

DOI: 10.5846/stxb201912082667

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.

Li P H, Xu L P, Zhang J M, Jin M T, Zhang R Q. Spatio-temporal changes of three-dimensional ecological footprint in inland river basins in Arid Region: a case study of the Manas River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6776-6787.

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

李鹏辉¹, 徐丽萍^{1,*}, 张军民², 金梦婷¹, 张茹倩¹

¹ 石河子大学理学院, 石河子 832000

² 广西师范大学环境与资源学院, 桂林 541001

摘要:干旱区生态资本独特但生态承载有限,其生态足迹供求关系及均衡机理倍受关注。以干旱区典型内陆河流域—玛纳斯河流域为靶区,根据干旱区土地利用/覆盖类型特征及变化趋势,基于绿洲生产消耗所产生的生态系统服务流动规律建立三维生态足迹评价模型,并利用干旱区本土参数对流域 2000—2018 年的生态足迹时空分异进行分析。结果表明:(1)受自然承载有限和社会经济发展交互影响,玛纳斯河流域生态赤字不断扩大。时间上,18 年间流域生态赤字增长了 4.36 倍,人均生态赤字增长了 3.12 倍,其中能源用地和耕地占比高、增速快,对生态赤字的贡献远远超过其他类型;空间上,石河子市对流域生态足迹的贡献率明显大于沙湾县和玛纳斯县;(2)同期,玛纳斯河流域生态足迹广度增加了 0.59 倍,足迹深度增加了 0.44,广深比达到 3343876:1.63,流量资本占用不断增加,存量资本日趋消损,生态压力不断增大;(3)流域资源利用效率显著提高,18 年内增加了 4.73 倍,增长速度为 5778.3 万元 $\text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$;(4)流域虽面临较大的生态挑战和人口压力,但在全疆范围来看并不突出。本土参数与省域参数和国家参数相比可较好反映流域自然资本利用现状,最后提出干旱区生态承载力的优化展望和流域可持续发展建议。

关键词:玛纳斯河流域;生态足迹;三维模型;省公顷;本土参数

Spatio-temporal changes of three-dimensional ecological footprint in inland river basins in Arid Region: a case study of the Manas River Basin

LI Penghui¹, XU Liping^{1,*}, ZHANG Junmin², JIN Mengting¹, ZHANG Ruqian¹

¹ College of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

² College of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin 541001, China

Abstract: The ecological capital is unique but the ecological carrying capacity is limited in Arid Region. The supply-demand relationship and the equilibrium mechanism of the ecological footprint have received much attention. The Manas River Basin, a typical inland river basin in the arid area, was taken as the target area. According to the characteristics and change trend of land use/cover type in the arid area, we established a three-dimensional ecological footprint evaluation model based on the ecosystem service flow law generated by the oasis production consumption. We analyzed the spatial and temporal differences of the ecological footprint of the river basin from 2000 to 2018 by using the local parameters of the arid area. The results showed that: (1) due to the interaction of limited natural carrying capacity and social and economic development, the ecological deficit of the Manas River Basin is expanding. On the time scale, the basin ecological deficit has increased by 4.36 times in the past 18 years, and the per capita ecological deficit has increased by 3.12 times, among

基金项目:国家自然科学基金(31760151)

收稿日期:2019-12-08; 修订日期:2020-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlpalw@sina.com

which the proportion of energy land and cultivated land was high and the growth rate was fast, and its contribution to the ecological deficit was far more than other types. On the spatial scale, the contribution rate of Shihezi city to the basin ecological footprint was significantly higher than that of Shawan County and Manas County. (2) In the same period, the ecological footprint span of the Manas River Basin increased by 0.59 times, the depth of the footprint increased by 0.44, and the ratio of span to depth reached 3343876:1.63, indicating that the occupation of the flow capital was increasing, the stock capital is declining, and the ecological pressure was increasing. (3) The utilization efficiency of basin resources has been significantly improved, increased by 4.73 times in 18 years, and the growth rate was 5778.3 yuan/hm²/year. (4) Although the basin faced great ecological challenges and population pressure, it was not prominent in the whole Xinjiang. Compared with the provincial and national parameters, the local parameters can better reflect the current status of natural capital use in the river basin. Finally, the optimization prospects of ecological capacity in the arid area and suggestions for sustainable development of the river basin are proposed.

Key Words: Manas River Basin; ecological footprint; three-dimensional model; provincial hectare; local parameter

自然资本和生态服务是人类生存和发展的基础^[1]。随着工业化和城市化的快速发展,人类对自然资本的消耗和生态系统的占用强度越来越大,通过绿色生产和消费以优化土地资源利用效率,提高自然资源承载和生态服务价值成为亟待解决的热点^[2]。生态足迹巧妙地用生物生产性土地面积来表征人类对自然环境的真实占用,实现了自然资本占用和经济外部性成本的统一性核算,为研究生态安全及可持续发展提供了有效方法^[3]。目前国内生态足迹的研究主要集中在足迹模型的改进^[4-6]、研究领域的扩展^[7-10]、时空变化的探讨^[11-13]、驱动力的分析^[14-16]等4个方面。生态足迹研究在理论框架探索、生态价值估算、生态供求关系及时空格局分异等方面取得了明显进展,逐渐明晰了生态足迹评价需要集成人地关系地域系统理论和地球系统科学研究方法,揭示基于系统服务价值流动规律的生态足迹供求关系及平衡机理,探索社会经济活动与生态服务功能之耦合关联机制^[17-19]。但仍难以精准追踪生态服务价值流动过程,缺少定量模拟生态足迹变化格局及路径的技术手段,基于特定区域人地关系模式的多学科综合研究能力相对薄弱,往往忽略了人类社会投入对生态足迹的影响,评价理论及方法都很难精确反映生态系统服务价值的变化规律^[20-22]。当前,如何精确测算基于统一性认识的区域生态资本消耗强度和供给能力,不断改进生态足迹评价方法是提高生态足迹评价可靠性和有效性的关键^[23]。具体表现在:(1)经济全球化愈演愈烈,资源跨区占用问题逐渐突出,区域尺度的生态足迹研究难以真实反映本地的生态压力^[24]。(2)作为生态足迹模型的关键参数,产量因子和均衡因子是不同区域不同生产性土地类型之间进行对比转换的桥梁。由于区域气候、地形、生物生产力等不同,直接借用全球或全国的因子难以真实反映小尺度(特定区域)的生态状况^[25-26]。(3)考虑到森林为主要的碳汇用地,能源消费足迹多用吸收能源消费产生的CO₂所需的林地面积来表示,忽视了土地的多功能性,不够科学。且能源用地缺乏相应的产量因子,容易造成总足迹虚高的现象^[27-28]。(4)在进行生态足迹测算时,大多以行政区域作为研究单元,忽略了系统的开放性,作为衡量生态状况的重要手段,以生态单元作为研究边界更有意义^[29]。

干旱区生态环境脆弱,其建设发展倍受学界关注,相关研究主要集中在承载力计算、生态安全评价、水资源管理等方面^[30-32],尺度上多以行政单元为主,而内陆河流域作为干旱区人工活动、经济建设、水土开发最密集的区域,在该尺度上的研究相对较少。因此,以生态单元完整、经济发展快速而潜在生态安全风险巨大,且相对独立的干旱区内陆河流域——新疆玛纳斯河流域为研究区域,运用本土因子修正其生态足迹当量因子,并完善能源足迹的计算方法,为丰富干旱区内陆河流域生态足迹的研究提供了实证案例。

1 研究区概况

玛纳斯河流域(以下简称“玛河流域”)位于43°05′—45°58′N,85°01′—86°32′E之间,自南向北依次经过山地、绿洲、荒漠,行政上包括石河子市、玛纳斯县、沙湾县、新湖总场以及克拉玛依市的小拐乡等,是“天山北

坡经济带”和“丝绸之路”经济带核心区的重要组成部分(图 1)。21 世纪以来,玛河流域社会经济建设和城镇化发展进入快速阶段,大规模的水土开发和人口经济增长,使绿洲及其周边环境发生了深刻变化。流域经济活动强度不断增加,人工绿洲持续扩张,耕地、建设用地大量增加^[33],农业用水严重挤占工业、生活、生态用水^[34],地下水位持续下降,人类干扰活动强烈,致使湿地退化严重,盐渍化面积扩大,生态服务价值整体下降^[35],区域发展面临着现实及潜在的生态安全风险。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

基础数据来源于 2000、2005、2010、2015 和 2018 年 6—8 月的五期 Landsat 影像(行列号为 144/28、144/29、144/30,下载网址:www.gscloud.cn),利用 ENVI 5.3 软件对影像进行辐射定标、大气校正、图像融合等预处理,通过人机交互解译获得近 18 年 5 期玛河流域土地利用/覆盖变化数据。参照国土资源部发布的《土地利用现状分类》标准,根据研究区土地利用结构特征和生态足迹模型特点,将流域土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类,并结合 Google Earth 和野外实地考察数据对解译结果进行检验和修正。利用遥感影像解译结果作为基础数据计算流域生态承载力。生态足迹的核算内容及社会统计基础数据来源见表 1。

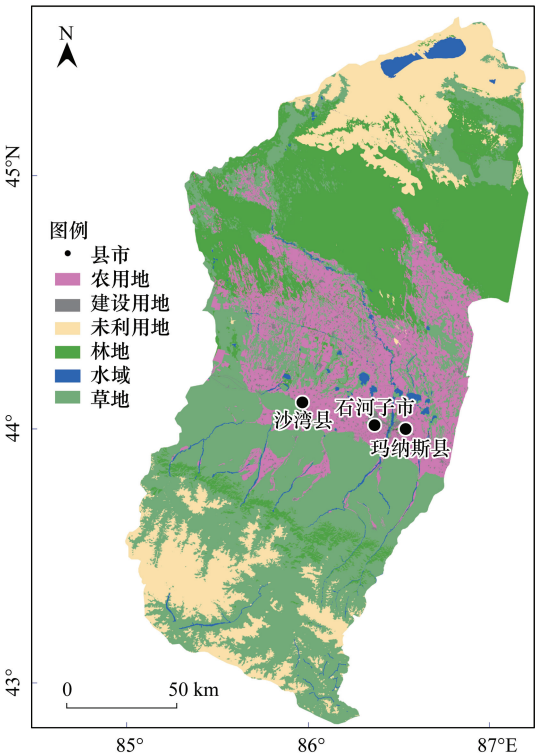


图 1 玛纳斯河流域示意图
Fig.1 Sketch map of the Manas River Basin

表 1 玛纳斯河流域生态足迹账户类型及数据来源

Table 1 Manas River Basin ecological footprint account type and data source			
账户 Account type	类型 Land type	纳入账户的生物性资源和能源类型 Types of biological resources and energy included in the account	数据来源 Data sources
生物资源账户 Biological resources account	耕 地	水稻、小麦、玉米、豆类、棉花、油菜、胡麻、葵花、甜菜、薯类、蔬菜、果用瓜、苜蓿、猪肉、禽蛋	《沙湾年鉴》(2006、2011、2016) 《玛纳斯年鉴》(2006、2011、2016)
	林 地	苹果、梨、葡萄、枣等林果品	《石河子统计年鉴》(2001、2006、2011、2016)
	草 地	羊肉、牛肉、奶制品、羊毛	《新疆统计年鉴》(2001、2006、2011、2016)
	渔业水域	水产品	《中国渔业统计年鉴》(2016)
	建设用地	建设用地	《中国区域经济统计年鉴》(2001)
能源账户 Energy account	能源用地	煤炭、电力、煤油、液化石油气、天然气	《中国林业统计年鉴》(2001、2006、2011、2016) 2018 年新疆维吾尔自治区、沙湾县、玛纳斯县、石河子市的《国民经济和社会发展统计公报》

2.2 研究方法

2.2.1 模型参数计算

借鉴张恒义等^[36]提供的生态足迹模型参数计算方法,以“省公顷”为面积当量,计算玛河流域的均衡因子和产量因子的多年平均值(表 2)。由于林地、草地、耕地均能吸收一定的 CO₂,且玛河流域草地和耕地面积所占比例较大,林地面积相对较小。若仅以林地为测算对象,难以反映流域实际情况。因此依据玛河流域实际情况,对能源足迹计算做如下调整:首先用各类能源的消耗量乘以碳排放系数,得到碳排放总量(公式 1);

其次用碳排放总量除以林地-草地-耕地的综合碳吸收系数得到转化的能源用地面积(公式 2)。能源用地的均衡因子也做相应调整(公式 4)。计算过程如下:

设流域的林地面积为 a_i , 草地面积为 b_i , 耕地面积为 c_i , 其中 i 代表年份, 分别取 2000、2005、2010、2015、2018。

$$Q = \sum A_j M_j \tag{1}$$

$$S_{\text{Energyland}} = \frac{Q}{V_{\text{wood-grass-crop}}} \tag{2}$$

$$V_{\text{wood-grass-crop}} = \frac{a_i}{a_i + b_i + c_i} \times 6.44 + \frac{b_i}{a_i + b_i + c_i} \times 0.39 + \frac{c_i}{a_i + b_i + c_i} \times 0.46 \tag{3}$$

$$r_{\text{Energyland}} = \frac{a_i}{a_i + b_i + c_i} \times r_{\text{woodland}} + \frac{b_i}{a_i + b_i + c_i} \times r_{\text{grassland}} + \frac{c_i}{a_i + b_i + c_i} \times r_{\text{cropland}} \tag{4}$$

式中, A_j 为第 j 种能源类型的消耗量, M_j 为第 j 种能源类型的碳排放系数, Q 表示碳排放总量, $V_{\text{wood-grass-crop}}$ 表示林地-草地-耕地的综合碳吸收系数, 6.44 为林地的碳吸收系数, 0.39 为草地的碳吸收系数, 0.46 为耕地的碳吸收系数, r_{woodland} 为林地的均衡因子, $r_{\text{grassland}}$ 为草地的均衡因子, r_{cropland} 为耕地的均衡因子。不同能源种类的碳排放系数和不同地表类型的碳吸收系数借鉴唐洪松等^[37]的研究成果。

表 2 玛纳斯河流域生态足迹模型的本土参数

Table 2 Native parameters of the Manas River Basin ecological footprint model

模型参数 Model parameters	耕地 Cultivated land	草地 Grass land	林地 Forest land	渔业水域 Fishery water	建设用地 Construction land	能源用地 Energy land
产量因子 Yield factors	1.292	0.796	0.262	0.947	1.292	0.000
均衡因子 Equilibrium factors	3.032	0.131	0.141	0.037	3.032	1.290

2.2.2 生态足迹计算

生态足迹分析法从供需两侧来评判区域的可持续发展状况。为保证地球生物的公平发展, 依据世界环境与发展委员会的建议^[38], 生态承载力需扣除 12% 的生物多样性保护面积。三维生态足迹通过足迹广度和足迹深度两项指标, 实现了对资本流量占用和资本存量消耗的表征, 使其具有了空间属性和时间属性^[4]。足迹广度表征人类在生态承载力限度内对于生物生产性土地面积的真实占用, 体现了人类对资本流量的占用水平, 能够反映区域资源的开发规模; 足迹深度表征人类对超出生态承载力部分资源消耗的累积程度, 体现了人类对资本存量的消耗程度, 能够反映出区域所面临的真实压力^[39]。

$$\begin{aligned} EF &= N \times ef = N \times \sum r_i(aa_i) & EC &= N \times ec = 0.88 \times N \times \sum a_i r_i y_i \\ ED &= EC - EF & EF_{3D} &= EF_{\text{size}} \times EF_{\text{depth}} \\ EF_{\text{size}} &= \min\{EF, EC\} & EF_{\text{depth}} &= 1 + \frac{\max\{EF - EC, 0\}}{EC} \end{aligned}$$

式中, EF 表示生态足迹, N 为人口数量, ef 为人均生态足迹, r_i 为 i 种土地类型的均衡因子, aa_i 为人均占用交易商品折算后的第 i 类生物生产土地面积, EC 表示生态承载力, ec 为人均生态承载力, a_i 为实际人均占有的第 i 类生物生产土地面积, y_i 为 i 种土地类型的产量因子, ED 表示生态赤字。 EF_{3D} 表示区域的三维生态足迹, 数值上与传统模型的 EF 相同; EF_{size} 表示足迹广度, 其上限由区域资源禀赋决定, 取值范围为 $0 < EF_{\text{size}} \leq EC$; EF_{depth} 表示足迹深度, 其取值范围为 $EF_{\text{depth}} \geq 1$, 当 $EF \leq EC$ 时, $EF_{\text{depth}} = 1$, 表示生态盈余, 当 $EF > EC$ 时, $EF_{\text{depth}} > 1$, 表示资本亏损, 其中 1 为足迹深度的自然原长。

2.3 评价指数

2.3.1 自然资源利用效率

自然资源利用效率可以用单位生态足迹所能创造的经济价值测度^[40]。EE 值越大, 说明单位面积的生物

生产性土地生产的生物产品量较大,区域资源的利用效率较高。计算公式如下:

$$EE = \frac{GDP}{EF} \times 100\%$$

2.3.2 生态适度人口

一个区域的生态适度人口由该区域的生态承载能力和人口对生态资源的需求共同决定。计算公式为^[41]:

$$P = N \times \frac{ec}{ef}$$

3 结果与分析

3.1 玛河流域生态足迹与承载力动态变化

3.1.1 玛河流域生态赤字不断扩大

近 18 年玛河流域的生态足迹和生态承载力均不断增加,且前者始终大于后者,生态赤字呈扩大趋势(图 2)。流域的生态足迹由 2000 年的 $249.57 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 2018 年的 $544.12 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 18 年内增加了 1.18 倍,增长速度为 $16.36 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$;流域的生态承载力也由 2000 年的 $210.42 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 增加到 2018 年的 $334.39 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 18 年内增加了 0.59 倍,增长速度为 $6.89 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$,二者增长速度比约为 2.37:1。从人均水平来看,玛河流域的人均生态足迹稳定增长,由 2000 年的 $3.63 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加到 2018 年的 $6.09 \text{ hm}^2/\text{人}$, 18 年内增加了 $2.46 \text{ hm}^2/\text{人}$,增长速度为 $0.14 \text{ hm}^2 \text{ 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$;人均生态承载力在 2015 和 2018 年略有降低,由 2000 年的 $3.06 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增加到 2018 年的 $3.74 \text{ hm}^2/\text{人}$, 18 年内增加了 $0.68 \text{ hm}^2/\text{人}$,增长速度为 $0.04 \text{ hm}^2 \text{ 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$,二者增长速度比约为 3.5:1。对比黑河流域发现,同一时段内两流域的人均生态足迹基本持平,但玛河流域的人均生态承载力却低于黑河流域^[42],表明干旱区内陆河流域自然本底的差异是导致其生态赤字差异的一个重要因素。

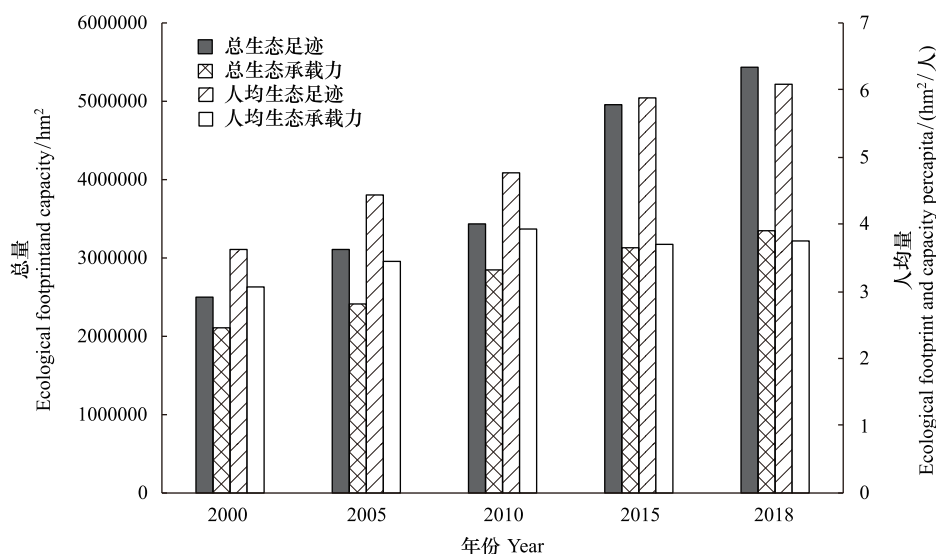


图 2 玛纳斯河流域生态足迹与生态承载力状况

Fig.2 Ecological footprint and ecological capacity of the Manas River Basin

3.1.2 玛河流域生态足迹呈不均衡增长

玛河流域生态足迹和承载力增长不均衡,能源用地和耕地对生态足迹的贡献率远远超过其他类型,其生态足迹的增长速度也明显快于其他类型(表 3)。就足迹成分而言,占比重较大的是能源用地(46.51%)、耕地(38.96%),其次是草地(9.71%)、建设用地(4.72%),相对较小的是林地(0.08%)、水域(0.02%)。除林地、能

源用地在 2010 年有所下降随后上升之外,其余类型的生态足迹均呈现出逐年增加的趋势。其中年增长速度最快的是能源用地 ($7.66\times 10^4\text{ hm}^2/\text{a}$),其次是耕地 ($5.23\times 10^4\text{ hm}^2/\text{a}$)、草地 ($2.98\times 10^4\text{ hm}^2/\text{a}$)、建设用地 ($0.47\times 10^4\text{ hm}^2/\text{a}$),相对较慢的是林地 ($93.91\text{ hm}^2/\text{a}$)、水域 ($34.98\text{ hm}^2/\text{a}$)。单一地类的资源消费结构也不均衡,以 2018 年为例,耕地账户内各资源所占比例由大到小依次是:棉花 (66.53%)、粮食 (14.41%)、其他 (8.99%)、猪肉 (6.66%)、禽蛋 (2.87%)、甜菜 (0.30%)、油料 (0.24%)。

就承载力成分而言,耕地、建设用地呈增加趋势,林地呈先减少后增加趋势,草地和水域呈明显的逐年下降趋势。这与李菊荣^[43]、彭丽媛^[44]、杨爱民等^[33]对玛河流域土地利用变化研究的成果基本吻合。对比发现,流域生态足迹各成分普遍增加,而生态承载力的增加主要依赖于耕地、建设用地面积的扩大。

Table 3 The calculation results of the ecological footprint and ecological capacity of the Manas River Basin										
生态足迹 Ecological footprint/hm ²						生态承载力 Ecological capacity/hm ²				
2018	2015	2010	2005	2000		2000	2005	2010	2015	2018
1909930	1963869	1497994	1168497	968428	耕地	1849864	2133186	2565751	2800474	3014456
620264	603492	468904	248622	83006	草地	94412	90722	85081	76450	73641
3535	3266	2781	3008	1845	林地	2319	2270	2209	2604	2665
1008	787	619	410	378	水域	1853	1078	1156	662	654
222068	208286	164324	157048	137038	建设用地	155793	178541	186813	236791	252460
2684437	2174776	1305559	1519366	1304986	能源用地	0	0	0	0	0
5441243	4954477	3440182	3096951	2495682	总和	2104240	2405797	2841011	3116981	3343876

3.1.3 玛河流域生态足迹空间分异明显

玛河流域内部各行政单元的人均生态足迹存在明显的空间分异(表 4)。2000—2018 年间,玛纳斯的人均生态足迹由 2.99 hm²/人增加到 5.43 hm²/人,增长速度为 0.14 hm²人⁻¹ a⁻¹;石河子的人均生态足迹由 4.29 hm²/人增加到 6.15 hm²/人,增长速度为 0.10 hm²人⁻¹ a⁻¹;沙湾的人均生态足迹由 3.35 hm²/人增加到 6.75 hm²/人,增长速度为 0.19 hm²人⁻¹ a⁻¹;流域整体的人均生态足迹也稳定增长,由 3.63 hm²/人增加到 6.09 hm²/人,增长速度为 0.14 hm²人⁻¹ a⁻¹。对比发现,流域各行政单元人均生态足迹的增长速度差异性明显,由大到小依次是沙湾>玛纳斯>石河子,其中沙湾的增长速度明显高于流域整体水平,玛纳斯的增长速度与流域整体水平持平,石河子的增长速度略低于流域整体水平。从各行政单元对流域生态足迹的贡献能力来看,石河子>沙湾>玛纳斯;而生产总值的贡献率也是石河子>沙湾>玛纳斯,体现出干旱区经济发展引起资源大量消耗的显著后效作用。

Table 4 Changes in the per capita ecological footprint of the Manas River Basin									
年份 Year	玛纳斯 Manas county		石河子 Shihezi city		沙湾 Shawan county		玛纳斯河流域 Manas river basin		
	ef	比例/%	ef	比例/%	ef	比例/%	ef	ec	ed
2000	2.9947	24.63	4.2864	48.92	3.3539	26.45	3.6333	3.0634	-0.5699
2005	4.1017	22.48	4.6190	48.53	4.4380	28.99	4.4406	3.4496	-0.9910
2010	5.1507	26.13	4.7895	46.72	4.3865	27.15	4.7580	3.9293	-0.8287
2015	4.9490	24.54	6.0458	47.72	6.6598	27.73	5.8764	3.6970	-2.1794
2018	5.4324	24.26	6.1464	50.62	6.7523	25.12	6.0895	3.7423	-2.3472

表中比例/%代表该区域生态足迹占流域总生态足迹的比重,ed (ecological deficit) 代表人均生态赤字;ef:代表人均生态足迹 Ecological footprint; ec: 代表人均生态承载力 Ecological capacity; ed:代表人均生态赤字 Ecological deficit

3.2 玛河流域生态足迹广度与深度变化

以三维生态足迹的概念模型为参考作出表达图,表明玛河流域生态足迹广度和足迹深度均不断增加(图 3)。在 2000—2018 年间,玛河流域生态足迹广度由 $210.4\times 10^4\text{ hm}^2$ 增加到 $334.4\times 10^4\text{ hm}^2$,增加了 $124.0\times$

10^4 hm^2 , 增长速度为 $6.89 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$; 生态足迹深度由 1.19 增加到 1.63, 增加了 0.44, 增长速度为 0.025/a。表明玛河流域流量资本占用持续增加, 存量资本开始不断下降, 流域资源过度消费的累积效应日益突出, 生态压力不断增大。

流域各地类的生态足迹广度增加迅速, 18 年内耕地增加了 97.22%, 水域增加了 72.96%, 建设用地增加了 62.05%, 林地增加了 44.42%, 草地减少了 11.28%; 生态足迹深度除耕地和建设用地稳定在 1.00 之外, 其余各成分也均呈增加趋势, 其中草地由 1.00 增加到 8.42, 林地由 0.80 增加到 1.33 后有所下降并逐渐稳定, 水域由 1.00 增加到 1.54。值得关注的是, 流域生态足迹账户各成分的足迹深度变化不一: 耕地和建设用地的足迹深度虽均处于自然原长, 但借助资本流量占用率可以发现耕地由 0.52 增加至 0.70 而后略有下降, 建设用地趋于 0.88, 表明流域对于耕地和建设用地占用程度加重; 草地的足迹深度在 2000 年后开始大于 1, 且增速迅猛 ($0.42/\text{a}$); 林地的足迹深度在 2000 年后开始大于 1, 并在 2010 年后趋于稳定; 水域的足迹深度在 2010 年后开始大于 1。表明流域各类资源的开发规模都在扩大, 且开发规模由大到小依次是耕地>建设用地>草地>林地>水域, 自然资本亏损程度也不断加大, 亏损的严重程度依次是草地>水域>林地>建设用地>耕地。耕地大幅扩张, 却仍能满足目前发展, 主要得益于草地的转入和大量未利用地的开垦, 草地的严重亏损主要在于承载面积的减少和牧草质量的下降。

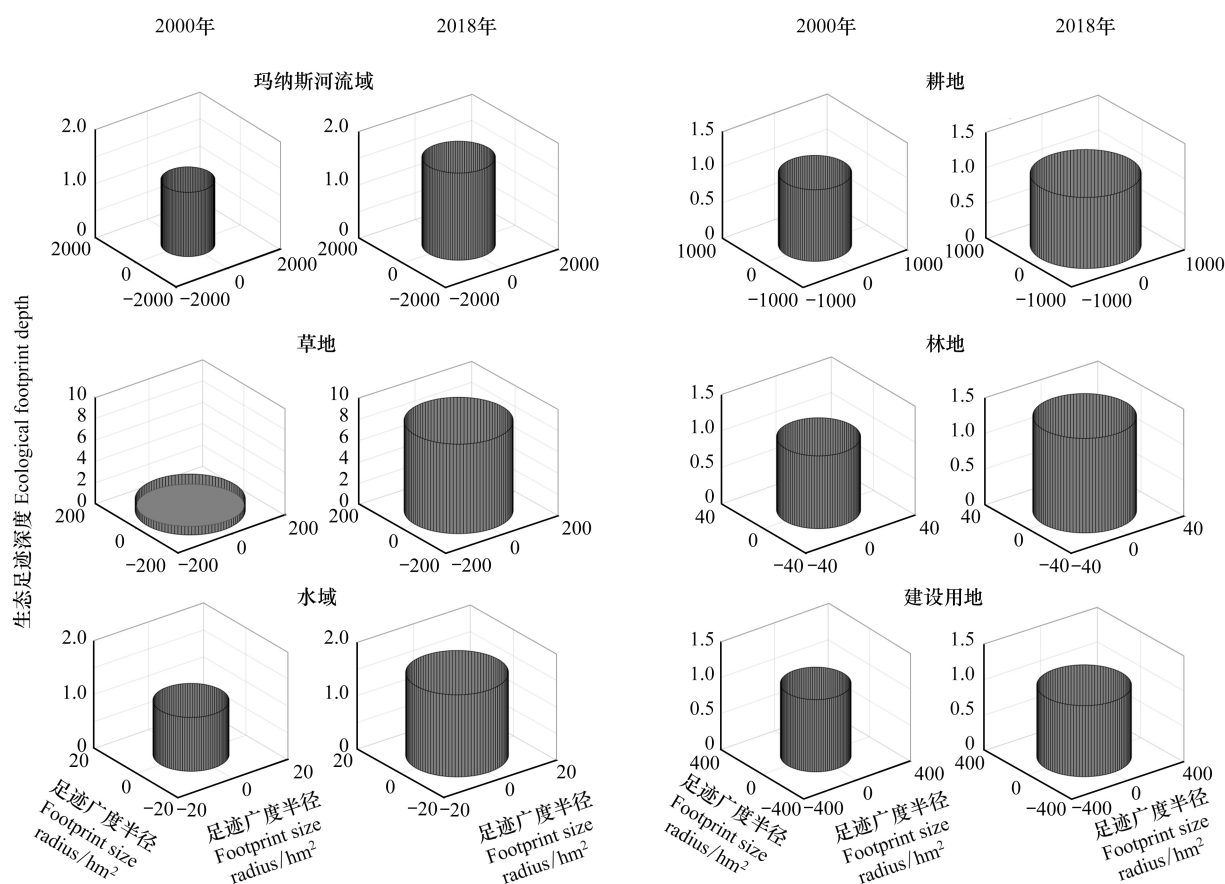


图3 玛纳斯河流域生态足迹广度、深度变化

Fig.3 The size and depth of the ecological footprint of the Manas River Basin

3.3 玛河流域生态利用效率变化

3.3.1 玛河流域面临较大的人口压力

玛河流域人口不断增长, 过剩人口带来的资源环境压力与日俱增(图4)。流域总人口由 2000 年的

68.69×10^4 人增加到 2018 年的 89.35×10^4 人, 18 年内增加了 20.66×10^4 人。而生态适度人口呈波动变化, 在 2000—2005 年和 2010—2015 年略有下降, 在 2005—2010 年和 2015—2018 年小幅上升。整体而言, 呈现出略有下降趋势, 由 2000 年的 57.92×10^4 人减少到 2018 年的 54.91×10^4 人, 18 年内减少了 3.01×10^4 人。结合计算公式发现, 这是由于人均生态赤字的波动增长造成的, 当人均生态赤字增加时, 人均生活的资源需求量也随之增加, 而流域的资源总量相对有限, 因此导致生态适度人口下降。流域总人口不断增加, 而生态适度人口却略有下降, 导致超载人数不断增加, 从 2000 年的 10.77×10^4 人增加到了 2018 年的 34.44×10^4 人, 增长速度为 1.31×10^4 人/年。而玛河流域人口主要集中在山麓绿洲地带, 北邻荒漠, 南靠山地, 生态系统脆弱, 资源相对紧缺, 过剩人口的不断增加进一步加剧了流域面临的生态挑战。

3.3.2 玛河流域资源利用效率明显提高

玛河流域的自然资源利用效率显著提高, 三次产业的资源利用效率和提高速度均是第三产业 > 第二产业 > 第一产业 (图 5)。2000—2018 年间, 玛河流域单位生态足迹所能创造的经济效益由 0.22 万元/ hm^2 增加到 1.26 万元/ hm^2 , 在 18 年内增加了 4.73 倍, 增长速度为 $0.058 \text{ 万元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。其中第一产业由 0.056 万元/ hm^2 增加到 0.316 万元/ hm^2 , 增加了 4.68 倍, 增长速度为 $0.014 \text{ 万元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 第二产业由 0.080 万元/ hm^2 增加到 0.453 万元/ hm^2 , 增加了 4.68 倍, 增长速度为 $0.021 \text{ 万元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 第三产业由 0.085 万元/ hm^2 增加到 0.492 万元/ hm^2 , 增加了 4.81 倍, 增长速度为 $0.023 \text{ 万元 } \text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。表明玛河流域资源利用效率正逐步提高, 经济发展潜力较大。

4 讨论

4.1 本土参数与省域参数和国家参数的比较

本研究测算的玛河流域本土参数与省域参数和国家参数相比, 能较好地反映流域实际状况。同其他生态足迹的模型参数研究一样, 本文能源用地的产量因子取 0, 建设用地的均衡因子和产量因子均与耕地相同。其中, 耕地和建设用地的均衡因子明显高于省域参数和国家参数, 草地、林地和水域的均衡因子明显低于省域参数和国家参数, 能源用地的均衡因子低于省域参数, 但与国家参数近似; 耕地、建设用地和草地的产量因子高于省域参数, 但低于国家参数, 林地的产量因子明显低于省域参数和国家参数, 水域的产量因子高于省域参数, 与国家参数近似 (表 5)。该结果主要与研究区特点和面积当量有关, 省域参数的面积当量是“国家公顷”, 国家参数的面积当量是“全球公顷”, 而本土参数的面积当量是“省公顷”。玛河流域是新疆重要的商品棉和粮食生产基地, 棉花和粮食对流域农业用地的资源占用超过 80%, 生产能力较高, 耕地的均衡因子和产量因子较高。林地面积仅占流域总面积的 4% 左右, 且多为生态林, 生产能力较低, 其均衡因子和产量因子较低。草地和水域面积占流域总面积的近 50% 和 2%, 二者的

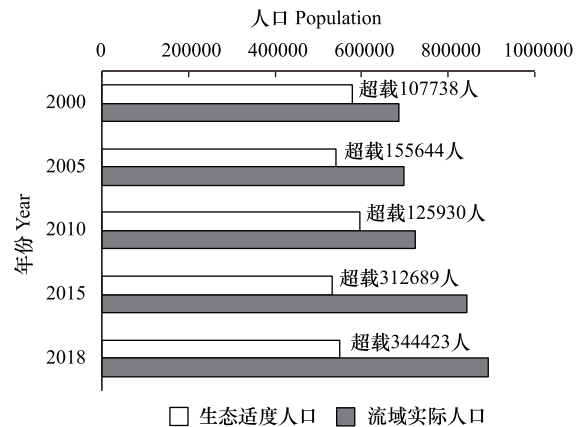


图4 玛纳斯河流域生态适度人口

Fig. 4 The ecologically moderate population of the Manas River Basin

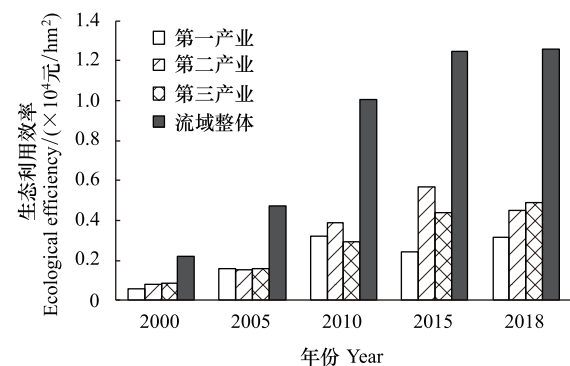


图5 玛纳斯河流域生态利用效率变化

Fig. 5 Ecological utilization efficiency of the Manas River Basin

生产能力在全疆范围内较高,但与其他地类相比较低,因此其产量因子较高,均衡因子较低。此外本文考虑到流域能源消耗量大且草地与耕地均有碳吸收能力的现实,对能源用地的均衡因子进行调整,其值为 1.29。

表 5 不同尺度下生态足迹模型因子对比

Table 5 Comparison of ecological footprint model factors at different scales

土地利用类型 Land type	均衡因子 Equilibrium factors			产量因子 Yield factors		
	本土参数	省域参数	国家参数	本土参数	省域参数	国家参数
耕地 Cultivated land	3.032	2.25	2.52	1.292	0.74	1.32
草地 Grass land	0.131	0.42	0.43	0.796	0.54	1.93
林地 Forest land	0.141	2.36	1.28	0.262	0.97	2.55
水域 Water area	0.037	0.33	0.35	0.947	0.54	1.00
建设用地 Construction land	3.032	2.25	2.52	1.292	0.74	1.32
能源用地 Energy land	1.290	2.36	1.28	0.000	0.00	0.00

国家参数来自于全球生态足迹网(Global Footprint Network)2017 年发布的《Working Guidebook to the National Footprint Accounts》数据^[45];省域参数来自于刘某某等基于净初级生产力对新疆均衡因子和产量因子的测算结果^[46-47]

测算结果上与本土参数相比,省域参数的测算结果高估了生态足迹,低估了生态承载力,夸大了生态赤字;国家参数的测算结果同时高估了生态足迹和生态承载力,在 2000、2005、2010 年低估了生态赤字,在 2015 和 2018 年夸大了生态赤字。省域参数和国家参数测算的生态足迹约是本土参数的 1.50 倍、1.15 倍,生态承载力约是本土参数的 0.61 倍、1.31 倍,生态赤字约是本土参数的 4.40 倍和 0.87 倍(图 6)。主要原因在于玛河流域是天山北坡经济带最为活跃的区域之一,重化工业集中,能源消耗量较大,省域参数中能源用地的均衡因子与林地一致,而林地面积仅占流域总面积的 4%左右,难以反映流域碳排放的实际吸收情况,致使总足迹虚高。同时耕地的产量因子高于省域参数,致使其低估了生态承载力,从而夸大了流域的生态赤字状况。玛河流域的水域和耕地产量因子与国家参数接近(实际上略低于),而草地和林地的产量因子明显低于国家参数,致使其高估了生态承载力。

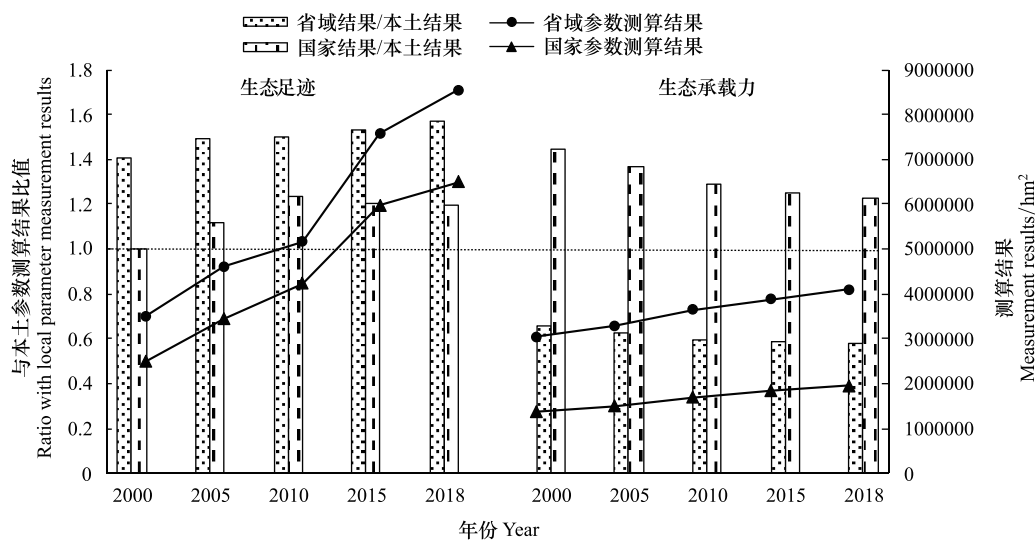


图 6 不同参数下玛纳斯河流域生态足迹测算结果对比

Fig.6 Comparison of ecological footprint calculation results of Manas River Basin under different parameters

4.2 干旱区生态承载力测算的优化展望

据 IPBES 全球评估报告,受气候变化和人类活动共同影响,全球正面临自然衰退“史无前例”和物种灭绝率“加速”的局面,同时我国生物多样性保护功能有所下降^[48]。新疆的生物资源种类繁多、品种独特、特性优

良,开发潜力较大,新疆野生动植物达 4000 多种,但目前生物多样性保护形势严峻,面临着物种灭绝速度加快、珍稀濒危物种增多、生存环境丧失、生态系统多样性降低等主要威胁。目前新疆已建成国家级自然保护区 15 个,面积达 41.2 万 km^2 ,占新疆总面积的 24.8%。在生态承载力的测算过程中,出于生物多样性保护目的,已有研究多以扣除 12% 为最终结果。然而干旱区生态系统脆弱,动植物生存受到威胁较大,其发展过程中所需预留的生物多样性保护面积应该更多(理论上应大于 12%),因此本文的承载力计算结果可能高于实际情况。未来对于干旱区的研究,预留多少的生物多样性保护面积是一个值得思考的问题。

4.3 玛河流域可持续发展的建议

干旱区的自然地理条件特殊,发展受自然本底影响较大,对比吕伟^[49]、韦良焕^[50]等的研究成果发现,研究时段内玛河流域的人均生态足迹及其增长速度均小于新疆生产建设兵团和新疆整体水平。玛河流域发育了干旱区典型的“山区-绿洲-荒漠”生态系统,社会-生态系统的健康稳定是流域可持续发展的前提。依据自然资本利用现状,为促进流域的可持续发展提出以下建议:(1)打破行政壁垒,统筹流域资源。玛河流域内部经济发展不均衡,生态占用也差异性突出,作为一个完整的生态单元,系统内部要素紧密相连,打破行政壁垒,统筹规划,合理配置流域资源,资本高消耗、低产出的区域(沙湾县、玛纳斯县)多向资源转化较高区域(石河子市)借鉴区域资源利用方式,促进各行政单元之间绿色、协调发展。(2)提高资源利用效率,调整产业结构。优化农业产业结构,突出“优棉、强畜、精果”,加大技术投入,积极推进农业现代化,建设优质农产品生产基地;同时应充分利用自身的地缘优势和资源优势,在“一带一路”倡议中找准定位,大力发展交通运输、物流仓储、生态旅游以及食品加工等产业,降低生态消耗和浪费^[51]。(3)优化能源消费结构,加大清洁能源利用力度。电力和煤炭是流域主要的两大能耗类型,流域应大力发展洁净煤技术,提高煤炭能源转换率和利用率。此外,玛河流域太阳能、风能、水能等清洁可再生能源丰富,开发潜力巨大,应加大清洁能源的开发利用力度,实现能源消费结构的多元化。(4)合理推进城镇化进程,适度控制人口规模。应结合绿洲适度规模,“量”、“质”兼顾,有序推进新型城镇化进程,同时还应控制人口数量,改善人口结构,提高人口素质,促进社会生产力发展,享受人才红利,从而有效缓解人口增长对生态环境的压力。(5)构建合理消费模式,加强生态文明建设。鼓励低碳绿色消费,提高居民资源节约意识,同时完善流域主体功能区划,优化生产建设布局,在对流域三生空间识别的基础上,明确区域生态环境保护和经济发展的重点。对于重点开发区域,实施高效、绿色的发展策略;对于限制开发区域,保持谨慎、适度发展的态度;对于禁止开发区域,采取严格的保护策略。

5 结论

本文以生态足迹理论为指导思想,以“省公顷”为面积当量,针对当前生态足迹计算过程中存在的问题,选取玛河流域为研究单元,并对能源足迹计算作出相应调整,利用本土参数对研究区域 2000、2005、2010、2015 和 2018 年的生态足迹进行计算分析。结果表明:

(1)玛河流域生态赤字不断扩张,生态足迹呈明显的不均衡增长,生态安全面临严峻挑战。其中流域生态赤字年均增速达 $-9.48 \times 10^4 \text{ hm}^2/\text{a}$,人均年增速达 $-0.10 \text{ hm}^2 \text{ 人}^{-1} \text{ a}^{-1}$ 。各类土地对流域生态足迹的影响程度由大到小依次是:能源用地、耕地、草地、建设用地、林地、水域。

(2)玛河流域的发展对流量资源占用持续扩大,存量资源消耗的累积效应日益突出,流域内部各行政单元的生态占用差异性突出,账户内各类型消费对存量资源的消耗程度也差异悬殊。打破行政壁垒,统筹规划,合理配置资源,是流域未来发展亟需解决的问题。

(3)干旱区内陆河流域生态环境脆弱,但同时也是资源开发与经济发展潜力巨大的区域。玛河流域 18 年内单位足迹创造的经济价值增加了 4.73 倍,增长速度为 $0.058 \text{ 万元 hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

参考文献 (References):

[1] 樊新刚,仲俊涛,杨美玲,文琦,马振宁,米文宝.区域可持续发展能力的能值与烟耦合分析模型构建.地理学报,2019,74(10):

2062-2077.

- [2] Mancini M S, Galli A, Niccolucci V, Lin D, Hanscom L, Wackernagel M, Bastianoni S, Marchettini N. Stocks and flows of natural capital: implications for ecological footprint. *Ecological Indicators*, 2017, 77: 123-128.
- [3] Yang Y, Meng G F. A bibliometric analysis of comparative research on the evolution of international and Chinese ecological footprint research hotspots and frontiers since 2000. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 650-665.
- [4] 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.
- [5] 靳相木, 柳乾坤. 基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例. *生态学报*, 2017, 37(9): 2982-2993.
- [6] 曹威威, 孙才志. 能值生态足迹模型的改进——以海南为例. *生态学报*, 2019, 39(1): 216-227.
- [7] Zhang X M, Zhou G G. A scientometric analysis of ecological footprint of water resources from 2006-2018. *Ekoloji*, 2019, (107): 1539-1549.
- [8] 林永钦, 齐维孩, 祝琴. 基于生态足迹的中国可持续食物消费模式. *自然资源学报*, 2019, 34(2): 338-347.
- [9] 胡志毅, 管陈雷, 杨天昊, 秦普艳, 陈艳. 中国旅游生态足迹研究可视化分析. *生态学报*, 2020, 40(2): 738-747.
- [10] 陈文辉, 谢高地, 张昌顺, 鲁春霞, 肖玉, 张彩霞, 张殷俊, 王浩. 北京市水果消费的生态足迹距离研究. *生态学报*, 2018, 38(3): 760-768.
- [11] 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.
- [12] Lu Y, Li X S, Ni H, Chen X, Xia C Y, Jiang D M, Fan H P. Temporal-spatial evolution of the urban ecological footprint based on net primary productivity: a case study of Xuzhou Central Area, China. *Sustainability*, 2019, 11(1): 199.
- [13] 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.
- [14] 杨灿, 朱玉林. 绿色发展视阈下的湖南省生态足迹驱动力因素分析. *经济地理*, 2019[2019-06-17]. <https://www.cnki.net/KCMS/detail/43.1126.K.20190617.0949.002.html>.
- [15] Danish, Ulucak R, Khan S U D. Determinants of the ecological footprint: Role of renewable energy, natural resources, and urbanization. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 54: 101996.
- [16] 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.
- [17] 丁振民, 姚顺波. 区域生态补偿均衡定价机制及其理论框架研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(9): 99-108.
- [18] 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.
- [19] 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研究. *生态学报*, 2020, (4). (2019-10-28). http://www.ecologica.cn/stxb/ch/reader/view_abstract.aspx?edit_id=20191120023917659&file_no=201811280000002.
- [20] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. *地理学报*, 2017, 72(6): 960-973.
- [21] 朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素. *地理研究*, 2019, 38(2): 337-347.
- [22] Zhan L, Lei Y L, Li L, Ge J P. Interprovincial transfer of ecological footprint among the region of Jing-Jin-Ji and other provinces in China: a quantification based on MRIO model. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 304-314.
- [23] Galli A, Giampietro M, Goldfinger S, Lazarus E, Lin D, Saltelli A, Wackernagel M, Müller F. Questioning the ecological footprint. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 224-232.
- [24] 牛方曲, 封志明, 刘慧. 资源环境承载力评价方法回顾与展望. *资源科学*, 2018, 40(4): 655-663.
- [25] 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.
- [26] 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. *生态学报*, 2019, 39(2): 739-747.
- [27] 封志明, 杨艳昭, 闫慧敏, 潘韬, 李鹏. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践. *资源科学*, 2017, 39(3): 379-395.
- [28] 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(9): 1550-1559.
- [29] 范育鹏, 乔琦, 方琳. 产业生态系统新型定量研究方法综述. *生态学报*, 2017, 37(13): 4599-4609.
- [30] 向秀容, 潘韬, 吴绍洪, 刘卫东, 马丽, 王晓峰, 尹云鹤, 李静. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测. *地理研究*, 2016, 35(5): 875-884.
- [31] Li J X, Chen Y N, Xu C C, Li Z. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of Central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 664-677.
- [32] 张振龙, 孙慧, 苏洋. 新疆干旱区水资源生态足迹与承载力的动态特征与预测. *环境科学研究*, 2017, 30(12): 1880-1888.
- [33] 杨爱民, 朱磊, 陈署晃, 靳含, 夏鑫鑫. 1975—2015 年玛纳斯河流域土地利用变化的地学信息图谱分析. *应用生态学报*, 2019, 30(11): 3863-3874.
- [34] 王永静, 闫周府. 新疆玛纳斯河流域用水结构演变及其驱动力分析. *干旱区研究*, 2017, 34(2): 243-250.
- [35] Xu Z, Fan W G, Wei H J, Zhang P, Ren J H, Gao Z C, Ulgiati S, Kong W D, Dong X B. Evaluation and simulation of the impact of land use change on ecosystem services based on a carbon flow model: A case study of the Manas River Basin of Xinjiang, China. *Science of the Total*

Environment, 2019, 652: 117-133.

- [36] 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(1): 82-92.
- [37] 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(3): 486-492.
- [38] ONGO. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>, 2019-11-20.
- [39] 程钰, 尹建中, 王建事. 黄河三角洲地区自然资本动态演变与影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(4): 127-136.
- [40] 史丹, 王俊杰. 基于生态足迹的中国生态压力与生态效率测度与评价. 中国工业经济, 2016, (5): 5-21.
- [41] 何鑫, 田丽慧, 毛凌琳. 生态足迹模型下的人口适度规模研究——以常德市为例. 中国农业资源与区划, 2019, 40(4): 54-64.
- [42] 周朕, 蒙古军. 基于改进生态足迹模型与生态重要性识别的最小生态用地优化——黑河中游案例研究. 干旱区地理, 2016, 39(3): 513-520.
- [43] 李菊荣, 王延华, 唐湘玲, 杨浩. 新疆玛纳斯河流域土地利用变化特征及影响因素研究. 土壤通报, 2018, 49(1): 61-68.
- [44] 彭丽媛. 玛纳斯河流域土地利用变化的生态环境质量评价[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
- [45] 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.
- [46] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401-406.
- [47] 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(3): 592-597.
- [48] 侯焱臻, 赵文武, 刘焱序. 自然衰退“史无前例”, 物种灭绝率“加速”——IPBES 全球评估报告简述. 生态学报, 2019, 39(18): 6943-6949.
- [49] 吕伟, 周宏飞, 柴晨好, 马进博. 新疆生产建设兵团 2001—2015 年生态足迹及其驱动力因子分析. 生态科学, 2019, 38(1): 211-217.
- [50] 韦良焕, 杨茜, 鞠美庭, 赵先贵. 基于足迹家族的新疆资源环境压力评估. 生态经济, 2017, 33(11): 167-171.
- [51] 聂莹, 刘清杰, 孙素芬. 经济全球化能够有效抑制“一带一路”沿线国家的生态足迹吗? ——来自动态门槛面板模型的经验证据. 自然资源学报, 2019, 34(2): 301-311.