

湖南武陵山片区生态可持续性与生态补偿时空变化特征研究

余光辉, 罗 敏, 李文佳

湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2026年9月17日; 录用日期: 2026年10月15日; 发布日期: 2026年10月26日

摘 要

武陵山片区是重点生态功能区, 经济发展与生态保护的矛盾日益凸显, 系统评估片区生态状况并制定生态补偿方案非常必要。基于碳足迹原理建立了改进的三维生态足迹模型和生态补偿模型, 分析了湖南武陵山片区生态可持续性时空演变与生态补偿标准。结果表明: 2010~2022年间, 湖南武陵山片区生态足迹和生态承载力呈上升趋势, 但片区内生态足迹远大于生态承载力, 且片区整体自然资源供需矛盾逐渐加剧, 处于不可持续状态。片区各市县生态状况变化存在空间差异, 片区内生态赤字呈西北向东南逐渐递增分布。农业和畜牧业在湖南武陵山片区经济发展中占据重要地位, 片区内生态压力正从耕地向草地转移。湖南武陵山片区始终作为生态输出地区, 片区总体生态补偿面积保持不变, 生态补偿差异缩小。研究有助于武陵山片区经济与生态保护协调发展。

关键词

生态补偿, 三维生态足迹模型, 时空分布, 武陵山片区

Spatio-Temporal Evolution of Ecological Sustainability and Ecological Compensation in Wuling Mountain Area of Hunan Province

Guanghui Yu, Min Luo, Wenjia Li

School of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: September 17, 2026; accepted: October 15, 2026; published: October 26, 2026

文章引用: 余光辉, 罗敏, 李文佳. 湖南武陵山片区生态可持续性与生态补偿时空变化特征研究[J]. 地理科学研究, 2026, 15(5): 934-946. DOI: 10.12677/gser.2026.155084

Abstract

Wuling Mountain Area is a key ecological function zone, where the contradiction between economic development and ecological protection has become increasingly prominent. Therefore, systematically evaluating the ecological status and formulating an ecological compensation plan is of great significance. Based on the principle of carbon footprint, this study establishes an improved three-dimensional ecological footprint model and an ecological compensation model, and analyzes the spatiotemporal evolution of ecological sustainability and ecological compensation standards in the Wuling Mountain area of Hunan Province. The results show that: between 2010 and 2022, the ecological footprint and ecological carrying capacity of Hunan Wuling Mountain Area show an increasing trend, but the ecological footprint of the area is much larger than the ecological carrying capacity, and the contradiction between supply and demand of natural resources in the area is gradually increasing, which is unsustainable. There are spatial differences in the ecological status of cities and counties in the region, and the ecological deficit in the region is gradually increasing from northwest to southeast. Agriculture and animal husbandry play an important role in the economic development of Hunan Wuling Mountain Area, and the ecological pressure in the area is shifting from cultivated land to grassland. The Wuling Mountain Area of Hunan Province has always been an ecological exporting area, with the overall area of ecological compensation in the area has remained unchanged and the differences in ecological compensation narrowing. The findings of this study facilitates the coordinated development of economy and ecological protection in the Wuling Mountain Area.

Keywords

Ecological Compensation, Three-Dimensional Ecological Footprint Model, Spatio-Temporal Distribution, Wuling Mountain Area

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前社会经济发展与生态保护之间的矛盾日益凸显, 如何实现两者的协调发展成为目前全球生态环境面临的重大挑战。生态足迹法是协调地区绿色发展与生态环境保护关系的有效方法, 能够测度人类占用自然资本状况和评价生态环境可持续发展现状。Rees 于 1992 年首次提出了生态足迹概念[1], Wackernagel 将其发展为二维生态足迹模型, 在全球和国家尺度上进行自然资本的核算[2]; 为了区分人类对自然资本流量和存量的占用情况, Niccolucci 等提出了三维生态足迹的概念, 在已有的模型基础上引入了足迹深度与足迹广度两个指标[3]; 方恺等首次将三维生态足迹模型引入国内并加以改进, 并对中国及全球的自然资本进行了核算分析[4] [5]; 国内其他学者也相继利用改进后的三维生态足迹模型从全国[6]、城市群[7]、流域[8]、省市[9]等尺度对自然资本利用演变、可持续发展变化及驱动因素等进行了测算分析, 其研究主要集中在基于全球或国家公顷尺度进行计算, 同时研究认为基于大尺度参数的计算难以反映区域差异, 因此有必要对模型参数进行本地化的修正[10] [11]。

武陵山片区作为重点生态功能区与集中连片特困地区, 严格的生态管控制约了当地产业发展, 生态保护与经济协调发展矛盾突出[12]。本研究应用改进的三维生态足迹模型评估湖南武陵山片区生态现状

及时空演变,构建生态补偿模型,核算生态补偿标准,探究片区内生态补偿空间分布格局和变化特征,以期对片区生态建设以及区域协调发展提供理论依据。

2. 研究区域与数据来源

2.1. 研究区概况

武陵山片区地处长江中游,地跨湖南省、湖北省、重庆市和贵州省,是我国少数民族和贫困人口广泛分布的集中连片特困地区,属于生态脆弱区域,在我国生态功能区划中占据重要地位,片区国土面积为 17.18 万 km²,共包含 71 个县(市、区),其中湖南省占 37 个县(市、区),湖北省占 11 个县(市),重庆市占 7 个县(区),贵州省占 16 个县(市)。其中湖南武陵山片区(25°52'21"N~30°7'44"N,108°47'9.10"E~112°5'13.10"E)占地面积为 9.27 万 km²,涵盖了张家界市、怀化市、湘西自治州三个地级行政区和邵阳市的新邵县、邵阳县、隆回县、洞口县、绥宁县、新宁县、城步县、武冈市,常德市的石门县,益阳市的安化县,娄底市的新化县、冷水江市、涟源市十三个县级行政区,片区内经济发展落后,片区整体人均可支配收入明显低于湖南省人均可支配收入水平,经济发展与生态环境保护之间的矛盾日益突出[13]。

2.2. 数据来源

各市县人口数据、经济数据、生物资源数据和能源数据(表 1)来源于 2011~2023 年《湖南省统计年鉴》¹、各市州统计年鉴和统计公报以及县区统计局统计数据,平均产量数据采用 1993 年联合国粮农组织发布的数据²;单位热值数据取自《农林技术经济手册(1983 修订版)》³;各种能源折算标准煤系数来源于《中国能源统计年鉴 2023》⁴;土地利用数据来源于 30 m 中国土地覆盖数据集⁵(CLCD)[14]。

Table 1. Ecological footprint accounts
表 1. 生态足迹账户

账户类型	生态足迹核算项目	土地类型
生物资源账户	稻谷、小麦、玉米、大豆、薯类、棉花、黄红麻、苧麻、烤烟、油料、猪肉、禽蛋	耕地
	柑橘、油菜籽、茶叶、竹笋干、木材、竹材	林地
	牛肉、羊肉	草地
	水产品	水域
能源消费账户	原煤、焦炭、液化石油气、原油、燃料油、天然气、汽油、柴油、煤油	化石能源用地
	建设面积、道路	建设用地

3. 研究方法

3.1. 三维生态足迹模型

基础三维生态足迹模型忽视了生态赤字与生态盈余的自然资本性质差异,在区域尺度上会高估足迹广度、低估足迹深度,因此本研究采用方恺改进后的足迹深度与足迹广度计算方法[15],公式如下:

¹<https://tjj.hunan.gov.cn/hntj/tjfx/hntjnj/index.html>
²<https://www.fao.org/faostat/zh/#home>
³<https://www.las.ac.cn/front/book/detail?id=b8c2e569ddec121a12c8c69387396d48>
⁴<https://navi.cnki.net/knavi/detail?p=qXmDfWaPdt00FPGY97ABY5wteqyt2lkS5QW0zg765PiKYSGYMV5HssB2D3iU-Q1BkIR5Pe2xvtFfh1Seijss0rQ21qQBbfMFDPDWSZEND6s=>
⁵<https://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/9de270f3-b5ad-4e19-afc0-2531f3977f2f>

$$EF_{depth} = 1 + \frac{ED}{EC} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^6 \max\{EF_i - EC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^6 EC_i} \quad (1)$$

$$EF_{size} = \sum_{i=1}^6 \min\{EF_i, EC_i\} \quad (2)$$

$$EF_i = N \times ef_i = N \times r_i \times \sum_{j=1}^n \frac{C_j}{P_j} \quad (3)$$

$$EC_i = N \times ec_i = N \times (a_i \times r_i \times y_i) \times (1 - 12\%) \quad (4)$$

式中, EF_{depth} 表示足迹深度; EF_{size} 表示足迹广度; ED 表示生态赤字; i 表示第 i 类生产性土地类型; j 表示不同的消费项目类别; EF_i 、 ef_i 、 EC_i 、 ec_i 分别表示第 i 类土地的生态足迹、人均生态足迹、生态承载力和人均生态承载力; N 表示地区总人口数; r_i 表示第 i 类土地均衡因子; C_j 表示第 j 种项目的人均消费量; P_j 表示地区第 j 种消费项目的平均产量; a_i 表示人均实际占有的第 i 类生物生产性土地面积; y_i 表示第 i 类土地产量因子; 12% 为扣除的生物多样性保护面积。

3.2. 生态补偿模型

根据三维生态足迹模型计算结果和研究区域的实际情况, 在环境利益公平分配的原则下, 综合考虑地区经济状况以及地区内生态经济协调程度[16], 本研究引入支付意愿和生态资源转化效率两个指标, 构建生态补偿模型。计算公式如下:

$$C_m = V_m - F_m \quad (5)$$

$$V_m = R \times \beta_m, \beta_m = \frac{EC_m}{\sum_{m=1}^n EC_m} \quad (6)$$

$$F_m = R \times \alpha_m, \alpha_m = \frac{EF_m \times M_{ec_m}}{\sum_{m=1}^n (EF_m \times M_{ec_m})} \quad (7)$$

$$M_{ec_m} = \frac{U_m \times W_m}{U \times W}, U_m = \frac{ef_m}{Y_m}, W_m = \frac{Y_m \times l_m}{Y}, l_m = \frac{1}{1 + e^{-t}}, t = \frac{I_m}{I}, I = \frac{A \times a + B \times b}{a + b} \quad (8)$$

式中, C_m 表示 m 市的生态补偿金额, $C_m > 0$ 时为 m 市应获得生态补偿金额 C_m , $C_m < 0$ 时为 m 市应给予生态补偿金额 $|C_m|$; V_m 表示 m 市生态服务供给金额; F_m 分别表示 m 市生态服务消费金额; R 表示湖南省生态服务金额(以环境污染治理投资代表); β_m 、 α_m 分别表示生态服务供给系数和生态服务消费系数; M_{ec_m} 表示 m 市的综合修正系数; U_m 表示 m 市生态资源转化效率; W_m 表示 m 市支付意愿; U 表示湖南省生态资源转化效率平均水平; W 表示湖南省支付意愿的平均水平; Y_m 表示 m 市人均 GDP; Y 表示湖南省的人均 GDP; l_m 表示 m 市的发展阶段系数; I_m 表示 m 市的人均收入; I 表示湖南省的人均收入; A 、 B 分别表示该地区城镇和农村的人均可支配收入; a 、 b 分别表示该地区城镇和农村人口。

3.3. 模型改进

现已有的大部分研究中, 在进行生态足迹核算时, 化石能源用地生态承载力通常默认为 0, 这与现实情况并不相符, 将导致总体生态承载力计算结果偏小。能源消耗主要以碳排放为主, IPCC 报告指出草地和森林能够吸收 93% 的碳排放量, 基于此本研究参照已有研究结合碳足迹原理计算化石能源用地生态承载力, 使计算结果能够更加符合实际情况。此外, 均衡因子和产量因子作为生态足迹模型的重要参数因子, 对于生态足迹和生态承载力的计算结果具有较大的影响, 在对小尺度区域进行核算时, 采用小尺度

参数因子能够更加准确地反映区域的生态状况,因此本文基于省公顷尺度对参数因子进行本地化的修正,计算湖南省内各类土地的均衡因子和各市州各类土地的产量因子,依据改进得到的参数因子计算得到研究区各市县生态足迹和生态承载力。同时,由于本文的研究区域包含多尺度地区,在已有的生态补偿研究中仅对同一尺度地区进行生态补偿标准核算,缺乏考虑包含多尺度区域的核算,因此本研究基于已有生态补偿模型进行了改进,统一研究区内各尺度地区生态补偿标准的计算,以便于对研究区内各市县生态补偿标准进行核算分析。

3.3.1. 账户调整

由于现实中化石能源用地并未实际存在,在计算时其生态承载力通常记为0,与实际情况不符,这将导致区域生态赤字的计算结果偏高。本文参考熊鹰等[17]的做法结合碳足迹核算方法计算化石能源用地的生态足迹与生态承载力,本研究中草地和林地的碳吸收比例采用 IPCC 报告结果,分别为 17.28:82.72 [18],草地和林地的固碳能力采用谢鸿宇的计算结果,分别为 0.9482 t/hm²、3.8096 t/hm² [19]。具体计算公式如下:

$$CE = \sum_{i=1}^n Q_i \times S_i \times D_i \quad (9)$$

$$CS = (A_f \times NEP_f + A_g \times NEP_g) \quad (10)$$

$$CEF = CE \times \left(\frac{P_f}{NEP_f} \times r_f \times y_f + \frac{P_g}{NEP_g} \times r_g \times y_g \right) \quad (11)$$

$$CEC = CS \times \left(\frac{P_f}{NEP_f} \times r_f \times y_f + \frac{P_g}{NEP_g} \times r_g \times y_g \right) \times (1 - 12\%) \quad (12)$$

式中, CE 、 CS 、 CEF 、 CEC 分别表示碳排放总量、碳吸收总量、化石能源用地生态足迹、化石能源用地生态承载力; Q_i 、 S_i 、 D_i 分别表示第 i 种能源的消费量、折算标准煤系数、碳排放系数; A_f 、 A_g 分别表示林地、草地的面积; NEP_f 、 NEP_g 分别表示全球林地、草地的固碳能力; P_f 、 P_g 分别表示全球林地、草地的碳吸收比例; r_f 、 r_g 分别表示林地、草地的均衡因子; y_f 、 y_g 分别表示林地、草地的产量因子。

对于建设用地,周涛等[20]指出建设用地的生态足迹与生态承载力在本质上同指建筑设施实际占用的生物生产性土地,因此本文中建筑用地的生态足迹采用生态承载力的计算方法,且两者数值相等。

3.3.2. 参数修正

由于各种生态生产性土地的生产能力存在差异,不同地区同类土地的生产能力也存在差异,因此有必要使用参数因子将各类土地和各地同类土地转化为统一的、可比较的生态生产性土地面积,以便于统一计算。在生态足迹模型中,均衡因子用于将同一地区不同地类的生产力统一到同一标准,以便于不同地区同类生产能力的叠加分析;产量因子用于将不同地区同一地类的生产力转换成同一标准,以便于不同地区区间的比较分析。基于全球公顷的均衡因子是将全球某类土地平均生产力除以全球各类土地平均生产力,基于全球公顷的产量因子是将国家某类土地平均生产力除以全球该地类的平均生产力。目前,大部分研究是基于全球公顷或国家公顷尺度的参数因子进行生态足迹核算,但有学者[10][11]指出大尺度下的均衡因子和产量因子不能准确反映小尺度区域的土地生产状况,在进行省、市生态足迹计算时,采用省公顷尺度的参数因子,能够提升区域生态足迹的计算精度,更能够精确反映各省、市的土地生产力和社会经济发展特征。因此,本研究以“省公顷”为计量单位,对参数因子进行本地化修正,逐年计算研究区域的均衡因子和产量因子。计算公式如下所示:

$$r_i = \frac{E_i}{E} = \frac{Q_i/S_i}{Q/S} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n P_i^j \times g_j\right)/S_i}{\left(\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^n P_i^j \times g_j\right)/S} \tag{13}$$

$$y_i^m = \frac{E_i^m}{E_i} = \frac{Q_i^m/S_i^m}{Q_i/S_i} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n P_i^j \times g_j\right)/S_i^m}{\left(\sum_{j=1}^n P_i^j \times g_j\right)/S_i} \tag{14}$$

式中， E_i 表示湖南省第*i*类土地的平均生产能力； E 表示湖南省内所有土地的平均生产能力； E_i^m 表示湖南省*m*市第*i*类土地的平均生产能力； Q_i 表示湖南省第*i*类土地的总生产热量； Q 表示湖南省所有土地的总生产热量； Q_i^m 表示*m*市第*i*类土地的总生产热量； S_i 表示湖南省第*i*类土地的面积； S 表示湖南省所有地类的总面积； S_i^m 表示*m*市第*i*类土地的面积； P_i^j 表示湖南省第*i*类土地第*j*种产品产量； p_i^j 表示*m*市的第*i*类土地第*j*种产品产量； g_j 表示第*j*种产品的单位热量。

4. 结果分析

4.1. 生态足迹研究

4.1.1. 生态足迹深度分析

Table 2. Footprint depth of cities and counties in the Wuling Mountain Area of Hunan Province
表 2. 湖南武陵山片区各市县足迹深度

地区	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
张家界市	2.09	2.21	2.22	3.05	3.16	3.23	2.82	2.16	1.96	1.79	1.77	1.85	1.97
怀化市	2.93	2.92	3.11	2.94	3.18	3.41	3.43	3.00	2.84	2.63	2.54	2.45	2.43
湘西自治州	2.25	2.37	2.44	2.55	2.68	2.74	2.74	2.47	2.39	2.36	2.12	2.23	2.88
新邵县	11.64	11.58	12.71	12.90	13.22	13.70	13.11	12.66	10.54	9.44	8.87	9.65	9.49
邵阳县	9.41	9.20	9.78	9.91	10.01	9.64	9.72	9.67	8.57	7.64	8.05	9.01	8.80
隆回县	8.01	7.95	8.45	8.51	8.57	8.57	8.43	8.18	6.87	6.60	6.08	6.41	6.67
洞口县	18.25	17.74	18.76	18.86	18.99	19.41	18.88	19.04	9.72	11.20	10.11	10.97	10.69
绥宁县	4.85	6.04	6.20	6.02	6.87	7.55	6.80	6.83	9.94	5.53	5.38	5.49	5.35
新宁县	4.99	4.93	5.90	5.88	5.79	5.58	5.58	5.41	6.06	4.81	4.67	4.76	4.83
城步县	3.24	3.29	3.19	3.15	3.66	4.11	3.73	3.79	5.43	2.79	2.57	2.56	2.61
武冈市	16.71	16.17	16.70	16.89	16.82	16.38	16.55	16.68	4.36	10.34	9.77	11.18	11.16
石门县	1.88	2.26	1.58	1.86	1.73	1.62	1.65	1.54	1.71	1.68	1.57	1.93	2.06
安化县	1.75	1.72	1.77	1.77	1.75	1.71	1.64	1.57	1.66	1.73	1.62	1.72	1.71
新化县	6.07	5.95	6.21	6.47	6.78	6.78	7.12	5.69	5.87	5.34	5.35	6.23	6.47
冷水江市	39.19	40.99	39.44	41.06	40.51	38.26	35.57	35.07	38.61	38.06	39.78	41.00	37.46
涟源市	12.94	13.86	14.99	16.01	16.78	16.68	16.88	14.70	12.68	12.05	12.65	14.82	14.90
武陵山片区	2.87	2.91	3.03	3.26	3.40	3.46	3.31	3.05	2.74	2.56	2.43	2.52	2.71

如表 2 所示，片区整体足迹深度呈先升后降再升的趋势，2022 年片区总体较 2010 年降低 5.6%，可见片区内对自然资本存量的占用呈波动趋势，波动范围在 2.43~3.46 之间，总体上片区足迹深度出现了小

幅度的降低,这说明湖南武陵山片区整体对自然资本存量的消耗程度在降低。

从空间上看,足迹深度较高的地区主要集中在片区的东南部,位于片区西北部的张家界市、湘西自治州、怀化市、石门县和安化县资本存量消耗相对较低且变化幅度较小。片区整体及片区内各个市县的足迹深度均呈波动减小的趋势,且片区整体及片区内各市县的足迹深度均大于1,这说明在2010~2022年间湖南武陵山片区内均存在不同程度的存量资本消耗,但消耗程度正逐渐降低。其中冷水江市的足迹深度始终居高不下,存在严重的存量资本过度占用问题。冷水江市矿产资源丰富,是湖南省重要的工业城市,冷水江市的经济以工业为主导,能源消耗量大,但冷水江市资本流量远小于其他市县,因此冷水江市长期存在严重的存量资本消耗问题。综上可知,2010~2022年间湖南武陵山片区总体对自然资本流量的利用提升,对自然资本存量的占用程度降低,这表明片区内自然资本利用率提升。

4.1.2. 生态足迹广度分析

Table 3. Per capita footprint size of cities and counties in the Wuling Mountain Area of Hunan Province (ha/cap)
表 3. 湖南武陵山片区各市县人均足迹广度(hm²/人)

地区	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
张家界市	0.45	0.44	0.41	0.33	0.33	0.33	0.35	0.36	0.36	0.36	0.38	0.36	0.34
怀化市	0.40	0.39	0.36	0.35	0.32	0.30	0.29	0.31	0.34	0.33	0.38	0.44	0.45
湘西自治州	0.24	0.22	0.22	0.22	0.21	0.20	0.20	0.23	0.23	0.24	0.28	0.27	0.24
新邵县	0.30	0.30	0.32	0.32	0.33	0.32	0.27	0.24	0.22	0.20	0.26	0.26	0.28
邵阳县	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.30	0.30	0.33	0.32	0.36	0.43	0.44	0.46
隆回县	0.25	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24	0.27	0.26	0.29
洞口县	0.28	0.28	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.28	0.27	0.27	0.31	0.35	0.35
绥宁县	0.25	0.26	0.29	0.33	0.35	0.33	0.33	0.33	0.30	0.28	0.30	0.31	0.32
新宁县	0.28	0.27	0.28	0.28	0.27	0.28	0.29	0.30	0.29	0.28	0.32	0.34	0.37
城步县	0.24	0.24	0.25	0.30	0.31	0.32	0.30	0.28	0.25	0.27	0.32	0.31	0.33
武冈市	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.32	0.31	0.33	0.31	0.31	0.38	0.39	0.41
石门县	14.59	13.74	13.87	10.85	10.71	10.74	11.64	12.75	14.56	17.35	21.34	22.18	19.76
安化县	0.46	0.40	0.39	0.37	0.80	1.10	1.16	0.96	0.81	0.76	1.05	0.99	1.07
新化县	0.41	0.41	0.42	0.42	0.42	0.45	0.44	0.44	0.46	0.48	0.49	0.43	0.44
冷水江市	0.33	0.33	0.34	0.34	0.33	0.34	0.32	0.30	0.31	0.33	0.36	0.33	0.36
涟源市	0.45	0.45	0.47	0.47	0.46	0.48	0.46	0.45	0.46	0.49	0.60	0.53	0.61
武陵山片区	1.35	1.52	1.21	1.15	1.10	1.05	1.05	1.04	1.17	1.32	1.55	1.81	1.65

如表3所示,湖南武陵山片区整体人均足迹广度呈波动上升趋势。片区内各市县人均足迹广度普遍呈波动上升趋势且大部分市县变化幅度较小,其中石门县的人均足迹广度远大于片区整体及其他市县;人均足迹广度变化幅度最大的是安化县,2010~2022年间增长了132.6%。近年来安化县自然资本流量利用率显著提升,石门县资源禀赋优越、流量资本利用率高。此外,张家界市和新邵县的人均足迹广度呈波动下降趋势,表明张家界市和新邵县对自然资本流量的利用降低。总体而言,2010~2022年间湖南武陵山片区及片区内市县对自然资本流量的利用率提升,其中安化县的提升幅度最大;随着片区内经济发展,

人类活动对自然资源的需求量也在逐渐增加，说明片区内经济增长仍依赖于自然资源消耗，生态系统与经济系统尚未实现实质性脱钩。

4.2. 生态承载力和生态赤字研究

4.2.1. 生态承载力分析

Table 4. Per capita ecological carrying capacity of cities and counties in the Wuling Mountain Area of Hunan Province (ha/cap)
表 4. 湖南武陵山片区各市县人均生态承载力(hm²/人)

地区	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
张家界市	2.47	2.12	2.29	1.37	1.35	1.35	1.64	2.26	2.72	3.03	3.47	3.29	3.42
怀化市	1.32	1.29	1.26	1.37	1.29	1.20	1.20	1.57	1.76	1.82	2.20	2.76	3.28
湘西自治州	1.39	1.24	1.27	1.18	1.13	1.11	1.11	1.46	1.52	1.51	2.13	2.08	1.63
新邵县	0.35	0.34	0.35	0.35	0.36	0.37	0.37	0.38	0.36	0.37	0.52	0.56	0.64
邵阳县	0.38	0.37	0.37	0.37	0.38	0.39	0.39	0.42	0.40	0.41	0.52	0.55	0.60
隆回县	0.39	0.37	0.39	0.39	0.41	0.42	0.42	0.43	0.40	0.43	0.52	0.55	0.62
洞口县	0.43	0.42	0.43	0.44	0.45	0.47	0.46	0.47	0.45	0.46	0.59	0.62	0.71
绥宁县	0.93	0.89	0.94	0.99	1.07	1.11	1.16	1.16	1.07	1.15	1.68	1.82	2.18
新宁县	0.64	0.62	0.64	0.66	0.69	0.72	0.74	0.75	0.70	0.74	0.94	1.01	1.18
城步县	1.14	1.09	1.14	1.20	1.30	1.33	1.37	1.37	1.27	1.37	1.91	2.08	2.49
武冈市	0.37	0.36	0.36	0.36	0.37	0.38	0.38	0.39	0.36	0.36	0.47	0.49	0.53
石门县	14.66	13.81	13.97	10.95	10.81	10.85	11.75	12.88	14.71	17.48	21.52	22.37	19.88
安化县	5.44	5.55	6.03	6.31	6.77	7.54	8.53	7.08	6.44	5.80	7.96	8.03	9.88
新化县	0.82	0.83	0.87	0.86	0.86	0.88	0.84	0.80	0.83	0.92	0.95	0.84	0.97
冷水江市	0.33	0.33	0.34	0.34	0.33	0.34	0.32	0.30	0.31	0.33	0.36	0.33	0.37
涟源市	0.45	0.46	0.48	0.47	0.47	0.48	0.46	0.45	0.47	0.50	0.61	0.55	0.62
武陵山片区	1.72	1.64	1.68	1.54	1.53	1.55	1.64	1.79	1.90	2.01	2.58	2.75	2.89

从湖南武陵山片区各市县人均生态承载力变化来看(表 4)，各市县人均生态承载力呈增长趋势但大部分市县增长幅度较小。其中，石门县和安化县的人均生态承载力明显高于其他市县，石门县人均生态承载力始终远远高于其他市县，安化县人均生态承载力从 5.44 hm²/人(2010)增长至 9.88 hm²/人(2022)，增长了 55.36%，说明这两个地区自然资源丰富，生态承载能力高且提升幅度大，可持续发展潜力大；此外，冷水江市的人均生态承载力变化最小且始终小于其他市县，表明冷水江市自然资源供给能力相对较弱。片区整体情况来看，生态承载力呈增长趋势，但是生态承载力始终远小于生态足迹。尽管片区内自然资源供给能力逐年上升，但增长速度较缓，且近几年片区内自然资源消耗加速，导致资源消耗和供给的差距不断扩大，这说明随着经济发展，人类活动对环境的影响正在逐渐加剧，片区内生态状况处于不可持续状态。

4.2.2. 生态赤字分析

(1) 各地区生态赤字变化

从湖南武陵山片区各市县人均生态赤字变化来看(表 5)，片区内人均生态赤字变化存在明显的空间差

异。空间上, 片区生态赤字呈从西北向东南逐渐递增的分布格局, 湘西自治州变化幅度最小且人均生态赤字最小, 其次是张家界市和怀化市, 而人均生态赤字较高的地区主要是石门县、冷水江市、洞口县和绥宁县。时间尺度上, 片区整体及片区内大部分市县的人均生态赤字均呈增长趋势, 其中, 石门县和绥宁县增长幅度最大, 石门县人均生态赤字呈波动上升趋势, 而绥宁县呈逐年增长趋势。虽然石门县拥有良好的自然资源禀赋, 但其自然资源消耗量远大于自身自然资源供给, 且石门县资源消耗量仍在不断增长, 因此该地区生态赤字呈明显增长趋势。绥宁县生态足迹与生态承载力的差距正逐步扩大, 这表明绥宁县长期存在自然资源过度消耗。与人均生态足迹变化相似, 洞口县和武冈市生态赤字呈逆增长趋势。总体而言, 湖南武陵山片区整体及片区内各市县长期存在生态赤字, 且片区生态赤字情况不断加重, 说明片区内自然资本流量难以满足当地发展需求。为了调整片区内生态赤字变化趋势, 改善片区生态赤字情况, 应明晰片区生态赤字构成, 从而优化片区内自然资源利用结构, 提升自然资源利用率, 实现对片区自然资源的合理利用和开发。

Table 5. Per capita ecological deficit of cities and counties in the Wuling Mountain Area of Hunan Province (ha/cap)
表 5. 湖南武陵山片区各市县人均生态赤字(hm²/人)

地区	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
张家界市	2.70	2.55	2.79	2.80	2.91	3.00	2.99	2.62	2.60	2.39	2.69	2.82	3.32
怀化市	2.54	2.47	2.67	2.66	2.82	2.91	2.91	3.15	3.25	2.97	3.40	3.99	4.70
湘西自治州	1.74	1.69	1.82	1.82	1.90	1.93	1.94	2.13	2.11	2.07	2.39	2.57	3.06
新邵县	3.72	3.56	4.07	4.19	4.44	4.70	4.50	4.48	3.44	3.11	4.11	4.85	5.44
邵阳县	3.23	3.03	3.29	3.33	3.44	3.38	3.43	3.61	3.05	2.73	3.63	4.37	4.69
隆回县	2.71	2.57	2.87	2.94	3.12	3.20	3.13	3.07	2.34	2.41	2.62	2.95	3.53
洞口县	7.38	7.00	7.64	7.77	8.14	8.60	8.28	8.54	3.89	4.68	5.40	6.22	6.85
绥宁县	3.58	4.48	4.90	4.98	6.26	7.27	6.71	6.79	9.55	5.21	7.35	8.18	9.51
新宁县	2.55	2.42	3.14	3.22	3.32	3.29	3.39	3.31	3.55	2.81	3.44	3.81	4.51
城步县	2.55	2.49	2.49	2.58	3.45	4.14	3.75	3.84	5.65	2.45	2.99	3.24	4.03
武冈市	5.78	5.44	5.70	5.75	5.83	5.83	5.84	6.09	1.22	3.40	4.12	4.98	5.43
石门县	12.91	17.45	8.04	9.37	7.92	6.75	7.66	6.90	10.48	11.94	12.30	20.85	21.02
安化县	4.10	3.98	4.67	4.84	5.06	5.35	5.45	4.06	4.24	4.23	4.98	5.76	6.99
新化县	4.17	4.11	4.55	4.73	4.97	5.09	5.16	3.74	4.04	3.99	4.14	4.39	5.32
冷水江市	12.59	13.31	13.25	13.55	13.19	12.61	11.15	10.28	11.76	12.32	14.07	13.21	13.44
涟源市	5.41	5.90	6.69	7.09	7.41	7.54	7.32	6.18	5.46	5.54	7.07	7.54	8.62
武陵山片区	3.22	3.12	3.42	3.48	3.67	3.80	3.79	3.66	3.30	3.14	3.70	4.18	4.93

(2) 各地区生态赤字构成

从各市县来看(图 1), 张家界市、怀化市、湘西州、邵阳地区和安化县生态赤字的构成和变化趋势与片区整体相似, 其中邵阳地区耕地生态赤字占比明显高于其他地区, 说明农业在邵阳地区社会经济发展中占据重要地位; 而安化县耕地生态赤字占比呈波动下降趋势, 其草地生态赤字占比不断提升, 这是由于安化县注重发展畜牧业, 是湖南省重要的黑山羊养殖区, 近年来实施了一系列草地保护政策, 用于引导合理养殖, 避免草地退化, 但目前安化县草地生态赤字居高不下, 说明安化县仍应加强草地保护。与

片区整体和其他地区不同的是，石门县和娄底地区存在化石能源用地生态赤字，石门县化石能源用地生态足迹和生态赤字均呈先降后升的趋势。

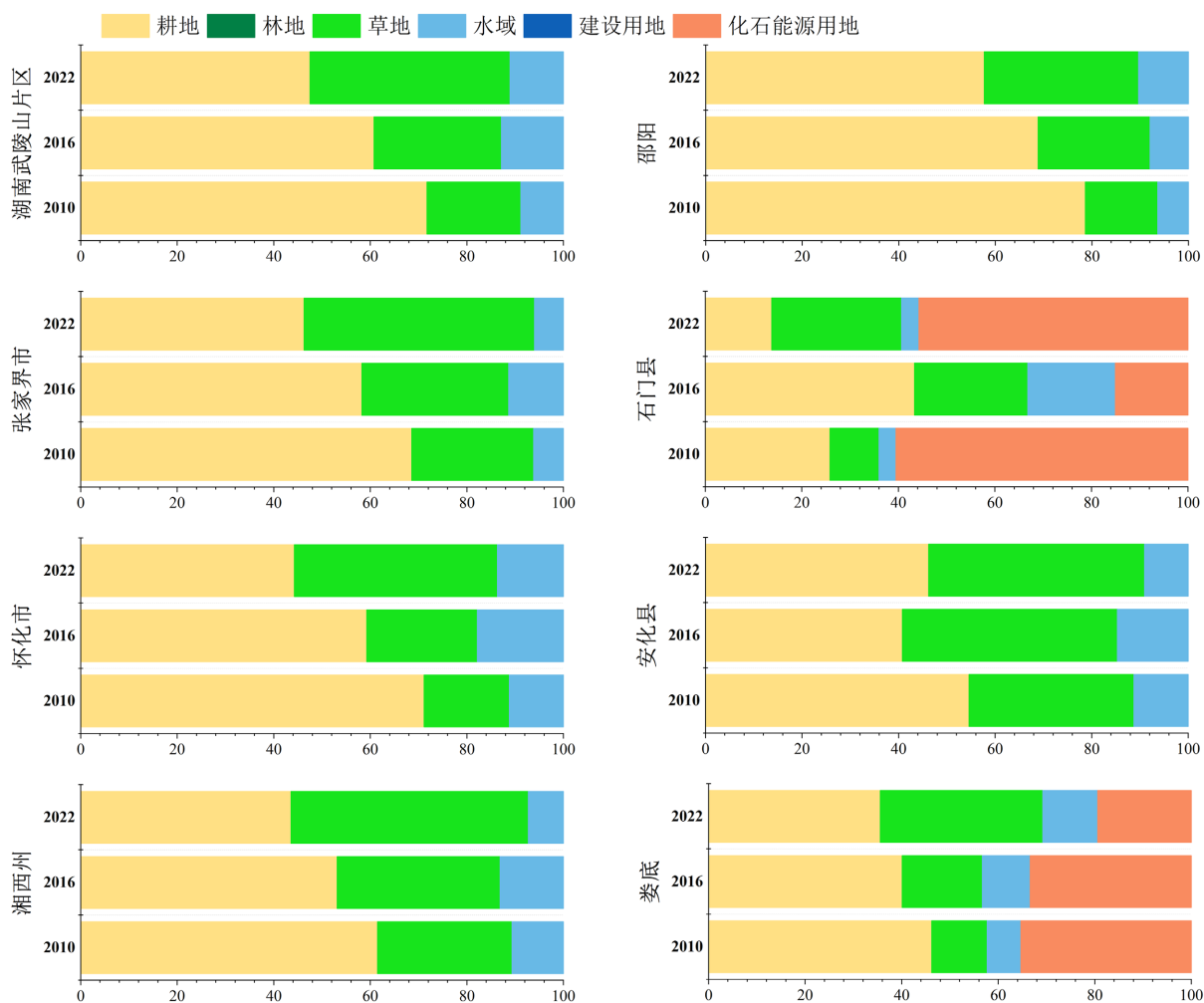


Figure 1. Changes in the composition of ecological deficits in various regions of the Wuling Mountain Area of Hunan Province
图 1. 湖南武陵山片区各地区生态赤字构成变化

片区整体来看，生态赤字主要由耕地、草地和水域构成，其中耕地生态赤字占比最大，其次是草地，耕地生态赤字占比有明显降低趋势，草地占比呈上升趋势。说明该片区通过农业技术升级或耕地保护政策有效缓解了耕地资源压力，但草地生态系统因畜牧业扩张、过度放牧或土地利用转型导致草地生态赤字日益严重，这一变化反映了片区发展模式正从传统农业向畜牧业倾斜转变，需要警惕草地退化风险并加强可持续管理。可见农业和畜牧业在湖南武陵山片区经济发展中占据重要地位，但由于片区内耕地和草地资源稀少，片区内耕地和草地普遍存在过度占用的问题，生态压力正从耕地向草地转移。

4.3. 湖南武陵山片区生态补偿

根据生态补偿模型计算得到湖南武陵山片区各市县各年生态补偿额度，如图 2 所示，2010~2022 年间湖南武陵山片区整体始终属于生态受偿区，说明研究区一直作为生态输出区域，应该进行生态补偿。从时间尺度上看，片区内生态补偿标准呈波动下降趋势，其变化趋势与湖南省生态服务投资金额变化

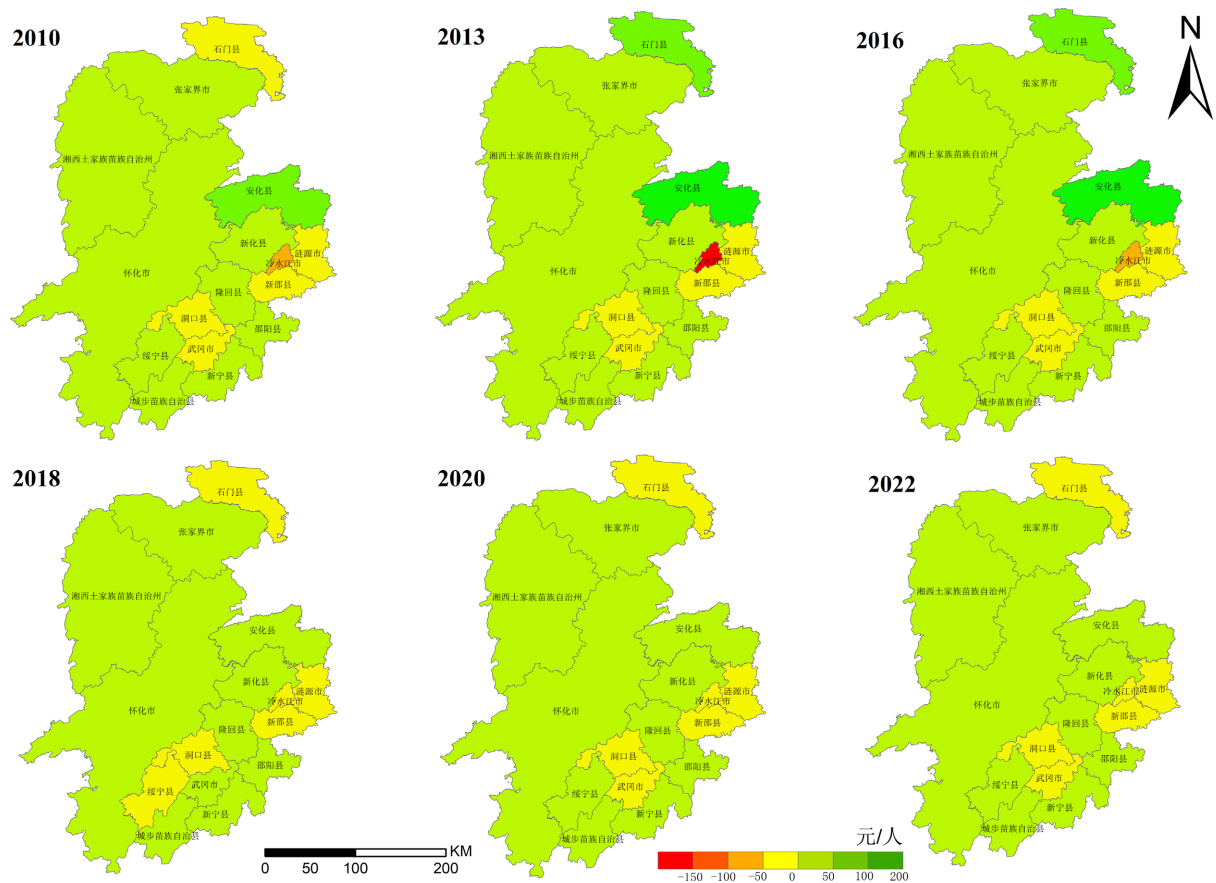


Figure 2. Spatial and temporal distribution of per capita ecological compensation in Wuling Mountain Area of Hunan Province
图 2. 湖南武陵山片区人均生态补偿时空分布

趋势相似。从空间上看，湖南武陵山片区生态补偿支付区主要集中在片区的东南部，片区内生态补偿面积整体保持不变，片区内人均生态补偿差异明显缩小。怀化市、安化县、张家界市和湘西自治州是主要的生态受偿区，说明这些地区是片区内主要的生态输出地区，具有重要的生态功能；冷水江市、洞口县和涟源市是主要的生态支付区，说明这些地区处于明显生态资源供小于求的状态，需要额外获取其他地区的生态服务。总体而言，片区内生态受偿金额明显高于生态支付金额，但近年来由于生态服务投资金额减少，使得各市县生态补偿标准降低，从而导致各市县生态补偿差异缩小，因此在未来发展中应考虑拓宽生态补偿资金来源渠道，从而提升生态补偿标准。

5. 结论

以省公顷为计量单位，结合碳足迹原理建立了改进的三维生态足迹模型，结合片区内生态和经济状况，构建了生态补偿模型，对湖南武陵山片区生态状况进行了评价分析。

(1) 片区生态状况不容乐观，虽然总体自然资源利用率有所提升，但近几年自然资源供需矛盾正逐渐加剧，处于不可持续状态。生态足迹总体呈上升趋势，且在近几年出现快速增长；生态承载力呈逐年上升趋势，但增长速度缓慢，且生态足迹远大于生态承载力。应优化调整产业结构，减少自然资源消耗、提升自然资源利用率，实现自然资源的合理利用和开发。

(2) 片区各市县生态状况变化存在空间差异。生态赤字呈西北向东南逐渐递增分布，人均生态赤字低值区主要位于湘西自治州、张家界市和怀化市，而高值区主要位于石门县、冷水江市和洞口县。大部分

市县的人均生态足迹和人均生态承载力呈上升趋势，石门县的明显大于片区整体和其他市县。

(3) 片区内农业和畜牧业在经济发展中占据重要地位，生态压力正从耕地向草地转移。整体生态赤字主要由耕地、草地和水域构成，其中耕地占比最大且逐年下降，而草地占比逐年上升，应警惕草地退化并加强可持续管理。邵阳地区耕地生态赤字占比和安化县草地生态赤字占比明显高于其他地区，说明邵阳地区和安化县应相应调整优化土地配置，引导土地资源合理利用。

(4) 2010~2022 年间，湖南武陵山片区始终作为生态输出地区。从空间上看，片区内大部分地区属于生态受偿区，支付区主要集中在片区的东南部。片区内生态补偿面积总体保持不变，但片区内生态补偿标准波动下降，人均差异明显缩小。人均可以获得生态补偿金额最多的地区是安化县和张家界市，人均需要支付最多是冷水江市和洞口县。

基金项目

湖南省哲学社会科学规划基金重点项目(21ZDB019)。

参考文献

- [1] Rees, W.E. (1992) Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves Out. *Environment and Urbanization*, **4**, 121-130. <https://doi.org/10.1177/095624789200400212>
- [2] Wackernagel, M., Onisto, L., Bello, P., Callejas Linares, A., Susana López Falfán, I., Méndez García, J., *et al.* (1999) National Natural Capital Accounting with the Ecological Footprint Concept. *Ecological Economics*, **29**, 375-390. [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(98\)90063-5](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(98)90063-5)
- [3] Niccolucci, V., Bastianoni, S., Tiezzi, E.B.P., Wackernagel, M. and Marchettini, N. (2009) How Deep Is the Footprint? A 3D Representation. *Ecological Modelling*, **220**, 2819-2823. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.07.018>
- [4] 方恺, 李焕承. 基于生态足迹深度和广度的中国自然资本利用省际格局[J]. 自然资源学报, 2012, 27(12): 1995-2005.
- [5] 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[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667.
- [6] 洪顺发, 郭青海, 李达维. 基于生态足迹理论的中国生态供需平衡时空动态[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 980-990.
- [7] 闻熠, 高峻, 徐迪, 等. 基于改进参数的长三角城市生态足迹分析及其可持续性评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 312-318+327.
- [8] 夏军, 刁艺璇, 余敦先, 等. 鄱阳湖流域水资源生态安全状况及承载力分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 1-8+24.
- [9] 代亚婷, 朱道林, 张晖, 等. 基于三维生态足迹的陕西省土地自然资本可持续利用与脱钩效应[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1926-1937.
- [10] Wang, H., Huang, J., Zhou, H., Deng, C. and Fang, C. (2020) Analysis of Sustainable Utilization of Water Resources Based on the Improved Water Resources Ecological Footprint Model: A Case Study of Hubei Province, China. *Journal of Environmental Management*, **262**, Article ID: 110331. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110331>
- [11] Zhang, J., Hao, X., Li, X., Fan, X. and Zhang, S. (2024) Evaluation and Regulation Strategy for Ecological Security in the Tarim River Basin Based on the Ecological Footprint. *Journal of Cleaner Production*, **435**, Article ID: 140488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140488>
- [12] 王兆峰, 张先甜. 武陵山片区旅游资源开发空间网络结构特征及其社会福祉效应研究[J]. 自然资源学报, 2025, 40(4): 912-933.
- [13] 李振民, 石磊. 高质量发展视角下湖南武陵山片区人地关系协调与空间协调研究[J]. 人文地理, 2024, 39(1): 113-121.
- [14] Yang, J. and Huang, X. (2021) The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- [15] 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[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [16] Yang, Y., Lu, H., Liang, D., Chen, Y., Tian, P., Xia, J., *et al.* (2022) Ecological Sustainability and Its Driving Factor of Urban Agglomerations in the Yangtze River Economic Belt Based on Three-Dimensional Ecological Footprint Analysis.

Journal of Cleaner Production, **330**, Article ID: 129802. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129802>

- [17] 熊鹰, 艾赣雄, 周晨, 等. 基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1165-1179.
- [18] 梁中, 徐蓓. 中国省域碳压力空间分布及其重心迁移[J]. 经济地理, 2017, 37(2): 179-186.
- [19] 谢鸿宇, 陈贤生, 林凯荣, 等. 基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J]. 生态学报, 2008(4): 1729-1735.
- [20] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 生态足迹的模型修正与方法改进[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4592-4603.