

DOI: 10.5846/stxb201407111419

杨屹, 加涛. 21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化. 生态学报, 2015, 35(24): - .

Yang Y, Jia T. The 21st century ecological carrying capacity and footprint in Shaanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

21 世纪以来陕西生态足迹和承载力变化

杨 屹*, 加 涛

西安理工大学经济与管理学院, 西安 710054

摘要: 采用修正后的生态足迹模型测算了 2000—2012 年陕西省生态足迹和生态承载力。修正的工作主要体现在增加了包括废气、废水和固体废弃物科目的污染排放账户, 确定了同全球平均产量表科目有差异, 但能体现陕西地域特点的板栗、核桃、禽蛋、蚕茧、花椒、棕片及生漆 7 个科目的全球平均产量, 并且测算了对应的生态足迹。结果显示, 21 世纪以来陕西省人均生态足迹从 1.300 hm²/人增加到 3.077 hm²/人, 人均生态赤字由 0.374 hm²/人增加到 2.176 hm²/人, 人均生态承载力从 0.926 hm²/人减少到 0.901 hm²/人。这些数据表明陕西已处于生态超载的状态, 且有逐步加剧的趋势。万元 GDP 生态足迹由 2.626 hm²/万元减少到 0.799 hm²/万元, 表明全省资源利用率正逐步提高, 经济发展能力持续向好。这一观点从发展能力指数由 3.191 增加到 6.842 也可得到验证。陕西省生态足迹值的上升和生态承载力的下降导致了生态赤字的增加。究其原因, 第一, 陕北能源重化工产业的发展对煤、石油等矿物能源消耗加速; 第二, 关中城市群中城镇人口聚集、工业企业发展等带来的污染排放增速过快; 第三, 陕南矿物资源开采伴生的生态环境破坏加剧。为此, 陕西省应把生态承载力作为推进新型城镇化、承接产业转移和规范产业发展的重要依据, 严格控制省内地级市以上主城区人口数量, 提高县城和重点镇的人口城市化率, 把重点镇建设和避免扶贫移民有机结合起来, 建立能源重化工、矿物开采等行业门槛, 执行节能减排目标机制。

关键词: 生态环境; 生态承载力; 生态足迹; 发展能力; 陕西

The 21st century ecological carrying capacity and footprint in Shaanxi Province

YANG Yi*, JIA Tao

School of Economics and Management, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China

Abstract: This paper reviews the ecological footprint model and expands the model to calculate the ecological footprint and carrying capacity of Shaanxi Province in 2000 and 2012. It is known that increased pollution emissions, including waste gases, wastewater, and solid wastes, affect ecological footprints. We determined the tons of chestnut and walnut, poultry eggs, silkworm cocoons, pepper, palm sheet and lacquer. We compared the numbers of these biological subjects in Shaanxi Province with the global averages. From 2000 to 2012, the per capita ecological footprint increased from 1.300 cap/hm² to 3.077 cap/hm² the per capita ecological deficit increased from 0.374 cap/hm² to 2.176 cap/hm², and the per capita ecological carrying capacity decreased from 0.926 cap/hm² to 0.901 cap/hm². Our data indicate that the ecological environment in Shaanxi Province was overloaded, and that the supply and demand of ecological goods from Shaanxi Province increased during 2000—2012. The ecological footprint for 10,000 Yuan GDP decreased from 2.626 hm²/10,000 Yuan to 0.799 hm²/10,000 Yuan. This indicated that Shaanxi Province's resource use and economic development capacity improved. The increase in the development capacity index from 3.191 to 6.842 also supports this. These data suggest that the ecological development capacity of Shaanxi Province continues to improve. The decrease in the ecological footprint and rise of ecological carrying capacity of Shaanxi Province contributes to an ecological deficit. The development of energy and heavy

基金项目: 陕西省社会科学基金项目(12Q072); 陕西(高校)哲学社会科学重点研究基地项目(107-0051102)和特色学科项目(107-5X1203); 西安理工大学科学研究计划项目(科技创新类)(107-211418)

收稿日期: 2014-07-11; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangyi_nwpu@163.com

chemical industries in northern Shaanxi means that the consumption of coal, oil, and other fossil fuels is accelerating. The urban population is increasing because of the development of industrial enterprises and this improves the local economy. However, it also causes heavy pollution in the area. Mineral resource mining destroys ecological habitats in southern Shaanxi. The exploitation of mineral resources has aggravated environmental pollution and ecological destruction, and the need for sustainable development is great. To solve these problems, the ecological carrying capacity should form the basis for new urbanization by relocating industries and regulating industrial development. Shaanxi Province should strictly control the population outside the urban areas of prefectural-level cities to comply with the existing urban scale. In addition, it is important to consider expanding urban city spaces to adapt to the growing population scale and increase the urbanization rate of key towns. Local governments should establish threshold limits on energy and heavy chemical and mining industries, and implement strategies for energy conservation to ensure that reduced emissions targets are met. In this manner, Shaanxi Province will be able to grow in a sustainable way.

Key Words: ecological environment; ecological carrying capacity; ecological footprint; development capacity; Shaanxi Province

21 世纪以来,陕西城镇化进程不断加快,陕北能源重化工的发展、关中城市群的建设带来的能源消耗及由此产生的污染排放和陕南矿物资源开采伴生的环境破坏加大了全省的生态压力。以人为核心的城镇化要以承载力为支撑。承载力是描述限制区域经济社会发展程度的常用指标^[1],通常表述为人口承载力、资源承载力、环境承载力等。生态承载力是指生态系统的自我维持能力、自我调节能力、资源与环境子系统的供容能力、可维持养育的社会经济活动强度以及具有一定生活水平的人口数量^[2],是判断资源开发强度与环境承载力协调与否的重要依据^[3]。在不同的社会经济状况下区域生态承载力是有差异的。

Rees 率先提出生态足迹法,计算人对自然的需求量和自然所能提供的供给量,并将各种物质与能源的消费按一定换算比例折算为相应的生物生产性土地面积,通过生态供需平衡来判断区域经济发展是否处于合理承载力范围之内^[4]。作为一种算法,生态足迹法在国际上很快得以推广和应用。Stuart 等来自世界 32 家学术机构的 45 名学者联合署名在《Science》发表文章将生态足迹作为描述全球生物多样性的关键指标之一^[5]。卞正富等在研究采矿及矿物再利用的基础上,认为生态足迹法是测算整体环境成本的有效方法^[6]。Lubchenco 指出如何减少生态足迹是未来环境面临的重要挑战^[7]。Wackernagel 等采用“全球公顷”和“真实土地面积”分别测算并比较了奥地利、菲律宾、韩国等国家 1961—1999 年的生态足迹总量、生态足迹土地类型构成、产业部门生态足迹及其演化特征^[8]。Van 等采用实际单产法测算了贝宁、不丹、哥斯达黎加、荷兰等国家的生态足迹^[9]。Marco 等以“全球公顷”为核算标准,利用地方单产分析比较了意大利 Siena 各县的生态足迹^[10]。Haberl 等分别采用世界单产和地方实际单产核算了奥地利的生态足迹^[11]。在国内,张志强等较早阐述了生态足迹的理论、方法及计算模型^[12],并测算了西部 10 省(区)(云南、西藏除外)的生态足迹,认为各省的人均生态足迹都表现出不同程度的赤字^[13]。陈成忠等研究了 1961—2005 年国内人均生态足迹波动的突变时间及影响因素,提出了政策和经济因素是产生波动主要原因的观点^[14]。徐中民、李茂林、余勇、赵志强等分别测算了甘肃、湖南、四川、广东等省份的生态足迹,结果表明这些省份均存在一定的生态赤字^[15-18]。陈东景等进一步证实了西北五省生态足迹赤字较为严重的结论,认为这同资源消耗产出效率存在着明显差异^[19]。姬艳梅等测算了陕北地区 2003—2007 年的生态足迹,结果显示区域生态承载力和人均生态承载力均呈下降趋势^[20]。当然,生态足迹法也存在一些理论上的缺陷和实际测算中的不足,如算法的提出者 Rees 等就曾指出在计算过程中由于缺乏生物资源账户中各产品的实际消费数据,因而不得不采用各产品的生产数据替代^[21];Wackernagel 认为生态足迹账户涵盖并不全面,若缺少对地下资源的估算,将可能低估实际承载力^[22];彭建等认为生态足迹法仅能测算出区域过去的生态足迹大小,但不能预测未来的生态足迹变化,缺乏动态性^[23];李明月等指出土地在现实中可以多种功能兼容,但生态足迹法为简化计算而做出各类土地作用类型单

一的假定,可能低估土地的实际承载能力^[24]。考虑到生态足迹法可以将人类对自然的索取及环境的承载程度转化为生物生产性土地面积,结果直观明了,尤其在引入均衡因子和产量因子后使得结果具有了可比性,因此对评价一定时期内区域生态承载力是有指导意义的。目前,陕西存在着建设用地紧张、土地资源稀缺、生态环境脆弱等现实问题,在推进新型城镇化进程中,确保城镇化发展与当地承载力相适配显得尤为重要。开展陕西生态足迹和生态承载力的测评研究对保护全省生态环境、实现区域可持续发展十分迫切。

1 研究区域概况

陕西国土面积 20.58 万平方公里,地势中间低、南北高,以秦岭为界南北河流分属长江水系和黄河水系,山地多川原少,耕地面积约 6.3 万平方公里,占全省国土面积的 30.61%,人均可利用土地资源仅 0.7 亩,耕地后备资源不足,且多分布在陕南、陕北等生态脆弱区,适宜开发的土地资源有限,开发利用难度大。全省水资源总量约 423 亿立方米,人均用水不到全国平均水平的一半,可利用水资源大部分集中在汛期,整体分布同区域人口、产业集聚不匹配,但矿产资源丰富。2013 年末陕西全省人口总量约为 3764 万人,全年生产总值 16045.21 亿元,人均生产总值 42000 元左右,第一、二、三产业占生产总值的比重依次为 9.5%、55.5% 和 35%,第二产业较为发达。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及说明

研究数据来源于《陕西统计年鉴(2001—2013)》、《陕西国民经济和社会发展统计公报(2001—2013)》以及陕西国土资源厅网站公开资料。部分数据经过计算处理并在文中注明。为统一数据统计口径,采用陕西农作物产量替代农产品的消费量。

2.2 研究方法

2.2.1 相关定义及计算

假设 1:各类土地在空间上互斥,即各类土地作用类型单一,不能同时发挥多种功能^[25]。

假设 2:可以确定区域内消耗的资源、能源和产生废弃物的数量,并可折算为生物生产性土地面积^[26]。

生态足迹是指用于生产区域人口消费的所有资源和吸纳区域产生的所有废弃物所需要的生物生产性土地总面积。计算公式为:

$$EF = N \times ef = N \times \sum (r_i \times c_i / p_i) \quad (1)$$

(1)式中, i 为消费商品的类别, P_i 为第 i 种消费商品的平均生产能力, c_i 为第 i 种商品的人均消费量, r_i 为均衡因子, N 为人口数, ef 为人均生态足迹, EF 为总生态足迹。

生态承载力是指区域所能提供给人类的生物生产性土地的面积总和。计算公式为:

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

(2)式中, a_i 为人均生物生产面积, r_i 为均衡因子, y_i 为产量因子, N 为人口数, ec 为人均生态承载力, EC 为生态承载力总量。

生态盈亏 ed 是指生态足迹和生态承载力之差。计算公式为:

$$ed = ec - ef \quad (3)$$

当 $ed < 0$ 时显示为生态赤字,表明生态环境已超载,反之则为生态盈余,由此判断区域发展是否处于生态承载力范围之内。

生态压力指数 Epi 以“自然—经济—社会”复合生态系统的容纳量作为参照点,反映人类活动对生态系统的干扰强度。计算公式为:

$$Epi = ef / ec \quad (4)$$

$Epi < 1$ 表明人类活动的干扰强度还未超过特定条件下区域生态系统的自反馈阈值,生态安全仍有保障,反之

将影响生态系统平衡。生态压力指数越大,干扰生态系统平衡的强度越大,对生态安全的威胁也越大。若 E_{pi} 长期居高不下将导致生态系统崩溃^[27]。

万元 GDP 生态足迹是计算区域每单位末端产出耗费的各种资源折算生物生产性土地面积的指标,反映经济发展对土地资源利用率、经济增长和技术进步对可持续发展的影响。该指标越大,区域系统资源的利用率越低,反之则说明利用率越高^[28]。计算公式为:

$$\text{万元 GDP 生态足迹} = EF/GDP \quad (5)$$

生态足迹多样性指数描述区域内各种消费所需生物生产性土地面积的均衡程度,通过 Shannon-Weaver^[29] 公式计算:

$$H = - \sum (p_i \times \ln p_i) \quad (6)$$

(6) 式中, H 表示生态足迹多样性指数, p_i 表示第 i 类土地类型在生态足迹中的比例, $\ln p_i$ 表示第 i 类土地类型在生态足迹中的分配状况。 H 值越大,表明区域内生态足迹分配越平等,反之则表明区域内类型单一或比例失调,生态系统处于不稳定状态^[30]。

按照 Ulanowicz 的方法^[31],发展能力指数 C 的计算公式为:

$$c = ef \times H = ef \times \left[- \sum (p_i \times \ln p_i) \right] \quad (7)$$

可持续发展能力与生态赤字、万元 GDP 生态足迹、多样性指数、发展能力指数等密切相关^[32],其中,生态足迹多样性指数、发展能力指数同可持续发展能力正相关,生态赤字、万元 GDP 生态足迹则同可持续发展能力负相关。

2.2.2 计算中的假定

假定 1:生态足迹中加入污染排放账户。

现有研究通常计算区域内消费引致的生态足迹,未将产生的污染物及为治理污染所占用的生态足迹纳入其中。根据刘乐冕提出的办法,将生态足迹账户扩展为耕地、草地、林地、水域、化石能源地、建筑用地和污染吸纳地 7 种类型^[33],分别从废水、废气、固体废弃物等排放量计算污染直接或间接占用土地的生态足迹。废水和废气的生态足迹分别指用于处理废水、大气污染物使之达到排放标准所占用的生物生产性土地面积。根据湿地消纳污水的生态功能,居民生活污水排放占用湿地面积以 365 t/hm^2 的标准进行换算^[34]。工业废水比生活污水成分复杂得多,处理难度大,但考虑到计算的可行性,将工业废水视同生活污水处理。计算废气生态足迹时,将其转换为吸收大气污染物所需的林地面积,并按照阔叶林对 SO_2 的平均吸收能力 88.65 kg/hm^2 、对烟尘和粉尘的滞尘能力 10.11 t/hm^2 的标准换算^[35-36]。固体废弃物的生态足迹包括处理废弃物占用的土地面积和未处理废弃物对生物生产性土地的破坏。处理固体废弃物方法主要是填埋和堆放,按照单位土地面积可堆积固体废弃物 10.19 万 t/hm^2 ^[37] 的标准换算。

假定 2:重新修正均衡因子以减少误差。

均衡因子是区域内某类生物生产性土地与该区域所有生产性土地平均生产力的比值。该因子将不同类型土地的单位生产能力转换为统一的、可比的生物生产值。

从表 1 可以看出,6 类均衡因子 40 多年的变动幅度不大,为此,选取各因子均值用于计算,即耕地和建设用地 2.34,林地和化石能源用地 1.64,草地 0.48,水域 0.32。此外,假定吸纳污染的土地为生物生产能力较差的土地,将其均衡因子设定为 1.0。对表 1 需要说明的是,1961 年至 1996 年以及 2004 年的数据来源于生态足迹提出者 Wackernagel 的研究成果。1999 年、2001 年和 2003 年的数据来源于由世界自然基金会 (World Wide Fund for Nature or World Wildlife Fund,简称 WWF) 组织,伦敦动物协会 (Zoological Society of London)、全球足迹网络 (Global Footprint Network,简称 GFN) 与水足迹网络 (Water Footprint Network) 参与共同编纂、发布的《地球生命力报告》(2000、2002、2004)。2005 年与 2006 年的数据来源于 WWF 发布的《中国生态足迹与可持续消费研究报告》。2007 年的数据来自于 GFN 2010 年发布的《生态足迹图集》(Ecological Footprint Atlas)。

表 1 各类生产性土地均衡因子汇总

Table 1 Summary of different equilibrium factors of productive land

年份 Year	耕地 Arable land	林地 Forest	草地 Pasture	水域 Water area	建筑用地 Construction land	化石能 源用地 Fossil energy land	资料来源 Source
1961	2.23	2.23	0.50	0.35	2.23	2.23	Wackernagel ^[8]
1971	2.23	2.23	0.49	0.35	2.23	2.23	
1981	2.23	2.22	0.48	0.35	2.23	2.22	
1991	2.22	2.17	0.47	0.36	2.22	2.17	
1993	2.82	1.14	0.54	0.22	2.82	1.14	Wackernagel ^[38]
1996	3.16	1.78	0.39	0.06	3.16	1.78	Wackernagel ^[22]
1999	2.11	1.35	0.47	0.35	2.11	1.35	Living Planet Report
2001	2.19	1.38	0.48	0.36	2.19	1.38	(2000,2002,2004)
2003	2.17	1.35	0.47	0.35	2.17	1.35	
2004	2.19	1.48	0.48	0.36	2.19	1.48	Wackernagel ^[39]
2005	2.17	1.37	0.48	0.35	2.17	1.37	WWF
2006	2.21	1.34	0.49	0.36	2.21	1.34	
2007	2.51	1.26	0.46	0.37	2.51	1.26	GFN
均值 Mean	2.34	1.64	0.48	0.32	2.34	1.64	本文采用值

2.2.3 对生物账户全球平均产量表的修正

计算一个国家或地区的生态足迹必须使用生物账户全球平均产量这一关键参数。现有文献中生物账户的科目不尽相同,相同科目的账户数据也存在差异。采用生物账户全球平均产量便于不同国家、地区间的比较。国内文献提及的全球平均产量的数据皆来源于 1993 年联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations,简称联合国粮农组织)的统计。生物账户全球平均产量表由 Wackernagel 等在测算 1993 年意大利平均生态足迹时提出。这一表格来源于国际地方政府环境行动理事会(International Council for Local Environmental Initiatives,简称 ICLEI)的网站 www.iclei.org/iclei/efcalcs.htm。目前测算生态足迹计算的文献使用的生物账户全球平均产量表都来自于上述线索。该全球平均产量表的科目设定较为宽泛,如,在 Average' meat and pasture yield 一级科目下有二级科目 Other meat; Marine fish 仅有一级科目; Veg 二级科目下三级科目豆类(Pulses)品名不清;一级科目 Oil seed (Incl. soya) 无下设科目,数据不支持。Cheese、Cocoa 等部分科目属欧美国家的主产品,在国内及陕西并无种植。

为核实生物账户全球平均产量数据,在联合国粮农组织统计数据官方网站中打开网页(<http://faostat3.fao.org/home/index.html>)。在左边页面选项卡中选择“Standard Download”、“Production”,在其二级选项中选择“Crops”;在右边页面中左上选项卡中选择“Regions”,在下拉菜单中选择“World+(Total)”,右上选项卡中选择“Yield(Hg/hm²)”,左下选项卡中选择“Items”,其下拉菜单中选择“Select All”,右下选项卡中选择“1993”,在“Output Options”一栏中显示为“Output Type”选项卡中选择“Table”,点击“Download”即可得到 1993 年全球平均产量表。该表由 Domain、Country、Item、Element、Year 与 Value 六项内容构成,科目数量为 159 个(2000 年以后科目为 160 个,增加项为 Pome fruit, nes),其中部分科目为欧美等国家种植物,如,Agave Fibres Nes 产于墨西哥,Artichokes 产于地中海沿岸,Avocados 主产于美国加利福尼亚州等。通过同 Wackernagel 等采用的全球平均产量对比相同科目的结果显示,前者小麦全球平均产量显示的数据为 2532kg/hm²,后者为 2744kg/hm²;前者大豆数据为 1935 kg/hm²,后者为 1856 kg/hm²;前者烟叶数据为 1576 kg/hm²,后者为 1548kg/hm²;前者糖料数据为 5520 kg/hm²,后者为 4893 kg/hm²。测算中以前者数据为准(表 2)。

在陕西统计年鉴上查阅各项生物账户年产量,农产品主要包括小麦、稻谷、玉米、大豆、棉花、油料、麻类、糖料、蚕茧、烤烟和蔬菜;林产品主要有生漆、油桐籽、五倍籽、棕片、核桃、板栗与花椒(根据果树和茶树的生长形态将水果和茶叶归入林产品);畜产品主要有猪肉、牛肉、羊肉、奶类和禽蛋及渔业包含的水产品,总科目

数量 26 个。将以上科目同 Wackernagel 等提出的全球平均产量科目对比,发现板栗、核桃、禽蛋、蚕茧、花椒、棕片及生漆 7 个科目无法归类,为此,采用如下方法估算全球平均产量:

第一,通过查找联合国粮农组织 1993 年科目,获得板栗与核桃的全球平均产量,板栗为 1311 kg/hm²,核桃为 2150 kg/hm²。

第二,谢鸿宇等测算出 1 kg 禽蛋所需的生态生产性土地面积为 3.6247 平方米,经换算得到禽蛋全球平均产量为 2760 kg/hm² [40]。

第三,商务部第 100 届中国出口商品交易会资料显示,我国蚕茧产量为世界第一,占世界总量的 75% 左右。由于无法获得蚕茧全球平均产量,只能以中国平均产量替代。在《全国农产品成本收益资料汇编》(电子版)中包含 2005 年至 2010 年蚕茧亩产量,分别为 106.80 kg、114.40 kg、109.20 kg、105.60 kg、105.25kg、107.09 kg,均值为 108.06kg,换算得到蚕茧全球平均产量为 1621 kg/hm²。

第四,商务部特办资讯资料显示,我国花椒产量世界领先,陕西是国内花椒种植大省。由于无法获得全球及中国的花椒平均产量,只能以陕西花椒平均产量替代。通过查阅《陕西统计年鉴 2012》中表 12—19 获得 2011 年全省花椒总产量 52974 吨。从该统计年鉴续表 12—21 获得 2011 年末全省花椒面积 137448 公顷,换算得到花椒全球平均产量为 385 kg/hm²。

第五,陕西生漆与棕片的产量比较大,不宜忽略。通过查阅国家统计局、国家林业总局、陕西统计局、陕西林业局的网站以及相关文献,仍无法获得生漆与棕片的平均产量。为此,以林产品 7 个科目的平均值 3732 kg/hm² 替代生漆与棕片的全球平均产量。

表 2 生物账户全球平均产量

Table 2 Global average yield of biological accounts

生物资源种类 Biological resources types	全球平均产量 Global average yield/ (kg/hm ²)	生物资源种类 Biological resources types	全球平均产量 Global average yield/ (kg/hm ²)
小麦 Wheat	2532	生漆(Lacquer)	3732
稻谷 Rice	2744	水果(Fruits)	18000
玉米 Maize	2744	茶叶(Tea)	566
大豆 Soja	1935	花椒(Pepper)	385
棉花 Cotton	1000	油桐籽(Tung-oil Seeds)	1856
烟叶 Tobacco	1576	五倍籽(Chinese Gall)	1856
油料 Oil-bearing	1856	棕片(Palm Sheet)	3732
蔬菜 Vegetables	18000	猪肉(Pork)	74
麻类 Fiber Crops	1500	牛肉(Beef)	33
糖料 Sugar Crops	5520	羊肉(Mutton)	33
蚕茧 Silkworm Cocoon	1621	奶类(Milk)	502
核桃 Walnut	2150	禽蛋(Poultry Eggs)	2760
板栗 Chestnut	1311	水产品(Aquatic Products)	29

3 结果与分析

3.1 生态足迹分析

根据式(1)分别计算 2000—2012 年陕西四类账户的人均生态足迹(表 3)。数据显示,陕西人均生态足迹增长较为明显,由 2000 年的 1.300 hm²/人增长至 2012 年的 3.077 hm²/人,年均增加 11.39%,其中,化石能源的消耗尤为突出,表明积极推进清洁能源开发利用的现实意义。生物资源账户的生态足迹呈现“增—减—增”的走势,由 2000 年的 0.496 hm²/人增长至 2005 年的 0.638 hm²/人,2007 年减少至 0.556 hm²/人,2012 年增长到 0.688 hm²/人。新世纪以来,全省人均生物生态足迹累计增加 38.71%,生态占用较为突出。在生物资

源账户构成上,耕地类和草地类的人均生态足迹占主要地位。耕地类人均生态足迹基本上稳中有升,从 2000 年的 $0.271 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 2012 年的 $0.349 \text{ hm}^2/\text{人}$,而且近几年增速较快。草地类人均生态足迹变动明显,2000—2005 年持续上升,年均增加 11.53%,2006 年后锐减,2007 年仅为 $0.229 \text{ hm}^2/\text{人}$,到 2012 年增长至 $0.250 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。水域类人均生态足迹呈现出“增—减—增”的走势,从 2000 年的 $0.018 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 2006 年的 $0.022 \text{ hm}^2/\text{人}$,2007 年锐减至 $0.015 \text{ hm}^2/\text{人}$,之后逐年增长,到 2012 年达到 $0.031 \text{ hm}^2/\text{人}$ 。总体来讲,水域资源状况变化不大。林地类人均生态足迹呈现出持续上升态势,从 2000 年的 $0.017 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长至 2012 年的 $0.057 \text{ hm}^2/\text{人}$,年均增加 19.61%。

表 3 2000—2012 年陕西人均生态足迹/ $(\text{hm}^2/\text{人})$

Table 3 Average annual ecological footprint of Shaanxi Province during 2000 and 2012

账户 Accounts	科目 Subject	年份 Year						
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
生物资源账户 Biological Resources Accounts	耕地	0.271	0.252	0.259	0.254	0.293	0.292	0.277
	林地	0.017	0.017	0.020	0.021	0.025	0.026	0.029
	草地	0.189	0.198	0.221	0.243	0.272	0.298	0.232
	水域	0.018	0.019	0.019	0.020	0.021	0.022	0.022
	小计	0.496	0.485	0.518	0.538	0.611	0.638	0.560
化石能源账户 Fossil energy accounts	煤	0.228	0.258	0.289	0.338	0.392	0.526	0.563
	石油	0.238	0.287	0.332	0.348	0.399	0.316	0.359
	天然气	0.019	0.030	0.039	0.050	0.090	0.052	0.085
	小计	0.485	0.575	0.660	0.736	0.881	0.893	1.007
建设用地账户 Construction land accounts	电力	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002	0.001
污染排放账户 Pollution Emissions Accounts	水污染	0.039	0.040	0.045	0.051	0.057	0.063	0.064
	大气污染	0.195	0.193	0.198	0.233	0.252	0.284	0.290
	固废污染	0.083	0.076	0.088	0.089	0.111	0.132	0.137
	小计	0.318	0.309	0.331	0.373	0.420	0.479	0.491
总计(Total)		1.300	1.370	1.511	1.647	1.913	2.011	2.059
账户 Accounts	科目 Subject	年份 Year						
		2007	2008	2009	2010	2011	2012	
生物资源账户 Biological resources accounts	耕地	0.282	0.301	0.320	0.328	0.332	0.349	
	林地	0.031	0.036	0.039	0.041	0.046	0.057	
	草地	0.229	0.264	0.239	0.242	0.236	0.250	
	水域	0.015	0.015	0.017	0.018	0.024	0.031	
	小计	0.556	0.617	0.615	0.628	0.638	0.688	
化石能源账户 Fossil energy accounts	煤	0.627	0.662	0.729	0.812	0.901	0.994	
	石油	0.406	0.521	0.537	0.596	0.618	0.641	
	天然气	0.121	0.154	0.149	0.171	0.185	0.232	
	小计	1.153	1.337	1.415	1.578	1.704	1.867	
建设用地账户 Construction land accounts	电力	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	
污染排放账户 Pollution emissions accounts	水污染	0.073	0.077	0.083	0.087	0.089	0.094	
	大气污染	0.284	0.271	0.244	0.236	0.278	0.226	
	固废污染	0.154	0.170	0.155	0.191	0.199	0.200	
	小计	0.511	0.518	0.482	0.515	0.566	0.519	
总计 Total		2.222	2.474	2.514	2.725	2.911	3.077	

在化石能源与建设用地账户中,全省能源消耗生态足迹增长较快,由 2000 年的 $0.487 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长至 2012 年的 $1.870 \text{ hm}^2/\text{人}$,增加了 2.8 倍,说明陕西经济发展仍处在持续扩张阶段,工业化进程加快的特点表现突出。煤、石油、天然气等能源消耗均有明显增加,其中天然气的人均生态足迹变动最为明显,由 2000 年的 $0.019 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 $0.232 \text{ hm}^2/\text{人}$,是 2000 年的 12 倍,除 2005 年稍有波动外,其他年份增长都较快。煤和石油类的人均生态足迹也在逐年增加,年均增加分别达到 28.00% 和 14.11%。需要说明的是,陕西电力消耗的人均生态足迹较低,仅占能源类消耗生态足迹总值的 0.16%,以煤、石油等高污染类的能源消耗仍占主要地位,天然气等清洁能源使用量有限,能源消费结构严重失衡。

从污染排放账户生态足迹的变动情况看,全省固体废弃物污染人均生态足迹呈现出平缓上升的走势,由 2000 年的 $0.083 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 2008 年的 $0.170 \text{ hm}^2/\text{人}$,2009 年稍有回落。相对而言,水污染的增加较为明显,由 2000 年的 $0.039 \text{ hm}^2/\text{人}$ 增长到 2012 年的 $0.094 \text{ hm}^2/\text{人}$,年均增加 11.75%。废气污染表现出先增后减的走势,也是在 2006 年达到高峰,之后逐年递减,到 2012 年减少到 $0.226 \text{ hm}^2/\text{人}$,表明陕西废气排放治理有一定效果。从构成上来看,2006 年之前大气污染较为严重,固体废弃物污染和水污染次之。从 2006 年开始,大气污染得到相对控制,需引起重视的是持续上升的固体废弃物污染。

3.2 生态承载力与压力指数分析

通过式(2)利用陕西省土地统计数据测算了人均生态承载力(表 4)。

表 4 2000—2012 年陕西人均生态承载力/ $(\text{hm}^2/\text{人})$

Table 4 Per capita ecological carrying capacity of Shaanxi Province during 2000 and 2012

年份 Year	耕地 Arable land	林地 Forest	草地 Pasture	水域 Water area	建筑 用地 Construction land	化石能源 用地 Fossil energy land	总计 Total	13.4%生物多样性 保护用地 13.4% of land for biodiversity conservation	人均生 态承载力 Per capita ecological carrying capacity
2000	0.512	0.394	0.008	0.004	0.151	0	1.069	0.143	0.926
2001	0.498	0.396	0.008	0.004	0.153	0	1.059	0.142	0.917
2002	0.478	0.401	0.008	0.003	0.145	0	1.035	0.139	0.896
2003	0.449	0.411	0.008	0.003	0.148	0	1.019	0.137	0.882
2004	0.438	0.414	0.008	0.003	0.152	0	1.014	0.136	0.878
2005	0.43	0.416	0.008	0.003	0.152	0	1.009	0.135	0.874
2006	0.426	0.417	0.008	0.003	0.154	0	1.008	0.135	0.873
2007	0.424	0.417	0.008	0.003	0.154	0	1.006	0.135	0.871
2008	0.423	0.416	0.008	0.003	0.154	0	1.003	0.134	0.869
2009	0.422	0.415	0.007	0.003	0.154	0	1.002	0.134	0.867
2010	0.421	0.414	0.007	0.003	0.154	0	0.999	0.134	0.866
2011	0.414	0.448	0.005	0.004	0.172	0	1.044	0.140	0.904
2012	0.413	0.446	0.005	0.004	0.172	0	1.041	0.139	0.901

数据显示,陕西人均生态承载力总体上维持在 $1 \text{ hm}^2/\text{人}$ 左右,扣除 13.4% 的生物多样性保护用地后,人均承载力仅为 $0.9 \text{ hm}^2/\text{人}$,并且呈现出逐年递减的态势,生态压力渐增。

通过式(3)、(4)分别计算全省生态赤字与生态压力指数(表 5)。2000—2012 年陕西人均生态赤字从 $0.374 \text{ hm}^2/\text{人}$ 上升至 $2.176 \text{ hm}^2/\text{人}$,呈持续增长趋势。生态压力指数从 1.404 增长到 3.414,增加 1.4 倍,严重超出生态承载力,生态压力凸显。

3.3 可持续发展能力的综合分析

通过式(5)、(6)和(7)计算万元 GDP 生态足迹、生态多样性和发展能力指数(表 6)。

表 5 2000—2012 年陕西人均生态赤字及压力指数

Table 5 Per capita ecological deficit and pressure index of Shaanxi Province during 2000 and 2012

年份 Year	指标 Index			
	生态足迹 Ecological footprint/ (hm ² /人)	生态承载力 Ecological capacity/ (hm ² /人)	生态赤字 Ecological deficit/ (hm ² /人)	生态压力指数 Ecological pressure index
2000	1.300	0.926	-0.374	1.404
2001	1.370	0.917	-0.453	1.494
2002	1.511	0.896	-0.615	1.686
2003	1.647	0.882	-0.765	1.867
2004	1.913	0.878	-1.035	2.178
2005	2.011	0.874	-1.137	2.301
2006	2.059	0.873	-1.185	2.357
2007	2.222	0.871	-1.351	2.551
2008	2.474	0.869	-1.605	2.848
2009	2.514	0.867	-1.647	2.898
2010	2.725	0.866	-1.859	3.148
2011	2.911	0.904	-2.007	3.221
2012	3.077	0.901	-2.176	3.414

表 6 2000—2012 年陕西万元 GDP 生态足迹及发展能力指数

Table 6 Ecological footprint for ten thousand Yuan GDP and development index of Shaanxi Province during 2000 and 2012

年份 Year	指标 Index				
	人口 Population/ 万人	国内生产总值 GDP / 亿元	万元 GDP 生态足迹 Ecological footprint for 10,000 Yuan GDP/ (hm ² /万元)	生态足迹多样性指数 Ecological footprint diversity index	发展能力指数 Development capability index
2000	3644	1804.00	2.626	2.455	3.191
2001	3653	2010.62	2.489	2.414	3.307
2002	3662	2253.39	2.456	2.411	3.643
2003	3672	2587.72	2.338	2.394	3.943
2004	3681	3175.58	2.218	2.418	4.625
2005	3690	3933.72	1.887	2.383	4.792
2006	3699	4743.61	1.605	2.331	4.800
2007	3708	5757.29	1.431	2.324	5.163
2008	3718	7314.58	1.258	2.323	5.746
2009	3727	8169.80	1.147	2.300	5.783
2010	3735	10123.48	1.005	2.266	6.175
2011	3743	12512.30	0.871	2.233	6.499
2012	3753	14451.18	0.799	2.224	6.842

从表 6 可以看出,2000—2012 年陕西生态多样性指数从 2.455 减少到 2.224,说明生态足迹分配越来越失衡,生态系统处于不稳定状态。但万元 GDP 生态足迹从 2.626 hm²/万元降至 0.799 hm²/万元,累计减少 69.57%,表明资源利用率正在逐步提高。发展能力指数由 3.191 增加到 6.842 的事实也说明了全省可持续发展态势良好。

4 结论与建议

21 世纪以来陕西生态足迹和生态承载力的变化状况表明,陕西人均生态赤字同生态压力指数均呈增长

趋势,人均生态足迹年均增加 11.39%,生态严重超载,生态压力凸显,生态多样性指数持续下降,生态足迹分配失衡,生态系统整体处于不稳定状态。但万元 GDP 生态足迹累计减少 69.57%、发展能力指数增长一倍的结果显示出陕西省可持续发展水平在不断提升。生态承载力是“转方式、调结构”、提高新型城镇化推进质量的重要依据。在陕西经济社会发展持续上升的同时,环境超载问题已经成为难点和薄弱环节。陕西地域复杂,城镇化规模很容易达到承载力极限。为此,必须落实《陕西主体功能区规划》,推进主体功能区的形成,根据不同区域的生态承载力、资源开发强度以及发展潜力,统筹未来人口分布和产业布局,有步骤地按节能减排目标承接中西部的产业转移,做到城镇建设规模及其功能定位同社会保障体系、产业布局同地方生态承载力相适应。

由于陕西省内的陕北、关中和陕南三大区域地理区位、资源禀赋、自然环境等有着明显的差异,陕北地区主要为黄土高坡,干旱少雨,关中地区土地平坦肥沃,人口密集,陕南地区包括秦岭、巴山和汉江谷地,除汉中盆地外区域外地形构造复杂,因此整体提高陕西省的生态承载力水平、降低生态足迹和缓解生态供需矛盾必须同区情相结合,例如对陕北实施产业规制能源重化工行业,治理关中渭河流域,实行陕南避灾扶贫移民搬迁。后续研究将围绕三大区域同陕西省之间以及三大区域之间的生态足迹和生态承载力区域差异对比中展开,这将凸显不同地区影响生态足迹和承载力的因素,对研究三大区域的经济结构调整具有理论价值和实际意义。

参考文献 (References):

- [1] 郭新锐,毛显强,冉圣红. 国内环境承载力研究进展. 中国人口·资源与环境, 2000, (S1): 29-31.
- [2] 毛文永. 生态环境影响评价概论. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [3] 李朝辉,魏贵臣. 生态环境承载力评价方法研究及实例. 环境科学与技术, 2005, 28(1): 75-76.
- [4] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 120-130.
- [5] Stuart H M B, Matt W, Ben C. Global biodiversity: indicators of recent declines. *Science*, 2010, 328(5982): 1164-1168.
- [6] Bian Z F, Miao X X, Lei S G, Chen S E, Wang W F, Sue S. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*, 2012, 337(6095): 702-703.
- [7] Lubchenco J. Entering the century of the environment: a new social contract for science. *Science*, 1998, 279(5350): 491-497.
- [8] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, Haberl H, Schulz N B. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines and South Korea for 1961—1999: comparing the conventional approach to an 'actual land area' approach. *Land Use Policy*, 2003, 21(3): 261-269.
- [9] van Vuuren V D, Smeets E M W. Ecological footprints of Benin, Bhutan, Costa Rica and the Netherlands. *Ecological Economics*, 2000, 34(1): 115-130.
- [10] Bagliani M, Galli A, Niccolucci V, Marchettini N. Ecological footprint analysis applied to a sub-national Area: the case of the Province of Siena (Italy). *Journal of Environmental Management*, 2008, 86(2): 354-364.
- [11] Haberl H, Erb K H, Krausmann F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Australia 1926—1995. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25-45.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈成忠,林振山. 中国 1961—2005 年人均生态足迹变化. 生态学报, 2008, 28(1): 338-344.
- [15] 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.
- [16] 李茂林,刘春莲,李琼. 基于生态足迹分析的可持续发展能力定量评价—以湖南省为例. 安徽农业科学, 2007, 35(22): 6703-6706.
- [17] 余勇,舒建英. 1997—2004 年四川省生态足迹动态变化研究. 安徽农业科学, 2007, 35(29): 9318-9319.
- [18] 赵志强,高江波,李双成,王仰麟. 基于能值改进生态足迹模型的广东省 1978—2006 年生态经济系统分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5): 861-867.
- [19] 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.
- [20] 姬艳梅,王小文,梁宝翠,洪雷. 陕北地区土地利用与生态承载力动态变化分析. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(S1): 271-274.
- [21] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4/6): 223-248.

- [22] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, Linares A C, Falfún 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.
- [23] 彭建, 吴建生, 蒋依依, 叶敏婷. 生态足迹分析应用于区域可持续发展生态评估的缺陷. *生态学报*, 2006, 26(8): 2716-2722.
- [24] 李明月, 江华. 生态足迹分析模型的假设条件缺陷及应用偏差. *农业现代化研究*, 2005, 26(1): 6-9.
- [25] 杨开忠, 杨泳, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法. *地球科学进展*, 2000, 15(6): 630-636.
- [26] 斯蔼, 汤洁, 林年丰, 王娟, 李海毅, 杜关记. 生态足迹法在松嫩平原西部可持续发展研究中的应用. *干旱区研究*, 2005, 22(4): 553-557.
- [27] 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): 776-781.
- [28] 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.
- [29] Shannon C E, Weaver W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [30] 徐中民, 张志强, 程国栋. *生态学经济理论方法与应用*. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [31] Ulanowicz R E. *Growth and Development: Ecosystems Phenomenology*. New York: Springer-Verlag, 2000.
- [32] 陈惠雄, 鲍海君. 经济增长、生态足迹与可持续发展能力—基于浙江省的实证研究. *中国工业经济*, 2008, (8): 5-14.
- [33] 刘乐冕. 炎陵县生态足迹动态分析与变化趋势研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [34] 王建龙, 文湘华. *现代环境生物技术*. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [35] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004, 19(4): 480-491.
- [36] 赵岩, 司继涛, 田保国, 王洪涛, 陆文静. 城市固体废物处理处置技术政策方法 I. 模型研究. *北京大学学报: 自然科学版*, 2007, 43(6): 834-838.
- [37] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛, 缪启龙, 吴建国. 中国城市生活垃圾处理及趋势分析. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 115-120.
- [38] Wackernagel M, Onisto L, Callejas L A, Lopez F I S, Mendez G J, Suarez G A I, Suarez G M G. Ecological footprint of nations; how much nature do they use? How much nature do they have?. Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997.
- [39] Wackernagel M, Kitzes J, Cheng D, Goldfinger S, Espinas J, Moran D, Monfreda C, Loh J, O'Gorman D, Wong I. *Asia Pacific 2005: the ecological footprint and natural wealth*. Switzerland: World Wide Fund for Nature, 2005.
- [40] 谢鸿宇, 王羚郦, 陈贤生, 谭韵静. *生态足迹评价模型的改进与应用*. 北京: 化学工业出版社, 2008.