

# 基于资源流动与生态载体层面的生态安全研究

严维<sup>1,2</sup>, 刘艳中<sup>1,2</sup>, 陈勇<sup>1,2</sup>, 张祚<sup>3</sup>, 朱晓南<sup>1,2</sup>, 宋改凤<sup>1,2</sup>

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院, 武汉 430081; 2. 武汉科技大学

冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 武汉 430081; 3. 华中师范大学 公共管理学院, 武汉 430079)

**摘要:**为了解决现有研究对生态载体安全状态研究缺失导致的生态安全判断不准确的问题,以临湘市为例,依据生态安全内涵,首先运用改进的生态足迹法,完成资源流动层面安全状态的判断,然后结合能值法的理论和系统学方法,构建生态载体安全等级划分体系,完成了生态载体层面安全状态研究,最终得出生态安全评价结果。结果表明:(1)从整体上看,2005—2017 年临湘市在资源流动层面上处于安全状态;生态载体安全等级由 IV-U 级到 II-D 级,生态载体安全状态经历了稳定上升又下降的波动过程,区域生态载体整体现状处于安全状态,因此得出临湘市处于生态安全状态。(2)从地类变化看,2005—2017 年除化石能源用地外,其他地类均处于资源流动安全状态,但生态载体中耕地和水域生产能力下降,状态较不安全,应减少粗放式生产及一味追求产量而忽视边际效益的对化肥、农药的不合理使用,改善载体状态。资源流动和生态载体安全状态的综合判断,能更全面地反映区域生态安全状态,也为区域生态建设发展提供参考。

**关键词:**生态安全;生态足迹法;能值理论;生态载体;临湘市

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0293-07

## Research on Eco-Security Based on Resource Flow and Eco-Carrier

YAN Wei<sup>1,2</sup>, LIU Yanzhong<sup>1,2</sup>, CHEN Yong<sup>1,2</sup>, ZHANG Zuo<sup>3</sup>, ZHU Xiaonan<sup>1,2</sup>, SONG Gaifeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of

Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory of Efficient

Utilization and Agglomeration of Metallurgical Mineral Resources, Wuhan University of Science and Technology,

Wuhan 430081, China; 3. School of Public Administration, Central China Normal University, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the inaccurate judgment of ecological security caused by the lack of research on the security status of ecological carriers in the existing research, Linxiang City was taken as the example. Based on the generally accepted connotation of ecological security, the improved ecological footprint method was used to complete the judgment of the security status at the level of resource flow, and then the theory of emergy method and systematics method were combined to construct the security classification system of ecological carrier to examine the security status of ecological carrier is completed. The conclusion of ecological security evaluation can be obtained. The results showed that: (1) from 2005 to 2017, Linxiang City was in a safe state on the level of resource flow as a whole; the security level of the whole ecological carrier was from level IV-U to level II-D; the security status of the ecological carrier experienced a stable rise and degradation process, and the overall status of the regional ecological carrier was in a safe state, so Linxiang City was in an ecological security state; (2) from the perspective of land type change, in 2005—2017, except for fossil energy land, other land types were in a safe state of resource flow, but the capacities of cultivated land and water area in the ecological carrier were degraded and the state were not safe, so extensive production and excessive use of chemical fertilizer and pesticide that blindly pursued output but ignored marginal benefit should be reduced, so as to improve the carrier state. The comprehensive judgment of resource flow and ecological carrier security state can reflect the regional ecological security state more

收稿日期:2019-12-17

修回日期:2020-01-13

资助项目:国家自然科学基金(41971237,71774066)

第一作者:严维(1996—),男,湖北随州人,硕士研究生,研究方向为区域生态安全。E-mail:yanwei33@foxmail.com

通信作者:刘艳中(1979—),男,江西吕梁人,博士,教授,主要从事资源环境与区域可持续发展研究。E-mail:Liuyanzhong@wust.edu.cn

comprehensively, and also provide reference for the development of regional ecological construction.

**Keywords:** ecological security; ecological footprint method; emergy theory; ecological carrier; Linxiang City

随着构建生态安全型社会战略部署的不断升级,对区域生态安全状态客观、全面的评价显得尤为重要<sup>[1]</sup>。在此背景下,国内学者开展了一系列生态安全理论和方法的研究,旨在识别区域生态安全是否存在问题,提出相关建议。在生态安全内涵的发展上,周鹏<sup>[2]</sup>、景永才<sup>[3]</sup>等从生态系统服务与人类获取角度开展研究;姬翠梅<sup>[4]</sup>、杨京平<sup>[5]</sup>则从人类社会可持续发展以及“经济—生态—社会”的和谐统一角度进行研究;陈国阶<sup>[6]</sup>从人类所赖以生存的自然环境健康的角度进行研究;不同学者分别从不同的视角给出了关于对生态系统内涵的解释。总结来说生态安全主要包括两层含义:一是生态系统与人类系统间的资源供给与需求的安全性,即资源流动安全;二是生态系统载体自身状态安全<sup>[7]</sup>。在生态安全评估模型方法上,有指标体系法,如“PSR”<sup>[8-9]</sup>、“DPSIR”<sup>[10]</sup>等,从社会、经济和生态系统三者耦合的角度,识别判断区域生态安全变化的相互联系;景观生态学方法<sup>[11]</sup>,通过人类活动区域变化对土地利用及结构的影响,分析得出生态安全格局,从而在空间角度分析生态安全状态;生态系统模型方法,如生态足迹法<sup>[12-17]</sup>、能值分析<sup>[18-24]</sup>、资源承载力<sup>[25]</sup>等,通过量化生态系统服务供给变化,表征人类活动对生态环境带来的压力,评估生态安全状态。综合国内研究现状可以看出,现有生态安全研究在生态系统与人类系统资源流动的生态安全层面上较为集中,如生态系统模型方法,但缺少对生态载体安全状态的判断,而区域生态安全状态的全面评估结果是区域安全可持续发展方案制定的重要参考,因此有必要对生态载体安全状态补充研究。

一般认为生态空间中的自然资源均以生态土地和水域为载体,人类对自然资源的开发利用离不开对土地和水域の利用<sup>[26]</sup>。2018年自然资源部部长陆昊在国土空间规划会议中指出:国土空间中的生态载体作为保障生态资源流动安全的前置条件具有重要意义。结合上述观点及已有研究,本文认为生态系统自身安全表现为生态载体的安全,研究生态载体的安全状态,对掌握区域生态安全情况以及指导区域空间规划都有重要意义。因此,本文结合能值法的理论基础,提出生态载体能值产出指数,并据此建立生态载体安全状态判断标准,完成对生态载体安全状态的研究判断,综合改进的生态足迹法得出的资源流动安全性结果,得出较为全面的生态安全结论,并对临湘市进行实证分析。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

2018年临湘市位于 $29^{\circ}10'N-29^{\circ}52'N, 113^{\circ}15'E-113^{\circ}45'E$ ,面积为 $1\,718.60\text{ km}^2$ ,总人口为54.09万人,城镇人口为15万人,乡村人口为39.09万人。地形地貌在分布上存在明显差异,整体地势南高北低,东南部存在连续的山峰,中部地形以丘陵为主,西北部多是平原及湖泊分布为主,土地利用类型丰富多样。该市生物资源丰富,在内生性要素资源存储方面,拥有丰富的林木资源和矿产资源,其中森林覆盖率约为51.11%,林木蓄积量达到 $261.3\text{ 万 m}^3$ 。

2005—2018年全市GDP年均增速始终保持在8%以上,其中与生态资源相关的产出、加工产业为当地的发展提供了较大动力。高速的发展在提升经济的同时,也给临湘市生态环境带来了巨大的压力。为响应国家高质量发展,建设绿色生态中国,区域主体迫切需要掌握区域生态安全的综合情况,包括资源流动及生态载体的安全状态,为区域制定发展计划提供可靠建议。

### 1.2 研究方法

在研究生态系统自身安全状态时,本文参考能值理论中的能量折算标准和能值转换率,将区域生态载体产出能值计算求和,并量化通过人类活动流向生态载体的能值量,分析计算除去人类活动影响后生态载体产出的变化情况,最终揭示生态系统自身安全状态的变化情况。然后结合改进的生态足迹法,计算出消费性生态足迹、生产性生态足迹和生态承载力<sup>[16]</sup>,分析并揭示区域资源需求量及流量消耗安全状态,从而直观表示生态系统与人类系统资源流动的安全性。综合上述两个方面的判断结果,得出关于区域生态安全的完整评价。为实现与生态足迹法研究的一致性,评价生态载体对能量的生产状态,结合生态足迹法中的土地利用分类方式,选用具备生产能力的土地分类,本文中的生态载体对应为具有生态生产性能力的耕地、林地、草地和水域。

1.2.1 能值法理论结合 如图1所示,依据Odum的能值方法的理论,并结合其研究所绘制的“能量系统语言”图例<sup>[18]</sup>,绘制研究所用的区域生态系统能量流动图。该图从系统学的角度考虑绘制,将区域生态环境整体视作一个系统,该系统内部的环境生态子系统在与区域人口构成的人类子系统交互的过程中,核心是生态服务的产生和人类对生态服务的占用,即以

生产活动和消费活动为主,从而形成相互作用。系统中的生态载体通过将外界能量经耕地、草地、森林、水域等生态生产用地封装进生态产品服务,向人类活动

提供消费所需产品。人类消费占用自然资源,并通过人类活动(化肥、农药、废气等)作用于生态载体,影响载体的状态,并改变其对能量的“封装”能力<sup>[21]</sup>。

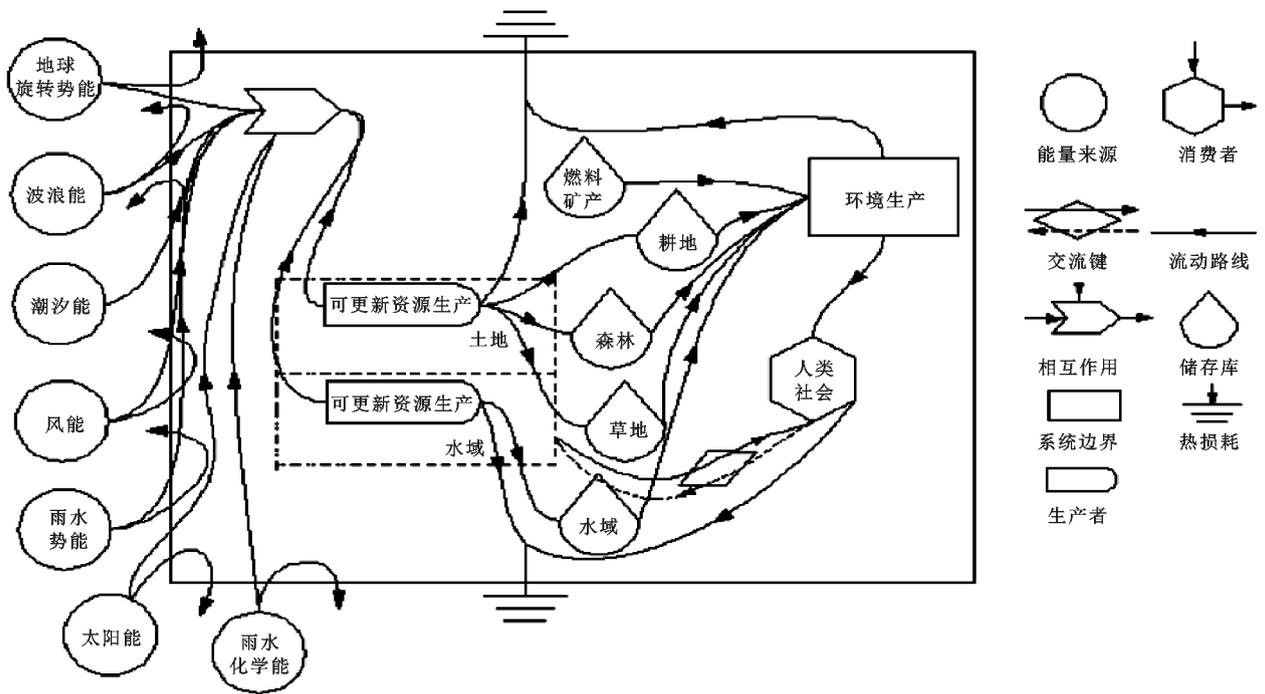


图 1 区域生态系统能量流动

1.2.2 改进的生态足迹模型 在传统生态足迹模型的基础上,将生态足迹扩展划分为消费性生态足迹( $EF_c$ )和生产性生态足迹( $EF_p$ )计算,并计算出对应的消费性生态盈余/赤字( $ED_c$ )以及生产性生态盈余/赤字( $ED_p$ )<sup>[16]</sup>。计算消费性生态足迹用以反映区域人口对资源的消耗情况,以及区域人口对域内以外的生态环境的压力情况。计算生产性生态足迹则可以表征区域人口活动作用于区域内生态系统的强度,并计算生产性生态盈余/赤字,来反映区域生态环境安全可持续性的真实状态。就同一区域而言,可同时分析消费性生态足迹和生产性生态足迹得出区域资源消耗的可持续性,完成对区域资源流动情况的状态描述<sup>[16]</sup>。具体算式<sup>[12]</sup>如下:

$$EF_c = N \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n \left( \frac{c_{ij}}{P_{ij}} \cdot r_j \right) \quad (1)$$

$$EF_p = N \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^n \left( \frac{p_{ij}}{P_{ij}} \cdot r_j \right) \quad (2)$$

$$EC = 0.88 \sum_{j=1}^6 (A_j \cdot r_j \cdot y_j) \quad (3)$$

$$ED = EC - EF \quad (4)$$

式中: $N$ 为人口数; $j$ 为生产性土地的类型; $i$ 为各类生产性土地产出物的类型; $c_{ij}$ 为 $j$ 类生产性土地产出物 $i$ 的人均消费量; $p_{ij}$ 为 $j$ 类生产性土地产出物的人均产出量; $P_{ij}$ 为产出物 $i$ 在 $j$ 类生产性土地的平均生产能力; $A_j$ 为 $j$ 类型土地的实际面积; $r_j, y_j$ 分别

为结构因子和修正的产量因子。保留 12% 的生态承载面积用于保护生物多样性,EC 仅计算去除保留面积后的 88% 生态生产性面积。

1.2.3 生态载体安全等级的能值计算方法 能值计算方法中,研究区域的各种能量被统一为同一太阳能值标准,更为真实准确地反映了研究区生态载体产出状态。其中,能值方法中的能值转换率相比传统价值评价中价值的波动更具有稳定性<sup>[27]</sup>。将区域内的人类活动对生态载体造成的影响量化为能值,计算出除去人类活动影响后,生态载体的能值产出量( $EPA$ ),以及定义的生态载体能值产出指数( $I_{EPA}$ )。计算如下:

$$EPA_j = \sum_{i=1}^n \frac{N \cdot p_{ij}}{A_j} \cdot \alpha_i - \sum_{k=1}^n \frac{U_{kj}}{A_j} \cdot \beta_k \quad (5)$$

$$EPA' = (EPA_{y+1} - EPA_y) / EPA_y \quad (6)$$

$$I_{EPA} = EPA_y / \max(EPA) \quad (7)$$

式中: $EPA_j$ 为 $j$ 类生产性生态载体实际的生产对应的能值(不考虑人类活动附加); $n$ 取值为 4,为 4 小类生产性生态载体; $\alpha_i$ 为出产物 $i$ 对应的能值转换率; $U_{kj}$ 为在 $j$ 类生产性土地中投入物质 $k$ 的物质质量; $\beta_k$ 为物质 $k$ 对应的能值转换率; $EPA'$ 为 $EPA$ 的求导,表示其变化率; $y$ 为对应的年份。根据计算结果,将生态载体安全状态依据表 1 完成分级,归纳出其安全状态。

参考土地安全评价<sup>[28]</sup>和生态安全评价、预警<sup>[29]</sup>

中等级划分的方法,本文构建生态载体产出状态评价标准,分正负两个方向共 8 个级别。将正负方向的前

3 级别等距 0.1 划分,后 1 级非等距划分,并依据研究对各个等级做出状态解释。

表 1 生态载体产出状态分级标准

项目	I 取值范围	状态解释	分级
EPA' > 0	(1, 0.9)	人类活动作用提升,使当前时间节点生产能力提升至最优状态,载体状态安全	I-U
	[0.9, 0.8)	人类活动作用提升,当前时间节点,生产能力逐步提升即将达到最优水平,载体状态安全	II-U
	[0.8, 0.7)	人类活动作用提升,当前时间节点,生产能力逐步提升并有较大提升空间,载体状态安全	III-U
	[0.7, 0)	弱人类活动作用,生产能力有待提高,载体为初始状态,安全	IV-U
EPA' < 0	(1, 0.9)	人类活动作用增强,使当前时间节点生产能力最优状态波动,载体状态波动	I-D
	[0.9, 0.8)	人类活动作用轻微过度,使当前时间节点载体生产能力出现退化趋势,载体状态不稳定	II-D
	[0.8, 0.7)	人类活动作用过度,使当前时间节点载体生产能力退化,载体状态不安全	III-D
	[0.7, 0)	人类活动作用严重过度,载体生产能力严重退化,载体状态极不安全	IV-D

1.2.4 数据来源与参数选取 人口、各类项目的生产及消费数据来源于 2005—2018 年《临湘市统计年鉴》,土地利用数据、土地结构数据取自《临湘市土地利用总体规划数据库》和《土地利用变更数据》。生态足迹法计算中用到的产量因子和均衡因子参考已有的关于临湘市的研究结果<sup>[12-16]</sup>。

消费、生产和人类活动中能值相关数据来自朱玉林等<sup>[22]</sup>的研究及喻锋等<sup>[24]</sup>基于中国能值生态系统

生产总值核算研究中的相关能值指标(表 2)。按照足迹法假设,将临湘市足迹项目折算成 6 大类生态生产性土地面积。将数据中包含稻谷、玉米、油料、薯类等在内的项目划分到耕地中,将茶叶、竹材和木材等项目归为林地中,将肉类和禽蛋等项目归为牧草地中,水域对应项目以水产品为主,将有电力项目数据归为建设用地中,将包含有液化石油气、煤炭和汽油等的能源数据纳入到化石能源用地中。

表 2 能量折算与能值转换标准

项目	内容	计算方法	能量折算标准/ (J · t <sup>-1</sup> )	能值转换率/ (sej · J <sup>-1</sup> )	项目	内容	计算方法	能量折算标准/ (J · t <sup>-1</sup> )	能值转换率/ (sej · J <sup>-1</sup> )	
生产性 土地产物	稻谷		1.55 × 10 <sup>10</sup>	6.02 × 10 <sup>4</sup>	生产性 土地产物	油桐籽		3.86 × 10 <sup>10</sup>	6.90 × 10 <sup>5</sup>	
	小麦		1.57 × 10 <sup>10</sup>	1.14 × 10 <sup>5</sup>		油茶籽		3.86 × 10 <sup>10</sup>	8.60 × 10 <sup>4</sup>	
	玉米		1.65 × 10 <sup>10</sup>	4.53 × 10 <sup>4</sup>		板栗		9.68 × 10 <sup>9</sup>	6.90 × 10 <sup>5</sup>	
	豆类		2.07 × 10 <sup>10</sup>	1.16 × 10 <sup>6</sup>		竹笋干		1.17 × 10 <sup>10</sup>	2.70 × 10 <sup>4</sup>	
	薯类	质量 × 能量	4.20 × 10 <sup>9</sup>	4.54 × 10 <sup>3</sup>		乌桕籽	质量 × 能量	3.86 × 10 <sup>10</sup>	6.30 × 10 <sup>4</sup>	
	油料	折算系数 ×	2.64 × 10 <sup>10</sup>	1.16 × 10 <sup>6</sup>		棕片	折算系数 ×	1.18 × 10 <sup>10</sup>	6.90 × 10 <sup>6</sup>	
	棉花	能值转换率	4.34 × 10 <sup>9</sup>	1.44 × 10 <sup>6</sup>		牲畜肉类	能值转换率	1.50 × 10 <sup>10</sup>	3.94 × 10 <sup>6</sup>	
	麻类		2.93 × 10 <sup>9</sup>	1.41 × 10 <sup>5</sup>		禽肉		2.09 × 10 <sup>10</sup>	1.70 × 10 <sup>6</sup>	
	甘蔗		2.31 × 10 <sup>9</sup>	1.43 × 10 <sup>5</sup>		奶类		3.20 × 10 <sup>9</sup>	2.85 × 10 <sup>6</sup>	
	蔬菜		2.46 × 10 <sup>9</sup>	8.30 × 10 <sup>4</sup>		蜂蜜		1.34 × 10 <sup>10</sup>	8.40 × 10 <sup>4</sup>	
	瓜果		2.46 × 10 <sup>9</sup>	2.46 × 10 <sup>5</sup>		蛋类		8.30 × 10 <sup>9</sup>	3.35 × 10 <sup>6</sup>	
	烟叶		1.88 × 10 <sup>9</sup>	4.20 × 10 <sup>5</sup>		水产品		5.50 × 10 <sup>9</sup>	2.00 × 10 <sup>6</sup>	
	毛类		5.00 × 10 <sup>9</sup>	6.44 × 10 <sup>6</sup>		项目	内容	计算方法	能量折算系数/(sej · t <sup>-1</sup> )	
	水产		5.40 × 10 <sup>9</sup>	2.85 × 10 <sup>6</sup>		人为 投入物	氮肥		3.80 × 10 <sup>15</sup>	
	茶叶		1.88 × 10 <sup>10</sup>	3.36 × 10 <sup>5</sup>			磷肥		3.90 × 10 <sup>15</sup>	
	水果		3.35 × 10 <sup>9</sup>	8.89 × 10 <sup>5</sup>			钾肥	能量 × 能量	1.10 × 10 <sup>15</sup>	
木材		1.20 × 10 <sup>10</sup>	5.84 × 10 <sup>4</sup>	复合肥	折算系数		2.80 × 10 <sup>15</sup>			
竹材		1.57 × 10 <sup>10</sup>	4.40 × 10 <sup>4</sup>	农药			1.60 × 10 <sup>15</sup>			

注:能值折算标准及能值转换率来自于朱玉林<sup>[22]</sup>、严茂超<sup>[23]</sup>、喻锋<sup>[24]</sup>等的研究。

## 2 结果与分析

### 2.1 生态足迹计算结果与分析

对于区域整体的生态足迹和生态承载变化而言(图 2),2012 年之前,消费足迹总体小于生态承载力,表现出消费盈余,从 2012 年开始,消费足迹持续超过

承载力,表现出赤字状态,并在 2012 年之后呈现出赤字逐渐扩大的趋势。2005—2017 年期间,临湘市整体的生产性生态足迹大于其消费性生态足迹和生态承载力,表明临湘市整体的生产活动实际从区域生态系统获取了超过区域人口总体消费的生态生产面积,且资源量的获得水平超过当前的平均生产资源量,但

从生态系统和人类系统间的资源流动分析,临湘市整体处于安全状态。

分析临湘市各地类的足迹构成(图 2—4)可知,生产性生态足迹构成中,耕地、草地和水域提供了 90% 以上的足迹构成,且耕地、草地和水域都处于生产性生态赤字状态。消费性生态足迹中,化石能源、水域及草地一直处于赤字状态,耕地足迹在逐年增加的消费需求下也出现了赤字状态。化石能源用地和建设用地的消费足迹处于不安全状态,但从区域生态载体的土地和水域中超额获取的生态生产面积在满足消费足迹的同时,为区域同外界进行生态生产性面积互换提供支持,保证了区域人口系统和生态系统在资源流动中处于安全状态。

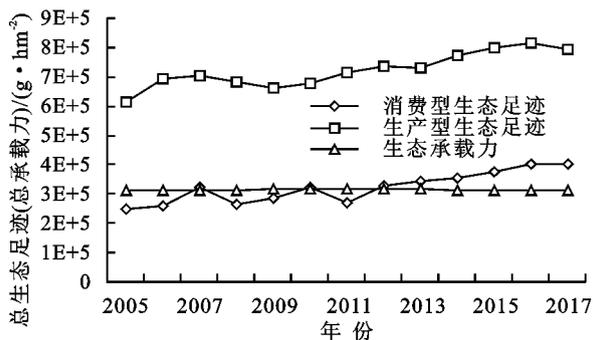


图 2 2005—2017 年临湘市足迹、承载变化

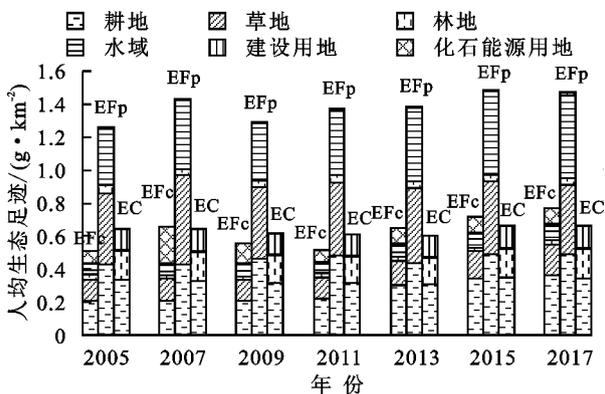


图 3 临湘市各类型土地人均足迹和承载变化

## 2.2 生态载体产出结果及状态分析

结合能值理论,土地和水域两大载体产出能值总量通过能量折算标准和能值转化率计算得出。如图 4—5 所示,2005 年产出总能值为  $3.81 \times 10^{21}$  sej,其中土地载体产出占比为 90.29%,水域载体产出占比为 9.71%;2017 年产出总能值为  $4.94 \times 10^{21}$  sej,其中土地载体产出占比有所下降,为 87.65%,水域载体产出占比为 12.35%,较之前有所上升。临湘市能值产出总量总体上呈现波动上升趋势,且波动变化趋势与其生产性生态足迹变化趋势大体一致。区域人口在消费与发展的需求下,通过人类活动作用于区域生态载体,使得生态载体的能值总量呈现上升趋势。

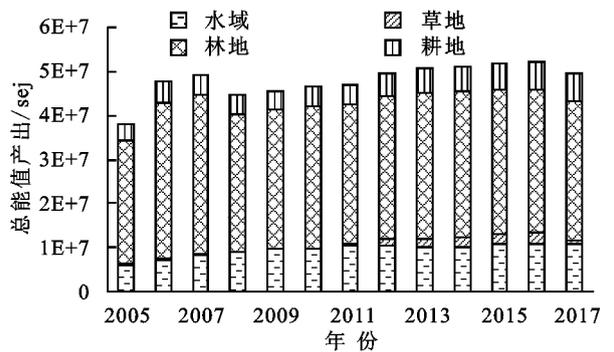


图 4 临湘市各地类能值产出量情况

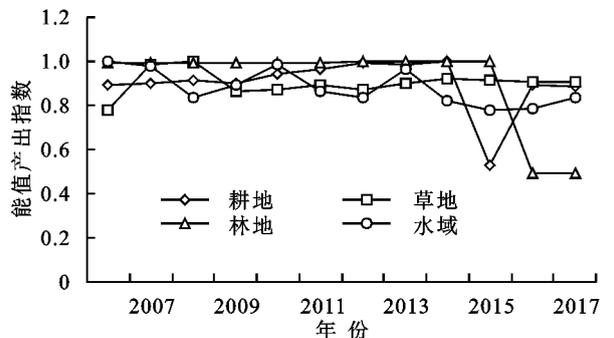


图 5 临湘市各地类能值产出指数情况

在生态载体承受压力及载体安全状态方面,结合图 5 和表 3 可知,生态载体中耕地、草地和水域的生产性生态赤字从 2005—2017 年都处于逐年扩大的态势,区域人口一直是超额获取区域内耕地、草地、水域生态生产性土地面积,载体处于持续压力状态,耕地、水域能值产出分级经历了 II-U 到 I-D 再到 II-D 的变化,草地则是从 III-U 到 II-U 再到 I-D 的变化,结合分析可知,在持续压力状态下,耕地、水域和草地载体的产出能力经历了先提升后出现下降的状态。持续的压力状态首先是促使作用于载体的科学方法和技术的提升和人类活动的增强,在一定程度上提升了耕地、草地和水域载体的能值转换效率,但伴随压力的逐步增大,过度的人类活动使得其载体的状态下降,耕地和水域的安全性出现退化,草地的安全性出现波动。林地载体一直处于盈余状态,其能值转换相对稳定,载体状态安全,2017 年林地的能值产出分级为 IV-D,由于育林保护措施,减少了对区域内林地资源的获取,所以产出指数较低,但其状态安全。

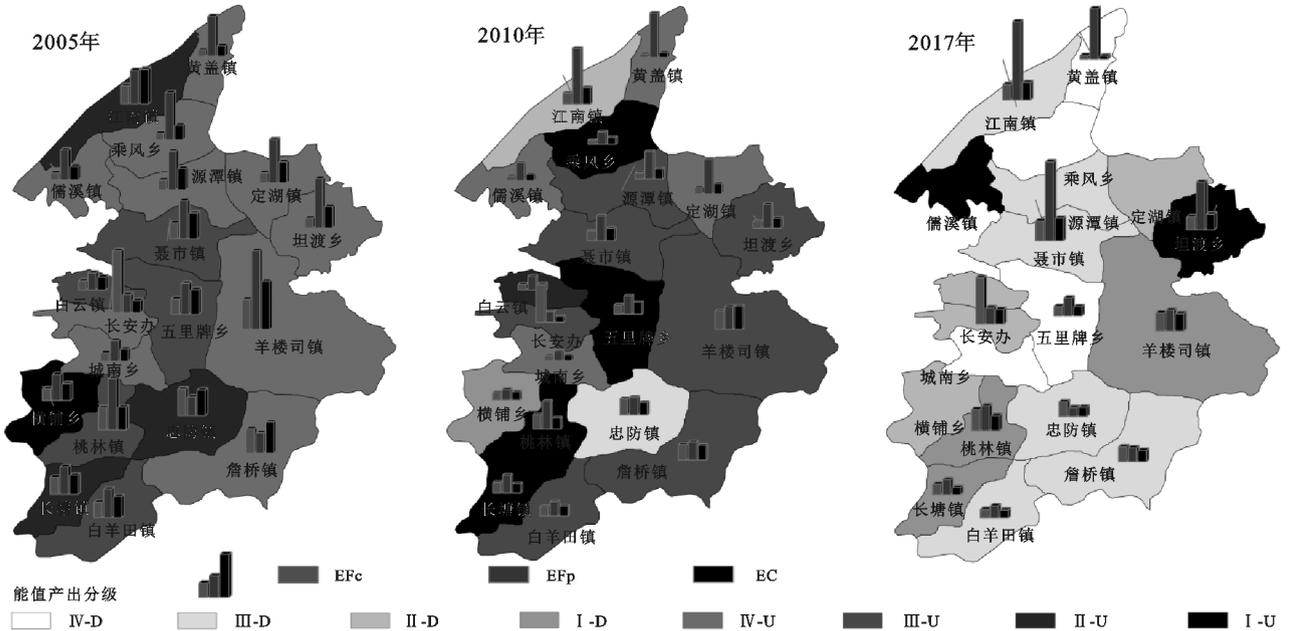
对乡镇分析可知,城南、五里牌、乘风和黄盖的生态载体出现明显退化,现实是随着逐年上升的人口以及对生态系统服务需求的不断增加,就如图 6 中生态足迹和承载力的变化情况,区域生态载体过度承载,导致其安全状态下降。就整体分析,临湘市在 2010 年前对区域内的生态载体的使用率已达到较高水平,2005 年其能值产出分级处于 II-U 级,说明区域内的人类活动作用提升且对生态载体产生正向作用,生产

能力逐步提升即将达到最优水平,此时生态载体状态安全,2010年处于 I-D 级,说明临湘市人类活动作用增强,使当前时间节点生产能力最优状态波动,生态

载体状态出现波动,2017年处于 II-D 级,说明区域人类活动作用轻微过度,使当前时间节点载体生产能力出现退化,状态不稳定。

表 3 临湘市各地类生态安全等级划分

地类	2005 年			2010 年			2017 年		
	生产性生态赤字/ 盈余/(g·hm <sup>-2</sup> )	能值产出 指数	能值产出 分级	生产性生态赤字/ 盈余/(g·hm <sup>-2</sup> )	能值产出 指数	能值产出 分级	生产性生态赤字/ 盈余/(g·hm <sup>-2</sup> )	能值产出 指数	能值产出 分级
耕地	-47498.5	0.875	II-U	-71046.7	0.946	I-D	-78312	0.885	II-D
草地	-207711	0.755	III-U	-231118	0.873	II-U	-229408	0.907	I-D
林地	59105.79	0.969	I-U	61435.69	0.995	I-D	74769.67	0.491	IV-D
水域	-164499	0.854	II-U	-184884	0.984	I-D	-267031	0.838	II-D



注:2017年由于乡镇合并,部分地区数据为0,部分地区数据被平均。

图 6 2005年、2010年、2017年临湘市资源流动及生态载体情况

### 3 讨论

(1) 通过比较消费性生态足迹与生产性生态足迹分析得出临湘市在资源流动层面上的安全性。依据改进的生态足迹模型计算结果可知,2006—2017年临湘市整体的生产性生态足迹和消费性生态足迹的差值始终为正,这表明研究期内临湘市始终存在剩余的生产性生态面积,资源流动层面状态安全;除长安办、詹桥镇和忠防镇存在生态资源供给不足的问题外,临湘市其余乡镇的生产性生态足迹和消费性生态足迹的差值始终为正,生态系统和人类系统在资源流动层面表现为安全状态。

(2) 在生态载体安全状态的判断中,2006—2017年临湘市内的生态载体一直处于压力状态。在压力状态下,临湘市内部分生态载体状态先是波动上升,后又出现下降的过程。临湘市整体生态载体等级为 I-D,虽然处于安全状态,但结合各乡镇分析可以发

现,江南镇、聂市镇和坦渡乡的生态载体在与区域人口消费活动交互中,其土地及水域载体承受着巨大压力,部分乡镇如聂市镇和江南镇载体等级更是降为 III-D,区域生态载体处于不安全状态。对不同生态载体类型而言,注意对部分地区耕地和水域的保护,避免粗放式生产及一味追求产量而忽视边际效益的过度化的化肥、农药的使用,导致生态载体自身转换能值能力的退化,从而避免需要更多外部投入来使其维持产出状态,形成恶性循环,最终导致生态环境退化和经济效益降低。

(3) 使用综合资源流动与生态载体层面下的生态安全研究方法,开展对临湘市的实证分析,分别得出了关于其生态安全内涵两个方面的结论,避免了仅考虑资源流动层面安全性而导致的结果的片面性。就临湘市而言,一方面其现阶段对生态系统的开发利用虽然满足了自身发展的需求,但另一方面其整体的能值产出安全等级出现下降,生态载体处于压力状态,不利于生态安

全状态的持续稳定,应引导对部分乡镇耕地和水域的合理使用,减轻开发强度,使其恢复安全状态。

## 4 结论

(1) 在生态足迹方法评价的基础上,将能值方法用于对区域生态载体生态安全状态的判断,较同类研究更注重对生态载体安全状态的判断,更加切合生态安全内涵的释意,对生态安全研究具有一定意义。但在选取人类活动与生态载体相互作用的指标时,由于存在数据可得性问题,例如随着区域间的物质与人口流动的日渐频繁,外来人口活动对本地生态系统及载体的影响也日益增大,而相关数据缺失对流动人口造成的资源与环境压力的统计,因此模型中的实际消费量偏小,对于人口流动性较大的区域,需要将缺失的部分纳入考虑。所以评价模型对实际的拟合程度还可随未来数据统计精度的提高而提高。

(2) 根据基础数据研究了区域生态安全在资源消耗层面和生态载体层面的发展过程,针对研究结果而言,按照土地类型和行政分区划分进行的研究,能在宏观层面上对把握区域安全状态,对指导性规划方案的制定具备引导作用。后续研究在此基础上结合地理空间数据补充对安全状态的成因分析,将评价结果落实于实际对应的地理单元上,用以实施性规划方案制定的参考。

### 参考文献:

- [1] 陆军.强化国家生态安全是我国实现可持续发展的需要[J].环境保护,2019,47(8):9-12.
- [2] 周鹏,周婷,彭少麟.生态系统服务价值的测度模式与方法[J].生态学报,2019,39(15):5379-5388.
- [3] 景永才,陈利顶,孙然好.基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J].生态学报,2018,38(12):4121-4131.
- [4] 姬翠梅.生态—经济—社会系统视角下的山西省农业生态安全评价[J].中国农业资源与区划,2019,40(5):174-179.
- [5] 杨京平.生态安全的系统分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [6] 陈国阶.论生态安全[J].重庆环境科学,2002(3):3-5.
- [7] 刘丽梅,吕君.生态安全的内涵及其研究意义[J].内蒙古师范大学学报:哲学社会科学版,2007,36(3):36-42.
- [8] 赵柯,李伟芳,毛菁旭,等.基于PSR模型的耕地生态安全评价及时空格局演变[J].生态科学,2019,38(1):186-193.
- [9] 韩磊,潘玉君,高庆彦,等.基于PSR和无偏GM(1,1)模型的云南省耕地生态安全评价与预测[J].生态经济,2019,35(2):148-154.
- [10] 陈勇,黄冉冉,唐荣彬,等.基于DPSIR和云模型的矿业城市生态安全评价[J].矿业研究与开发,2017,37(12):32-38.
- [11] 刘世梁,侯笑云,尹艺洁,等.景观生态网络研究进展[J].生态学报,2017,37(12):3947-3956.
- [12] 周兰兰,刘艳中,宋彦,等.基于生态足迹模型的区域生态可持续性判别准则研究[J].环境科学与技术,2017,40(9):183-191.
- [13] 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[J].生态学报,2019,39(2):739-747.
- [14] 冯娟,赵全升,谢文霞,等.“省公顷”在小城镇生态足迹分析中的应用研究:以山东省晏城镇生态建设为例[J].地理科学,2008,28(2):209-213.
- [15] 张恒义,刘卫东,林育欣,等.基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J].生态学报,2009,29(5):2738-2748.
- [16] 熊德国,鲜学福,姜永东.生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进[J].地理科学进展,2003,22(6):618-626.
- [17] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint: A 3D representation[J]. Ecological Modelling, 2009,220(20):2819-2823.
- [18] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. Ecological Modelling, 2011,222(16):2939-2944.
- [19] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳.生态经济系统能值分析[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [20] Li W L, Li Z Z, Zhao S. A modified method of ecological footprint calculation and its application[J]. Ecological Modelling, 2005,185(1):65-75.
- [21] 曹威威,孙才志.能值生态足迹模型的改进:以海南为例[J].生态学报,2019,39(1):216-227.
- [22] 朱玉林,顾荣华,杨灿.湖南省生态赤字核算与评价:基于能值生态足迹改进模型[J].长江流域资源与环境,2017,26(12):2049-2056.
- [23] 严茂超,李海涛,程鸿,等.中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估[J].北京林业大学学报,2001,23(6):66-69.
- [24] 喻锋,李晓波,王宏,等.基于能值分析和生态用地分类的中国生态系统生产总值核算研究[J].生态学报,2016,36(6):1663-1675.
- [25] 朱嘉伟,谢晓彤,李心慧.生态环境承载力评价研究:以河南省为例[J].生态学报,2017,37(21):7039-7047.
- [26] 谢高地.生态资产评价:存量、质量与价值[J].环境保护,2017,45(11):18-22.
- [27] 高艳妮,李岱青,蒋冲,等.基于能值理论的三江源区生态系统服务物质当量研究[J].环境科学研究,2017,30(1):101-109.
- [28] 于淑会,周向莉,卿冀川,等.河北滨海盐碱土地生态安全评价[J].中国生态农业学报,2017,25(5):778-786.
- [29] 赵妮平.面向不同情景的喀斯特山区生态安全预警研究[D].贵阳:贵州师范大学,2019.