- [30] 任志远,黄青,李晶.陕西省生态安全及空间差异定量分析.地理学报,2005,60(4):597-606.
- [31] 唐呈瑞,逯承鹏,杨青,姜璐,任婉侠,薛冰.东北老工业区生态安全动态演变过程及驱动力.生态学报,2017,37(22):7474-7482.