

DOI: 10.5846/stxb201802260390

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): - .

Li J C, Yan C A, Gao W. Estimating ecological footprint at the watershed scale with uncertainty analysis based on local parameters. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): - .

基于本土参数的流域生态足迹评估与不确定分析

李金城¹, 严长安², 高 伟^{1,*}

¹ 云南大学生态学与环境学院, 昆明 650091

² 昆明市环境科学研究院, 昆明 650032

摘要:产量因子和均衡因子是生态足迹模型的关键参数, 评估其取值的不确定性对完善生态足迹核算模型具有重要意义。以牛栏江流域为例, 应用生态足迹模型评估了 2014 年整个流域及流域内 11 个区县的生态足迹与生态承载力, 通过计算本土产量因子并与国内外常用值对比, 进行流域生态足迹不确定性分析。研究结果表明: 2014 年牛栏江流域生态足迹为 3521404 gha(全球公顷), 可利用生物承载力为 2338535 gha, 处于不可持续发展状态, 其中官渡区生态超载率最高。不同研究中均衡因子、产量因子取值差异较大, 其中耕地的均衡因子最大值是最小值的 4.16 倍, 草地的产量因子最大值是最小值的 4.16 倍; 采用均衡因子和产量因子最大值计算所得流域生态足迹、生态承载力, 生态赤字分别是最小值的 2.5 倍、3.9 倍、1.4 倍。由于牛栏江流域特殊的气候和地形以及畜牧业、渔业发展程度低, 因此计算生态足迹时需要进行详细的分类, 不能简单的采用全球及全国的因子。

关键词:生态足迹; 生态承载力; 不确定性; 本土参数

Estimating ecological footprint at the watershed scale with uncertainty analysis based on local parameters

LI Jincheng¹, YAN Chang'an², GAO Wei^{1,*}

¹ School of Ecology and Environmental Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China

² Kunming Institute of Environmental Sciences, Kunming 650032, China

Abstract: The yield and the equivalence factor are key parameters of the ecological footprint model. It is significant to evaluate the values' uncertainties to improve the ecological footprint model. Using the Niulanjiang Watershed as a case study, this study assessed the ecological footprint and capacity of the whole watershed and its 11 counties separately through the ecological footprint model. The local yield factor was calculated and compared with the most-often used values from around the world to estimate the uncertainty of the model. The results showed that the ecological footprint of the Niulanjiang Watershed is 3,521,404 gha, and the biological capacity is 2,338,535 gha, indicating unsustainability. Guandu County occupies the largest ecological overshoot among the counties in the watershed. The equivalence and yield factors vary greatly in different studies. The maximum equivalence factor of cropland was 4.16 times that of the minimum, and the maximum yield factor of grassland was 4.16 times that of the minimum. The estimated ecological footprint, capacity, and overshoot using the maximum equivalence and yield factor were 2.5 times, 3.9 times, and 1.4 times those using the minimum respectively. Due to its special climate and topography, and the low level of development of animal husbandry and fisheries, the ecological footprint of Niulanjiang Watershed needs to be classified in detail; global and national factors cannot be applied directly.

基金项目: 国家自然科学基金(41701631); 云南大学服务云南行动计划(2016MS18)

收稿日期: 2018-02-26; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaowei@ynu.edu.cn

Key Words: footprint; ecological carrying capacity; uncertainty; local parameter

随着全球人口的不断膨胀和经济的迅速增长,资源消耗、污染排放等人类活动日益逼近甚至超过资源环境承载力,严重制约了人类社会经济的可持续发展。自 1987 年 WCED 提出可持续发展概念后,可持续发展已成为全人类共识的发展理念和战略。然而,必须通过定量测度可持续性状态才能将发展理念转化为可操作性模式^[1]。为此,众多国际组织和相关研究人员从多个角度探寻测度国家和地区发展可持续性的方法和指标,如:世界银行提出的“国家财富指标体系”^[2]、Daly^[3]等提出的“可持续经济福利指数(ISEW)”、Prescott-Allen 等^[4]提出的“可持续性的晴雨表”等。以上研究方法在很多国家和地区得到了应用,但基于指标体系的可持续性评价方法侧重于对经济和社会发展状态的评估,且在评价指标选取、权重确定和指数计算方法等方面尚存在较大的主观性和不确定性,如何定量测度可持续状态始终是可持续发展研究中的难题。William Rees 1992 年提出了生态足迹(ecological footprint)的概念^[5],生态足迹将可持续性量化,通过具体指标确定人类生存是否处于生态系统承载力范围之内,很好的解决了生态影响与承载力的测量问题^[6]。

生态足迹模型主要是用来计算区域内维持资源消费和吸纳人类活动所产生废弃物所必需的生物生产性土地面积^[7-9],将生态足迹与区域所能提供的生物生产性土地面积进行对比,从而判断一个区域是否处于可持续发展状态^[10]。生态足迹计算过程中,将不同资源利用和能源消费类型转化为耕地、草地、林地、水域、建设用地、能源用地 6 种生物生产性土地面积^[11]。不同地区和不同土地类型生产力不同,计算时需乘均衡因子(equivalence factor)和产量因子(yield factor),均衡因子和产量因子是生态足迹核算中最主要的参数,对生态承载力的评估结果有重要影响。目前,国内的生态足迹案例研究大多借用全球或国家等大尺度的均衡因子和产量因子^[12-15],如张志强等人采用 Wackernagel 对全球生态足迹计算时所取的产量因子、均衡因子计算了中国西部 12 省(区市)的生态足迹^[16],邱寿丰等人采用国家生态足迹账户计算方法和参数对福建省生态足迹进行了研究^[17],谢文瑄等采用谢高地计算中国的生态空间占用研究所采用的均衡因子计算了山东半岛城市群的生态足迹^[18],尚没有形成基于流域中小尺度实际土地生产力的均衡因子和产量因子,这直接影响了生态足迹模型核算结果的可靠性和可比性。在流域尺度上,采用本土参数与大尺度(国家或全球)参数的计算结果是否存在差异? 差异的不确定性有多大? 这些问题尚未得到系统和充分的研究,不利于生态足迹方法的推广与应用。

基于此,本研究基于生态足迹模型,以牛栏江流域为案例,计算牛栏江流域本土生态足迹均衡因子和产量因子,评估了 2014 年生态足迹、生物承载力和生态盈余,并分析了均衡因子和产量因子不确定性对评估结果的影响,为生态足迹的不确定性研究与小尺度生态足迹评估提供借鉴和参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

牛栏江为金沙江右岸支流,发源于昆明市嵩明县杨林镇,干流长 423 km,落差 1660 m,流域面积 13320 km²。牛栏江流向大体由南向北,流经云南的嵩明、马龙等县(市)和贵州威宁县(25° 02'—27° 24' N, 102° 53'—104° 05' E),在昭通市的麻耗村附近注入金沙江^[19],水系成树枝状。牛栏江流域是一个生态自然环境相对完整的区域,位置及土地利用如图 1 所示,流域内主要土地利用类型(2014 年)为:耕地 2145.78 km²,占 16.12%,林地 8652.98 km²,占 67.26%,草地 2151.92 km²,占 16.17%,建设用地 39.07 km²,占 0.29%,水域 21.47 km²,占 0.16%。2014 年牛栏江流域总人口数为 2672133 人,流域生产总值为 704.50 亿元,人均生产总值为 26367 元,其中第一产业 93.32 亿元,占 13.25%,第二产业 283.98 亿元,占 40.31%,第三产业 327.20 亿元,占 46.44%。近年来,随着流域内人口增长和经济发展,流域生态压力不断上升。加之 2012 年牛栏江-滇池补水工程启动,流域每年向滇池补水 5.66 亿 m³,流域资源环境压力进一步加大。牛栏江流域的生态环境保护不仅关乎本流域经济社会的可持续发展,对下游昆明市也具有重要影响。

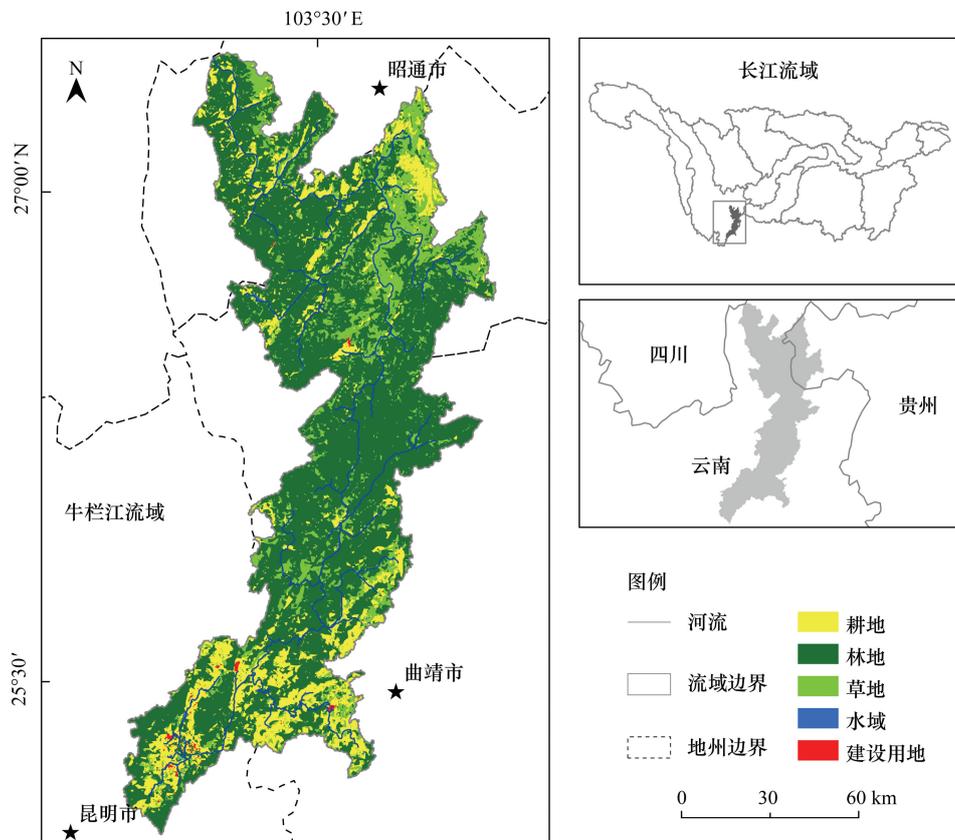


图1 牛栏江流域位置

Fig.1 Location of Niulanjiang Watershed

1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 生态足迹模型

生态足迹模型是用来计算区域内维持人类资源消费和废弃物吸收所必需的生物生产性土地面积。通过等价因子转换,将资源、能源消费项目折算为耕地、草地、林地、建设用地、能源用地6种生物生产性土地,其中能源用地采用能源折算系数对煤、石油、天然气等化石能源消费项目进行折算。采用的计算公式为^[17]:

$$EF = N \cdot ef = N \cdot \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot a_j) = N \cdot \sum_{j=1}^6 \left[r_j \cdot \sum_{i=1}^n (a_i) \right] = N \cdot \sum_{j=1}^6 \left[r_j \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{c_i}{p_i} \right) \right] \quad (1)$$

式中, EF 为流域总生态足迹(gha); N 为人口数(人); ef 为人均生态足迹(gha/人); r_j 为均衡因子; a_j 为各类生物生产土地面积(hm^2), $j=1,2,3,\dots,6$ 表示6类生物生产土地面积; a_i 为人均 i 种消费项目折算的生态生产性面积(hm^2); i 为消费项目类型; p_i 为 i 种消费品的平均生产能力(t/hm^2); c_i 为 i 种消费品的人均年消费量($\text{t}/\text{人}$), n 为消费品类型的数量。

1.2.2 产量因子

在生态足迹的计算过程中,同种生物生产性土地所提供的潜在生物生产空间是不同的,为了能够对比流域某种生物生产性土地与全球此类土地均值的差异,需乘产量因子^[20-22],从而将流域生产力转化为全球生产力。目前国内对产量因子的研究较少,本研究中的产量因子采用流域某种土地利用类型平均生产力与全球此类土地利用类型平均生产力的比值来表示,综合反映流域内环境和社会经济因素。计算公式为^[20]:

$$y_i = \frac{P_i}{GP_i} = \frac{Q_i}{S_i} / \frac{GQ_i}{GS_i} \quad (2)$$

式中, y_i 指第 i 类土地的产量因子; P_i 指流域第 i 类土地的平均生产力($10^9 \text{ J}/\text{hm}^2$); GP_i 指全球第 i 类土地的平均

均生产力 ($10^9 \text{ J}/\text{hm}^2$); Q_i 指流域第 i 类土地的总产出 (10^9 J); S_i 指流域第 i 类土地的总面积 (hm^2); GQ_i 指全球第 i 类土地总产出 (10^9 J); GS_i 指全球第 i 类土地的总面积 (hm^2)。

1.2.3 均衡因子

在生态足迹的计算过程中,不同生物生产土地类型的生产不同,为了便于比较,需乘均衡因子将其转化为统一的可比较的生物生产力面积^[12,20-21]。本研究中,在流域土地生产力转化为全球生产力的基础上,乘以均衡因子,从而转化为能够统一对比的生物生产力面积。因此,均衡因子应采用全球均衡因子。国外对均衡因子相关研究较多,本文采用的计算公式为^[18]:

$$q_i = \frac{GP_i}{GP} = \frac{GQ_i}{GS_i} \cdot \frac{GQ}{GS} = \frac{\sum GP_k^i \cdot gr_k^i}{\sum GS_i} \cdot \frac{GQ}{GS} \quad (3)$$

式中, q_i 指全球第 i 类土地的均衡因子; GP_i 指全球第 i 类土地的平均生产力 ($10^9 \text{ J}/\text{hm}^2$); GP 指全球土地的平均生产力 ($10^9 \text{ J}/\text{hm}^2$); GQ_i 指全球第 i 类土地的总生物产量 (10^9 J); GS_i 指全球第 i 类土地的生物生产面积 (hm^2); GQ 指全球土地的总生物产量 (10^9 J); GS 指全球土地的生物生产面积 (hm^2); GP_k^i 指第 i 类土地的第 k 种生物产品产量 (kg); gr_k^i 指第 i 类土地的第 k 种生物产品的单位热值 ($10^3 \text{ J}/\text{kg}$)。

1.2.4 生物承载力

生物承载力是一个区域所能提供给人类生产生活所需要的生物生产性土地面积,用此来表示该区域生态容量^[22-25]。计算公式为^[20]:

$$EC = N \cdot ec = N \cdot \sum_{j=1}^6 (a_j \cdot r_j \cdot Y_j) = N \cdot \sum_{j=1}^6 \left(a_j \cdot r_j \cdot \frac{Y_{ij}}{Y_{nj}} \right) \quad (4)$$

式中, EC 为流域总生物承载力 (gha); N 为流域总人口数 (人); ec 为人均生态承载力 ($\text{gha}/\text{人}$); a_j 为实际人均占有的 j 类生物生产土地面积 (hm^2); r_j 为均衡因子; Y_j 为产出因子; Y_{ij} 为流域 j 类土地的平均生产力 ($10^9 \text{ J}/\text{hm}^2$); Y_{nj} 为流域 j 类土地的世界平均生产力 ($10^9 \text{ J}/\text{hm}^2$)。

根据 WCED 报告,生态供给中减去 12% 的生物多样性土地面积来维持生物多样性^[26]。

1.2.5 生态足迹核算指标及数据来源

生态足迹核算指标具体分类如表 1 所示^[27-30]。为了客观的反映牛栏江流域生态足迹及生态承载力的特征,考虑材料的可靠性、可获得性等因素,选择 2014 年作为研究年份,基础数据主要来源于《云南省 2015 年统计年鉴》、2015 年云南省各州市统计年鉴、《中国城市统计年鉴 2015》以及《中国农村统计年鉴 2015》;土地利用类型数据主要来源于 UCL-Geomatics (Belgium) (<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>),数据采集年份为 2015 年,空间分辨率为 300 m。

表 1 牛栏江流域生态足迹核算指标

Table 1 Accounting indicators of Niulanjiang Watershed's ecological footprint

账户	生态足迹指标	纳入账户的生物性资源和能源类型
Account	Ecological footprint index	Biological and energy types included in accounts
生物资源账户 Biological resources account	耕地	谷物、豆类、薯类、棉花、花生、油菜籽、芝麻、麻类、甘蔗、甜菜、烟草、茶叶、禽蛋、猪肉
	林地	木材、油桐籽、油茶籽、橡胶、苹果、柑橘、梨、葡萄、香蕉、
	水域	水产品
	草地	牛肉、羊肉、奶类和羊毛
碳账户 Carbon account	建设用地	建设用地、电力用地
	碳足迹	煤、石油、天然气

2 结果与分析

2.1 牛栏江流域 2014 年生态足迹评估及分析

2014 年牛栏江流域生态足迹及承载力计算结果如表 2 所示,其中,人均生态足迹为 0.730 gha ,人均生物

承载力为 0.643 gha,人均生态足迹大于生物承载力,存在生态赤字,流域人均生态赤字为 0.087 gha。这表明当地人们对自然资源的开发利用超出了生态承载力的范围。牛栏江流域进出口贸易不大,流域可能通过消耗自然资源存量来弥补生态承载力的不足,处于一种不可持续的发展状态。从空间分布看,会泽县生态足迹所占比例最高,为 23%,其次是威宁县 14%,官渡区 12%和宣威市 11%,这与当地人口数量和发展程度有关。]

表 2 牛栏江流域 2014 年生态足迹和生态承载力计算结果汇总表
Table 2 Ecological footprint and capacity of Niulanjiang Watershed in 2014

人均生态足迹 Ecological footprint per capita				人均生物承载力 Ecological capacity per capita			
土地类型 Type	人均面积 Area per capita (hm ² /人)	均衡因子 Equivalence factors	均衡面积 Balance area/ (gha/人)	土地类型 Type	人均面积 Area per capita/ (hm ² /人)	产量因子 Yield factors	均衡面积 Balance area/ (gha/人)
耕地 Crop land	0.042	2.11	0.089	耕地 Crop land	0.080	0.97	0.164
草地 Forest	0.073	0.47	0.034	草地 Forest	0.080	0.77	0.029
水域 Water	0.002	0.35	0.001	水域 Water	0.001	0.77	0.000
林地 Forest	0.013	1.35	0.018	林地 Forest	0.335	1.76	0.796
能源用地 Fossil Fuels	0.728	1.35	0.983	能源用地 Fossil Fuels	0.000	0.00	0.000
建设用地 Build-up land	0.001	2.11	0.002	建设用地 Build-up land	0.001	0.97	0.002
人均生态足迹 Ecological footprint per capita			1.126	人均生态承载力 Ecological capacity per capita			0.991
				减去生物多样性保护面积 12% Area of biosustainability			0.119
				可利用的人均生物承载力			0.872
				Available ecological capacity per capita			

表中 gha 表示全球公顷

通过对比不同县市的生态超载率(图 2)发现,官渡区的生态超载率最高,为 1659%,是寻甸县(超载率为 59%)的 28 倍,官渡区的生态足迹已经远远超出了生态承载力,处于严重的不可持续发展状态。这与官渡区的经济社会发展情况有关,2014 年官渡区全年 GDP 达到了 866 亿元,其中位于牛栏江流域部分的人均 GDP 达到了 9.55 万元,为流域内人均 GDP 最高,是寻甸县的 6.2 倍。由于官渡区在本研究区域内的面积很小,因此没有计算官渡区进出口生物产品的实际数量,这也是官渡区生态超载率偏大的原因之一。

通过对比图 3、图 4 以及万元 GDP 生态足迹计算发现,不同县市的人均 GDP 及万元 GDP 生态足迹差异很大,其中人均 GDP 为 9.55 万元/人,万元 GDP 生态足迹

为 0.138 hm²,是生态超载率和人均 GDP 最高,万元 GDP 生态足迹最低的区县;巧家县人均 GDP 为 0.88 万元,万元 GDP 生态足迹为 1.502 hm²,是人均 GDP 最低,万元 GDP 生态足迹最高的区县。这从一定程度上说明官渡区对资源利用效率,能源消费结构以及生态环境建设等方面远高于巧家县。对人均 GDP 与万元 GDP 生态足迹相关分析发现,人均 GDP 与万元 GDP 生态足迹呈显著负相关,相关系数为 -0.76,这说明经济越发达的地区对资源的利用效率越高。

2.2 牛栏江流域生态足迹不确定性分析

在生态足迹计算中,为了便于比较和计算不同土地利用类型和不同区域的生态承载力,采用产量因子和均衡因子两个参数对生产力进行修正。产量因子是根据本地产量与全球产量比值,将本地某种土地面积转化为此类土地利用的全球公顷,以便与其他地区研究结果比较。均衡因子是不同土地利用类型之间生产力的比

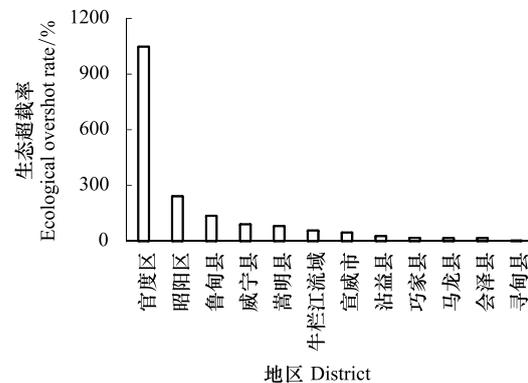


图 2 牛栏江流域各縣市生态超载率统计表
Fig.2 The ecological overload rate statistics table in all cities of Niulanjiang Watershed

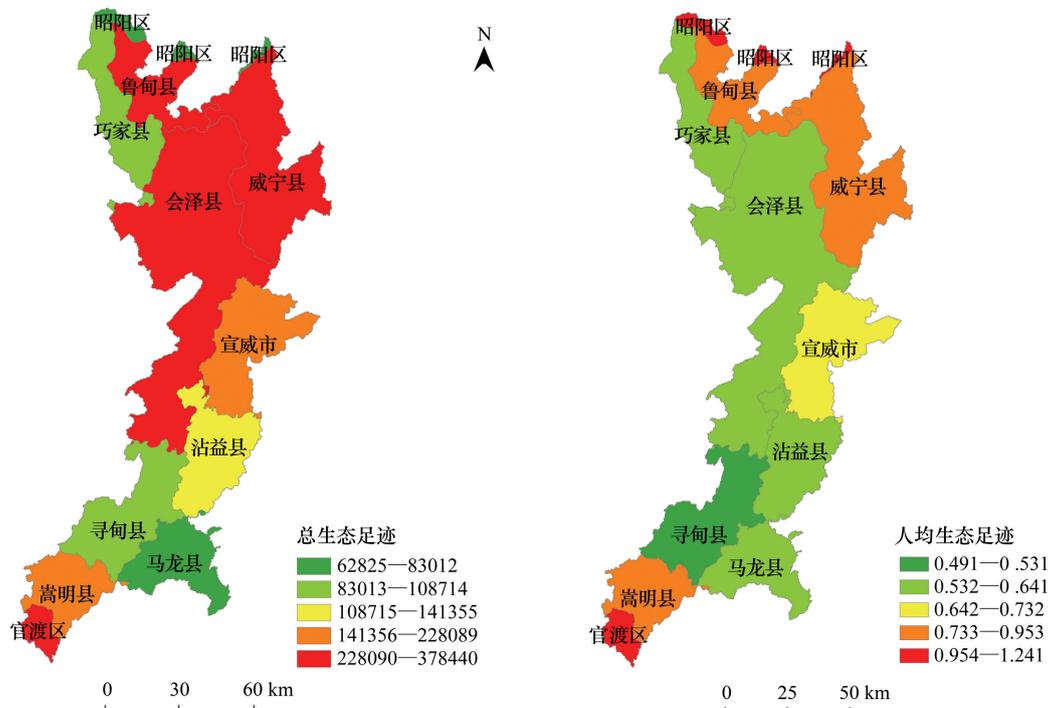


图 3 牛栏江流域各县市总生态足迹及人均生态足迹

Fig.3 The total and per capita ecological footprint in all cities of Niulanjiang Watershed

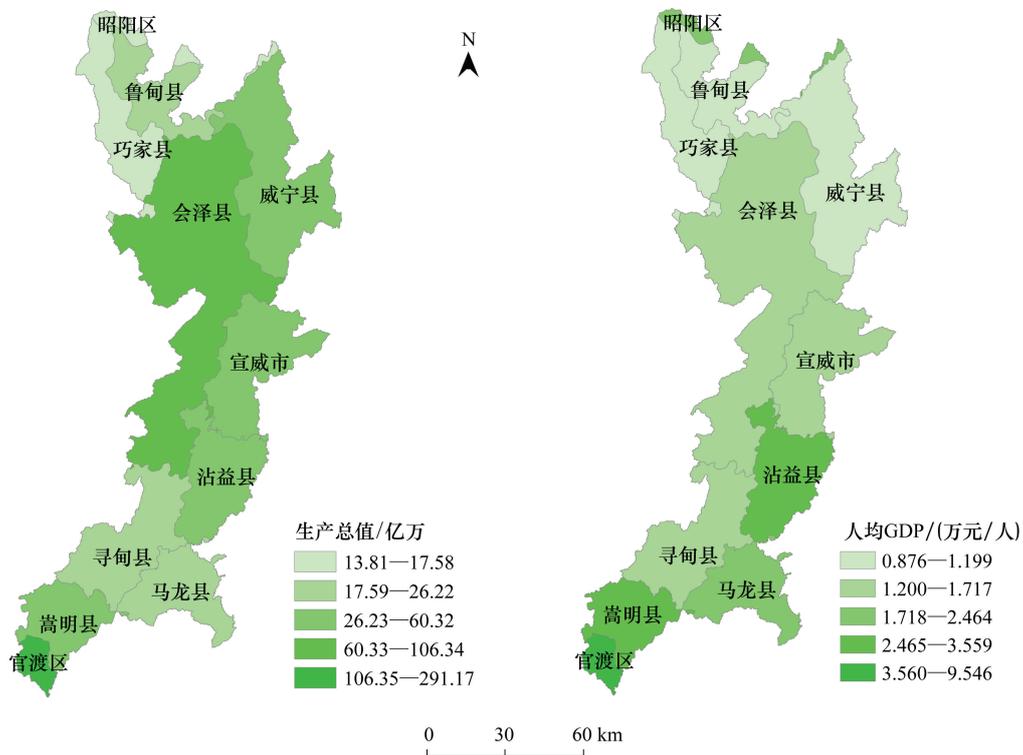


图 4 牛栏江流域各县市生产总值及人均 GDP

Fig.4 The gross product and per capita GDP in all cities of Niulanjiang Watershed

较,不同土地利用类型乘以相应的均衡因子转化为统一的度量单位。本研究先根据研究区的产量因子将研究区不同土地利用类型的面积转化为全球公顷,再乘以相应的全球均衡因子,统一度量。

根据产量因子计算公式,即本地某类土地的平均产量与全球此类土地的平均产量比值,本地某类土地平均产量为此类土地产品总产量与面积比值,产量数据通过统计年鉴获得,全球土地平均产量通过查阅世界农粮组织(FAO)获得,计算得到牛栏江流域耕地产量因子为 0.97;林地产量因子为 1.76;草地产量因子为 0.77;水域产量因子为 0.77;建设用地产量因子为 0.97;能源用地产量因子为 0.00。对比不同研究标准的产量因子可以发现存在不同程度的差异(表 3)。其中与 Wackernagel(1999)^[7]研究中的全球平均标准差异最大,除了标准与方法不同之外,全球尺度忽略了地区性生物生产力的差异,因此大尺度(全球平均标准)并不适用小尺度(流域)计算。对比全国范围,差异较小,说明在计算过程中需要进行详细分类。与刘某承基于净初级生产^[24]力云南生态足迹产量因子存在一定差异,主要原因是云南地形上以山地为主,海拔由低到高,地区之间温度、降雨等气候因素差异明显,因此相同的土地利用类型的生物生产力会存在很大的差异。其中,草地、水域的产量因子与刘某承基于净初级生产力云南生态足迹产量因子的研究差异很大,主要原因是草地的面积占整个流域面积的 16.12%,畜牧业发展程度很低,牧草资源利用率低下,导致草地生产力水平相对低下,牛栏江流域水域占总面积的 0.16%,面积少且渔业发展程度低,基于 NPP 的水域产量因子计算的是浮游生物的生产力,而伴随着水华等水环境污染问题,此项产量因子计算偏大,因此与本研究差异很大。由此说明,云南省省级尺度的产量因子不适合流域尺度生态足迹的计算,在计算小尺度生态足迹时需进行详细的分类。

本文采用的均衡因子来自 Jason Venetoulis^[31]的文章:耕地为 2.11;林地为 1.35;草地为 0.47;水域为 0.35;建设用地为 2.11;能源用地为 1.35,该均衡因子是全球多年平均值,与本研究的计算方法一致。通过统计国内引用量前 20 的文章^[6,10,32-46]中采用的均衡因子和产量因子,发现不同研究的均衡因子和产量因子存在很大差异(表 3),其中耕地的均衡因子最大值是最小值的 4.16 倍,草地的产量因子最大值是最小值的 4.16 倍。与刘某承等基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算中的云南省生态足迹中云南省生态足迹均衡因子差异最大,这是由于研究方法和标准不同,本研究的均衡因子基于全球多年平均生产力,而刘某承基于云南省净初级生产力。与 Wackernagel、谢高地等研究中的均衡因子存在一定差异,说明均衡因子在不同研究尺度及时间上会存在一定的差异。

表 3 不同研究中的均衡因子、产量因子对比

Table 3 The comparison of different equivalence factors and yield factors and available ecological capacities in different studies

土地类型 Type	均衡因子 Equivalence factors			产量因子 Yield factors			可利用生物承载力/gha Available ecological capacity		
	本研究	最小	最大	本研究	最小	最大	本研究	最小	最大
耕地 Crop land	2.11	0.76	3.16	0.97	1.66	2.24	385644	661393	1336608
林地 Forest	1.35	0.88	2.23	1.76	0.91	1.20	1876566	967888	2108318
草地 Pasture	0.47	0.62	0.54	0.77	0.79	3.29	68792	70313	336433
水域 Water	0.35	0.48	0.37	0.77	1.00	1.00	511	661	699
建设用地 Build-up land	2.11	0.76	3.16	0.97	0.97	0.97	2529	7022	10516
	合计 Total						2338535	967144	3806395

采用不同研究中最大和最小均衡因子、产量因子以及本研究中均衡因子、产量因子计算得到牛栏江流域生态足迹、生态承载力和生态赤字,结果如表 4 所示。在 3 种不同因子计算下,牛栏江生态赤字都大于 0,处于不可持续发展状态。采用最大值均衡因子和产量因子计算所得生态足迹,生态承载力,生态赤字分别是最小值计算所得的 2.5 倍、3.9 倍、1.4 倍。本研究所得的生态足迹和生态承载力介于采用最大值和最小值因子所得结果之间,但生态赤字均小于前两者。

在引用量较高及近期的文献中,与刘某承(2010)^[22]基于净初级生产力云南生态足迹因子计算的生态赤字与本研究的最为接近,其次是 Wackernagel(1999)^[7]提供的全球平均值,最后是谢高地基于净初级生产力全

国生态足迹因子平均值。这从另一个角度说明了中国各地区土地生产力差异很大,在计算流域尺度的生态足迹时不能采用全国平均值。

表 4 不同研究均衡因子、产量因子下牛栏江流域生态赤字/gha

Table 4 The overshoot of Niulanjiang Watershed under different equivalence and yield factors

评价指标 Evaluation index	本研究 The research	最小值 Min	最大值 Max
生态足迹 Ecological footprint	3521404	2304526	5686188
生物承载力 Ecological capacity	2338535	967144	3806395
生态赤字 Ecological overshoot	1182870	1337382	1879793

3 结论

基于本土产量因子参数计算,牛栏江流域 2014 年人均生态足迹为 1.126 gha/人,可利用人均生物承载力为 0.872 gha/人,人均生态赤字为 0.087 gha/人,处于不可持续发展状态,流域生态超载率存在较大的空间异质性,以官渡区最高。

生态足迹模型中的均衡因子及产量因子在不同文献中取值差异较大,对核算结果具有显著影响。采用最大值均衡因子和产量因子计算所得牛栏江流域生态足迹、生态承载力、生态赤字分别是最小值计算所得的 2.5 倍、3.9 倍、1.4 倍。

根据牛栏江流域本土参数所得的产量因子与大尺度研究采用的因子差异较大,主要原因是云南地形上以山地为主,海拔由低到高,地区之间温度、降雨等气候因素差异明显,相同土地利用类型的生物生产力会存在很大的差异,加之畜牧业、渔业发展程度很低,因此差异明显。由此可见,计算小尺度生态足迹需要进行详细的分类,不能直接借用全球或全国的因子。

参考文献 (References):

- [1] 张志强, 孙成权, 程国栋, 牛文元. 可持续发展研究: 进展与趋向. 地球科学进展, 1999, 14(6): 589-595.
- [2] Hardi P, Barg S, Hodge T. Measuring sustainable development; Review of current practice. Occasional Paper Number 17, 1997.
- [3] Costanza R, Daly H E. Natural capital and sustainable development. Conservation Biology, 1992, 6(1): 37-46.
- [4] Castañeda B E. An index of sustainable economic welfare (ISEW) for Chile. Ecological Economics, 1999, 28(2): 231-244.
- [5] Rees W E, Wackernagel M. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: measuring the natural capital requirements of the human economy. Focus, 1994, 6(1): 45-60.
- [6] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析. 地理学报, 2000, 55(5): 607-616.
- [7] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfán I S L, García J M, Guerrero A I S, Guerrero M G S. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. Ecological Economics, 1999, 29(3): 375-390.
- [8] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, Erb K H, Haberl H, Krausmann F. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. Land Use Policy, 2004, 21(3): 271-278.
- [9] Borucke M, Moore D, Cranston G, Gracey K, Iha K, Larson J, Lazarus E, Morales J C, Wackernagel M, Galli A. Accounting for demand and supply of the biosphere's regenerative capacity: The National Footprint Accounts' underlying methodology and framework. Ecological Indicators, 2013, 24: 518-533.
- [10] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例. 生态学报, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [11] 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(6): 630-636.
- [12] 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.
- [13] 陈成忠, 林振山. 生态足迹模型的争论与发展. 生态学报, 2008, 28(12): 6252-6263.
- [14] 白钰, 詹望. 城市尺度生态足迹模型应用中不同参数选择的影响分析. 水土保持研究, 2011, 18(6): 151-156.
- [15] 鲁凤, 陶菲, 钞振华, 胡秀芳. 基于净初级生产力的省公顷生态足迹模型参数的计算——以江苏省为例. 地理与地理信息科学, 2016, 32(2): 83-88.

- [16] 张志强, 徐中民, 程国栋, 陈东景. 中国西部 12 省(区市)的生态足迹. 地理学报, 2001, 56(5): 599-610.
- [17] 邱寿丰, 朱远. 基于国家生态足迹账户计算方法的福建省生态足迹研究. 生态学报, 2012, 32(22): 7124-7134.
- [18] 谢文瑄, 黄庆旭, 何春阳. 山东半岛城市扩展模式与生态足迹的关系. 生态学报, 2017, 37(3): 969-978.
- [19] 王晓爱, 陈小勇, 杨君兴. 中国金沙江一级支流牛栏江的鱼类区系分析. 动物学研究, 2009, 30(5): 585-592.
- [20] 田玲玲, 罗静, 董莹, 刘和涛, 曾菊新. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 316-325.
- [21] Monfreda C, Wackernagel M, Deumling D. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 231-246.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 卞子浩, 赵永华, 王晓峰, 奥勇. 陕西省生态足迹及其驱动力. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1316-1322.
- [26] Gössling S, Hansson C B, Hörstmeier O, Saggel S. Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability. *Ecological Economics*, 2002, 43(2/3): 199-211.
- [27] 张星星, 曾辉. 珠江三角洲城市群三维生态足迹动态变化及驱动力分析. 环境科学学报, 2017, 37(2): 771-778.
- [28] 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.
- [29] 徐中民, 张志强, 程国栋, 陈东景. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析. 应用生态学报, 2003, 14(2): 280-285.
- [30] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态足迹的概念及计算模型. 生态经济, 2000, (10): 8-10.
- [31] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [32] 徐中民, 陈东景, 张志强, 程国栋. 中国 1999 年的生态足迹分析. 土壤学报, 2002, 39(3): 441-445.
- [33] 王书华, 毛汉英, 王忠静. 生态足迹研究的国内外近期进展. 自然资源学报, 2002, 17(6): 776-782.
- [34] 郭秀锐, 杨居荣, 毛显强. 城市生态足迹计算与分析——以广州为例. 地理研究, 2003, 22(5): 654-662.
- [35] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估. 生态学报, 2004, 24(10): 2257-2262.
- [36] 李金平, 王志石. 澳门 2001 年生态足迹分析. 自然资源学报, 2003, 18(2): 197-203.
- [37] 陈东景, 徐中民, 程国栋, 张志强. 中国西北地区的生态足迹. 冰川冻土, 2001, 23(2): 164-169.
- [38] 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. 地理科学进展, 2003, 22(6): 618-626.
- [39] 龙爱华, 张志强, 苏志勇. 生态足迹评介及国际研究前沿. 地球科学进展, 2004, 19(6): 971-981.
- [40] 陈东景, 徐中民. 生态足迹理论在我国干旱区的应用与探讨——以新疆为例. 干旱区地理, 2001, 24(4): 305-309.
- [41] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法的理论解析. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 69-78.
- [42] 陈敏, 张丽君, 王如松, 怀保光. 1978 年—2003 年中国生态足迹动态分析. 资源科学, 2005, 27(6): 132-139.
- [43] 章锦河, 张捷, 梁琳琳, 李娜, 刘泽华. 九寨沟旅游生态足迹与生态补偿分析. 自然资源学报, 2005, 20(5): 735-744.
- [44] 赵先贵, 肖玲, 兰叶霞, 王书转, 马彩虹. 陕西省生态足迹和生态承载力动态研究. 中国农业科学, 2005, 38(4): 746-753.
- [45] 岳东霞, 李自珍, 惠苍. 甘肃省生态足迹和生态承载力发展趋势研究. 西北植物学报, 2004, 24(3): 454-463.
- [46] 白艳莹, 王效科, 欧阳志云, 苗鸿. 苏锡常地区生态足迹分析. 资源科学, 2003, 25(6): 31-37.