

张晓雨,周宝同,明弘.基于三维生态足迹的可持续发展实证研究:以重庆市为例[J].中国岩溶,2020,39(5):705-713.
DOI:10.11932/karst20200508

基于三维生态足迹的可持续发展实证研究 ——以重庆市为例

张晓雨¹,周宝同^{1,2},明弘²

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 重庆市盛地土地经济研究院, 重庆 400000)

摘要:文章借鉴 Niccolucci 的三维生态足迹模型,通过计算“国家公顷”,更新均衡因子和产量因子,添加污染物账户,改进传统生态足迹模型,并利用改进模型分析重庆市 2008—2017 年生态足迹的历时性。在此基础上,构建可持续发展能力综合指数,以研究重庆市可持续发展能力的动态变化。结果表明:(1)存量指数除 2008 年、2012 年、2013 年及 2014 年之外,其他年份均小于 1,说明重庆市存量资本的消耗有所下降;(2)生态资源利用效率指数整体呈逐年降低状态,重庆市资源利用效率逐年提高;(3)生态多样性指数整体呈阶梯式上升,重庆市生态系统的稳定性增强;(4)可持续发展能力综合指数总体上升了 13.85%,重庆市可持续发展能力总体增强;(5)生态压力指数介于 1.51~2.00 之间,生态环境尚处在很不安全状态,存量资本依然在被占用,重庆市尚处于非可持续发展状态,且 2017 年可持续发展能力综合指数出现小幅度下跌,故应牢固树立绿色发展理念,及时采取措施警惕其继续下滑。

关键词:国家公顷;足迹模型;综合指数;重庆市

中图分类号:X22 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2020)05-0705-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

生态足迹的概念最早是由加拿大著名生态经济学家 William Rees 教授于 1992 年提出的,指生产一定人口所消费的资源和吸纳这些人口产生的废弃物所需要的生物生产性的土地面积^[1]。1996 年其学生 Wackernagel 等^[2]提出生态足迹分析方法,因其模型具有直观综合、可操作性强等优点,成为定量评估区域可持续发展状态的有效工具。1999 年,张志强等^[3]将生态足迹概念、模型首次引入国内。国外研究主要集中在对其模型和方法的改进方面,Bicknell 等^[4]首次使用投入产出法测算了新西兰的生态足迹,Wackernagel 等^[5]运用“实际土地使用”的方法,测算了 1961—1999 年奥地利、菲律宾和韩国的生态足迹,

Siche 等^[6]采用能值分析法,对传统生态足迹进行了改进,Niccolucci 等^[7]添加足迹广度和深度,构建了三维的生态足迹模型。而国内研究主要集中在对其模型的实证运用方面,顾晓薇等^[8]、张恒义等^[9]和张帅等^[10]分别建立了基于“国家公顷”、“省公顷”和“市公顷”的生态足迹模型,对沈阳市、浙江省和某市开展了研究。方恺^[11]、靳相木等^[12]和杜悦悦等^[13]借鉴 Niccolucci 提出的三维生态足迹模型分别对全国、温州市和京津冀城市群展开了实证研究。

目前,对重庆市生态足迹的研究,就研究对象而言,主要集中在水资源^[14-17]和土地资源^[18-19],就研究范围而言,主要集中在区县^[20-23]和小流域^[24-25],就应用领域而言,主要集中在可持续发展^[26-29]、生态安全^[30-31]、人口问题^[32]等领域。研究更加细化,如对建

基金项目:国家社会科学基金重大项目(15ZDC032)

第一作者简介:张晓雨(1996—),女,硕士研究生,主要从事土地利用方向研究。E-mail:3298057715@qq.com。

通信作者:周宝同,E-mail:379485639@qq.com。

收稿日期:2020-01-03

设用地生态足迹^[33]、农田生态系统碳足迹^[34]、工业水足迹^[35]的研究,且研究方法也在不断改进,如加入能值法^[36-38]。但大多研究还是采用的是“全球公顷”;均衡因子与产量因子未根据研究年份做出更新;计算水资源生态足迹时,单纯以淡水水域的生物生产量来进行衡量,造成对水资源核算存在一定误差,从而使得生态足迹结果可能与真实情况存在差别,这些仍需加以改进。

重庆市岩溶区土地总面积达32 680 km²,占全市国土面积的39.7%,由于其生态系统对环境干扰的抵抗能力弱,且缺乏完善的内环境稳定机制,易因自然或者人类的影响使其生态系统的稳定遭到破坏^[39]。近年来重庆市依靠其优越的区位优势和国家战略优势,在社会经济得到快速发展的同时,资源环境也承受了巨大压力,水土流失、石漠化严重,可持续发展受到威胁。现有文献资料对中国岩溶地区生态环境的安全评价研究主要集中在贵州^[40-41]和广西^[39],而对重庆岩溶区域的研究还较少^[42]。本次研究通过更新相关参数、完善账户等途径,使结果更加贴合实际情况,并厘清存量与流量资本的利用情况,以期对重庆

市制订相关土地利用规划、加强土地资源科学管理和合理配置资源、促进社会经济高质量、可持续发展提供参考。

1 研究区概况

重庆市地处中国内陆西南部,位于长江上游地区,东邻湖北、湖南,南靠贵州,西接四川,北连陕西,总面积为8.24万km²,辖38个区县(自治县);地势东南部、东北部高,中部和西部低,由南北向长江河谷逐级降低;属亚热带季风性湿润气候;境内有长江、嘉陵江、乌江、涪江、綦江等主要河流;全市森林覆盖率达48.3%。截止2018年,重庆市常住人口达3 101.79万,城镇化率为65.50%,同比提高1.42%;地区生产总值为20 363.19亿元,同比增长6.0%;三大产业结构比为6.8:40.9:52.3,重庆经济建设基本形成大农业、大工业、大交通、大流通并存的格局,社会经济发展态势良好。

2 数据来源

数据来源详见表1。

表1 指标和数据来源

Table 1 Indicators and data sources

项目	指标	数据来源
生物资源账户	谷物、豆类、薯类、麻类、油料、甘蔗、烟草蔬菜、禽蛋、禽肉、猪肉;茶叶、蚕茧、水果、木材、竹材、竹笋、核桃、板栗、油桐籽、油茶籽;牛肉、羊肉;蜂蜜、奶类;水产品	《中国农村统计年鉴》(2009—2018)、《中国林业统计年鉴》(2008—2017)、《中国丝绸年鉴》(2009—2016)、《中国统计年鉴》(2009—2018)、《重庆市统计年鉴》(2009—2018)、《中国能源统计年鉴》(2009—2018)、中国环境状况公报(2008—2017)、重庆市生态环境状况公报(2008—2017)、世界粮农组织(FAO)(2008—2017)以及历年土地利用变更调查数据(2008—2017)
能源消耗账户	原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气;电力	中国环境状况公报(2008—2017)、重庆市生态环境状况公报(2008—2017)、世界粮农组织(FAO)(2008—2017)以及历年土地利用变更调查数据(2008—2017)
污染物排放账户	污水(生活污水、工业废水);SO ₂ 、烟尘粉尘;固体废弃物(生活垃圾、工业废弃物)	中国环境状况公报(2008—2017)、重庆市生态环境状况公报(2008—2017)、世界粮农组织(FAO)(2008—2017)以及历年土地利用变更调查数据(2008—2017)
土地数据	各类土地面积	

3 模型与方法

3.1 修正均衡因子和产量因子

本研究中的均衡因子是在“国家公顷”的基准之下,与“全球公顷”下的存在差异,且由于国内区域间的环境、管理和技术等方面的差异,产量因子每年均有变化。因此,为使研究结果更加真实地反映重庆市实际情况,文中采用热值法对均衡因子和产量因子进行修正,具体计算公式如下:

$$q_i = \frac{\bar{p}_i}{p} = \frac{Q_i}{S_i} \frac{\sum_k p_k^i r_k^i / S_i}{\sum_i \sum_k p_k^i r_k^i / \sum_i S_i} \quad (1)$$

式中: q_i 为国家第*i*种土地类型的均衡因子; \bar{p}_i 为国家第*i*种土地类型的平均生产力(10⁹ J·hm⁻²); p 为国家所有土地的平均生产力(10⁹ J·hm⁻²); Q_i 为第*i*种土地类型所生产出的所有产品的产量(kg); S_i 为第*i*种土地类型的面积(hm²); p_k^i 为第*i*种土地类型上第*k*种生物所生产出的产品产量(kg); r_k^i 为第*i*种土地类型上第*k*种生物产品的单位热值(10³ J·kg⁻¹)。

$$y_i^m = \frac{\bar{p}_i^m}{p_i} = \frac{Q_i^m}{S_i^m} \Big/ \frac{Q_i}{S_i} = \frac{\sum_k (p_k^i)^m r_k^i}{S_i^m} \Big/ \frac{\sum_k p_k^i r_k^i}{S_i} \quad (2)$$

式中: y_i^m 为 m 省第 i 类土地的产量因子; \bar{p}_i^m 为 m 省第 i 类土地的平均生产力($10^9 \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$); Q_i^m 为 m 省第 i 类土地的总生产力(10^9 J); S_i^m 为 m 省第 i 类土地的总面积(hm^2); $(p_k^i)^m$ 为 m 省第 i 类土地上第 k 种生物产品的产量(kg); Q_i 为第 i 种土地类型所生产出的所有产品的产量(kg); S_i 为第 i 种土地类型的面积(hm^2)。

3.2 计算二维人均生态足迹

$$ef = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^n (q_i a_j) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^n \left(q_i \times \frac{c_j}{p_j} \right) \quad (3)$$

式中: ef 为区域人均生态足迹; a_j 为根据全国第 j 消费资源平均产量折算的人均占有的生态生产性土地; c_j 为第 j 种消费资源人均生产量; p_j 为生态生产性土地生产第 j 种消费资源的全国平均产量; q_i 为第 i 种生态生产性土地的均衡因子。

$$ec = (1 - 12\%) \times \sum_{i=1}^6 (A_i q_i y_i) \quad (4)$$

式中: ec 为实际人均生态承载力; A_i 为第 i 种生态生产性土地的人均面积; q_i 为第 i 种生态生产性土地的均衡因子; y_i 为第 i 种生态生产性土地的产量因子。

$$ER/ED = EC - EF = N \times (ec - ef) \quad (5)$$

式中: ER 为区域生态盈余; ED 为区域生态赤字; EC 为区域总体生态承载力; EF 为区域总体生态足迹; N 为区域常住人口。

3.3 计算三维人均生态足迹

与传统生态足迹模型相比,三维生态足迹模型引入了足迹深度和足迹广度概念,足迹广度是指在生态承载力的限度内所占用的实际生态生产性土地面积,表征人类占用资本流量的水平,具有空间属性,强调代内公平;足迹深度是指为维持区域现有消费水平理论上需要占用自身土地面积的倍数,表征人类对资本存量的消耗程度,具有时间属性,强调代际公平^[43]。该模型实现了对存量资本和流量资本的区分测度,方便了不同区域不同时期生态足迹结果的对比,且将存量资本变化代替传统的以生态赤字作为区域是否可持续发展的判定标准,这也正是三维生态足迹模型区别于二维生态足迹模型的显著特点。

$$EF_{3D} = EF_{size} \times EF_{depth} \quad (6)$$

$$EF_{size} = \sum_{i=1}^n \min \{ EF_i, EC_i \} \quad (7)$$

$$EF_{depth} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max \{ EF_i - EC_i, 0 \}}{\sum_{i=1}^n EC_i} \quad (8)$$

式中: EF_{3D} 为三维生态足迹; EF_{size} 为足迹广度; EF_{depth} 为足迹深度; EF_i 为第 i 类土地的生态足迹; EC_i 为第 i 类土地的生态承载力。

3.4 计算可持续发展能力综合指数

单一指数因子难以全面综合地测度区域可持续发展能力,本文利用三维生态足迹、存量流量指数、生态资源利用效率指数、生态压力指数和生态多样性指数构建了可持续发展能力综合指数,分别从经济增长动力、存量资本利用情况、资源利用效率、环境承压程度、生态系统稳定性 5 个方面来进行综合评价。存量流量指数是当生态承载力小于生态足迹时,即开始耗用存量资本时,表示存量资本消耗量与流量资本占用量的比例关系指数^[44]。

$$r_{flow}^{stock} = \frac{EF' - EF_{size}}{EF_{size}} = \frac{ED}{EC'} = EF_{depth} - 1, EF' > EC' \quad (9)$$

式中: r_{flow}^{stock} 为存量流量指数; EF' 为生态足迹; EF_{size} 为足迹广度; EF_{depth} 为足迹深度; ED 为生态赤字; EC' 为生态承载力。

$$EE = (N' \times ef') / \text{GDP} \quad (10)$$

生态资源利用效率指数即万元生态足迹,表示每产出万元 GDP 需要占用的资源数量^[45],高生态资源利用效率指数代表低资源利用程度。式中: EE 为生态资源利用效率指数; N' 为人口数; ef' 为人均生态足迹; GDP 为国内生产总值。

$$PP = \frac{ef'}{ec'} \quad (11)$$

生态压力指数,即 1 单位生态承载力支撑了多少生态足迹,其数值越大,代表区域承受的环境压力越大^[46]。式中: PP 为生态压力指数; ef' 为人均生态足迹; ec' 为人均生态承载力。生态压力指数等级划分标准详见表 2。

表 2 生态压力指数等级划分标准

等级	生态压力指数	表征状态
1	$0 < X \leq 0.5$	很安全
2	$0.5 < X \leq 0.8$	较安全
3	$0.8 < X \leq 1$	稍不安全
4	$1 < X \leq 1.5$	较不安全
5	$1.5 < X \leq 2$	很不安全
6	$X > 2$	极不安全

$$H = - \sum_{i=1}^6 (P_i \times \ln P_i) \quad (12)$$

生态多样性指数衡量的是区域生态足迹中6种土地类型的均匀分配程度,高生态多样性指数代表生态足迹中土地类型占比越均匀,种类越丰富,生态系统的稳定性就越高^[47]。式中: H 为生态多样性指数; P_i 为人均第*i*类生物生产性土地生态足迹占总人均生态足迹的比率。

$$S_s = \frac{EF_{3D} + H}{EE + PP + r_{flow}^{stock}} \quad (13)$$

式中: S_s 为可持续发展能力综合指数; EF_{3D} 为三维生态足迹; H 为生态多样性指数; EE 为生态资源利用效率指数; PP 为生态压力指数; r_{flow}^{stock} 为存量流量指数^[28]。

4 结果与分析

4.1 均衡因子与产量因子

本研究通过热值法对均衡因子与产量因子进行修正,计算结果如表3所示。

表3 均衡因子与产量因子

Table 3 Equilibrium factor and yield factor

年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
均衡因子	耕地	4.54	4.04	4.01	4.00	4.00	3.98	3.95	3.95	3.92	3.94
	林地	0.32	0.28	0.30	0.30	0.30	0.31	0.33	0.33	0.34	0.34
	草地	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.04
	水域	0.39	0.40	0.41	0.41	0.42	0.43	0.44	0.45	0.47	0.41
产量因子	耕地	1.04	1.05	1.05	1.00	0.98	0.98	0.97	0.98	1.02	0.90
	林地	0.53	0.50	0.46	0.48	0.51	0.52	0.75	1.16	1.25	1.31
	草地	6.09	4.00	4.27	4.51	4.72	5.09	5.33	5.54	5.83	6.83
	水域	0.61	0.55	0.57	0.67	0.75	0.83	0.92	0.96	0.97	1.08

4.2 三维人均生态足迹

由图1可知,重庆市人均足迹广度变化曲线在2008–2013年降低,2013–2016年回升,2017年再次降低,但总体变化幅度并不大。人均足迹广度多年平均值为0.3266,从2008年的0.3506到2017年的0.3056,降低了12.84%。其中,2013–2016年间,“两江新区”的持续发展,供给侧改革的深入实施,加之重庆市积极融入“一带一路”建设,在社会经济快速发展的同时,对外开放水平不断提高,使得这期间流量资本的占用程度提高。

由图2可知,重庆市人均足迹深度变化曲线大致呈倒“M”型,但总体幅度较小。人均足迹深度多年平均值为1.9671,从2008年的2.016到2017年的1.9125,下降了5.13%。总体来说,重庆市人均足迹深度整体呈曲折下降态势,但在此期间,重庆市人均足迹深度均大于1.9,这说明重庆市2008–2017年资源利用效率虽有所提高,但依然处于生态赤字状态,流量资本尚不能满足经济社会发展需求,需要消耗存量资本来维持发展。特别是2012年重庆市人均足迹深度达到了2.017,即表示资源再生需要约2年才能满足人们1年的资源消费需求。

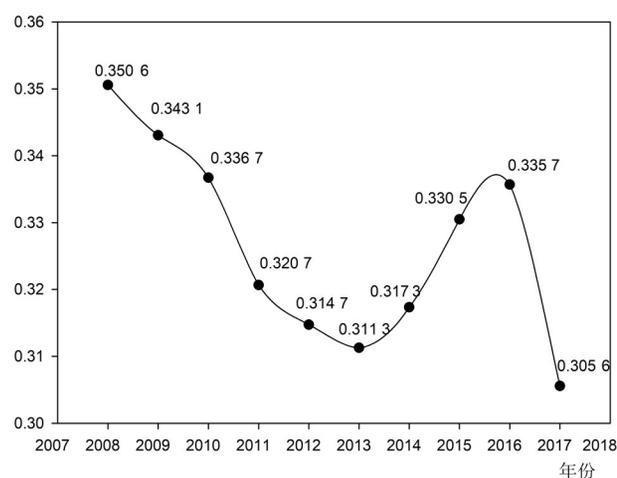


图1 人均足迹广度

Fig. 1 Breadth of per capita footprint

由图3可知,人均二维生态足迹与人均三维生态足迹变化态势大体一致,这主要是由于耕地(生产)生态足迹在总的生态足迹中占比最大,与耕地(生产)变化态势大体一致,总体上呈下降趋势,变化幅度不大;但也并不完全一致,人均二维生态足迹略大于人均三维生态足迹。人均三维生态足迹多年平均值为0.7539,由2008年的0.8044到2017年的0.6972,降低了13.33%。

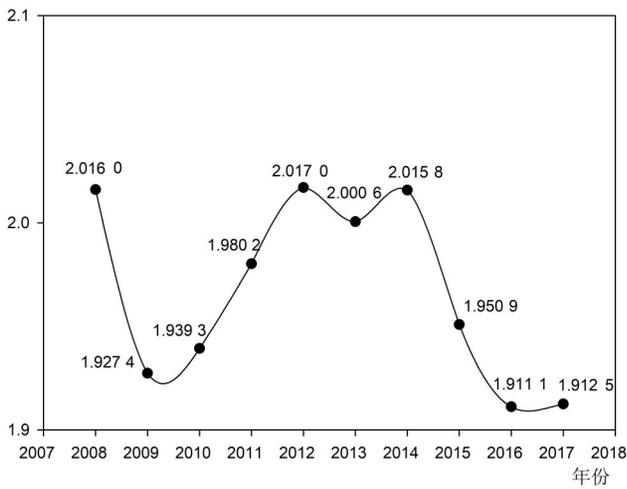


图 2 人均足迹深度

Fig. 2 Depth of per capita footprint

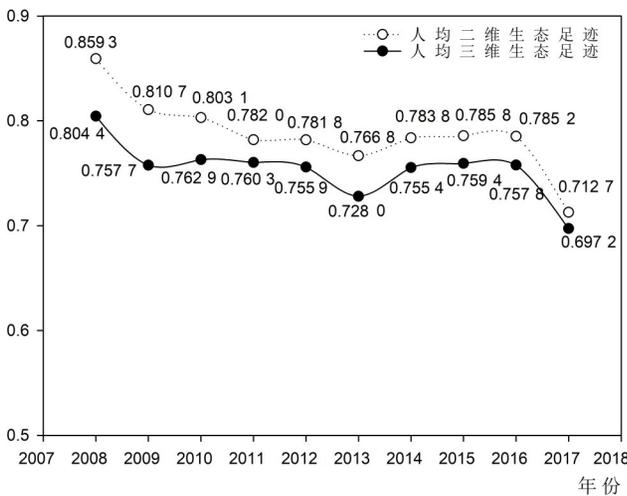


图 3 人均二维/三维生态足迹

Fig. 3 Per capita 2D/3D ecological footprint

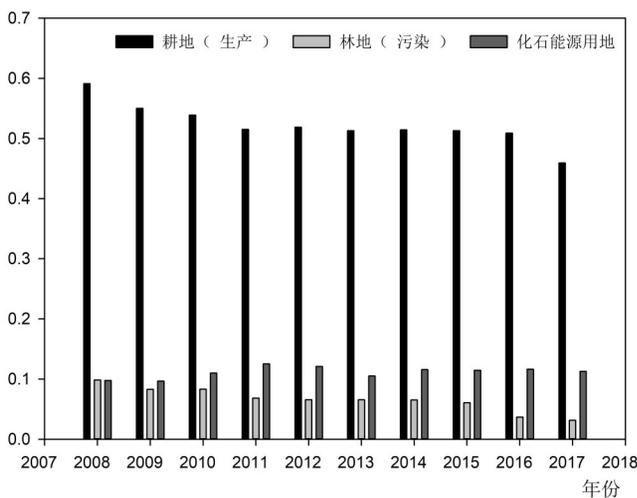


图 4 主要地类人均生态足迹 (ha/cap)

Fig. 4 Per capita ecological footprint of main land types

由图 4 可知,耕地(生产)由 2008 年的 0.591 3 到 2017 年的 0.459 2,下降了 22.34%;同时,林地(生产)、水域(生产)、草地的生态足迹分别上涨了 119.93%、112.25%、56.97%,这主要是由于近年来人们生活水平的提高和追求健康养生,对生物资源的需求日趋多样化,使得粮食等农产品的需求相对下降,对林产品、水产品以及畜牧产品的需求相对增大。林地(污染)由 2008 年的 0.098 4 到 2017 年的 0.031 5,下降了 67.99%,其中,SO₂、烟(粉)尘排放量分别下降了 67.61%、75.33%,说明重庆市实施的“蓝天”、“绿地”等环保行动取得了明显成效,大气环境质量得以改善。化石能源用地由 2008 年的 0.097 6 到 2017 年的 0.112 9,上升了 15.68%,这主要是由于重庆市工业化水平的不断提高和经济社会的不断发展,化石能源需求增大,但由于近年来重庆市供给侧改革的深入和产业结构的升级,大力发展电子信息、装备制造等低耗能产业,创新科技,使其增速较缓。

由图 5 可知,水域(污染)上升了 36.74%,说明重庆市仍需深入开展“碧水行动”,全面贯彻落实水污染防治措施,落实河长制、湖长制,完善水环境监测网络,特别要加强对生活污水的治理;林地(生产)上升了 119.93%,这主要是由于人口的增长与经济发展水平的提高,人们对林产品的需求增大。建设用地上升了 82.78%,这主要是由于重庆市工业化、城市化水平的不断提高和人口的持续增长。耕地(污染)下降了 19.83%,工业废弃物排放量降低了 13.28%,城市生活垃圾无害化处理率保持在 100%,建制镇生活垃圾无害化处理率达到 95.2%,这主要是由于近年来重庆市关停了高排放低效益小企业,加强科技创新和应用,完善基础设施,加强环保宣传,使公众环保意识得以增强。草地和水域(生产)分别上升了 56.97% 和 112.25%,这主要是由于随着经济发展,人们生活水平得以提高,生活品质改善,人们的饮食观念得以改变。

4.3 可持续发展能力综合指数

由图 6 可知,重庆市存量流量指数变化态势大致呈倒“M”型。多年平均值为 0.967 1,从 2008 年的 1.016 0 到 2017 年的 0.912 5,降低了 10.19%。其中,2008 年认真落实“314”总体部署,积极参与抗震救灾;2010 年建立“两江新区”以及政策执行存在一定时滞性,使得 2008、2012、2013 以及 2014 年的存量流量指数大于 1,这说明仅仅依靠流量资本已不能满足

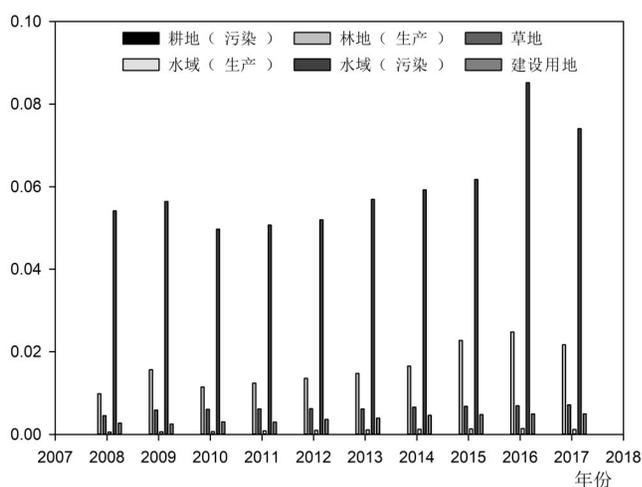


图5 其他地类人均生态足迹(ha/cap)

Fig. 5 Per capita ecological footprint of other land types

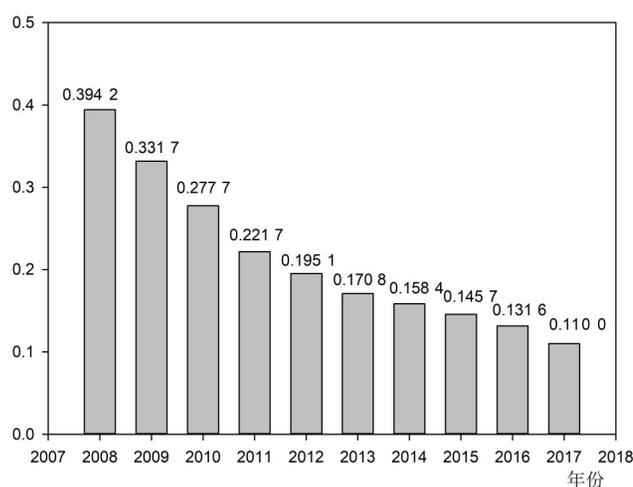


图7 生态资源利用效率指数

Fig. 7 Index of ecological resources utilization efficiency

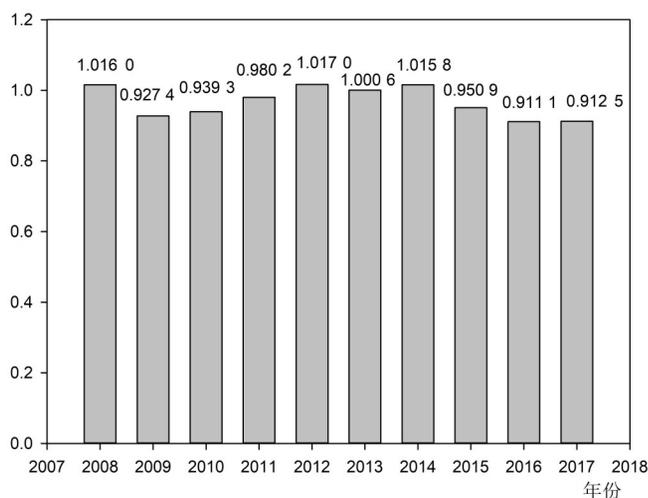


图6 存量流量指数

Fig. 6 Stock flow index

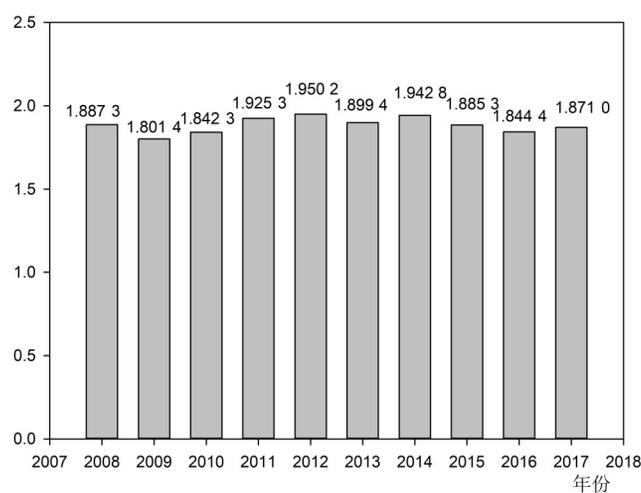


图8 生态压力指数

Fig. 8 Ecological pressure index

经济发展过程中的资源需求,存量资本被大量消耗。近年来,随着智慧城市建设的推进,积极融入“一带一路”建设,改善生产生活消费方式,推广节能减排技术取得进展,存量资本的消耗有所下降,存量流量指数小于1。

由图7可知,重庆市生态资源利用效率指数整体呈逐年降低状态,多年平均值为0.2137,从2008年的0.3942到2017年的0.11,降低了72.1%。这是由于近年来重庆市产业结构逐渐优化,供给侧结构性改革深入推进,资源利用方式的集约化、节约化程度逐渐增强,加之生产科技创新对降低资源消耗的推动作用,促使重庆市资源利用效率逐年提高。

由图8可知,重庆市生态压力指数总体波动小,总体呈现平稳状态,多年平均值为1.885,从2008年

的1.8873到2017年的1.8710,降低了0.86%,生态压力指数始终介于1.51~2之间,生态环境处于很不安全状态。

由图9可知,重庆市生态多样性指数在2008-2017年整体呈阶梯式上升,多年平均值为1.045,从2008年的0.9836到2017年的1.0889,上升了10.71%。这主要是由于重庆市近年来实施的退耕还林还草,基本农田保护、土地复垦与整理,划定林地生态红线、林地分级管理和重点区域管制,加大湿地保护与修复力度等措施,使得土地利用方式逐渐多样化,生态系统的稳定性增强。

由图10可知,重庆市可持续发展能力综合指数在2008-2012年和2014-2017年呈现倒“U”型,整体呈现上升,多年平均值为0.5877,从2008年的0.5422到2017年的0.6173,上升了13.85%,说明重庆市可持

续发展能力逐渐增强,这主要得益于重庆市近年来认真践行科学发展观,优化产业结构,大力发展电子信息等低耗能、高效益产业,淘汰小水泥、小火电、小钢铁、小煤矿等落后产能企业,严格能效、资源消耗准入门槛,推动技术创新,推广清洁绿色生产,优化土地利用结构,普及环保知识等举措的实施。

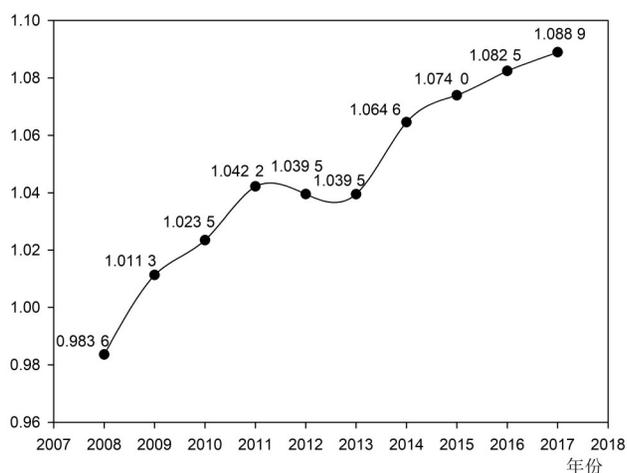


图9 生态多样性指数

Fig. 9 Ecological diversity index

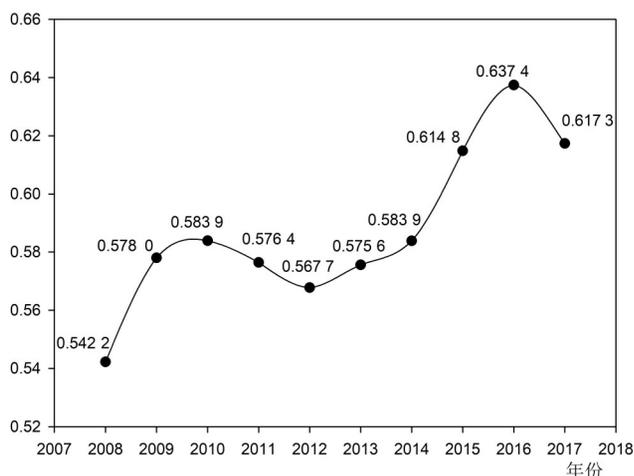


图10 可持续发展能力综合指数

Fig. 10 Comprehensive index of sustainable development capacity

但其生态压力指数仍介于1.51~2.00之间,生态环境尚处在很不安全状态,存量资本依然在被消耗,重庆市尚处于非可持续发展状态。同时,2017年可持续发展能力综合指数又出现小幅度下降,这是由于2017年GDP增速下降到9.3%(近十年来首次下跌到两位数以下),经济增速放缓,社会消费需求相对下降;发展设施农业,农业技术水平提高,集约化程度增强,单产提高;9大支柱产业中能源工业下滑

5.9%,因此三维生态足迹总体下降。受2017年暴雨洪涝灾害影响,重庆市农作物减产4.25%,全国农作物减产4.16%,相对来说重庆市耕地产量因子数值有所减小,耕地生态承载力下降,使得耕地的存留量指数和生态压力指数上升。受人们饮食结构变化和人口数的增长,草地的生态足迹上升了4.24%,而草地面积缩减了0.09%,故而草地的存留量指数和生态压力指数上涨。由于工业化、城市化水平的提高和人口的增长,建设用地生态足迹增长了1.66%,略大于其面积增长率(1.29%),因而建设用地生态压力指数上涨。

5 结论与讨论

(1) 近十年来重庆市可持续发展能力综合指数总体上升了13.85%,但生态压力指数仍介于1.51~2.00之间,生态环境尚处在很不安全状态,生态赤字状态仍未扭转,存量资本依然在被消耗,重庆市尚处于非可持续发展状态,特别是2017年重庆市可持续发展能力综合指数出现小幅度下滑。因此,重庆市应严格落实习近平总书记提出的“两点”“两地”定位和“四个扎实”要求,认真践行“绿水青山就是金山银山”理念;倡导低碳、节俭的可持续生活消费模式,转变经济增长方式,推动产业结构绿色转型,加强科技创新,发展低碳经济,形成节约资源和保护环境的空间格局;优化生态空间布局,严守生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界三条控制线;改革生态环境监管体制,强化绩效评价和责任追究,形成以政府为主导、企业为主体、社会组织和公众共同参与的环境治理体系,警惕可持续发展能力继续下滑;

(2) 在生态足迹的计算中,为使各类土地可以直接相加,可能会将生产力差异很大的不同地块乘上相同的均衡因子,这会导致生态足迹和生态承载力与真实情况有所差距,因此,后续研究中可运用能值法等其他方法加以改进。另外,可持续发展能力的测度需要一个包含生态、经济、社会等多方面的复杂指标体系,本文中的可持续发展能力综合指数虽有一定涉及,但难以包含所有评价指标。

参考文献

- [1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2):121-130.
- [2] Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint: Reduc-

- ing human impact on the earth[M]. Gabriola Island, BC: New Society Publishers, 1996:61-83.
- [3] 张志强,徐中民,程国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济,2000(10):8-10.
- [4] Bicknell B, Ball R J, Cullen R, et al. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy[J]. Ecological Economics, 1998, 27(2):149-160.
- [5] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, et al. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961-1999: comparing the conventional approach to an 'actual land area' approach[J]. Land Use Policy, 2003, 21(3): 261-269.
- [6] Siche J R, Agostinho F, Ortega E. Emergy Net Primary Production (ENPP) as basis for calculation of Ecological Footprint [J]. Ecological Indicators, 2009, 10(2):475-483.
- [7] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, et al. How deep is the footprint? A 3D representation[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(20):2819-2823.
- [8] 顾晓薇,王青,刘建兴,等.基于“国家公顷”计算城市生态足迹的新方法[J].东北大学学报,2005,26(4):295-298.
- [9] 张恒义,刘卫东,王世忠,等.“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[J].自然资源学报, 2009, 24(1):82-92.
- [10] 张帅,董泽琴,王海鹤,等.基于生态足迹改进模型的均衡因子与产量因子计算:以某市为例[J].安徽农业科学, 2010, 38(14):7496-7498.
- [11] 方恺.生态足迹深度和广度:构建三维模型的新指标[J].生态学报, 2013, 33(1):267-274.
- [12] 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[J].生态学报, 2017, 37(9):2982-2993.
- [13] 杜悦悦,彭建,高阳,等.基于三维生态足迹的京津冀城市群自然资本可持续利用分析[J].地理科学进展, 2016, 35(10): 1186-1196.
- [14] 张倩,谢世友.基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J].灌溉排水学报, 2019, 38(2):93-100.
- [15] 郭晓娜,苏维词,杨振华,等.城乡统筹背景下重庆市水生态足迹分析及预测[J].灌溉排水学报, 2017, 36(2):69-75.
- [16] 王文国,龚久平,青鹏,等.重庆市水资源生态足迹与生态承载力分析[J].生态经济, 2011(7):159-162.
- [17] 谭秀娟.重庆市直辖以来水足迹研究[D].重庆:西南大学, 2010.
- [18] 施开放,刁承泰,孙秀锋,等.基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究[J].生态学报, 2013, 33(6): 1872-1880.
- [19] 杨庆媛,王兆林,鲁春阳,等.生态足迹研究方法在土地资源可持续利用评价中应用:以重庆市为例[J].西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(8):134-138.
- [20] 董国仓,罗有贤,翁才银,等.基于ArcGIS的重庆市县域生态足迹差异分析[J].经济地理, 2009, 29(11):1885-1889.
- [21] 邹聪明,胡小东,张云兰,等.基于能值生态足迹模型的高温伏旱区生态安全研究:以重庆市江津区为例[J].干旱地区农业研究, 2010, 28(6):201-205, 216.
- [22] 李营刚,蒋勇军,丁馨怡.基于生态足迹模型的重庆市涪陵区可持续发展研究[J].西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(6):73-77.
- [23] 黄华.基于生态足迹法的三峡库区土地承载力研究:以重庆市忠县为例[J].价值工程, 2014, 33(20):165-166.
- [24] 刘晓,苏维词.基于生态足迹模型的重庆市三峡库区可持续发展对策研究[J].水土保持研究, 2008, 15(2):222-225, 228.
- [25] 肖莉,蒋莉,陈治谏,等.小流域可持续发展能力的生态足迹法分析:以重庆市万州区五桥河流域为例[J].农村生态环境, 2005, 21(4):22-27.
- [26] 郑钦玉,何再超.重庆市可持续发展的生态足迹测度[J].中国生态农业学报, 2007, 15(6):143-147.
- [27] 丁馨怡.基于生态足迹模型的重庆市涪陵区可持续发展研究[D].重庆:西南大学, 2008.
- [28] 白婷.基于改进生态足迹模型的重庆市可持续发展能力研究[D].重庆:西南大学, 2017.
- [29] 王小丽.基于生态足迹模型的重庆市可持续发展动态研究[D].重庆:重庆师范大学, 2012.
- [30] 张喜梅.基于生态足迹的重庆市生态安全动态变化研究[D].重庆:西南大学, 2014.
- [31] 黄海,刘长城,陈春.基于生态足迹的土地生态安全评价研究[J].水土保持研究, 2013, 20(1):193-196, 201.
- [32] 王小丽,杨华,简太敏.基于生态足迹的重庆市涪陵区生态适度人口研究[J].安徽农业科学, 2012, 40(1):340-343.
- [33] 陈展图,杨庆媛,肖琼,等.基于生态足迹视角的建设用地节约集约利用分析:以重庆市为例[J].生态经济(学术版), 2010(1):270-273.
- [34] 杭晓宁,张健,胡留杰,等.2006—2015年重庆市农田生态系统碳足迹分析[J].湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(5):524-531.
- [35] 谭晖川.重庆市工业水足迹变化特征分析与预测[D].重庆:重庆交通大学, 2017.
- [36] 刘小雷,丁桑岚.基于能值理论改进的生态足迹法:以重庆市为例[J].安徽农业科学, 2011, 39(12):7391-7394.
- [37] 袁欢.基于能值理论和生态足迹模型的区域可持续发展研究[D].重庆:西南大学, 2011.
- [38] 周园园.基于能值生态足迹的微型城镇生态安全研究[D].重庆:西南大学, 2016.
- [39] 张燕,吴玉鸣.西南岩溶区生态安全评价研究:以广西为例[J].中国人口·资源与环境, 2006, 16(4):129-133.
- [40] 杨廷锋.贵州岩溶地区生态效率的动态变化研究[J].中国岩溶, 2010, 29(4):414-418.
- [41] 张凤太,苏维词.贵州省岩溶地区水土资源生态安全研究[J].水电能源科学, 2015, 33(9):151-154.
- [42] 张军以,苏维词,张凤太.基于PSR模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价[J].中国环境科学, 2011, 31(6):1039-1044.

- [43] 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.
- [44] 方恺,Reinout H.自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J].地理科学进展,2012,31(12):1700-1707.
- [45] 吴健生,李萍,张玉清.基于生态足迹的城市地域可持续发展能力评价:以深圳为例[J].资源科学,2008,30(6):850-856.
- [46] 林卫.基于生态足迹的流域生态系统可持续发展能力评价研究[D].长沙:中南林业科技大学,2014:9-10.
- [47] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication[M]. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949.

Empirical study on sustainable development based on the three-dimensional ecological footprint: A case of Chongqing

ZHANG Xiaoyu¹, ZHOU Baotong^{1,2}, MING Hong²

(1.School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Institute of Shengdi Land Economic Research, Chongqing 400000, China)

Abstract Chongqing is located in southwest China, the upper reaches of the Yangtze River, with a total karst area of 32,680 km², accounting for 39.7% of the city's land area. Due to its poor internal environmental stability, the area has serious ecological problems such as soil erosion and rocky desertification. In recent years, relying on its superior location and national strategic advantages, Chongqing has basically formed a pattern of coexistence of large agriculture, large industry, large transportation and large circulation. With the rapid economic and social development, the ecological environment is facing tremendous pressure and the sustainable development has been threatened. In order to provide references for the sustainable development of Chongqing, in this paper, we firstly adapted the 3D ecological footprint model of Niccolucci by calculating the "national hectare", updating the equilibrium factor and yield factor, and adding the pollutant account. Then, we diachronically analyzed the ecological footprint of Chongqing from 2008 to 2017 by using the improved ecological footprint model. On this basis, we constructed a comprehensive index to assess the dynamic changes of sustainable development ability in Chongqing. The results show that, (1) The stock flow indexes were less than 1 in the period studied, except for those in the years of 2008, 2012, 2013 and 2014, indicating that the consumption of stock capital has decreased; (2) The overall ecological resource utilization efficiency index decreased year by year, while the resource utilization efficiency increased at the same time; (3) The index of ecological diversity increased stepwise, and the stability of the ecosystem was enhanced; (4) The comprehensive index of sustainable development capacity increased by 13.85%, indicating that the overall sustainable development capacity has been strengthened; (5) The ecological pressure index was between 1.51 and 2.00, the ecological environment was still in a very unsafe state, the stock capital was still occupied, and Chongqing was still in a state of unsustainable development. In addition, the comprehensive index of sustainable development capacity showed a slight decline in 2017. Therefore, under the guidance of the concept of "green water and green mountains are golden mountains and silver mountains", Chongqing should accelerate the formation of a spatial pattern of resource conservation and environmental protection, strive to build an environmental governance system led by the government, dominated by enterprises, and jointly participated by social organizations and the public, optimize the ecological spatial layout, strictly abide by the three control lines, and be alert to the continuous decline of sustainable development capacity.

Key words national hectare, footprint model, comprehensive index, Chongqing

(编辑 黄晨晖)