

2006—2014 年延安市生态足迹和承载力变化分析

吴 歌^{1,6}, 符素华^{2,6}, 杨艳芬³, 冯永忠^{4,5}

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 北京师范大学 地理学部, 北京 100875;

3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 陕西省循环农业工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100;

5. 西北农林科技大学 农学院, 陕西 杨凌 712100; 6. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了分析延安市的可持续发展状况,以 2006—2014 年延安市统计资料为基础,计算了延安市生态足迹、生态足迹多样性指数、生态承载力和生态盈余/赤字的变化情况,并结合万元 GDP 生态足迹、生态经济系统发展能力指数和生态足迹指数对延安市可持续发展能力进行了分析。结果表明:延安市生态足迹增长速度高于承载力增长速度,生态赤字不断增大;各土地类型生态足迹和生态承载力分配极不均衡,在生态足迹中化石能源用地和草地约占 95%,在生态承载力中耕地和林地分别约占 87%;万元 GDP 生态足迹逐渐减小,资源利用效率在提高,但发展对资源的消费速度仍高于资源的再生速度。该研究结果可为延安市土地利用和产业结构调整提供参考。

关键词:生态足迹;生态承载力;生态盈亏;可持续发展;延安市

中图分类号:X22

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0259-06

Analysis on Change in Ecological Footprint and Land Carrying Capacity in Yan'an City from 2006 to 2014

WU Ge^{1,6}, FU Suhua^{2,6}, YANG Yanfen³, FENG Yongzhong^{4,5}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Faculty of Geographical Science,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Research Center of Recycle Agricultural Engineering and

Technology, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 6. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to analyze the sustainable development status of Yan'an City, the indexes including GDP ecological footprint, ecological footprint diversity, land carrying capacity and ecological footprint index (EFI), etc. were used to analyze the development status of Yan'an City. The results showed that ecological footprint grew faster than land carrying capacity in Yan'an City during the period from 2006 to 2014; seriously ecological deficit existed in Yan'an City; moreover, the ecological footprint and land carrying capacity both presented the low diversity and unevenly distributed; with respect to the ecological footprint, fossil land and grass land took up 95%; with respect to the ecological capacity, arable land and forest accounted for 87%; GDP ecological footprint gradually decreased, which indicated that the efficiency in resource use slowly increased from 2006 to 2014. The result of EFI showed that the badly unsustainable development existed in Yan'an City.

Keywords: ecological footprint; ecological capacity; ecological deficit; sustainable development; Yan'an City

世界环境与发展委员会 1982 年提出的可持续发展理念如今已经成为人们心中的共识,实现生态环境和社会经济的可持续发展是区域发展的目标,生态足

迹模型的提出为可持续发展提供了一个度量的指标。生态足迹是由 Rees^[1]在 1992 年提出,该模型计算过程简便、结果清晰易懂,提出后被广泛应用于多个国

收稿日期:2018-01-03

修回日期:2018-03-02

资助项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目“陕北黄土高原丘陵沟壑区坡耕地抗旱减蚀适应性技术研究”(2015KTCL02-07);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划

第一作者:吴歌(1989—),女,河南郑州人,博士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:812537224@qq.com

通信作者:冯永忠(1972—),男,甘肃渭源人,教授,博士,主要从事农业区域发展与规划设计、农业生产过程废弃物循环利用研究。E-mail:fengyz@nwsuaf.edu.cn

家和领域,随后 Rees 的博士生 Wackernagel 及其他学者进一步发展和完善了该模型。在模型改进方面,针对生态足迹模型在实际计算过程中并没有如模型假设条件那样将人类社会消费的所有产品和产生的所有废弃物全部换算成生产或消纳这些产品和废弃物所需的土地的问题,学者们提出了水足迹^[2]、碳足迹^[3]、氮足迹^[4]以及基于生态系统服务的新足迹模型^[5]。另外,学者们还采用不同方法修正模型中的两个重要参数即产量因子和均衡因子,例如刘某承等^[6]基于净初级生产力的概念计算出我国的产量因子,顾晓薇等^[7]提出用“国家 hm^2 ”代替“全球 hm^2 ”,提高了生态足迹模型的科学性和准确性。在对生态足迹的研究热点方面,美国倾向于将生态足迹同环境问题中的社会经济因素联系起来,英国比较注重国际贸易中生态足迹转移的问题^[8]。我国主要通过计算生态足迹来衡量某一区域可持续发展水平或某一行业对环境的影响,例如徐中民等^[9]将生态足迹概念引入我国后计算了甘肃省、全国的生态足迹^[10],为地区和国家制订、调整发展策略提供了依据;曹淑艳^[11]和张丹^[12]等分别计算了农产品生产的生态足迹、城市餐饮业食物浪费的生态足迹,研究成果可促进行业提高资源利用率、降低成本,并引导普通民众关注自身行为对环境的影响。生态足迹模型的计算方法目前有生命周期评价法、投入产出分析法、基于能值或基于净初级生产力的计算方法、时间序列动态分析法以及三维生态足迹模型等计算方法^[13]。

近年来延安经济发展迅速,但是延安地区生态环境脆弱,自然灾害频发,生态环境严重制约着经济发展。学者们从土地利用、产业结构、国家政策等不同角度分析延安市的可持续发展状况,而对延安整体发展状况的分析多出现在以陕西或西北地区为研究对象的研究中,延安作为单独研究对象的研究比较少。邢华超^[14]、肖玲^[15]等分别分析了 2001—2006 年、1989—2004 年延安市的生态足迹,但分析指标仅限于生态足迹和可持续发展指数,本文在这些研究的基础上,利用改进后的生态足迹模型,结合万元 GDP、生态足迹多样性指数、生态经济系统发展能力指数、生态足迹指数,对 2006—2014 年延安市生态、经济整体发展状况进行全面、细致的分析,以期为促进延安市可持续发展提供决策依据。

1 研究区概况

延安市地处黄河中游,东连山西省吕梁和临汾市,西依子午岭与甘肃省庆阳市,南接铜川、渭南和咸阳市,北面与榆林市相靠,介于 $107^{\circ}40'—110^{\circ}30'E$, $35^{\circ}11'—$

$37^{\circ}30'N$,总面积 $3.7 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。延安市平均海拔 1 200 m 左右,地势西北高东南低,地貌类型以黄土高原、丘陵为主^[16]。延安市四季分明、日照充足,昼夜温差大,年均气温 $7.7 \sim 10.6^{\circ}\text{C}$,年均无霜期 170 d,年均日照数 $2\,300 \sim 2\,700 \text{ h}$,年均降水量 500 mm 左右,属内陆干旱半干旱气候。延安市生态环境脆弱、水土流失严重,但是从 20 世纪 90 年代我国在延安地区开展退耕还林等生态工程以来,年平均土壤侵蚀模数由 $9\,000 \text{ t/km}^2$ 减少到 $7\,000 \text{ t/km}^2$,入黄泥沙由每年的 2.58 亿 t 下降到 1.96 亿 t,延安市生态环境明显改善^[17]。

延安市下辖 1 区 12 县,常住人口 225 万人,延安市地下资源十分丰富,2016 年生产总值为 1 082.91 亿元,第二产业约占 53%,人均生产总值 4.83 万元^[18],在陕西省经济、社会发展中有重要影响。

2 研究方法与数据来源

2.1 生态足迹计算模型

生态足迹是指生产一定区域内的所有人口消费的生物资源、化石能源所需生态生产性土地面积以及消纳这些人口产生废弃物所需的生态生产性土地面积之和。本文在原有土地类型中增加了消纳生活垃圾的污染排放用地^[19],即一共有 7 类生态生产性土地:耕地、林地、草地、水域、建设用地、化石能源地和污染排放用地。生态足迹的计算模型^[20]为:

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

式中:EF 为总生态足迹; N 为总人口数; ef 为人均生态足迹; aa_i 代表第 i 种消费的人均生态足迹; c_i 代表第 i 种消费项目的年人均消费量; p_i 表示第 i 种消费项目的世界平均产量; r_i 表示均衡因子,用于将不同类型生态生产性土地转换为具有等价生产能力的土地面积。在本文中,均衡因子采用杨屹等^[19]的计算结果,即耕地为 2.34,林地为 1.64,草地为 0.48,水域为 0.32,建设用地为 2.34,污染排放用地按照单位土地面积可堆积生活垃圾 $1.02 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$ 的标准换算。化石能源地的生态足迹采用谢鸿宇等^[21]的计算方法。

由于缺少延安市生物资源和化石能源的消费量数据,通过比较延安市和陕西省平均居民可支配收入发现二者基本持平(图 1),因此本文计算延安市的生态足迹时用陕西省人均消费生物资源量代替延安市人均生物资源消费量,没有进行贸易调整。

万元 GDP 生态足迹可以衡量区域发展过程中资源利用效率,万元 GDP 生态足迹越大表明区域资源利用效率越低,不利于区域经济可持续发展,反之则资源利用效率越高、有利于区域经济可持续发展^[22]。

计算公式为:

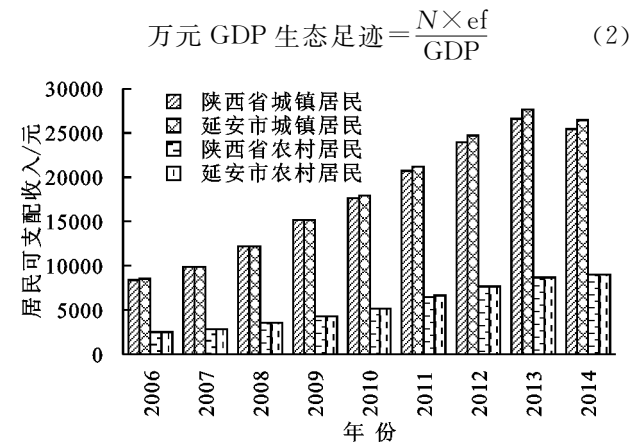


图 1 陕西省和延安市居民可支配收入对比

2.2 生态承载力计算模型

生态承载力表示区域生态环境可提供的各类生态生产性土地面积总和。为了保护生物多样性,扣除总生态承载力的 12% 得到可用生态承载力^[22]。计算模型^[19]为:

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

(3)

式中:EC 为生态承载力总量;N 为人口总数;ec 为人均生态承载力; a_i 为第 i 种生态生产性土地的人均面积; y_i 为产量因子,表示当地与全球第 i 类土地生产能力之比; r_i 为均衡因子。本文根据《陕西统计年鉴》、《延安统计年鉴》、《延安年鉴》以及世界联合国粮农组织(FAO)网站数据,计算了延安市 2006—2016 年的产量因子(表 1)。

表 1 延安市产量因子

土地类型	主要用途	产量因子								
		2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
耕地	农产品	2.10	2.05	2.15	2.30	2.60	2.46	2.77	2.47	2.56
林地	水果	0.41	0.46	0.59	0.59	0.62	0.65	0.67	0.60	0.75
草地	禽畜产品	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
化石能源地	吸收 CO ₂	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
水域	水产品	1.08	2.49	1.11	0.52	1.40	1.37	1.26	1.15	1.03
建设用地	建水电站	2.10	2.05	2.15	2.30	2.60	2.46	2.77	2.47	2.56
污染排放用地	填埋生活垃圾	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注:(1) 因缺少 2008 年统计数据,故本文 2008 年耕地产量因子用 2006—2007 年、2009—2014 年耕地产量因子平均值代替;(2) 草地产量因子采用徐中民等^[23]的计算结果;(3) 根据谢鸿宇等^[21]计算结果,延安水域产量因子按照全球水产品产量 $1.48 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ 计算得到,化石能源地产量因子根据温带森林温室气体吸收能力为 4.5 t/hm^2 、全球森林平均吸收温室气体能力为 3.81 t/hm^2 计算得到。

2.3 生态盈余/赤字

生态盈余/赤字表示生态承载力与生态足迹之差,当差值为负值时称为生态赤字,表明区域内人口的生产消费活动对自然生态系统产生了压力,超出了生态环境系统容量;当差值为正值时称为生态盈余,表示区域内人口生产消费活动没有对自然生态系统产生显著影响。计算公式为:

$$ED(ES) = EC - EF = N \times (ec - ef)$$

(4)

式中:ED,ES 分别代表生态赤字、生态盈余。

2.4 生态足迹多样性指数和生态经济系统发展能力指数

生态足迹多样性指数可以反映生态系统稳定性,用 Shannon-Weaver^[24] 公式计算:

$$H = - \sum P_i \ln P_i$$

(5)

式中:H 为生态足迹多样性指数; P_i 为第 i 类土地在总生态足迹中占的比例。H 值越大表明各类土地生态足迹分配越均衡,生态系统多样性越高,系统的稳定性越高。

生态经济系统发展能力可以用生态经济系统发展能力指数衡量。如果生态足迹一定、生态足迹多样性指数 H 值越大,那么生态经济系统发展能力指数

越大,说明当地生态经济系统发展能力越强。生态经济系统发展能力指数可由生态足迹乘以从系统组织角度推导的生态足迹多样性指数得到,按 Ulanowicz^[25] 的计算公式,生态经济系统发展能力指数可以表述如下:

$$C = ef \times H = ef \times (- \sum P_i \ln P_i)$$

(6)

式中:C 代表生态经济系统发展能力指数。

2.5 生态足迹指数

生态足迹指数 (Ecological Footprint Index, EFI) 指一定区域的生态赤字/盈余占生态承载力的百分比,可视为区域为今后保留的可持续发展能力的百分比,可以用来评估区域可持续发展的潜力^[26]。计算公式为:

$$EFI = \frac{EC - EF}{EC} \times 100\%$$

(7)

式中:EFI 为生态足迹指数,其等级标准见表 2。

表 2 生态足迹指数等级标准

项目	等级				
	I	II	III	IV	V
EFI	0.5~1	0~0.5	0	-1~0	<-1
表征状态	强可持续	弱可持续	临界点	不可持续	严重不可持续

3 结果与分析

3.1 生态足迹与生态承载力

2006—2014年延安市人均生态足迹迅速增长,2006年为 $1.01 \text{ hm}^2/\text{cap}$,2014年增加至 $1.86 \text{ hm}^2/\text{cap}$,平均每年比上一年增长 7.80% 。人均生态承载力缓慢增加,2006—2014年延安市人均可用生态承载力分别为 $0.17, 0.13, 0.18, 0.20, 0.22, 0.22, 0.24, 0.24, 0.27 \text{ hm}^2/\text{cap}$,平均每年比上一年增加 7.20% ,人均生态承载力的增长速度小于生态足迹的增长速度,人均生态赤字逐年增加(图2)。

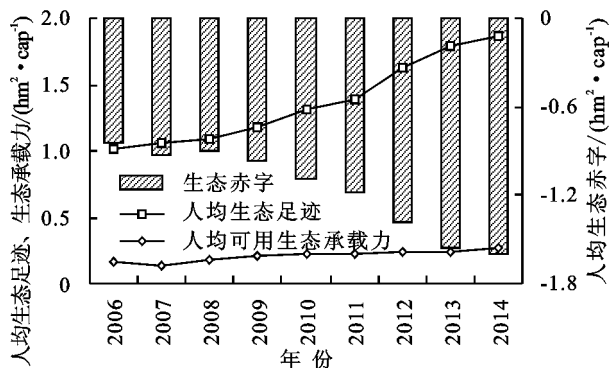


图2 2006—2014年延安市人均生态足迹、生态承载力和生态赤字变化

在人均生态足迹和生态承载力中,各类土地贡献不一(图3)。在人均生态足迹中,2006—2014年化石能源地平均比例达 80.43% ;草地为 15.00% ;耕地在人均生态足迹中约占 4.14% ;其他土地类型(包括林地、水域、建设用地、污染排放用地)在人均生态足迹中所占比重很小,总共约为 0.43% 。在人均生态承载力中,耕地占 57.23% ,林地占 30.47% ,化石能源地占 11.44% ,其他土地类型(包括草地、水域、建设用地和污染排放用地)在生态承载力中所占比例仅为 0.86% 。

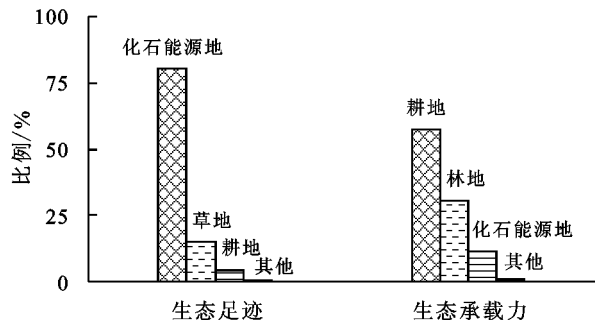


图3 2006—2014年延安市各类土地在生态足迹和生态承载力中的平均比例

2006—2014年,各类土地人均生态足迹和生态承载力变化略有差异(图4)。2006—2014年延安市人均化石能源地生态足迹持续增加,2006年延安市人均

化石能源地生态足迹为 $0.68 \text{ hm}^2/\text{cap}$,2014年增至 $1.72 \text{ hm}^2/\text{cap}$,平均每年比上一年增长 12.40% ,延安市化石能源地生态足迹增大主要原因是能源消费量的不断增加。化石能源地人均生态承载力整体呈上升趋势,平均每年比上一年增长 26.29% 。本文将延安市防护林作为吸收 CO_2 的化石能源地,化石能源地生态承载力的增加主要来自防护林面积增加。延安市人均化石能源地生态承载力增长速度大于人均化石能源地生态足迹,生态赤字逐年加大。本文草地生态承载力包括两部分:一是牧草地生态承载力,二是用于吸收 CO_2 的草地承载力,其中牧草地面积用《延安年鉴》中年末人工种草保留面积计算,因缺乏退耕还草、封山育草面积而将吸收 CO_2 的草地面积记为0(即吸收 CO_2 的草地的承载力为0)。从图4B可看出延安市人均草地生态足迹整体呈现下降趋势,这主要是鲜牛奶和牛肉等来自草地的生物产品消费量降低引起的。草地虽然出现生态赤字但是生态赤字在减小,这与延安地区畜牧业发展模式以及国家实施的一系列保护草地等生态措施有关。

人均耕地生态足迹逐渐减小,人均耕地承载力除了2007年有明显降低外整体上升趋势明显,生态盈余增加。延安市人均耕地生态足迹减小是由2006—2014年延安市人口对耕地产品消费量减少、延安市耕地产量因子(表1)提高引起的;人均耕地生态承载力增加则是耕地面积和产量因子提高引起的。

人均林地生态足迹变化平稳,2013年、2014年由于水果消费量下降引起这两年人均林地生态足迹减小、变化趋势出现波动。人均林地生态承载力平均每年比上一年增长 11.77% ,这是因为延安市果园面积和产量因子增加引起的。2006—2014年延安市林地的人均生态盈余呈上升趋势。水域的人均生态足迹变化较平稳,2013年和2014年因水产品消费量骤减使得生态足迹迅速减小。人均水域生态承载力虽有波动但整体呈平缓增加趋势,这与水域面积变化有关。人均水域虽然出现生态赤字,但赤字在不断减小。

建设用地的人均生态足迹呈增大趋势,人均生态承载力呈波动式上升,该类型土地的人均生态盈余也为波动式增加。在本文中,建设用地的生态足迹主要来自水电消费,因此水电消费量增加是造成建设用地生态足迹增大的主要原因。建设用地人均生态承载力增加是建设用地面积增加和建设用地产量因子提高引起的。

人均污染排放用地生态足迹变化波动较大,2006—2012年变化相对平稳,在2013年和2014年大幅增加。本文以延安市生活垃圾产生量来计算人

均污染排放用地生态足迹,人均污染排放用地生态足迹增加是垃圾量增加造成的。在本文中,将延安市污

染排放用地生态承载力设为 0。从图 4G 可以看出人均污染排放用地生态赤字在增大。

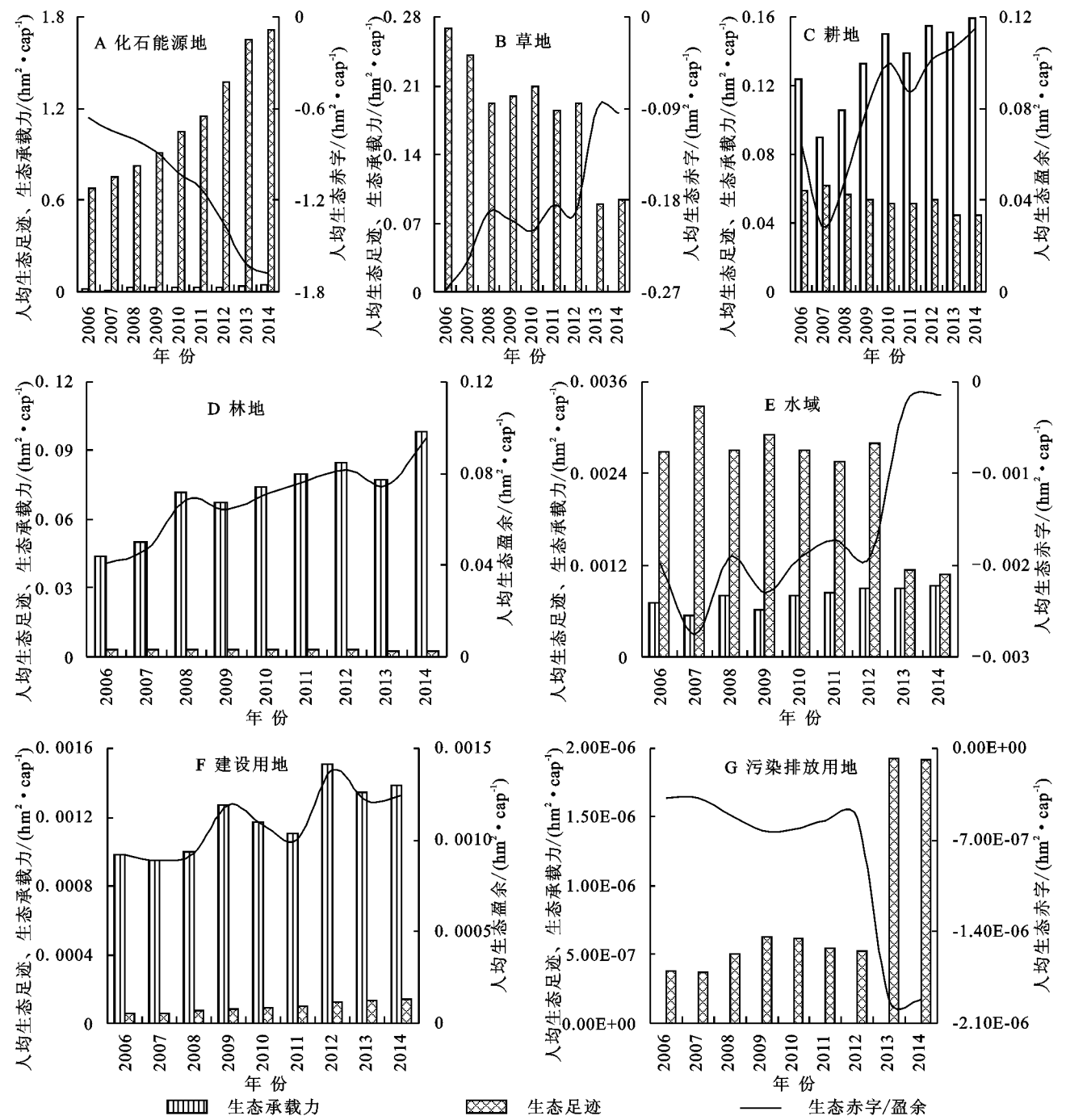


图 4 2006—2014 年延安市各类型土地的人均生态足迹、生态承载力和生态赤字或盈余的变化

综上所述,各土地类型人均生态足迹、生态承载力和生态赤字/盈余差异较大。在 7 种土地类型中,只有耕地、林地、建设用地生态压力比较小,处于生态盈余状态;化石能源用地、草地、水域、污染排放用地均出现生态赤字,其中化石能源用地的生态赤字最严重,而且化石能源地生态赤字在不断增大,草地、水域、污染排放用地生态赤字在减小。因此在进行产业结构调整时应既结合土地类型特点又兼顾全局,合理制定发展规划。

3.2 可持续发展能力的综合分析

延安市万元 GDP 生态足迹从 2006 年的 0.40 $\text{hm}^2/\text{万元}$ 降低到 2014 年的 0.30 $\text{hm}^2/\text{万元}$,平均每年比上一年降低 3.05%(图 5)。万元 GDP 生态足迹的下降说明延安市发展过程中资源利用效率在提高。但是延安市万元 GDP 下降的速度明显小于人均生态足迹增加的速度,所以应进一步增强节能减排意识,不断优化改进管理、生产方式,提高资源利用率,促进可持续发展。

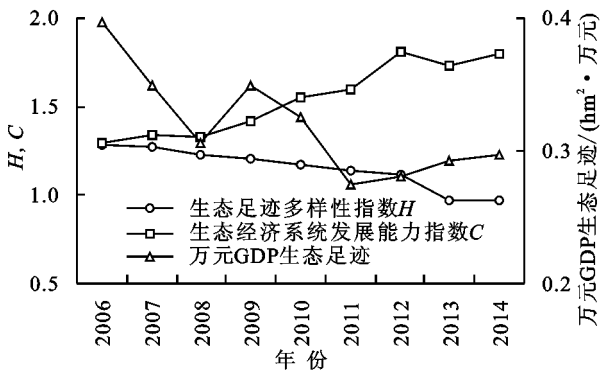


图 5 2006—2014 年延安市万元 GDP 生态足迹、生态足迹多样性指数和生态经济系统发展指数变化

由图 5 可知,2006—2014 年延安市生态足迹多样性指数逐年降低,从 2006 年的 1.28 减小到 2014 年的 0.96,平均每年比上一年减少 3.39%,这表明延安市生产性土地类型分配比例越来越不均衡,系统稳定性在降低。从各类土地在总生态足迹中的比例(图 3)可知,延安市生态生产性土地分配比例单一,延安市 2006—2014 年生态足迹多样性指数不断减小反映出当地生态系统稳定性降低,这不利于生态系统的稳定。此外,生态经济系统发展能力指数 C 呈明显上升趋势,平均每年比上一年增加 4.30%,增加速率高于生态足迹多样性指数 H 的变化速率。这表明延安市的生态经济系统发展能力逐渐增强,生态经济系统发展能力指数主要是由生态足迹升高驱动。

延安市 2006—2014 年的生态足迹指数 EFI 均小于 -1 ,表明该地区的未来的可持续发展能力较弱(表 3)。结合公式(7)可知,延安市生态赤字增加是引起延安市生态足迹指数 EFI 严重偏小的主要原因,而化石能源地是生态赤字的主要贡献者。

表 3 延安市生态足迹指数 EFI

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
EFI	-5.13	-6.95	-4.90	-4.77	-4.89	-5.40	-5.89	-6.55	-6.01

4 结论与建议

(1) 2006—2014 年延安市人均生态足迹的增长速度大于生态承载力,生态赤字逐年增大。

(2) 2006—2014 年,延安市除化石能源用地和污染排放用地生态赤字逐年增大外,耕地、林地、草地、水域等土地类型生态盈余逐渐增加,但是化石能源地产生的生态赤字超过了其他土地类型增加的生态盈余,这是造成延安市整体出现生态赤字的根本原因。

(3) 2006—2014 年,延安市万元 GDP 生态足迹减小,表明延安市能源利用效率提高、生态经济系统发展能力增强,但是生态足迹多样性指数和生态足迹

指数偏低,表明延安市可持续发展潜力较弱。
建议在延安市的发展过程中,首先应提高资源利用效率,积极开发绿色能源;其次应逐渐调整产业结构,合理发展畜牧业,加强草地管理;发扬当地林果业优势,加强果园土壤资源管理,建立产业链条,增加经济效益;引进符合当地实际情况的农业技术,保护耕地减少水土流失;继续保护植被,增加绿地面积。

参考文献:

[1] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Focus,1992, 6(2):121-130.

[2] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan Ltd., 2011.

[3] Weidema B P, Thrane M, Christensen P. Carbon footprint: A catalyst for life cycle assessment[J]. Journal of Industrial Ecology, 2010,12(1):3-6.

[4] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, et al. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment[J]. Environmental Development, 2012,1(1):40-66.

[5] 焦文琚,闵庆文,李文华,等. 基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用[J]. 资源科学,2014,36(11):2392-2400.

[6] 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.

[7] 顾晓薇,王青,刘建兴,等. 基于“国家 hm^2 ”计算城市生态足迹的新方法[J]. 东北大学学报,2005,26(4):295-298.

[8] 周晓艳,张文妍,叶信岳,等. 1992—2012 年国际生态足迹研究文献计量分析[J]. 地理科学进展,2014,33(3):336-346.

[9] 徐中民,张志强,程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析[J]. 地理学报,2000,55(5):607-616.

[10] 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.

[11] 曹淑艳,谢高地,陈文辉,等. 中国主要农产品生产的生态足迹研究[J]. 自然资源学报,2014,19(8):1336-1344.

[12] 张丹,成升魁,高利伟,等. 城市餐饮业食物浪费的生态足迹:以北京市为例[J]. 资源科学,2016,38(1):10-18.

[13] 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.

[14] 邢华超,陈知送,王秀茹,等. 延安市 2001—2006 年生态足迹分析[J]. 水土保持研究,2009,16(6):143-146.

[15] 肖玲,巢世军,赵先贵,等. 陕西省可持续发展的时空差异分析[J]. 中国生态农业学报,2008,16(5):1239-1243.

[16] 吴歌. 基于生态足迹的延安市可持续发展研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.