

基于生态足迹模型的四川省耕地资源评价^{*1}

王琦¹ 易桂花^{2*} 张廷斌^{1, 3, 4} 别小娟¹ 刘栋¹ 何冬¹ 徐嘉昕¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

2. 成都理工大学管理科学学院, 四川成都 610059;

3. 成都理工大学工程技术学院, 四川乐山 614000;

4. 国土资源部地学空间信息技术重点实验室, 四川成都 610059)

【摘要】:耕地是所有生态生产性土地中生产力最大的一类, 生态足迹模型是定量评价可持续发展的常用工具之一。基于传统生态足迹模型、改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型, 测算、分析了 2006~2013 年四川省耕地生态赤字等相关变化及趋势, 客观评价了四川省耕地资源利用状况, 并探讨了几种模型的差异。结果表明:2006~2013 年间, 四川省人均耕地生态足迹不断上升, 人均耕地生态承载力基本稳定, 人均耕地生态赤字持续扩大; 耕地资源利用由弱不可持续状态逐步向强不可持续状态发展。3 种生态足迹模型的对比研究发现, EF-NPP 模型在一定程度上弥补了传统生态足迹模型和改进生态足迹模型的不足, 客观、动态地反映了区域耕地利用状况和可持续发展状态。

【关键词】:生态足迹; 耕地; 生态赤字; NPP; 四川省

【中图分类号】:X176 **【文献标识码】:**A **【文献标识码】:**1004-8227(2018)01-0080-08

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201801010

在社会经济结构和生态环境结构发生系列变化的情况下, 定量测度和评估可持续发展已经成为当今社会研究的热点^[1~4]。20 世纪 90 年代, 由加拿大生态经济学家 Ree 和 Wackernagel 共同发展的生态足迹模型(Ecological Footprint, EF), 能够衡量自然资本可持续发展状况^[2, 5], 该模型将人类在任何空间尺度下消耗的自然资源折算成生物生产性土地面积, 通过与现存的实际土地面积相比来评估人类活动是否还处于生物圈承载的再生能力范围之内^[6, 7]。生态足迹模型因其简洁明了、综合、计算简单及可以进行区域性比较等特点, 目前已在国际资源、环境与社会经济、生态经济等领域引起广泛关注和应用^[8~11]。

¹ 收稿日期:2017-03-24; 修回日期:2017-05-11

基金项目:国家自然科学基金(41202233); 中国地质调查局项目(DD20160015-26)

作者简介:王琦(1992~), 男, 硕士研究生, 主要从事生态遥感研究. E-mail:419287689@qq.com

*通讯作者 E-mail:yigh@cdut.edu.cn

传统生态足迹模型由于均衡因子建立在全球农业生态区基础之上^[12]、计算中采用全球生物产量而导致误差较大^[13]。为了提高区域生态足迹结果的可靠性,许多学者对生态足迹模型进行了不断的探索和修正。顾晓薇等^[14]和张寅玲等^[15]使用以“国家公顷”为基础的改进生态足迹模型分别测算了沈阳市和兰州市的生态足迹;VenettoulisJ^[16]提出净初级生产力的生态足迹算法(以下简称EFNPP);杜加强等^[6]、马高等^[17]以EF-NPP模型和传统生态足迹模型分别从国家、区域两个尺度测算了生态足迹并对比了模型间的差异;刘某承^[18~20]等应用EF-NPP模型分别进行了各个省份乃至整个国家不同土地类型的均衡因子和产量因子测算。

近年来,很多学者将生态足迹模型应用到生物生产性土地(耕地^[21]、林地^[22]、草地^[23]、水域^[24]、建筑用地^[25]、能源用地^[26])并进行了大量的单项研究,研究的对象已从国家^[6, 27]向区域、省市或者单个城市^[28, 29]发展。其中,集中在中东部省市的区域性耕地单项研究较多,且应用模型以传统生态足迹模型、改进生态足迹模型和EFNPP模型为主^[3, 6, 14],针对3种模型的区域性耕地资源对比研究则较少。四川省作为西南部地区的农业大省,城镇化的快速推进导致耕地资源日益减少、耕地保护形势严峻^[30],目前针对四川省耕地单项研究亦较少报道。基于此,本文采用传统生态足迹模型、改进生态足迹模型和EF-NPP模型,对比研究了2006~2013年间四川省耕地资源的生态赤字等相关变化,客观反映了耕地资源的利用状况,并探讨了几种模型的差异,以期对四川省耕地资源的持续利用状况和应用模型的认识提供科学依据。

1 研究区概况

四川省位于我国西南腹地,地理范围 $97^{\circ}21' \sim 108^{\circ}33'E$ 、 $26^{\circ}03' \sim 34^{\circ}19'N$ 。全省北依甘肃,东连重庆,南衔云南,西接西藏,西北、东北、东南分别与青海、陕西、贵州相邻,为西南农业大省,面积达48.6万 km^2 。地貌类型复杂,整体地势由东南向西北持续升高(图1)。气候温和湿润、降水丰富。土壤类型众多,以紫色土为主,土壤中含有丰富的钾、磷、钙、镁、铁、猛等元素,肥力较高^[31],素有“天府之国”美誉。

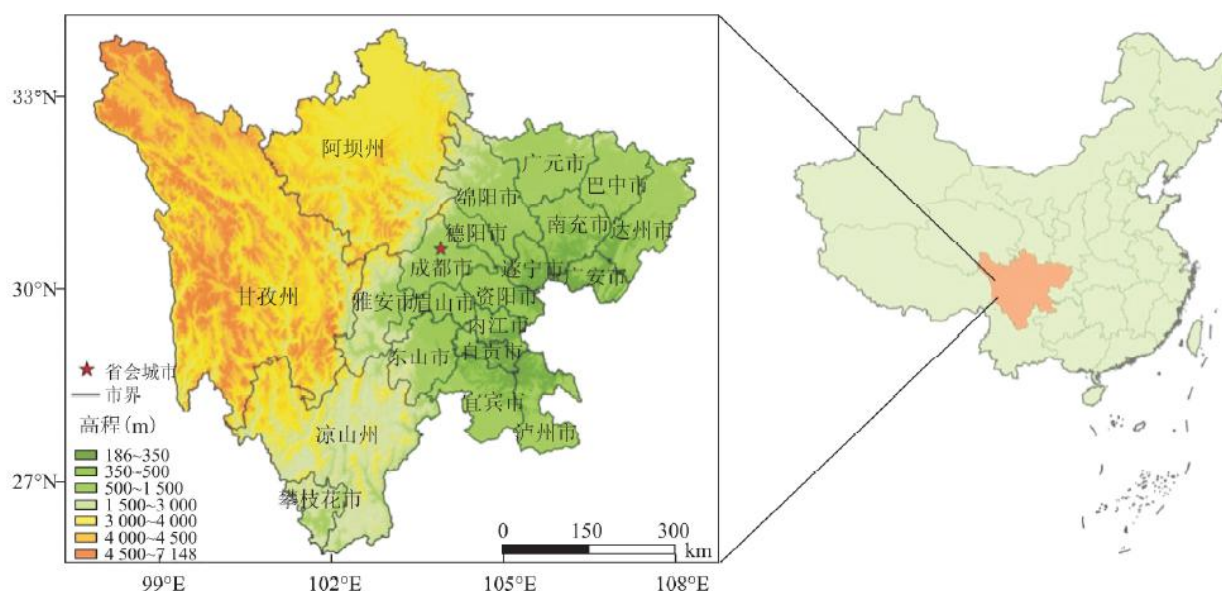


图1 四川省地理位置图

Fig. 1 Location of the Sichuan province

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

各种消费项目数据(稻谷、小麦、玉米、豆类、油菜籽、甘蔗、烟叶、蔬菜等)和人口等数据来源于《四川省统计年鉴》(2006—2013)、《中国统计年鉴》(2006—2013)和联合国粮食及农业组织统计数据库(<http://www.fao.org/faostat/en/#home>)。

遥感数据为四川省 2006~2013 年 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)的 MOD17A3 和 MOD12Q1 数据,分别来源于美国 NASA(National Aeronautics and Space Administration)的 EOS/MODIS(<https://lpdaac.usgs.gov/>)和地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。MOD17A3 数据是采用 BIOME-BGC 模型^[32] 计算出的全球陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)产品,该产品已广泛应用在全球变化、环境监测和生物量估算等研究中^[33~36]。MOD12Q1 数据是一种数据分类产品,本文采用该产品国际地圈生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)的全球植被分类方案^[17, 37]。文中使用 MODIS 重投影工具(MODIS Reprojection Tool, MRT)对 MOD17A3 和 MOD12Q1 数据进行镶嵌、格式转换和重投影等预处理,将分辨率统一转换为 1km。然后根据 MOD17A3 产品对应的比例系数将数据本身的 DN 值转为真实的 NPP 值。在 ENVI4.8 中,结合全国和研究区矢量范围对数据进行裁剪操作得到 2006~2013 年全国和四川省的 NPP 数据与土地分类数据。将同一年的土地分类数据与 NPP 数据进行叠加运算、统计分析,得到 2006~2013 年全国与四川省的耕地以及其他 5 大类土地的平均 NPP 统计值。

2.2 研究方法

2.2.1 传统生态足迹模型

生态足迹是提供已知人口的资源消费和废弃物消纳,在一定的经济规模条件下折算成所必需的具有生物生产力的地域空间面积的总和^[27, 38, 39]。耕地生态足迹计算公式^[1]如下:

$$EF = N \cdot ef$$

$$ef = \sum_{i=1}^n r_i \frac{C_i}{P_i}$$

式中:EF 为区域耕地总的生态足迹;N 为区域总人口数;ef 为区域人均耕地生态足迹;i 为消费项目类型;r 为耕地均衡因子; C_i 为第 i 种消费项目类型的人均消费量; P_i 为第 i 种消费项目类型的全球年平均产量。传统生态足迹模型采用 Wackernagel 研究报告中给出的耕地均衡因子 2.82^[40]。

耕地生态承载力是提供给人类活动的可以再生、持续利用的耕地资源总量,是一种真实的耕地面积^[1]。具体公式为:

$$EC = N \cdot ec$$

$$ec = a \cdot r \cdot y$$

式中:EC 为区域耕地总的生态承载力;ec 为区域人均耕地生态承载力;a 为人均占有的耕地生物生产面积;y 为耕地产量因子。耕地产量因子采用 Wackernagel 提供的 1.66^[40]。由于本文只研究耕地这一土地类型,且四川省耕地总面积占其土地总面积

13.48%，根据现有的生物多样性研究成果^[41]，计算生态承载力将把四川省耕地实际面积中的1.8%（由土地采用的13.4%的比例折算）作为生物多样性保护地。

2.2.2 改进生态足迹模型

改进生态足迹模型是在传统生态足迹模型基础上提出的，因其计量单位的不同，在计算中将全国平均生产量替代全球平均生产量，同时采用以“国家公顷”为标准计算的因子^[42]。文中均衡因子取值为1.74^[18]。由于不同的耕地类型（消费项目）所反映的生产力不同，耕地的产量因子可由耕地的不同类型（消费项目）产量因子相加计算而来。以四川省2013年相关统计数据为例，2013年耕地产量因子值为0.9844（表1）。

表1 2013年四川省耕地产量因子

消费项目	稻谷	小麦	玉米	豆类	油菜籽	甘蔗	烟叶	蔬菜
年产量（10 ⁴ t）	1 549.50	421.30	762.40	92.10	224.03	56.94	25.07	3 910.68
种植面积（10 ⁴ hm ² ）	199.07	121.60	137.80	47.13	99.80	1.40	12.00	127.60
平均产量（kg/hm ² ）	7 783.69	3 464.64	5 532.66	1 954.17	2 244.94	40 638.31	2 090.28	30 648.46
全国平均产量（kg/km ² ）	6 717.14	5 055.77	6 016.03	1 729.18	1 919.80	70 595.26	2 078.87	35 174.89
作物产量因子	1.16	0.69	0.92	1.13	1.17	0.58	1.01	0.87
与总耕地面积比重	26.67	16.29	18.46	6.31	13.37	0.19	1.61	17.10
耕地产量因子	0.984 4							

2.2.3 EF-NPP 模型

净初级生产力(NPP)是指植物产生的有机干物质量，表现为在单位时间和单位面积由光合作用产生的扣除自养呼吸后的剩余部分^[43]，它提供给地球上所有消费者和分解者生长、生存、繁殖的必需物质。生态足迹(EF)旨在评价人类活动对生产性土地的索取程度，而人类的NPP占用则表征了人类施加给生态系统的压力强度^[44, 45]。将EF和NPP结合起来形成的EF-NPP模型，可以更好地测量和评价区域可持续发展状况。EF-NPP模型与改进生态足迹模型两者的计算方法类似。不同的是，EF-NPP模型的均衡因子是通过计算某类土地的年平均NPP在所有土地类型年平均NPP的占比得到^[18]；EF-NPP产量因子是区域某类土地的年平均NPP与该类型土地的全局年平均NPP之比^[19]。

2.2.4 生态盈亏

生态盈亏表示一个区域的生态状况和可持续发展状态，是耕地生态足迹和耕地生态承载力之差^[46~48]：

$$ED=EF-EC=N\left(ef-ec \right)$$

式中:当 ED 为正值时,表现为生态赤字,即区域处于不可持续发展状态;当 ED 为负值或零值时,表现为生态盈余,即区域处于可持续发展状态。

3 结果与分析

3.1 产量因子和均衡因子

2006~2013 年四川省耕地改进生态足迹模型、EF-NPP 模型的产量因子和 EF-NPP 模型均衡因子计算值分别见表 2 和表 3。改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型中产量因子的变化趋势相同,即 2006~2010 年均呈缓慢增长趋势、2010~2013 年均呈缓慢下降趋势;计算值在 2006 年均最小,分别为 0.9273 和 1.2434;在 2010 年均达到最大分别为 1.0030 和 1.3727。EF-NPP 模型均衡因子在 2006~2013 年间呈缓慢下降趋势。

表 2 2006 ~ 2013 年四川省改进生态足迹模型产量因子

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
产量因子	0.927 3	0.984 4	0.978 9	0.993 7	1.003 0	0.993 9	0.988 4	0.984 4

表 3 2006 ~ 2013 年四川省 EF-NPP 模型两大因子

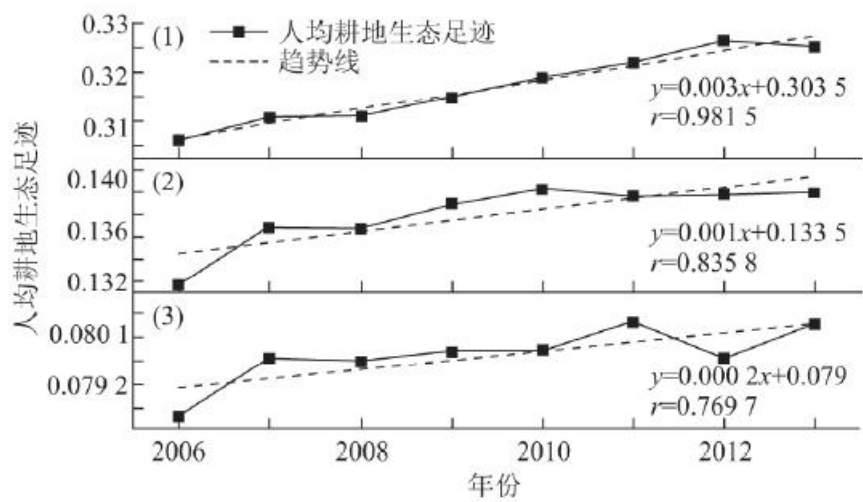
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
产量因子	1.243 4	1.331 6	1.327 0	1.363 8	1.372 7	1.337 8	1.351 2	1.335 9
均衡因子	1.038 4	1.013 5	1.013 6	0.997 0	0.990 7	1.001 7	0.992 1	0.998 6

3.2 耕地足迹

四川省 2006~2013 年间 3 种模型计算的人均耕地生态足迹整体均呈上升趋势(图 2)。其中,传统生态足迹模型增长最快,趋势变化率为 0.03hm²/10a,改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型趋势吻合且增长缓慢,趋势变化率分别为 0.01 和 0.002hm²/10a。从图 2 可以看出,传统生态足迹模型呈现出先上升后下降两个过程,人均耕地足迹在 2006~2012 年、2012~2013 年间,增长率和减少率分别为 6.7%和 0.4%,整体增长了 6.2%。改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型趋势相似,主要分为快速上升、平稳变化两个阶段,其中 2006 年到 2007 年均处于快速上升阶段,增长幅度为 3.9%和 1.4%。在接下来的 2007~2013 年平稳变化阶段,改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型分别以 2.3%和 0.8%的幅度增长至 2013 年的 0.14 和 0.08hm²,整体分别增长了 6.3%和 2.2%。

以全球公顷为计量单位的传统生态足迹模型采用了国际通用的均衡因子和基于统计数据所得的全球平均产量来计算生态足迹,其计算结果有利于国家之间的比较。但在研究小区域时,因不同国家不同地区同类土地生产力有很大不同,将导致小区域的计算结果会出现较大差异^[49],吴开亚等^[42]在 2003 年安徽省的生态足迹研究中证实了这一点。改进生态足迹模型和 EF-NPP

模型趋势基本吻合，主要是因为两种模型更能体现区域耕地的特性。如，采用全国公顷为基础来计算、均衡因子以国家为尺度等。因此，在耕地足迹变化中，改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型更能反映其客观变化。



(1)：传统生态足迹模型 Traditional ecological footprint model;
(2)：改进生态足迹模型 Improved ecological footprint model;
(3)：EF-NPP 模型 EF-NPP model

图 2 2006~2013 年四川省人均耕地生态足迹变化
Fig. 2 Changes of the per-capita ecological footprint of cultivated land in Sichuan province during 2006–2013

3.3 耕地生态承载力

在研究时段内，随着耕地面积的增加，3 种模型计算的人均耕地生态承载力呈现出不同的变化趋势(图 3)。传统生态足迹模型由 2006 年的 0.206hm²到 2013 年的 0.201hm²，表现为持续下降的态势，仅在 2010 年出现一个小高峰，值为 0.205hm²；改进生态足迹模型和 EFNPP 模型以 2010 年为节点，呈现出“前增后减”的不规则变化趋势，整体稳定。2010 年之前，改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型分别由 2006 年的 0.0711、0.0569hm²增加到 2010 年的 0.0764、0.0595hm²，增长幅度为 7.3%和 4.5%。2010 年之后开始减少，两种模型到了 2013 年，值分别减少至 0.0736、0.0573hm²。

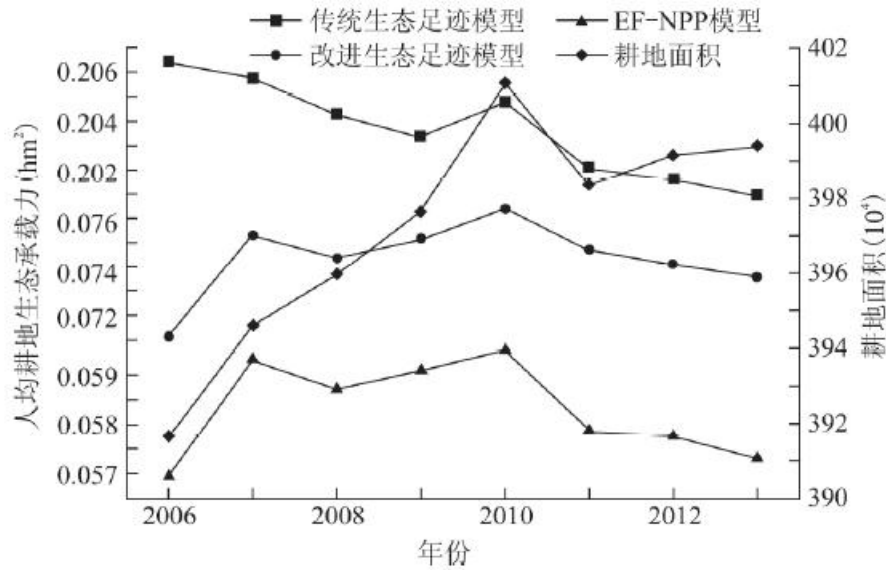


图 3 2006~2013 年四川省人均耕地生态承载力变化

Fig. 3 Changes of the per-capita ecological capacity of cultivated land in Sichuan province during 2006–2013

耕地生态承载力的计算基于真实的耕地生产性面积。传统生态足迹模型相比其他两个模型所求值偏高且趋势相反，主要原因是采用了国际通用的恒定均衡因子和产量因子，忽略了区域生物性土地生产力，导致计算出的人均生态承载力的结果完全由耕地面积和人口来决定。改进生态足迹模型的产量因子基于统计数据计算而来，均衡因子采用的是基于全国公顷的恒定值，该值有效反映了小区域耕地的生产力，但因年际降水、光照、温度等气候要素差异所导致的区域土地生产力不同而产生的年际均衡因子也不同，耕地生态承载力仍存在一定的误差。EF-NPP 模型引入遥感因子(NPP)，减弱了对统计数据的依赖性，年际 NPP 的动态变化客观地反映了区域耕地生态承载力的变化，使计算结果更加客观、有效。

3.4 生态盈亏

由图 4 可以看出，研究时段内，传统生态足迹模型和改进生态足迹模型的人均耕地生态赤字上升趋势明显且与人口增长呈正比；EF-NPP 模型的生态赤字呈现一个不规则的变化趋势；由数据可知，传统生态足迹模型、改进生态足迹模型的人均耕地生态赤字分别由 2006 年的 0.100、0.061 hm^2 持续上升至 2013 年的 0.124、0.066 hm^2 ；而 EF-NPP 模型的人均耕地生态赤字从 2006 年开始平稳下降，2010 年达到最低，值 0.0203 hm^2 。在接下来的 3a 里，又以 13.2% 的幅度增长至 2013 年的 0.023 hm^2 。EF-NPP 模型中，2006~2010 年人均耕地生态赤字幅度有所降低，耕地资源利用呈现弱不可持续发展状态，2010~2013 年生态赤字幅度增加，表明耕地资源正逐步转向强不可持续发展状态，与刘运伟等^[46]、邱高会等^[50]关于四川省的相关生态足迹研究结论一致。四川省政府自“十一五”耕地保护系列措施实施开始，耕地面积小幅增加、耕地生产力提升，使得在 2006~2010 年期间生态赤字有小幅降低，但是随着经济的迅速发展和人口的迅猛增加，耕地的供需矛盾加剧，导致生态赤字进一步扩大，耕地资源利用由弱不可持续状态逐步向强不可持续状态发展。

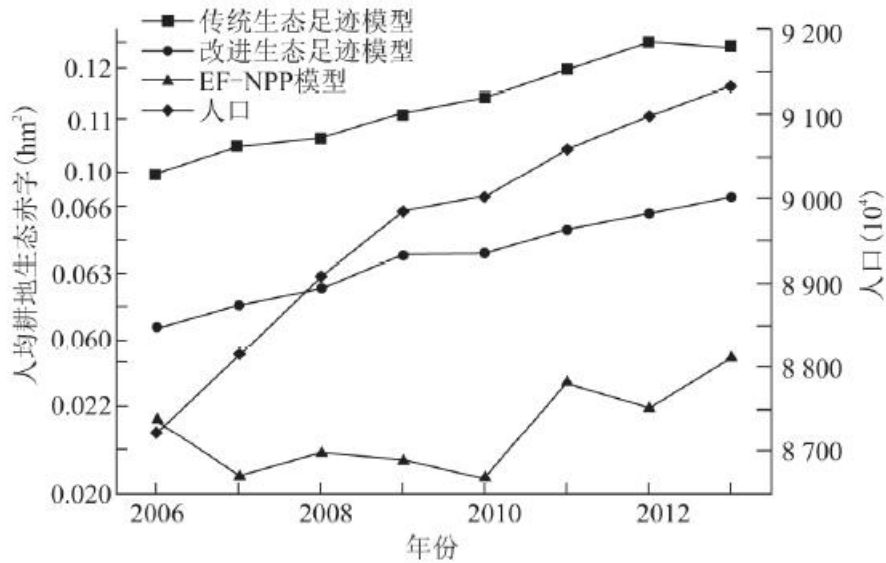


图 4 2006~2013 年四川省人均耕地生态盈亏变化
Fig. 4 Changes of the per-capita ecological deficit of cultivated land in Sichuan province during 2006–2013

4 结论

本文基于传统生态足迹模型、改进生态足迹模型和 EF-NPP 模型,对四川省 2006~2013 年间耕地资源的生态赤字等相关变化进行了对比研究,反映了四川省耕地资源利用状况,同时探讨了几种模型的优缺点,主要结论有:

(1) 2006~2013 年四川省人均耕地生态足迹不断上升,人均耕地生态承载力基本稳定,人均耕地生态赤字持续扩大;耕地资源利用由弱不可持续状态逐渐转变为强不可持续发展状态。

(2) 传统生态足迹模型在评价耕地利用状况时很难客观反映出区域耕地生产力特性。主要原因有二,一是计算中采用了基于统计数据计算的全球平均产量;二是使用了基于全球对比的均衡因子和产量因子。

(3) EF-NPP 模型与改进生态足迹模型相比,EF-NPP 模型优势更加明显,体现在:①EF-NPP 模型将遥感因子(NPP)应用到动态均衡因子和产量因子的计算之中,能够反映区域耕地生产力的特征且能较为客观的看到动态变化。②EF-NPP 模型将雪地、荒原等低生产力土地纳入计算,使结果相对更为可靠。③改进生态足迹模型和 EFNPP 模型基于国家公顷,前者能够把握不同地区的差异性,在统计资料的选取上可以体现一个地区的生产力,但其计算结果更多取决于统计数据;而后者是在前者的基础上,引入遥感因子(NPP),减弱了对统计数据的依赖性,计算结果更准确客观地反映了区域生态足迹。

参考文献:

[1] 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.

SHI K F, DIAO C T, SUN X F, et al. Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method [J]. *ActaEcologica Sinica*, 2013, 33(6) : 1872—1880.

[2] 彭建, 王仰麟, 吴健生. 净初级生产力的人类占用: 一种衡量区域可持续发展的新方法 [J]. *自然资源学报*, 2007, 22(1) : 153—158.

PENG J, WANG Y L, WU J S. Human appropriation of net primary production: an approach for ecological assessment of regional sustainable development [J]. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(1) : 153—158.

[3] 王国刚, 杨德刚, 苏芮, 等. 生态足迹模型及其改进模型在耕地评价中的应用 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5) : 1081—1086.

WANG G G, YANG D G, SHU R, et al. Application of traditional ecological footprint and its derivatives in evaluating utilization of croplands [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(5) : 1081—1086.

[4] 杨永奎, 王定勇. 重庆市直辖以来生态足迹的动态测度与分析 [J]. *生态学报*, 2007, 27(6) : 2382—2390.

YANG Y K, WANG D Y. Dynamic calculation and analysis of ecological footprint of Chongqing after establishing municipality status [J]. *ActaEcologicaSinica*, 2007, 27(6) : 2382—2390.

[5] WACKERNAGEL M, REES W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective [J]. *Ecological Economics*, 1997, 20(1) : 3—24.

[6] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于净初级生产力的生态足迹模型及其与传统模型的对比分析 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1) : 191—196.

DU J Q, SHU J M, ZHANG L B, et al. Comparison and analysis of traditional ecological footprint and the other based on net primary production [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1) : 191—196.

[7] 王明全, 王金达, 刘景双, 等. 基于能值的生态足迹方法在黑龙江和云南二省中的应用与分析 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(1) : 73—81.

WANG M Q, WANG J D, LIU J S, et al. Application of the emergetic ecological footprint method to Heilongjiang and Yunnan Provinces and Analysis [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(1) : 73—81.

[8] 谢高地, 曹淑艳. 生态足迹方法作为生态系统评估工具的潜力 [J]. *资源科学*, 2006, 28(4) : 8—8.

XIE G D, CAO S Y. potential of ecological footprint approach as a tool to evaluate ecological systems[J]. *Resources science*, 2006, 28(4) : 8—8.

[9] COSTANZA R. The dynamics of the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 2000, 32(3) : 341—345.

-
- [10] SENBEL M, MCDANIELS T, DOWLATABADI H. The ecological footprint: a non-monetary metric of human consumption applied to North America [J]. *Global Environmental Change*, 2003, 13(2) : 83—100.
- [11] LENZEN M, HANSSON C B, BOND S. On the bioproductivity and land-disturbance metrics of the Ecological Footprint [J]. *Ecological Economics*, 2007, 61(1) : 6—10.
- [12] MONFREDA C, WACKERNAGEL M, DEUMLING D. Establishing national natural capital accounts based on detailed Ecological Footprint and biological capacity assessments [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3) : 231—246.
- [13] ER K H. Actual land demand of Austria 1926—2000: a variation on Ecological Footprint assessments [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3) : 247—259.
- [14] 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(自然科学版)*, 2005, 26(4) : 397—400.
- GU X W, WANG Q, LIU J X, et al. New method of urban ecological footprint calculation based on “National Hectare” [J]. *Journal of Northeastern University (National Science)*, 2005, 26(4) : 397—400.
- [15] 张寅玲, 白中科, 周伟, 等. 生态足迹模型在耕地可持续利用研究中的应用——以兰州市为例 [J]. *资源与产业*, 2013, 15(4) : 125—129.
- ZHANG Y L, BAI Z K, ZHOU W, et al. A case study on lanzhou: application of ecological footprint model on farmland's sustainable development research [J]. *Resources & Industries*, 2013, 15(4) : 125—129.
- [16] VENETOULIS J, TALBERTH J. Refining the ecological footprint [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4) : 441—469.
- [17] 马高, 任志远, 韩红珠. 基于净初级生产力的陕西省生态足迹测算 [J]. *陕西师范大学学报(自科版)*, 2014(5) .
- MA G, REN Z Y, HAN H Z. Ecological footprint calculation of Shaanxi province based on net primary productivity [J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2014(5) .
- [18] 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 [J]. *自然资源学报*, 2009, 24(9) : 1550—1559.
- LIU M C, LI W H. The calculation of China's equivalence factor under ecological footprint mode based on net primary production [J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24 (9) : 1550—1559.
- [19] 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 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(3) : 592—597.
- LIU M C, LI W H, XIE G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(3) : 592—597.

[20] 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[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(5) :401—406.

LIU M C, LI W H. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production. [J]. Journal of Ecology & Rural Environment, 2010, 26(5) : 401—406.

[21] 赵兴国,潘玉君,王爽,等. 云南省耕地资源利用的可持续性及其动态预测——基于“国家公顷”的生态足迹新方法 [J]. 资源科学, 2011, 33(3) : 542—548.

ZHAO X G, PAN Y J, WANG S, et al. Dynamic analysis of sustainability of arable land resources use in Yunnan Province:a new method of ecological footprint based on national hectare [J]. Resources science, 2011, 33(3) : 542—548.

[22] 夏天凤,张硕新,崔君君. 甘肃省森林资源可持续发展评价 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6) : 159—163.

XIA T F, ZHANG S X, CUI J J. An evaluation on sustainable development of forest resources in Gansu Province [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(6) : 159—163.

[23] 海全胜,阿拉腾图娅,宁小莉,等. 内蒙古正蓝旗草地的区域生态足迹分析 [J]. 干旱区研究, 2011, 28(3) : 532—536.

HAI Q S, ALATENG T UYA, NING X L, et al. Analysis on ecological footprint of grasslands in Plain Blue Banner, Inner Mongolia [J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3) : 532—536.

[24] 王文国,何明雄,潘科,等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报,2011,26(9) :1555—1565.

WANG W G, HE M X, PAN K, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9) : 1555—1565.

[25] 赵卫,刘景双,孔凡娥,等. 城市化对区域生态足迹供需的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(1) : 120—126.

ZHAO W, LIU J S, KONG F E, et al. Effects of urbanization on supply and demand of regional ecological footprint [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1) : 120—126.

[26] 李智,鞠美庭,刘伟,等. 中国 1996 年~ 2005 年能源生态足迹与效率动态测度与分析 [J]. 资源科学, 2007, 29(6) : 54—60.

LI Z, JU M T, LIU W, et al. Dynamic measurement of ecological footprint of energy resources and its economic efficiency in last ten years, China [J]. Resources Science, 2007, 29(6) : 54—60.

[27] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(2) : 280—285.

XU Z M, ZHANG Z Q, CHENG G D, et al. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2) : 280—285.

[28] 刘运伟, 何仁伟, 赵亚玲. 欠发达民族山区生态足迹与生态承载力动态变化及预测分析——以四川凉山彝族自治州为例 [J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(5) : 647—653.

LIU Y W, HE R W, ZHAO Y L. Dynamic analysis and forecast of ecological footprints and ecological capacity in Liangshan Yi autonomous prefecture in Sichuan province [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31 (5) : 647—653.

[29] 段七零. 基于能值分析的江苏省耕地生态足迹区域差异 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(4) : 96—102.

DUAN Q L. Regional difference of ecological footprints of cropland in Jiangsu Province based on emery analysis [J]. Progress in Geography, 2008, 27(4) : 96—102.

[30] 杨秉珣, 董廷旭, 刘泉. 四川省城镇化进程及耕地保护研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(9) : 149—152

YANG B X, DONGTX, LIU Q. The urbanization process in sichuan province and farmland protection [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(9) : 149—152.

[31] 张颖聪. 四川省耕地生态服务价值时空变化研究 [D]. 四川农业大学, 2012.

ZHANG Y C. Study on temporal and spatial change of ecological service value of cultivated land in Sichuan province [D]. Sichuan Agricultural University, 2012.

[32] RUNNING S W. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, biome-bgc, and an application for global scale models—scaling physiological processes — 8 [M] // Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. 1993: 141—158.

[33] 王芳, 卓莉, 陈健飞, 等. 2000 ~ 2006 年广东省农田生物质能时空变化遥感分析 [J]. 地理研究, 2010, 29(12) : 2223—2232.

WANG F, ZHUO L, CHEN J F, et al. Spatial and temporal analysis of cropland bio-energy in Guangdong Province during 2000 ~ 2006 based on remote sensing [J]. Geographical Research, 2010, 29(12) : 2223—2232.

[34] 张晓浩, 黎夏, 施迅, 等. 广东省水稻生物质能的估算 [J]. 遥感信息, 2007(1) : 26—29.

ZHANG X H, LI X, SHI X, et al. Estimation of paddy biomass energy in Guangdong Province [J]. Remote Sensing Information, 2007(1) : 26—29.

[35] 国志兴, 王宗明, 张柏, 等. 2000 年~ 2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析 [J]. 资源科学, 2008, 30(8) : 1226—1235.

GUO Z X, WANG Z M, ZHANG B, et al. Analysis of temporalspatial characteristics and factors influencing vegetation NPP in Northeast China from 2000 to 2006 [J]. Resources Science, 2008, 30(8) : 1226—1235.

[36] 国志兴, 王宗明, 刘殿伟, 等. 三江平原农田生产力时空特征分析 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(1) : 249—254.

GUO Z X, WANG Z M, LIU D W, et al. Analysis of temporal and spatial features of farmland productivity in the Sanjiang Plain. [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(1) : 249—254.

[37] 冉有华, 李新, 卢玲. 四种常用的全球 1km 土地覆盖数据中国区域的精度评价 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(3) : 490—500.

RAN Y H, LI X, LU L. Accuracy evaluation of the four remote sensing based land cover products over China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3) : 490—500.

[38] WACKERNAGEL, MATHIS. Our ecological footprint : reducing human impact on the earth [M]. New Society Publishers, 1996.

[39] REES W E. Eco-footprint analysis: Merits and brickbats [J]. Ecological Economics, 2000, 32(3) .

[40] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. Ecological Economics, 1999, 29(3) : 375—390.

[41] ROJSTACZER S, STERLING S M, MOORE N J. Human appropriation of photosynthesis products. [J]. Science, 2001, 294(5551) : 2549.

[42] 吴开亚, 王玲杰. 基于全球公顷和国家公顷的生态足迹核算差异分析 [J]. 中国人口资源与环境, 2007, 17(5) : 80—83.

WU K Y, WANG L J. Accounting discrepancies of ecological footprint based on global hectare and national hectare [J]. China Population Resources and Environment, 2007, 17(5) : 80—83.

[43] 张峰, 周广胜, 王玉辉. 基于 CASA 模型的内蒙古典型草原植被净初级生产力动态模拟 [J]. 植物生态学报, 2008, 32(4) : 786—797.

ZHANG F, ZHOU G S, WANG Y H. Dynamics simulation of net primary productivity by a satel-lite data-driven casa model in inner mongolian typical steppe, China [J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(4) : 786—797.

[44] 杜加强, 王金生, 滕彦国, 等. 生态足迹研究现状及基于净初级生产力的计算方法初探 [J]. 中国人口: 资源与环境, 2008, 18(4) : 178—183.

DU J Q, WANG J S, TENG Y G, et al. Ecological Footprint and Introduction of EF-NPP [J]. China Population Resources and Environment, 2008, 18(4) : 178—183.

[45] HABERL H, WACKERNAGEL M, KRAUSMANN F, et al. Ecological footprints and human appropriation of net primary production: a comparison [J]. Land Use Policy, 2004, 21(3) : 279—288.

[46] 刘运伟, 李琳莉. 基于生态足迹理论的四川省可持续发展评价研究 [J]. 林业经济, 2015, 37(1) : 106—109.

LIU Y W, LI L L. A study of sustainable development evaluation of Sichuan Province based on ecological footprint model [J]. Forestry Economics, 2015, 37(1) : 106—109.

[47] 阎振元, 陈英姿. 基于生态足迹的生态盈亏平衡分析——以辽宁省长海县为例 [J]. 人口学刊, 2009(4) : 11—15.

YAN Z Y, CHEN Y Z. Analysis on the ecological balance of profits and losses based on ecological footprint [J]. Population Journal, 2009(4) : 11—15.

[48] 周悦, 谢屹. 基于生态足迹模型的辽宁省水资源可持续利用分析 [J]. 生态学杂志, 2014, 33(11) : 3157—3163.

ZHOU Y, XIE Y. Analysis of sustainable utilization of water resource in Liaoning Province based on ecological footprint model [J]. Chinese Journal of Ecology. 2014, 33 (11) : 3157 —3163.

[49] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 等. 生态足迹的模型修正与方法改进 [J]. 生态学报, 2015, 35(14) : 4592—4603.

ZHOU T, WANG Y P, GONG J Z, et al. Ecological footprint model modification and method improvement [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14) : 4592—4603.

[50] 邱高会, 广佳. 区域生态安全动态评价及趋势预测——以四川省为例[J]. 生态经济(中文版), 2015, 31(4) : 129—132.

QIU G H, GUANG J. Dynamic evaluation and trend prediction of regional ecological security: a case study of Sichuan Province [J]. Ecological Economy, 2015, 31(4) : 129—132.