

DOI: 10.5846/stxb202112203605

柳宏斌, 夏国柱, 林涛, 徐欢, 连帅明, 许仲林. 基于改进生态足迹模型的可持续发展评价——以北疆为例. 生态学报, 2023, 43(1): 234-248.

Liu H B, Xia G Z, Lin T, Xu H, Lian S M, Xu Z L. Sustainable development evaluation based on an improved ecological footprint model: a case study of northern Xinjiang. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 234-248.

# 基于改进生态足迹模型的可持续发展评价 ——以北疆为例

柳宏斌<sup>1,2</sup>, 夏国柱<sup>3</sup>, 林涛<sup>3</sup>, 徐欢<sup>1,2</sup>, 连帅明<sup>1,2</sup>, 许仲林<sup>1,2,\*</sup>

1 新疆大学地理科学学院, 乌鲁木齐 830017

2 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830017

3 新疆维吾尔自治区国土综合整治中心, 乌鲁木齐 830002

**摘要:**生态足迹评价体系,可以在一定程度上刻画区域社会经济发展对当地生态环境产生的影响,当前可持续发展研究的难点之一,便是如何更加真实的体现这种影响。立足于传统生态足迹模型,采用“一年一区一值”的参数方案计算区域当年均衡因子与产量因子,结合土地利用转移矩阵和建设用地流入量改进建设用地足迹算法,对北疆地区 2005 年、2010 年、2015 年、2018 年生态足迹及生态承载力进行测度,并结合相关指数对研究区发展的可持续性进行评价。结果表明:①北疆生态足迹增涨 3.5 倍,且以能源增长为主导,生物生产性足迹贡献率大幅下降;人均生态足迹增长 3.4 倍,工业型城市生态足迹增长率及人均生态足迹增长率均高于其他类型城市。②研究区生态承载力呈现上升态势,除水域和草地外,其他地类承载力均呈上升态势,昌吉州与阿勒泰地区的总体承载力及人均承载力均呈下降态势。③北疆生态利用效率上涨 1.32 倍,各行政单元呈现农业及服务型城市生态利用效率上升、工业型城市生态利用效率降低的态势,表明工业型城市生态足迹增速远高于经济增速。④各行政单元呈现生态赤字状态且不断加剧,总体及人均增速都呈现工业型>农业型>服务型城市。整体而言,研究区系统安全性一般,处于协调发展状态,但存在由生态足迹激增引发安全性下降的风险,部分地州呈低协调甚至不协调状态,整体可持续发展性有所降低。

**关键词:**生态足迹;可持续发展;建设用地流入量

## Sustainable development evaluation based on an improved ecological footprint model: a case study of northern Xinjiang

LIU Hongbin<sup>1,2</sup>, XIA Guozhu<sup>3</sup>, LIN Tao<sup>3</sup>, XU Huan<sup>1,2</sup>, LIAN Shuaiming<sup>1,2</sup>, XU Zhonglin<sup>1,2,\*</sup>

1 College of Geographical Science, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

2 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830017, China

3 Xinjiang Uygur Autonomous Region Land Consolidation and Rehabilitation Centre, Urumqi 830002, China

**Abstract:** Ecological footprint is a biologically productive land that can produce the materials needed to meet the productive needs of human life and absorb the waste generated by humans in the region. Ecological footprint evaluation system can describe the impact of regional social and economic development on local ecological environment to a certain extent, but one of the difficulties in current sustainable development research is how to more truly reflect such impact. Based on traditionally ecological footprint model, this study firstly calculates the equilibrium factor and yield factor by year and by subregion. We improved the construction land footprint algorithm through combining the land use transfer matrix. Finally measured the ecological footprint and ecological carrying capacity of Northern Xinjiang in 2005, 2010, 2015 and 2018, and evaluated the

**基金项目:**国家自然科学基金项目(2020D04003)

**收稿日期:**2021-12-20; **网络出版日期:**2022-08-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: galinwa@gmail.com

sustainability of development in the study area. The results showed that: (1) the ecological footprint of the Northern Xinjiang increased by 3.5 times, which was dominated by energy footprint, while the contribution of biological productivity footprint decreased significantly. Per capita ecological footprint increased by 3.4 times, and the growth rate of ecological footprint and per capita ecological footprint of industrial cities were both higher than other types of cities. (2) The ecological carrying capacity of the study area showed an upward trend except for water and grassland. The overall and per capita carrying capacity of Changji and Altay were both declining. (3) The ecological efficiency of Northern Xinjiang increased by 1.32 times. The units showed a trend of increasing ecological efficiency in agricultural and service-oriented cities and decreasing in industrial cities, indicated that the growth rate of ecological footprint of industrial cities was higher than the corresponding cities' economy. (4) The ecological deficit of each unit was increased, and the growth rate of overall and per capita showed a trend of industrial cities > agricultural cities > service-oriented cities. Overall, ecosystem security in the study area was at an average level, and the ecological system and economic system were in a coupling state. But there was a risk of security decline caused by the surge of ecological footprint. Some cities were in a low coupling or even decoupling state, and the overall sustainability was reduced. Therefore, in the future development process, government should combine national and regional policy guidance with our own geographic and resource advantages, actively optimize the industrial structure, improve the efficiency of resource utilization, to build a diversified, healthy and sustainable new development system.

**Key Words:** ecological footprint; sustainable development; construction land inflow

随着社会经济的高速发展及城市化进程的不断推进,人类生产生活所产生的负面影响如人地矛盾加剧、生态功能失调、资源过度消耗等问题日趋显现<sup>[1]</sup>。如何平衡生态环境保护与社会经济发展的矛盾,使二者协调发展,成为亟待解决的问题<sup>[2-3]</sup>。生态足迹体系将人类活动对生态环境产生的影响转化为消耗这些影响所需的生物生产性土地面积,将原本复杂的生态经济过程转化为土地面积的供需平衡问题<sup>[4-6]</sup>,使得区域经济发展与生态可持续性综合评价成为可能<sup>[7]</sup>。自生态足迹理论提出以来,国内外专家从基础模型改进<sup>[8-10]</sup>、时空分布特征<sup>[11]</sup>、成因分析<sup>[12]</sup>等方面对生态足迹体系进行了深入探讨,使得原有理论不断充实,并衍生出能源足迹<sup>[13]</sup>、水足迹<sup>[14]</sup>、旅游足迹<sup>[15]</sup>等系列针对性的生态评价体系<sup>[16]</sup>。尽管生态足迹体系已在很多应用领域取得明显进展<sup>[17-18]</sup>,但如何精确定量评价人类活动产生的影响以及生态环境的响应仍是阻遏生态评价体系发展完善的主要因素<sup>[19-20]</sup>。为此,国内学者从指标体系构建<sup>[21]</sup>、参数方案本土化<sup>[22-23]</sup>、方法改进<sup>[24]</sup>等诸多方面进行探索,力求更加精准的评价生态环境所承受的压力与生产性活动对自然环境产生的负面作用,研究尺度也逐渐由国家层面<sup>[25]</sup>向省域<sup>[26-28]</sup>、区域<sup>[29]</sup>、生态单元<sup>[30]</sup>等精细尺度转变,研究领域也有所扩展<sup>[31-32]</sup>。目前,对于生态足迹及可持续发展的研究较多,但多以笼统均一化的参数方案进行评价,结合研究区城市发展类型及区域间差异进行评价分析仍然欠缺。

新疆作为陆上丝绸之路的重要枢纽,是西北地区生态屏障构建的关键,迫切需要在生态环境保护、人地矛盾缓和等方面寻求突破口,以协调区内经济发展差异,缓解生态环境压力<sup>[33]</sup>。北疆作为疆内发展重心,是社会生产生活最为集中、人地关系最为敏感的地区。随着社会发展与城市化的推进,经济发展与环境保护的矛盾日益加剧,对于可持续发展的需求更加急切<sup>[34]</sup>。因此,本研究基于生态足迹模型,建立土地利用转移矩阵改进模型中建设用地足迹算法,并采用当年当地参数体系以保留区域发展的差异性,结合相关可持续发展评价方法对北疆及各行政单元生态足迹、承载力及可持续发展进行测度,以期剖析各行政单元生态利用情况,指出现阶段发展与保护两大主题的潜在矛盾,揭示北疆可持续发展的内在机制,为区域协同发展与生态环境保护提供参考。

## 1 研究区概况及数据来源

### 1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区,位于我国西北边陲,远离海洋,深居内陆,属温带大陆性气候,干燥少雨(图1)。全境多山,北部为阿尔泰山,南部为昆仑山,中部的天山山脉将新疆分为南北两部。北疆地区气候温润,年均气温 $-4\sim 9^{\circ}\text{C}$ ,年降水量在 $150\sim 200\text{mm}$ 。北疆能源丰富,发展潜力巨大,是新疆经济发展的重心所在,2018年生产总值占全疆72%,是“一带一路”战略重点示范区与发展区。研究区属典型干旱区,自然生态环境脆弱<sup>[35]</sup>,经济高速发展导致人地冲突激增,环境压力巨大,缓和生态保护与经济发展矛盾迫在眉睫。

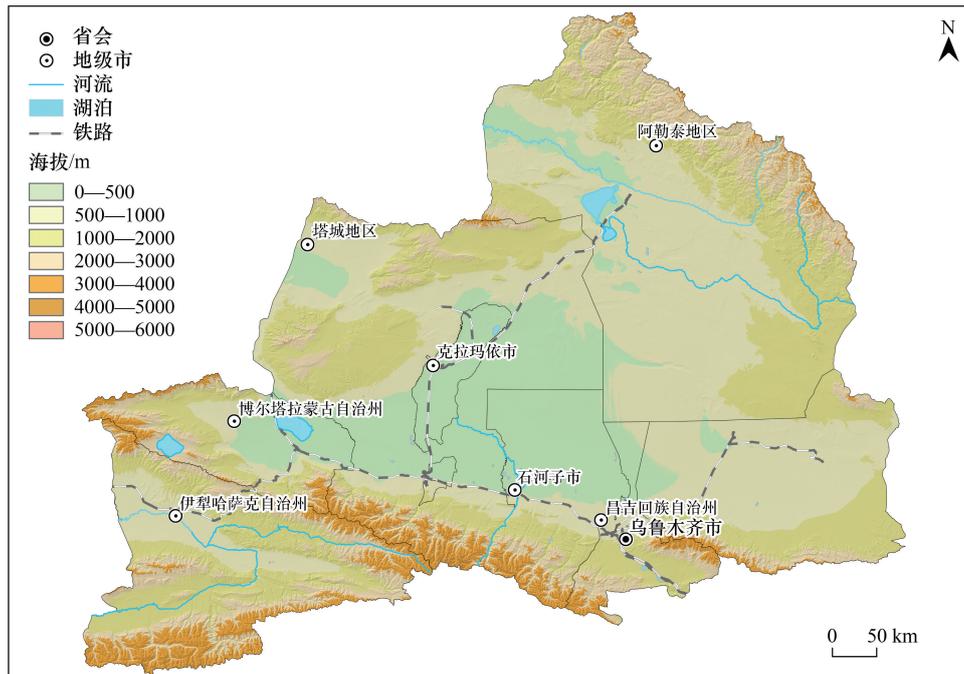


图1 研究区示意图

Fig.1 Schematic map of the study area

### 1.2 数据来源

本研究采用的数据包括遥感影像资料与统计资料两部分。其中,遥感影像为中科院数据中心(www.resdc.cn)发布的新疆土地利用30m分辨率成品数据集(2005、2010、2015、2018年)<sup>[36-37]</sup>,并根据相应分类体系进行重分类后构建土地利用转移矩阵,用于分析研究区在研究时段内建设用地的的发展情况及其它用地类型的流入情况。

统计资料中,农产品(产量)、林果产品(产量)、水产品(产量)、能源用量(消耗量)、当年人口等数据源于《新疆统计年鉴》(2005、2010、2015、2018年)、兵团统计年鉴以及部分地州统计年鉴;农产品、林果产品、水产品等热值数据源自《农业技术经济手册(修订版)》(1983);各种能源碳排放系数及碳吸收系数源自唐洪松等<sup>[38]</sup>的研究成果。该部分数据用于生态足迹模型中研究区土地均衡因子、产量因子及相关生产力计算。

## 2 研究方法

### 2.1 生态足迹账户

传统生态足迹模型将生态账户划分为生物生产性账户与能源账户两类,将耕地、林地、草地、水域及建设用地划为生物生产性土地,能源用地自成一类<sup>[39]</sup>。本研究基于生态足迹思想,将生态账户划定为生物生产性

账户与非生物生产性账户。其中,将耕地、林地、草地划入生物生产性账户,将建设用地及能源用地划为非生物生产性账户,并对相应的计算方法进行改进。生态足迹账户构成如下(表 1)。

表 1 生态足迹账户及构成

Table 1 Ecological footprint accounts and components

账户类型 Account Type	生物生产性土地 Biological productive land				非生物生产性土地 Non-biological productive land	
土地类型 Land type	耕地	林地	草地	水域	建设用地	能源用地
账户构成 Account Components	水稻、小麦、玉米、豆类、棉花、油菜、胡麻、葵花、甜菜、薯类、果用瓜、猪肉、禽肉、兔肉	苹果、梨、葡萄、桃、杏、红枣、坚果	牛肉、马肉、骆驼肉、山羊肉、绵羊肉、苜蓿	水产品产量	当年建设用地面积及分来源 建设用地流入量	煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气

## 2.2 生态足迹模型及参数方案

生态足迹是指产生满足区域内人类生产生活所需的物质以及吸纳区域内人类产生的废物所需的生物生产性土地面积<sup>[40-41]</sup>,基本生态足迹由以下方式计算:

$$EF = N \times ef = N \times \sum r_i (a_i) = N \times \sum r_i \left( \frac{c_i}{p_i} \right) \quad (1)$$

$$EC = N \times \sum a_i r_i y_i \quad (2)$$

$$r_i = \frac{\frac{p_i}{\bar{p}}}{\frac{\sum q_i}{\sum s_i}} \quad (3)$$

$$y_i = \frac{\frac{p_i}{\bar{p}}}{\frac{Q_i}{S_i}} \quad (4)$$

式中, $N$ 为人口数量, $ef$ 为人均生态足迹, $c_i$ 为*i*种商品的人均消费量, $p_i$ 为*i*种商品的平均生产能力。 $EC$ 为区域生态承载力, $a_i$ 为人均第*i*种土地类型面积。 $r_i$ 为*i*种土地类型的均衡因子, $\frac{p_i}{\bar{p}}$ 为第*i*类土地的平均生产力, $\bar{p}$ 为区域全部生产性土地的平均产量, $q_i$ 为区域第*i*类土地的生物产量, $s_i$ 指区域第*i*类土地的生物面积。 $y_i$ 为第*i*种土地类型的产量因子, $\frac{p_i}{\bar{p}}$ 为区域第*i*种土地的平均产量, $\bar{P}_i$ 为北疆第*i*种土地的平均生产力, $q_i$ 指区域第*i*种土地的生物产量, $s_i$ 指区域第*i*种土地的面积, $Q_i$ 指北疆第*i*种土地的平均生产力, $S_i$ 指北疆第*i*种土地的面积。

土地均衡因子及产量因子借鉴张恒义等<sup>[42]</sup>提供的热值法进行计算。考虑到北疆各区域资源禀赋、社会经济发展状况均有差异,本研究采用“一年一区一值”作为当地模型参数,保留区域间的差异性,使得生态足迹评价更加接近于当地真实情况。

改进生态足迹模型将足迹划分为 3 个部分:生物生产性足迹(可更新生态足迹)、能源用地足迹及建设用地足迹,其计算过程如下:

$$EF = ef_{biol} + ef_{el} \times r_{el} + ef_{cl} \times r_{cl} \quad (5)$$

式中, $EF$ 为区域总的生态足迹, $ef_{biol}$ 为区域生物生产性土地生态足迹, $ef_{el}$ 为区域能源用地足迹, $ef_{cl}$ 为区域建设用地生态足迹。生物生产性土地的生态足迹沿用传统模型的计算方法。

能源用地生态足迹的测度采用吸碳法<sup>[43]</sup>,其量化思路为将所有消耗的能源转化为排碳量,使用吸收总排碳量所需的植被面积进行评价<sup>[30]</sup>,计算过程如下:

$$ef_{cl} = \frac{\sum m_j n_j}{k} \quad (6)$$

$$k = \frac{s_{al}}{s_{al} + s_{fl} + s_{gl}} \times 0.46 + \frac{s_{fl}}{s_{al} + s_{fl} + s_{gl}} \times 6.44 + \frac{s_{gl}}{s_{al} + s_{fl} + s_{gl}} \times 0.39 \quad (7)$$

$$r_{cl} = \frac{s_{al}}{s_{al} + s_{fl} + s_{gl}} \times r_{al} + \frac{s_{fl}}{s_{al} + s_{fl} + s_{gl}} \times r_{fl} + \frac{s_{gl}}{s_{al} + s_{fl} + s_{gl}} \times r_{gl} \quad (8)$$

式中,  $m_j$  为第  $j$  种能源的消耗量,  $n_j$  为第  $j$  种能源的碳排放系数,  $k$  为区域的综合碳吸收系数,  $s_{al}$  代表区域耕地面积,  $s_{fl}$  代表区域内林地面积,  $s_{gl}$  代表区域内草地面积。

建设用地足迹评价方法是由生态足迹思想<sup>[44-45]</sup>推演而来,基于区域当年建设用地流入量与当年建设用地总量,构建建设用地评价的均衡因子与产量因子,并对区域的建设用地足迹进行评价。其计算过程如下:

$$ef_{cl} = r_{cl} \times S_{cl} \quad (9)$$

$$r_{cl} = \frac{S_{inflow}^{al-cl}}{S_{inflow}^{cl}} \times r_{al} + \frac{S_{inflow}^{fl-cl}}{S_{inflow}^{cl}} \times r_{fl} + \frac{S_{inflow}^{gl-cl}}{S_{inflow}^{cl}} \times r_{gl} \quad (10)$$

$$y_{cl} = \frac{\frac{S_{inflow}^{cl}}{S_{cl}}}{\sum S_{inflow}^{cl}} \quad (11)$$

式中,  $S_{cl}$  为区域建设用地面积,  $S_{inflow}^{cl}$  为当年区域建设用地流入面积,  $S_{inflow}^{al-cl}$ 、 $S_{inflow}^{fl-cl}$ 、 $S_{inflow}^{gl-cl}$  分别为当年区域分别由耕地、林地、草地向建设用地的流入面积,  $\sum S_{inflow}^{cl}$  为当年北疆建设用地流入量,  $\sum S_{cl}$  为当年北疆建设用地总量。

### 2.3 生态利用效率及可持续性评价

研究中引入资源利用效率(EE)对生态利用效率进行评价,即单位面积生态足迹所创造的经济价值,效率值越高说明区域资源的利用效率越高。其计算过程如下:

$$EE = \frac{VA}{EF} \times 100\% \quad (12)$$

式中,  $VA$  代表区域的经济增加值。

通过生态压力指数来反应各区域的生态环境承压能力的强弱<sup>[46]</sup>,其运算过程如下:

$$ETI = ef' / ec \quad (13)$$

式中,  $ef'$  为区域可更新人均生态足迹,  $ec$  为区域人均生态承载力。

通过 ECC 协调指数来评价区域的生态环境与社会发展的协调性,可以在一定程度弥补生态赤字计算的不足<sup>[47-49]</sup>。并计算当地的生态足迹多样性指数,用以辅助生态足迹的评价体系。其数值越接近 1.414 表明区域协调性越好,越接近 1 表明区域协调性越差,计算公式如下:

$$ECC = \frac{ef' + ec}{\sqrt{(ef')^2 + ec^2}} \quad (14)$$

### 2.4 土地利用转移矩阵

为了明确北疆城市在发展过程中,对于周边不同类型土地的开发利用情况。采用地理信息系统(GIS)及遥感技术(RS)技术对遥感影像数据进行处理,并裁剪至相应子区间。在遥感分类解译的基础上,提取研究区内各土地利用类型的面积变化,并将不同时期的土地利用转换关系通过矩阵形式展示,精细反映城市发展过

程中对于土地的开发利用情况及各个部分间的流向,定量评价各部分间的相互转化情况,明确建设用地开发利用过程中对其他土地及生态系统的影响(表2)。

表2 研究区2015—2018年土地利用转移矩阵

Table 2 Land Use Transfer Matrix 2015—2018 of the study area

土地利用类型 Land use types/hm <sup>2</sup>	耕地 Arable land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land	流出量 Outflows
耕地 Arable land	4046192.28	2511.36	119008.62	5701.5	43946.37	10402.83	181570.68
林地 Forest land	3222.63	1236039.03	185801.31	3513.69	851.04	2988	196376.67
草地 Grass land	291871.35	144545.22	16079977.26	24497.01	41067.81	331145.01	833126.4
水域 Water area	7661.16	3881.79	16219.62	556551	1208.88	23957.82	52929.27
建设用地 Construction land	23145.57	314.46	22223.97	3624.03	363165.12	27635.85	76943.88
未利用地 Unused land	58401.27	2849.40	701546.13	85135.05	20246.49	14274215.28	868178.34
流入量 Inflows	384301.98	154102.23	1044799.65	122471.28	107320.59	396129.51	

### 3 结果与分析

#### 3.1 生态足迹时空演变

##### 3.1.1 生态足迹呈不均衡增长态势

从整体来看,在研究时段内北疆生态足迹呈现显著的增加趋势(图2),由2005年的 $5.79 \times 10^7 \text{hm}^2$ 上升至2018年的 $2.07 \times 10^8 \text{hm}^2$ ,增长了3.5倍,年增长率为 $1.07 \times 10^7/\text{a}$ 。其中又以能源用地增幅最大,在研究时段内增长了5.3倍。同时,耕地、林地、水域、建设用地都呈现增加趋势,分别为1.08倍、1.91倍、1.07倍、1.51倍,表明研究时段内北疆地区经济社会发展对生态环境的压力不断增大,且主要成因为能源消耗的剧增,林地开发强度增加,建设用地扩张迅速。

北疆人均生态足迹在研究时段内呈现显著升高态势,由2005年 $6.38 \text{hm}^2/\text{人}$ ,增长至2018年 $21.63 \text{hm}^2/\text{人}$ ,年增长率为 $1.09 \text{hm}^2 \text{人}^{-1} \text{a}^{-1}$ ,但人均生态承载力波动微弱;生物生产性足迹增长1.03倍,占生态足迹的比例由2005年39.51%降低至2018年11.40%。反映出生态环境难以满足当前人类对于生产生活所需的物质需求,亦无法吸纳区域内人类所产生的废物,人地矛盾进一步加剧。

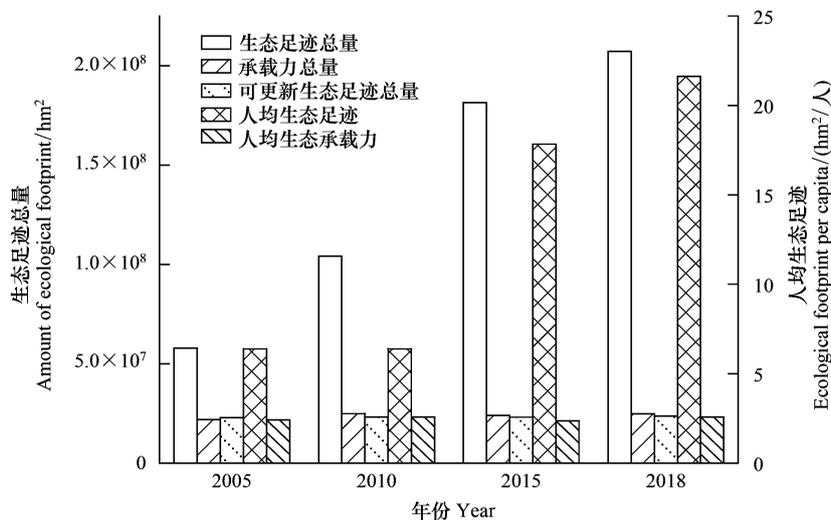


图2 北疆生态足迹及生态承载力状况

Fig.2 Ecological footprint and ecological carrying capacity of North Xinjiang

从足迹成分变化来看(图3),能源用地对生态足迹增长贡献最大,占增长总量的99%。研究时段内,能源用地对当年的生态足迹贡献率呈显著增加,2005年为59.2%,2010年为76.7%,2015年为86.7%,2018年达到88%;能源账户中,煤炭与焦炭的消耗量分别增加了4.98倍和3.96倍,原油、液化石油气、天然气消耗则分别增加了1.45倍、2.3倍、1.89倍。耕地对当年的生态足迹的贡献率呈现下降趋势,分别为35.2%、20.9%、12%、10.6%;生物生产性账户中,耕地面积增加了1.45倍,生物性产品的热值产出增加了2.78倍,但生态足迹仅仅增加了1.08倍,表明单位耕地的产出呈现增加态势,耕地的使用效率也有所提升,但新疆耕地总体质量不高,存在大量不稳定耕地,且与社会发展用地矛盾突出,因此要严格相关用途管制,限制非农化耕地转换,把好耕地红线。建设用地的贡献率由2005年的1.3%降低至2018年的0.6%,但北疆建设用地面积增长了1.69倍,表明期间北疆的城市化进程及社会经济发展均取得了显著进步。林地与水域的贡献率变化不大,稳定在0.1%上下。草地的生态足迹贡献率呈现逐年下降的态势,由2005年4%降低至2010年1.2%,到2018年仅为0.6%,生物生产性账户中草地面积增加了1.04倍,同时生物性产品热量产出增加了2.36倍,表明北疆各个地州对于草地的开发强度有所减少,同时草地资源的利用效率有所提升。

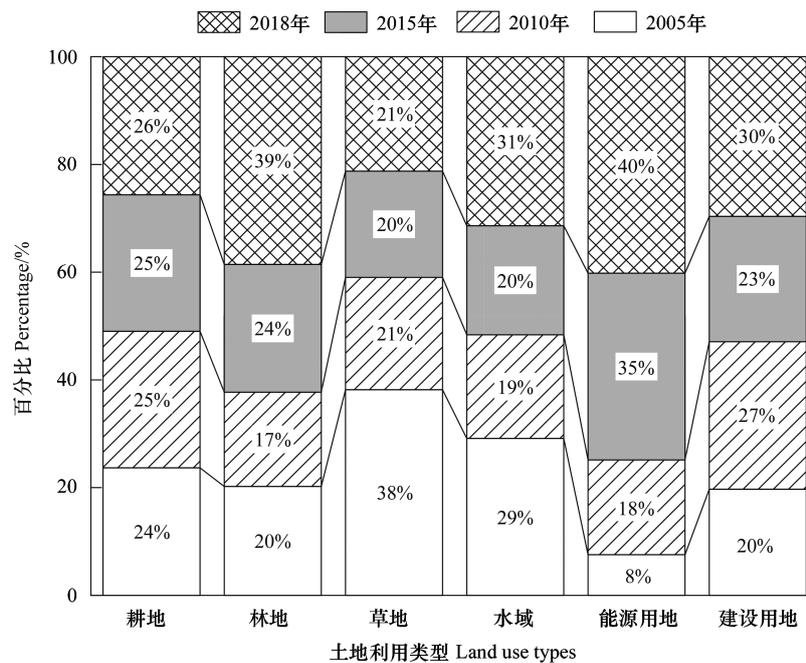


图3 北疆生态足迹变化情况

Fig.3 Changes in ecological footprint of North Xinjiang

### 3.1.2 区域间差异显著

考虑到北疆各地州资源禀赋及社会发展状态,依据各产业多年平均产业增加值将各地州划分为不同发展类型。其中,塔城地区第一产业增加值比重最大,划分农业型地州;石河子市、克拉玛依、昌吉州第二产业增加值比重最大,划分为工业型地州;乌鲁木齐、博州、阿勒泰地区、伊犁地区划分为服务业型地州。从各地州的足迹贡献率来看,2005年及2010年乌鲁木齐市为主导城市,贡献率分别为30%和24.8%;2015年及2018年主导贡献的地州为昌吉州,贡献率达29.3%和29.7%,可见昌吉州作为天山北坡城市群发展的核心区,其影响日趋增加。

分区域来看(图4),2005—2018年间生态足迹增幅序列为昌吉州>石河子>克拉玛依>乌鲁木齐>伊犁地区>塔城地区>博尔塔拉州>阿勒泰地区,呈现工业型地州>农业型地州>服务业型地州的态势。其中,乌鲁木齐市与石河子市以能源与建设用地足迹增长为主导,伊犁地区以能源与林地足迹增长为主,其余地区均为能源与耕地增长为主导。可见,社会经济发展及城市化进程导致的能源消耗增加为北疆地区生态足迹增加的主

要原因,各类资源的开发力度在不断加强,在“碳达峰、碳中和”背景下,如何实现清洁能源替代、绿色能源转型以达到零碳、近零碳排放,是当前平衡社会发展与生态保护的重点。研究时段内草地生态足迹下降幅度较大,北疆整体降低了  $1.04 \times 10^6 \text{hm}^2$ ,其中阿勒泰地区降幅最大,达  $33.78 \times 10^4 \text{hm}^2$ ,林地与水域生态足迹也有不同程度的降低。另外,乌鲁木齐、石河子市、昌吉州、伊犁地区呈现生物生产性生态足迹降低态势,其余地州为增加态势,不同类型城市分化显著。从人均水平来看,生态足迹增长序列为:石河子>昌吉州>克拉玛依>乌鲁木齐>伊犁地区>博尔塔拉地区>塔城地区>阿勒泰地区。其中,石河子 2018 年人均生态足迹约为 2005 年人均生态足迹的 16 倍,昌吉州为 7.9 倍,克拉玛依 3.4 倍,其余地州增长不到 2 倍。

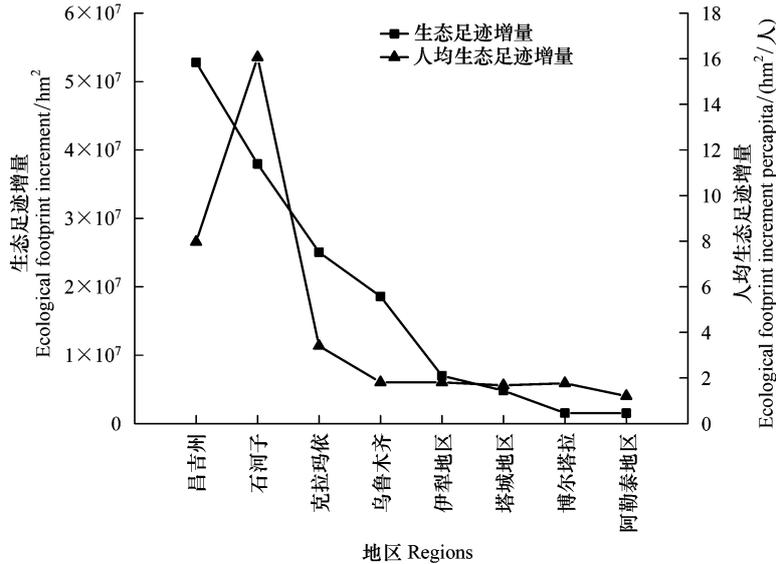


图 4 各地州生态足迹增量及人均生态足迹增量

Fig.4 Ecological Footprint increment and ecological footprint per capita of regions

### 3.2 生态承载力分析

研究时段内,北疆地区生态承载力呈现波动上升的态势(图 5),由 2005 年的  $2.19 \times 10^7 \text{hm}^2$  上升至 2018 年  $2.48 \times 10^7 \text{hm}^2$ ,增加了 1.13 倍,增速为  $15.32 \times 10^4 \text{hm}^2/\text{a}$ 。其中,耕地、林地、建设用地承载力同步呈现波动上升状态,增幅分别为 1.09 倍、7 倍和 1.43 倍,而水域和草地承载力则呈现下降趋势。生态承载力的增大,表明了该用地对于生产性活动的承受能力有所提升,耕地、建设用地面积增加是承载力增大的主导因素,而草地承载力下降则与草地质量下降、面积有所缩减有关。人均生态承载力由 2005 年的  $2.415 \text{hm}^2/\text{人}$  上升至 2010 年  $2.58 \text{hm}^2/\text{人}$ ,2015 年降低至  $2.35 \text{hm}^2/\text{人}$ ,在 2018 年上升至  $2.59 \text{hm}^2/\text{人}$ ,整体变化趋势与整体承载力变化一致。

分区域来看(图 6),只有昌吉州与阿勒泰地区承载力呈现降低趋势,昌吉州除建设用地外、阿勒泰地区除水域外其余用地承载力均在降低,两地州都是以耕地承载力的大幅度降低为主导,缩减量分别占当地整体承载力缩减量的 55.6% 和 76.2%。为此,两地州应因根据自身发展需求,积极寻求提升生态承载能力的途径,以缓解环境压力。对比用地类型变化,发现耕地承载力减少的地州为石河子市、昌吉州、阿勒泰地区;乌鲁木齐市、昌吉州林地承载力有所下降;除克拉玛依与伊犁地区外,其余地州草地生态承载力均在降低;乌鲁木齐市、阿勒泰地区、伊犁地区呈现水域承载力上升态势;建设用地方面,石河子市、博州地区、阿勒泰地区呈降低态势,其余地州呈不同程度上升。从人均变化来看,除伊犁地区、昌吉州、阿勒泰地区外均处于上升状态,增量最大的是石河子市达  $2.26 \text{hm}^2/\text{人}$ ,其次为塔城地区 ( $1.95 \text{hm}^2/\text{人}$ ),博州地区增量为  $0.87 \text{hm}^2/\text{人}$ ,其余地州增幅较小。

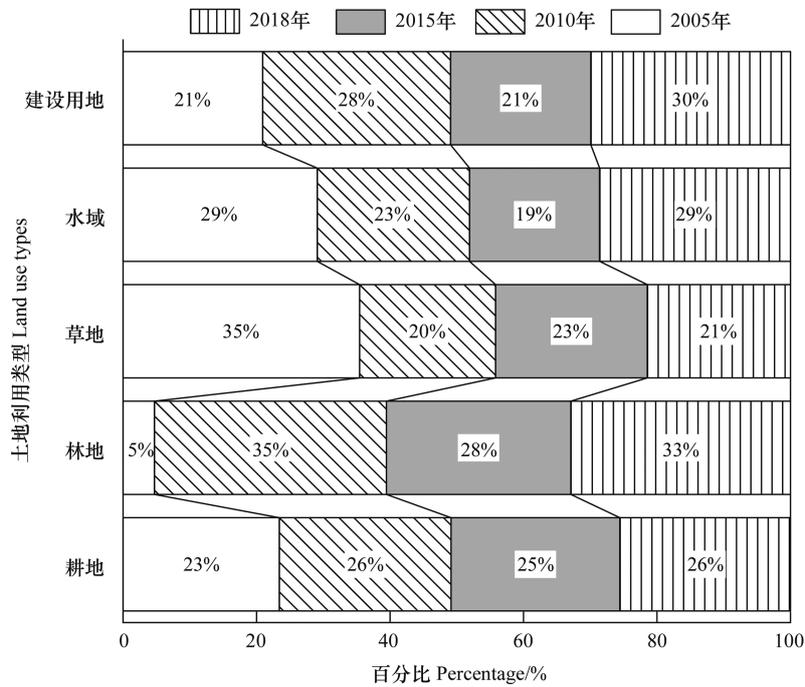


图 5 北疆生态承载力变化情况

Fig.5 Changes in ecological carrying capacity of North Xinjiang

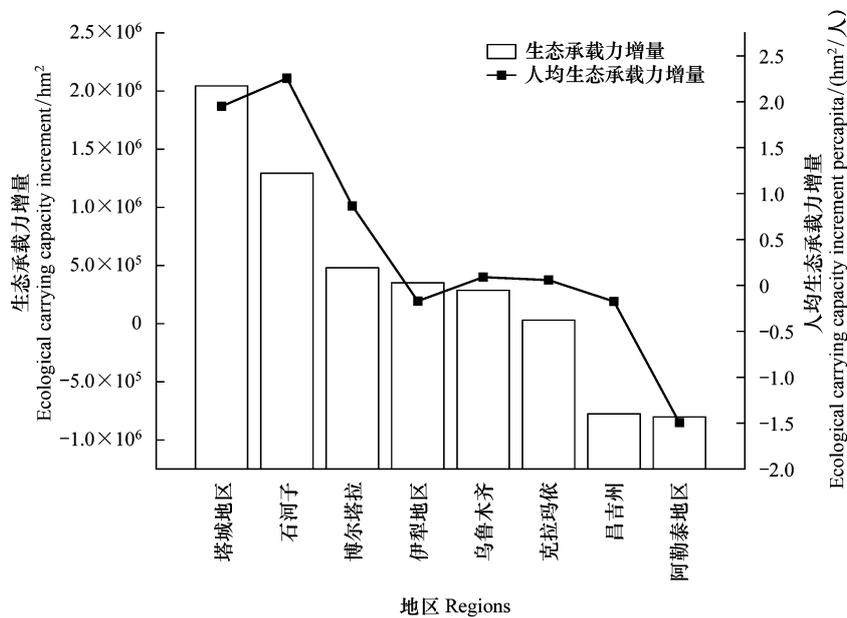


图 6 各地州生态承载力增量及人均生态承载力增量

Fig.6 Ecological carrying capacity increment and ecological carrying capacity increment per capita of regions

### 3.3 生态资源利用效率

生态资源利用效率的高低可以在一定程度上反应区域对生产性土地等自然资源的利用情况<sup>[50]</sup>。在研究时段内,北疆整体生态资源利用效率呈现连续上升趋势(图 7),由 2005 年 0.29 万元/hm<sup>2</sup>增长至 2018 年 0.38 万元/hm<sup>2</sup>,总体增长了 1.32 倍。其中,第一产业生态资源效率有所降低,二三产业有所提升,表明地区经济发

展重心由农业向工业、服务业转型,产业结构优化升级。地区整体产业结构在 2005 年及 2010 年呈现第二产业为主导,增加值贡献率分别达 46.52%、50.28%,在 2015 年及 2018 年则呈现第三产业为主导,增加值贡献率达 50%左右,同期第二产业增加值贡献率降低至 40%以下,第一产业贡献率则呈缓慢下降趋势,由 2005 年的 13.94%连续降低至 2018 年的 10.31%。

从行政单元的产业结构来看,乌鲁木齐市、阿勒泰地区、伊犁地区呈现第三产业增加值贡献率上升状态,石河子市、昌吉州和博州地区呈现第二产业增加值贡献率上升,克拉玛依市则呈现二产贡献率略微降低,三产略微提升的状态。同时,乌鲁木齐市、博州地区、阿勒泰地区、塔城地区、伊犁地区呈现总体生态效率持续上升的态势,石河子市呈现总体生态利用效率持续下降,昌吉州和克拉玛依地区生态利用效率变化虽有波动,但仍呈现降低趋势。

总体来看,工业型城市的生态利用效率呈降低状态,而农业型与服务业型城市生态利用效率成上升态势。其可能的成因为生态足迹的增长速度远远大于区域经济增长速度的增长速度,消耗的环境价值无法与创造的经济价值持平,导致生态利用效率呈现降低态势。新疆正处于经济发展转型过渡的关键时期,应结合国家及自治区相关政策,把握契机改善经济结构、改变以煤为主的能源结构、优化以工业为主的产业结构,因地制宜的发展相关产业,提高资源利用效率并兼顾产业发展对生态环境的影响。

### 3.4 生态可持续性及其空间分布格局

#### 3.4.1 生态赤字加剧且空间分布不均

通过对于北疆及各地州的生态足迹以及生态承载力对比,对区域发展的可持续性进行分析。发现研究时段内,北疆整体呈现不可可持续发展的状态且生态赤字在持续增加(图 8),扩张速率约  $1.05 \times 10^7 \text{ hm}^2/\text{a}$ ,地州扩张速率序列与生态足迹增幅序列基本一致。生态赤字的主要原因在于能源用地足迹因社会经济发展需求而大幅度上升。林地、草地、水域由于退耕还林、还草政策的不断推进而略有生态盈余,建设用地在 2015 年呈现生态赤字,其余年份呈现生态盈余,但盈余量在逐年减少。生态赤字表征了区域发展需求大于生态供给能力,说明北疆呈现消耗生态存量的不良发展状态,长此以往将会透支区域生态资源,形成不可持续的恶性循环。

所有地州都呈现生态赤字增加态势,针对各地州赤字组份分析发现,乌鲁木齐市呈现水域生态盈余,其余用地类型生态赤字;克拉玛依市各地类呈现生态赤字,石河子市除能源用地外,各地类呈生态盈余状态;昌吉州水域及建设用地方面呈盈余状态;阿勒泰地区、塔城地区及博州地区则以生态赤字为主;伊犁地区则呈现生态盈余状态,建设用地在 2018 年转为赤字。人均生态赤字变化呈现工业型>农业型>服务业型城市,其中以克拉玛依地区、石河子市、昌吉州为主导。

#### 3.4.2 生态压力较大且协调性较低

生态压力指数与人均生态协调指数分别反应了区域生态环境的承压能力以及生态环境与社会经济发展的协调程度,在一定程度上弥补了生态赤字的不足,更加全面的对区域可持续发展性做出评价<sup>[47]</sup>。借鉴赵贵等<sup>[46]</sup>提供的生态压力指数等级划分标准,对研究区生态压力情况进行分析。发现,研究时段内北疆地区整体处于稍不安全状态,即整体自然系统安全性一般,但由生态足迹扩大引发安全性下降的风险仍然存在;从地州角度来看,克拉玛依地区、阿勒泰地区处于很不安全状态,即两地自然环境所承受的生态压力较大,环境风险较高,可持续发展性较差;伊犁地区和石河子市则分别处于较安全与很安全类别,即由生态足迹带来的环境压力较低、可持续发展性较强,这与生态赤字评价结果一致。石河子市作为率先贯彻可持续发展理念的兵团

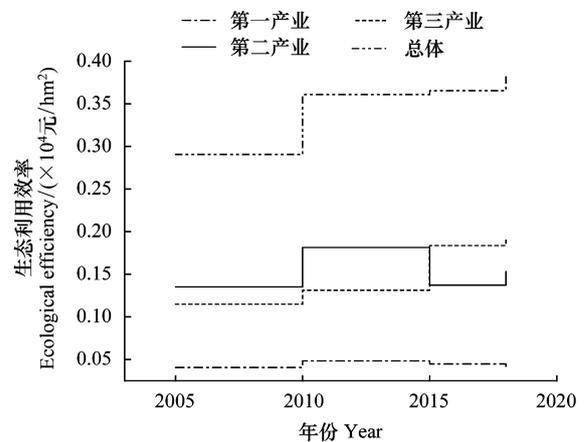


图 7 北疆整体生态利用效率

Fig.7 Ecological efficiency of North Xinjiang

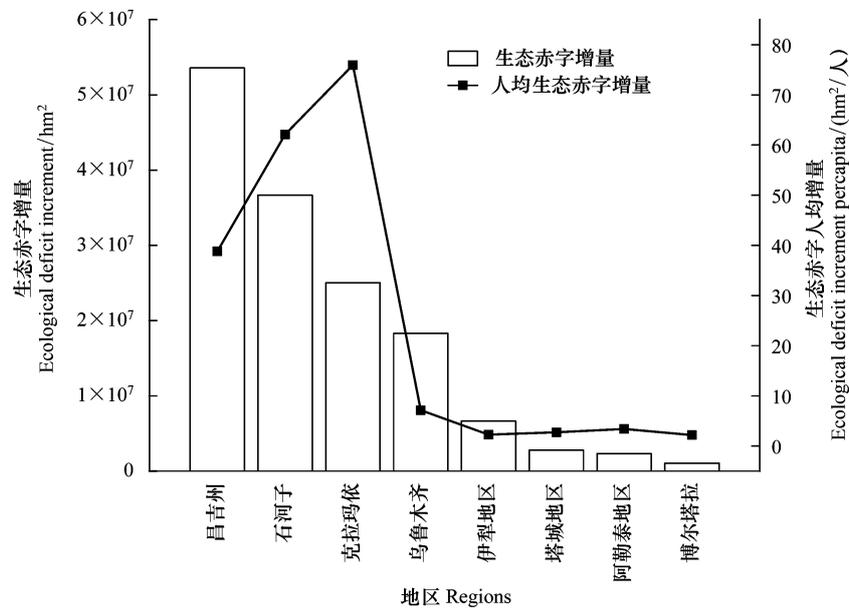


图8 各地州生态赤字增量及人均生态赤字增量

Fig.8 Ecological deficit increment and ecological deficit increment per capita of regions

城市,在兵地融合不断深入的契机下,应利用自身经济发展优势、结合现有可持续发展经验,协同带动玛纳斯县、沙湾县等周边地区,与乌鲁木齐、昌吉协同发展同步,争取形成“沙石玛兵地融合”与“乌昌一体化”相呼应的良性发展局面。

从协调性来看,北疆整体的处于协调发展状态,且人均可更新生态足迹小于人均生态承载力即生态需求略小于生态供给。石河子市和克拉玛依市的发展协调性较差,但石河子市处于生态需求小于生态供给且协调性持续下降的状态,是生态资源利用效率不高、不消耗生态存量的良性不协调;而克拉玛依市则处于生态需求大于生态供给但协调性逐渐上升的状态。乌鲁木齐市和阿勒泰地区虽然发展协调性较好,但均处于生态需求大于供给的发展状态,表明区域是通过消耗自然资本存量来支持发展需求的,其可持续性较差。伊犁地区则处于发展均衡且生态需求小于生态供给的良性发展状态。由于自然本底及经济发展水平的差异,部分地州虽然城市化率较高,但生态用地少且功能一般,难以满足生物多样性保护需求,且生物产品的产出与消耗很大,以消耗生态资源存量为代价维持城市发展,导致环境压力逐渐增大且失衡程度增加,可持续发展将面临巨大挑战。

#### 4 讨论

本研究基于传统生态足迹模型,对生态足迹的传统模型进行改进,将模型账户划分为生物生产性账户与非生物生产性账户,并对建设用地足迹计算方法进行改进。采用改进后的生态足迹模型以北疆各地州为例进行实证分析。

##### 4.1 参数方案本地化

本研究借鉴张恒义等<sup>[42]</sup>提供热值算法,结合生态足迹模型方案,对因子进行本土化。其中,涉及到的本土化参数有均衡因子、产量因子、消费商品的平均生产能力。生态足迹中生物生产性土地所受影响因素较多,如种植(养殖)结构、产量等,北疆作为新疆的重点发展区域,生态禀赋各异、城市类型多元、发展程度不一,采用统一值作为参数化方案缺乏合理性。本研究通过设定参数对照方案“同区不同年”、“同年不同区”、“整体对局部”计算不同区域、不同年份的因子。发现采用取均值方式获得的统一参数方案会在一定程度上

消除区域的差异,均值化的本地方案会使得一些特殊年份的差异无法体现。

对照不同尺度测度结果(表3),发现耕地均衡因子当地参数略小于北疆参数而稍大于省域参数,而产量因子略大于省域参数;当地草地均衡因子则显著小于北疆参数及省域参数,产量因子则大于省域参数;林地的均衡因子呈现随研究区范围增大的态势,当地的产量因子则略小于省域产量因子;水域的当地均衡因子大于北疆参数且仅为省域参数的一半;建设用地均衡因子当地参数小于北疆参数和省域参数,但产量因子是省域参数的1.6倍;能源用地本地参数与北疆参数相近,均小于省域参数,产量因子与其他研究一致取0<sup>[22]</sup>。

表3 不同尺度下模型因子对比

Table3 Comparison of ecological footprint model factors in different scales

土地利用类型 Land use types	均衡因子 Equilibrium factors			产量因子 Yield factors	
	当地参数	北疆参数	省域参数	当地参数	省域参数
耕地 Arable land	3.586	5.051	2.25	0.878	0.74
草地 Grass land	0.035	0.051	0.42	0.862	0.54
林地 Forest land	0.180	0.241	2.36	0.923	0.97
水域 Water area	0.153	0.061	0.33	3.120	0.54
建设用地 Construction land	1.762	2.471	2.25	1.192	0.74
能源用地 Energy land	0.998	0.998	2.36	0.000	0.00

当地参数以昌吉州2018年计算结果为例,北疆参数为北疆地区2018年计算结果,省域参数为刘某承等<sup>[22-23]</sup>的测算结果

经参数方案对照发现,生物生产性土地因子大小与研究区范围及统计数据口径有直接关系,建设用地采用流入量构建因子方案在一定程度上避免了对承载力与生态足迹的高估。为了更加合理的评价北疆各地州的可持续发展状况,本研究采用“一年一区一值”的参数方案,进行生态足迹及生态承载力评价。相较于已有研究该方案的优点在于,将研究区按行政单元划分为子区间进行分析,每个子区间相关参数采用当地、当年数据进行计算,在一定程度上降低了由于研究尺度、统计口径、年际变化造成的偏差,保留了子区间的差异性与独特性,为进一步精确定量评价人类活动产生的影响提供了参考,并对相关理论与实证研究起到补充与借鉴作用。

## 4.2 建设用地算法改进与传统算法对照

### 4.2.1 简述

传统生态足迹模型,采用区域的电力消耗情况进行建设用地生态足迹评价,并取建设用地的均衡因子、产量因子与耕地一致<sup>[4]</sup>。电力作为社会生产生活的必须资源,其消耗量的大小与区域的经济发展有必然联系。但仅用电力消耗量评价北疆建设用地生态足迹缺乏合理性,这与城市类型密切相关,如乌鲁木齐市2018年仅规模以上工业、企业电力消耗量达279.02亿千瓦时,超过伊犁地区、塔城地区、阿勒泰地区的用电量总和但建设用地面积却小的多。另外,在城市发展过程中,建设用地规模逐渐增加,越来越多的城市边缘土地流入建设用地,这些土地包含各种用地类型并非全部为生产力最高的耕地,所以直接将建设用地的均衡因子与产量因子定为与耕地一致缺乏合理性<sup>[19]</sup>。因此,本研究结合研究区遥感影像,采用土地利用转移矩阵对研究时段内的建设用地流入流出进行量化,并基于建设用地流入量构建当年的建设用地均衡因子与产量因子,明确了建设用地的流入来源,相较于将耕地因子赋予建设用地更加合理。

### 4.2.2 流入量算法与消耗量算法对照

依据前文城市分类,选择以下地州作为对照样本进行基于建设用地与基于电力的建设用地足迹计算,农业型:塔城地区;工业型:克拉玛依地区;服务业型:伊犁地区。以2018年电力消耗量为基础数据,电力消耗量:伊犁地区>克拉玛依地区>塔城地区。基于电力消耗量建设用地生态足迹计算方法<sup>[51]</sup>如下:

$$ef_{cl-elec} = \frac{C_i \times H_i}{EP_i} \times r_{cl-elec} \quad (15)$$

式中, $ef_{cl-elec}$ 为电能消耗项目转换而来的建设用地生态足迹, $EP_i$ 为电能的世界平均足迹取1000(GJ/hm<sup>2</sup>),

$H_i$  为电力折算系数取 4.04 (GJ/t),  $C_i$  为转化后电能的总消耗量 (kg),  $1\text{kw} \cdot \text{h} = 0.1229\text{kg}$  标准煤,  $r_{cl-elec}$  为基于电力消耗运算的均衡因子, 取刘某承等<sup>[22-23]</sup>提供的测度结果进行对照运算。

结果表明(表 4)基于电力消耗量所得的建设用地生态足迹面积远小于实际建设用地面积,也小于基于建设用地流入量计算的生态足迹面积,即消耗量算法在一定程度上低估了建设用地的生态足迹。其可能的成因为,电力作为生产生活社会发展的必须资源,与当地的城市化水平、产业结构、经济发展状况有直接联系。而北疆地区地域辽阔、城市发展程度不一,存在工业城市面积小消耗大、农业城市面积大消耗不一定大的情况,导致其在研究区适用性降低。

表 4 不同算法建设用地足迹对比

Table 4 Comparison of construction land footprint in different algorithm

地区 Regions	流入量算法/hm <sup>2</sup> Inflow algorithm	消耗量算法/hm <sup>2</sup> Consumption algorithm	实际建设用地面积/hm <sup>2</sup> Actual building area
克拉玛依地区	43563.886	6629.233	28825.470
塔城地区	170734.003	1670.156	74801.250
伊犁地区	303601.740	8422.277	97017.570

#### 4.2.3 可能存在的问题

基于建设用地流入量的算法,在一定程度上使得建设用地生态足迹评估更接近真实情况,但潜在的问题也不可忽略:(1)城市发展过程中,建设用地存在流入同时也存在流出,甚至存在流出量大于流入量的情况,对于这种情况如何更好的进行建设用地评价,是值得思考的问题。且流入量只用于新增建设用地情况,无法明确所有建设用地的具体来源,因此仅可在一定程度上精准评价建设用地的生态足迹。(2)生态足迹构成中,有很大一部分是源于人类生产生活性活动,而建设用地作为人类活动的直接承接单位,应该是生态足迹最集中的区域,现行生态足迹体系中建设用地的生态足迹并没有得到全面的展示。(3)未利用地并未为人类生产生活所用,但其生态价值及生态功能不可忽视。越来越多的未利用地转入建设用地及其他土地利用类型,如何将未利用地合理的并入生态足迹的评价体系中,有待进一步深入研究。

#### 4.3 展望

北疆地区由于其特殊的地理条件及资源优势,在新疆经济及社会发展中拔得头筹,其中又以天山北坡城市群尤甚。伴随城市化进程的推进,社会发展的生态代价不断显现,如何平衡经济发展与生态环境保护成为新时代的挑战。自然环境的优劣是区域可持续发展的基础,在发展社会经济的同时,应注重对于可能发生的生态破坏情况的预防,以及对于已破坏地区的生态修复、消除负面生态影响,做到“预防为主,防消结合”,使得生态环境成为区域经济腾飞的助推剂。北疆各地州城市发展类型多样,资源禀赋不同,发展潜力大,应结合国家及地区政策引导与自身的地缘、资源优势,积极优化产业结构、提高资源利用效率,构建多元健康可持续发展的新型发展体系,立足北疆辐射南疆,推进新疆经济又好又快发展。

### 5 结论

本研究基于传统生态足迹型,采用“一年一区一值”的参数化方案并从建设用地流入量角度对建设用地足迹计算进行改进,结合可持续评价指数对北疆地区生态足迹及可持续发展状态进行评价,结果表明:

(1)研究时段内,北疆整体生态足迹显著增长了 3.5 倍,其中以能源增长为主导,各足迹组份均有上升,生物生产性足迹对足迹总量贡献率大幅度下降,人均生态足迹增长 3.4 倍。工业型城市总体生态足迹增长率和人均生态足迹增长率均大于农业型城市及服务业型城市,部分地州生物生产性足迹有所降低。

(2)研究时段内,北疆整体生态承载力呈现上升态势,除水域和草地外其他组份承载力均呈上升态势,人均生态承载力也有所增加。各行政单元中,只有昌吉州与阿勒泰地区呈现总体承载力及人均承载力均下降的态势,伊犁地区呈人均承载降低态势,其余地州均上升。

(3) 研究时段内,北疆整体生态利用效率上涨 1.32 倍,产业结构在 2010 年后由第二产业主导转为第三产业主导,第一产业增加值贡献率连续降低。各行政单元呈现农业及服务业型城市生态利用效率上升、工业型城市生态利用效率降低的态势,其成因为工业型城市生态足迹增速远大于经济增速,环境价值消耗大于经济价值创造。

(4) 研究时段内,北疆整体呈现生态赤字状态且不断加剧。各地州均呈现生态赤字增长态势,总体及人均增长速率都呈现工业型>农业型>服务业型城市。生态压力指数表明,北疆整体自然系统安全性处于一般水平,但存在由生态足迹激增引发安全性下降的风险。其中克拉玛依地区、阿勒泰地区处于环境风险高、系统安全性差、可持续发展性降低的不安全级别,其余地州则处于安全及以上级别。北疆整体处于协调发展状态,但部分地州处于消耗生态资源存量来满足城市的发展的低协调甚至不协调状态,其可持续发展性有所降低。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] 田浩,刘琳,张正勇,赵贵宁,宁珊,康紫薇,王统霞. 天山北坡经济带关键性生态空间评价. 生态学报, 2021, 41(01): 401-414.
- [ 3 ] 夏楚瑜,李艳,叶艳妹,史舟,刘婧鸣. 基于净生产力生态足迹模型的工业碳排放效应、影响因素与情景模拟. 生态学报, 2017, 37(11): 3862-3871.
- [ 4 ] 石飞,杨庆媛,王成,江娟丽,胡蓉. 基于耕地能值-生态足迹的耕地休耕规模研究以贵州省松桃县为例. 生态学报, 2021, 41(14): 5747-5763.
- [ 5 ] Ester V. Books: Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 3(2 - 3): 185-187.
- [ 6 ] Wackernagel M, Schulz N B, Deumling D, Linares A C, Jenkins M, Kapos V, Monfreda C, Loh J, Myers N, Norgaard R, Randers J. Tracking the ecological overshoot of the human economy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2002, 99(14): 9266-9271.
- [ 7 ] Jon R. "Ecological Footprint". *Science*, 1997, 275(5303): 1049-1053.
- [ 8 ] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [ 9 ] Mózner Z, Tabi A, Csutora M. Modifying the yield factor based on more efficient use of fertilizer——The environmental impacts of intensive and extensive agricultural practices. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 58-66.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] 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(04): 761-771.
- [ 12 ] 董建红,张志斌,笄晓军,张文斌,冯雪丽. "三生"空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力——以甘肃省为例. 生态学报, 2021, 41(15): 5919-5928.
- [ 13 ] 方恺,董德明,林卓,沈万斌. 基于全球净初级生产力的能源足迹计算方法. 生态学报, 2012, 32(09): 2900-2909.
- [ 14 ] 王圣云,林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素——水足迹与灰水足迹视角. 地理科学, 2021, 41(02): 290-301.
- [ 15 ] 朱万春. 可持续发展背景下基于生态足迹法的旅游扶贫与精准识别研究. 生态经济, 2018, 34(07): 104-109.
- [ 16 ] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式. 生态学报, 2015, 35(06): 1647-1659.
- [ 17 ] 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(06): 1254-1261.
- [ 18 ] 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(04): 1248-1256.
- [ 19 ] 周涛,王云鹏,龚健周,王芳,冯艳芬. 生态足迹的模型修正与方法改进. 生态学报, 2015, 35(14): 4592-4603.
- [ 20 ] Sigurður E J, Jukka H, Brynhildur D. Data accuracy in Ecological Footprint's carbon footprint. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 105983.
- [ 21 ] 赵卉卉,王远,谷学明,王义琛,周婧,孙友胜. 基于物质流和生态足迹的可持续发展指标体系构建——以安徽省铜陵市为例. 生态学报, 2012, 32(07): 2025-2032.
- [ 22 ] 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(03): 592-597.
- [ 23 ] 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(09): 1550-1559.
- [ 24 ] 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(04): 1405-1412.
- [ 25 ] 杨开忠,杨咏,陈洁. 生态足迹分析理论与方法. 地球科学进展, 2000, 15(06): 630-636.
- [ 26 ] 惠焯,陈晓楠,宋健峰. 基于水足迹的作物生产生态效率评价——以陕西省为例. 生态学报, 2021, 41(08): 3078-3091.
- [ 27 ] Wang H, Huang J J, Zhou H, Deng C B, Fang C L. 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*, 2020, 262: 110331.

- [28] Peng B H, Li Y, Ehsan E, Guo W. Dynamic evolution of ecological carrying capacity based on the ecological footprint theory: A case study of Jiangsu province. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 19-26.
- [29] 杨屹, 朱彦臻, 张景乾. 关中-天水经济区生态足迹变化驱动因素. *生态学报*, 2017, 37(21): 7061-7067.
- [30] 李鹏辉, 徐丽萍, 张军民, 金梦婷, 张茹倩. 干旱区内陆河流域三维生态足迹时空变化分析——以玛纳斯河流域为例. *生态学报*, 2020, 40(19): 6776-6787.
- [31] 杨屹, 张柯. 足迹家族视角下关中城市群实现可持续发展目标的公平性评价. *生态学报*, 2021, 41(16): 6339-6350.
- [32] 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.
- [33] 金梦婷, 徐丽萍, 李鹏辉. 南北疆区域经济差异化三维生态足迹自然资源利用的时空演变. *生态学报*, 2020, 40(13): 4327-4339.
- [34] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 吴品儒. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价. *干旱区研究*, 2020, 37(05): 1337-1345.
- [35] 王鹤松, 何敏, 闫薇, 艾金龙, 褚建民. 基于遥感总初级生产力的天山-塔里木绿洲地区生态系统脆弱性研究. *生态学报*, 2021, 41(24): 9729-9737.
- [36] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(01): 3-14.
- [37] 李艳忠, 刘昌明, 刘小莽, 梁康, 白鹏, 冯昇星. 植被恢复工程对黄河中游土地利用/覆被变化的影响. *自然资源学报*, 2016, 31(12): 2005-2020.
- [38] 唐洪松, 马惠兰, 苏洋, 辛冲冲, 汪晶晶. 新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收. *干旱区研究*, 2016, 33(03): 486-492.
- [39] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 冯茂秋, 朱芳. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异. *生态学报*, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [40] 周静, 管卫华. 基于生态足迹方法的南京可持续发展研究. *生态学报*, 2012, 32(20): 6471-6480.
- [41] Wang Y N, Jiang Y T, Zheng Y M, Wang H W. Assessing the Ecological Carrying Capacity Based on Revised Three-Dimensional Ecological Footprint Model in Inner Mongolia, China. *Sustainability*, 2019, 11(7): 2002.
- [42] 张恒义, 刘卫东, 王世忠, 单娜娜, 梁红梅. “省公顷”生态足迹模型中均衡因子及产量因子的计算——以浙江省为例. *自然资源学报*, 2009, 24(01): 82-92.
- [43] 方恺, 董德明, 沈万斌. 生态足迹理论在能源消费评价中的缺陷与改进探讨. *自然资源学报*, 2010, 25(06): 1013-1021.
- [44] William E R. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(02): 121-130.
- [45] Feng Z M, Sun T, Yang Y Z, Yan H M. The Progress of Resources and Environment Carrying Capacity: from Single-factor Carrying Capacity Research to Comprehensive Research. *Journal of Resources and Ecology*, 2018, 9(02): 125-134.
- [46] 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(06): 135-138.
- [47] 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(02): 259-262.
- [48] 朱玉鑫, 姚顺波. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展研究——以陕西省为例. *生态学报*, 2021, 41(09): 3331-3342.
- [49] 鲁钰, 赵银娣, 董霁红. 西北地区三维生态足迹的生态安全评价及驱动力分析. *生态学报*, 2022(04): 1-14.
- [50] Shi Y M, Shao C F, Zhang Z Y. Efficiency and Driving Factors of Green Development of Tourist Cities Based on Ecological Footprint. *Sustainability*, 2020, 12(20): 8589.
- [51] 陈成忠, 林振山. 中国能源足迹增长波动的驱动因子分析. *生态学报*, 2009, 29(02): 758-767.