

荒漠生态系统生态承载力分析

——以民勤县为例

韦惠兰^{1,2}, 王 茜¹

(1. 兰州大学 经济学院, 兰州 730000; 2. 兰州大学 社区与生物多样性保护中心, 兰州 730000)

摘要:采用民勤县2010—2014年统计年鉴数据,运用生态足迹和承载力模型对该县近5a的生态足迹供需状况进行了对比分析,结合灰色预测理论建立GM(1,1)模型,以研究荒漠生态系统的生态承载力特点、变化趋势。研究表明:第一,人均生态足迹从2010年的2.3221 hm²逐年增至2014年的3.5906 hm²,增幅达54.63%。人均可利用生态承载力也有逐年上升的趋势,基本维持在0.7295 hm²—0.9441 hm²之间。民勤处于严重不可持续状态,生态赤字逐年扩大。第二,化石能源和草地对生态足迹和生态赤字影响最大,草地过载导致的草地退化成为其承载力严重不足的主要原因。第三,预测结果表明,生态足迹将持续增加,造成生态赤字的继续扩大。因此,要优化三次产业结构,提高能源利用效率;发展优势农业,加大技术投入;合理规划,转变畜牧业增长方式,坚持生态文明道路。

关键词:荒漠生态系统;生态足迹;生态承载力;灰色预测模型

中图分类号:X22;F205 **文章标识码:**A **文章编号:**1006-6152(2016)05-0076-06

DOI: 10.16388/j.cnki.cn42-1843/c.2016.05.010

生态环境的生产与支持功能为人类社会的生产、发展提供了保障^[1],人类社会的发展依赖于资源的支撑和环境的容纳。发展初期的盲目以及发展方式的粗放,使得资源与环境很难为发展提供足够动力。荒漠生态系统因其物种结构单一、生态环境脆弱,所能提供的生产能力更加有限,其承载能力能否与社会发展的需求相适应,将直接影响区域可持续发展。

加拿大生态经济学家威廉(William)及其学生瓦克纳格尔(Wackernagel)最早提出生态足迹法核算自然资源账户。1999年,我国研究学者引入生态足迹法对不同研究尺度、不同地域类型进行研究:Wackernagel运用生态足迹模型对52个国家进行资源核算^[2];张志强、徐中民等沿用Wackernagel提出的全球公顷测算出中国西部12省(市区)的生态赤字相当于新疆自治区的国土面积^[3];张恒义、刘卫东提出省公顷,适用于测算省域尺度的生态足迹^[4]。以

上研究考虑到了全球、国家、省域等不同研究尺度应与全球公顷、国家公顷、省公顷等不同标准匹配的情况,但采用的仍是基于全球公顷(根据全球平均产量计算)的均衡因子、产量因子等重要参数,其局限性在于仅考虑了土地的生产功能而忽视了其生态性功能和区域差异性。本文以民勤县为研究对象,引入更科学的均衡因子和产量因子核算其2010—2014年间的生态足迹和承载力,并将生态赤字和经济指标相结合,同时引入GM(1,1)模型对生态供需关系进行动态预测,克服静态指标的局限性,深入分析在社会发展的背景下民勤县域的资源环境的供需矛盾以及可持续状态,并为该区域的进一步发展提供政策参考。

一、研究区概况与数据来源

(一)研究区域概况

民勤县地处甘肃省河西走廊东北部,东经101°

收稿日期:2016-04-15

本刊网址·在线期刊:<http://qks.jhun.edu.cn/jhxs>

基金项目:甘肃省沙化土地封禁保护补助试点区经济效益监测与评估项目(406/071200006);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“高寒牧区牧民定居对草原可持续利用的影响评价”(15LZUJBWYJ015)

作者简介:韦惠兰,女,陕西蒲城人,兰州大学经济学院教授,兰州大学社区与生物多样性保护中心研究人员,博士生导师;王 茜,女,山西临汾人,兰州大学经济学院硕士生。

49°41'—104°12'10"、北纬38°3'45"—39°27'37"范围之间,在其境内东西方向长达206km,而南北方向长为156km,全县土地总面积达1.59万km²;民勤县境内的基本地貌由沙漠、平原和低山丘陵三种构成,其中境内各类荒漠化土地面积高达1.52万km²,占总面积的94.9%;民勤县有极为丰富的石油资源、矿产资源;民勤县的东、西、北三面则毗邻我国第三、第四大沙漠巴丹吉林和腾格里沙漠,野生动植物资源匮乏,是典型的荒漠地区,属温带大陆性干旱气候区,127.7mm的年均降水量远低于2623mm的年均蒸发量,昼夜温差最大为15.5℃。民勤县2013年三次产业结构为36:33.4:30.6。

(二)数据来源

文中计算民勤县生态足迹以及承载力等的原始数据均来自于2010—2014年《民勤县国民经济和社会发展统计资料》以及2011—2015年《中国农业年鉴甘肃省卷》。

二、研究方法

(一)生态足迹法

生态足迹是指通过统计一定区域内人类消耗的主要物品和产生的废弃物,根据生产这些物质的土地的生产力换算为相应类型的土地面积^[5]。通常将土地类型划分为彼此独立的化石能源用地、耕地、林地、牧草地、建筑用地以及水域等六种核算类型。本项指标反映了人类进行的生产活动对当地资源环境的开发利用程度。传统的生态足迹模型根据一定区域内的消费量进行计算,而本地消费量中属于进口的部分不构成本地的生态足迹,未计入本地消费量的出口部分则会对本地产生生态压力。文中选用区域内的生产量进行核算,既可解除采用消费量计算形成的多算或漏算,又可避免小尺度研究对象的进出口贸易数据缺失带来的误差。其计算公式如下:

$$ef = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{np_i}) = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot \sum_i \frac{c_i}{cp_i} \cdot y_i) \quad (1)$$

$$EF = N \cdot ef \quad (2)$$

式中,*i*为核算项目中生产项目的类型;*j*为生产性空间的类型(*j*=1,2,⋯,5,6);*ef*为区域人均生态足迹(hm²/cap),*c_i*为核算项目中该县第*i*种生产项目的年产量;*EF*为该县总体生态足迹,*N*为该县常住人口数量;*np_i*、*cp_i*,分别为第*i*种生产项目在省级尺

度、县级尺度上的单位面积产量;*y_i*=*cp_i*/*np_i*,为产量因子;*r_j*为土地利用均衡因子。

生态足迹的核算主要包括:(1)生物资源部分;(2)能源部分;(3)吸纳废弃物。根据民勤县统计汇编资料统计项目的分类,生物资源主要分为谷类、水果、羊肉、淡水产品等15个类别的产量,按照其对应的6种土地类型分别进行面积折算;能源部分将原煤、电力等主要生物质能源的消耗量,以单位消耗量对应的生产性面积的平均发热量为转换系数^[6],折合为建筑用地和化石燃料用地的面积^[7];吸纳废弃物也依赖于一定的生产性空间的功能,根据市场价值法将每年吸纳废弃物所花费的费用换算为生产性面积^[8]。计算公式为:

$$B = \frac{Q}{P \times N} \times r_j \times y_i \quad (3)$$

式中,*B*为吸纳废弃物所需要占用的人均生产性面积,*Q*为县域年内处理垃圾的总费用,*P*为民勤县年内单位面积耕地创造的产值,*N*为县域常住人口数,*r_j*、*y_i*同公式(1)(2)。

现有的研究多根据某一土地类型的生产力与六种土地类型的平均生产力之比得到均衡因子,这种方法仅考虑了土地的生产能力,而忽视了可持续发展所倡导的土地的生态性功能;由此均衡因子进行加总求和算得的生态足迹也直接掩盖了各类型土地的差异性。根据陆地植被生产力的遥感估算技术、植被的净初级生产力测算的均衡因子很好的解决了以上问题^[9]。文中引用刘某承基于此理论计算的甘肃省均衡因子:耕地1.05、草地0.94、林地1.58、水域0.73,建筑用地1.05、能源用地1.58^[10]。

(二)生态承载力

生态承载力反映区域内资源与环境对人类活动的支撑能力,具体表现为一定区域实际供给的具有生产能力的生产性空间的面积。不同类型的土地的面积,因生产力、生态功能的不同,不能直接进行比较、加总,应通过均衡因子,化为在生产力、生态功能上等价的水平。不同地区,因资源禀赋以及生产力的差异,也不能直接比较,而应通过产量因子进行调整。产量因子是不同区域之间同一类型土地的平均生产力比率,主要反映土地管理、技术等方面的差异^[11]。其计算公式如下:

$$ec = \sum_{j=1}^6 (r_j \cdot a_j \cdot y_i) \quad (4)$$

$$EC = N \cdot ec \quad (5)$$

式中, EC、ec 分别为该县实际生态承载力的总值、人均值; a_j 为第 j 类型生产性空间的人均实际占有的面积; i, j, r_j, y_i, N 含义同公式(1)(2)(3)。产量因子的取值参照刘某某根据遥感估算技术、植物净初级生产力计算的成果: 耕地 0.36、草地 0.67、林地 1.26、水域 1.26, 建筑用地 0.36、能源用地 0^[12]。考虑到生态安全, 须预留出 12% 的部分作为该地区保护多样性的特别区域。

(三) 可持续发展指标

生态足迹反映了社会发展对资源、环境的需求, 生态承载力反映了资源环境对人类活动的供给能力。两者相比较, 可以判断一个区域的资源是否供需平衡。如果一个地区的生态足迹超过了生态承载力, 即出现生态赤字, 表现为区域发展不可持续; 反之, 则为生态盈余, 表示区域发展现状仍处于可承载能力范围。计算公式为:

$$eb = ef - ec \tag{6}$$

式中, eb 为均生态盈亏, eb>0 时为生态赤字, eb<0 时则为生态盈余。

生态赤字从资源环境供需矛盾的角度揭示了一个地区的发展状况。文中引入万元 GDP 的生态足迹, 将生态与经济发展相结合, 更加全面地揭示经济发展现状与资源供给能力的协调性。万元 GDP 生态足迹为生态足迹与研究区域内国内生产总值之比, 数值越大说明该区域对资源的利用效率较低。

(四) 灰色预测模型

传统的生态足迹的计算多是静态描述某个时点的状态, 近年来, 研究者在引入时间序列值对生态足迹进行趋势判断和预测方面做了很多尝试, 以弥补静态指标的缺陷^[13]。灰色预测是对部分信息已知而部分信息未知或不确定的系统的行为特征值进行预测的方法^[14]。灰色预测模型 GM(1, 1) 是其中被广泛运用于数列预测的一个变量、一阶微分模型。其基本思想是, 将原始数列进行预处理得到具有较强规律的生成数列, 根据该规律建立相应的一阶线性微分方程, 经证明, 一阶线性微分方程的解逼近原始时间序列的变化规律。建模过程如下^[15]:

设预测对象 $X^{(0)} = \{X^{(0)}(i), i=1, 2, \dots, n\}$ 为非负单调原始数据列, 首先对 $X^{(0)}$ 进行数据预处理, 一般采用累加的方式:

$$X^{(1)}(k) = \sum X^{(0)}(i) = X^{(1)}(k-1) + X^{(0)}(k)$$

生成一次累加数列: $X^{(1)} = \{X^{(1)}(k), k=1, 2, \dots, n\}$, n 为数列中元素个数。对 $X^{(1)}$ 建立白化形式的微分方程:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u$$

微分方程的解为:

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}) \exp(-ak) + \frac{u}{a}$$

, 是一次累加量即 $k \in \{n+1, n+2, \dots\}$ 时刻的预测值。求解方法如下:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}^T = (B^T B)^{-1} B^T Y_n$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y_n = (X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n))^T$$

微分方程的解通过累减得到原始数据的预测值:

$$\hat{X}^{(0)}(k) = \hat{X}^{(1)}(k) - \sum_{i=1}^{k-1} \hat{X}^{(0)}(i) = \hat{X}^{(1)}(k) - \hat{X}^{(1)}(k-1)$$

最后, 可以用绝对残差和相对残差对模型精度做检验。残差序列:

$$\varepsilon^{(0)} = \{\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n)\} = \{x^{(0)}(1) - \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n) - \hat{x}^{(0)}(n)\}$$

$$\text{相对误差序列: } e = \left\{ \left| \frac{\varepsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\varepsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\varepsilon(n)}{x^{(0)}(n)} \right| \right\}$$

三、结果与分析

(一) 生态足迹、生态承载力分析

1. 生态足迹与生态承载力综合分析

民勤县 2010—2014 年生态足迹与生态承载力结果如表 1、表 2 所示。2010—2014 年间, 民勤县人均生态足迹基本呈逐年增加趋势, 从 2010 年的 2.3221hm² 增加到 2014 年的 3.5906hm², 增幅达到 54.63%, 年平均增长率为 10.93%。根据表 2, 人均可利用生态承载力也在逐年上升, 增幅较生态足迹而言不明显, 基本维持在 0.7295hm²—0.9441hm² 之间。这得益于近年来的生态文明倡导, 民勤县积极开展植树造林等绿化建设。生态足迹始终大于生态承

载力,因而民勤县一直处于赤字状态并且生态赤字不断扩大,从2010年的1.5926hm²扩大到2014年的2.6465hm²,年平均增长率为13.23%。上述结果说明,民勤县对资源的开发以及生态系统的利用远远超出了其供给能力,原本脆弱的生态环境承受着巨大的生态压力。

2.生态足迹与生态承载力结构分析

从需求结构分析,生态足迹各组分都基本呈现递增特点(见图1),其中林地、化石能源和草地的增幅相对较大,分别为65.71%、55.79%和55.34%。随着社会经济发展的深入,民勤对于资源与能源的开发力度不断加大,因而林地与化石能源的生态足迹增幅最为明显;肉羊养殖凭借独特的自然条件成为了民勤农牧业的支柱产业,在为民勤带来经济利益的同时也产生了巨大的生态压力,表现为草地生态足迹占比大且增幅明显。化石能源用地、草地、耕地是生态足迹中占比最大的三项:平均占比分别为38.86%、32.69%和14.33%。占比最大且增幅最为明显的化石能源和草地生态足迹的增长,是人均生态足迹增长的重要原因。

从供给结构分析,生态承载力各组分都有较小增长,变化不明显。其中,林地对生态承载力的贡献最大,平均占比达到70.97%,而且有逐年增大的趋势,可见民勤林业面积或林业生产能力有所增

加,这与当地对植树造林的生态政策有直接关系。其后依次为建筑用地、耕地、草地、水域等。建筑用地和耕地是有效承载力的重要支撑和生存的依靠,因此民勤更应重视保护耕地。草地在承载力中占比较小,说明草地生态系统结构简单、物种贫乏,生产能力有限。

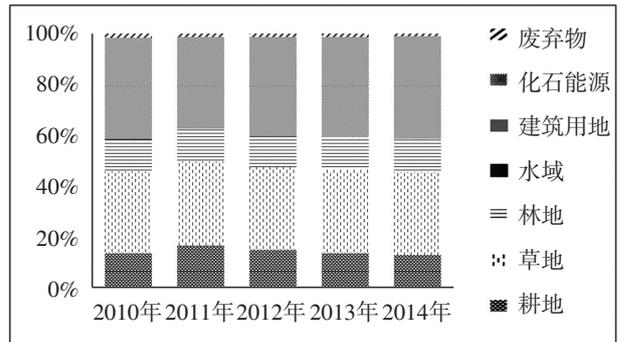


图1 2010—2014年民勤县人均生态足迹组分结构

3.各组分生态足迹供需分析

化石能源用地、草地、耕地的赤字依次构成了生态赤字的主要部分。主要原因有:人类对化石能源的需求大,同时没有专门吸纳CO₂的土地,故其承载力为0。草地平均人均生态足迹为1.0056hm²,承载力为0.0152hm²,生态赤字0.9904hm²,是承载力的65倍,反映出民勤县草地过载严重,原因在于民勤

表1 2010—2014年民勤生态足迹结果汇总

年份	人均耕地	人均草地	人均林地	人均水域	建筑用地	化石能源	废弃物	生态足迹	增幅
2010	0.3172	0.7507	0.2880	0.000	0.0021	0.9259	0.0382	2.3221	
2011	0.4576	0.9150	0.3534	0.000	0.0021	0.9891	0.0389	2.7561	18.69%
2012	0.4920	1.0768	0.3996	0.000	0.0022	1.2861	0.0410	3.2976	19.65%
2013	0.4634	1.1198	0.4430	0.000	0.0022	1.3437	0.0413	3.4134	3.51%
2014	0.4623	1.1661	0.4773	0.000	0.0023	1.4424	0.0402	3.5906	5.19%
平均	0.4385	1.0056	0.3923	0.000	0.0022	1.1975	0.0399	3.0760	11.76%

注:各组分生态足迹单位均为hm²/per capita,增幅为%。

表2 2010—2014年民勤县人均生态承载力

年份	耕地	草地	林地	水域	建筑用地	能源用地	人均承载力	12%扣除	实际可利用承载力	生态赤字
2010	0.1364	0.0076	0.4945	0.0046	0.1859	0.0000	0.8290	0.0995	0.7295	1.5926
2011	0.1501	0.0060	0.5599	0.0050	0.1859	0.0000	0.9070	0.1088	0.7981	1.9580
2012	0.1708	0.0068	0.6672	0.0057	0.1859	0.0000	1.0365	0.1243	0.9121	2.3855
2013	0.1704	0.0206	0.6659	0.0057	0.1859	0.0000	1.0487	0.1258	0.9228	2.4906
2014	0.1707	0.0347	0.6758	0.0057	0.1859	0.0000	1.0729	0.1287	0.9441	2.6465
平均	0.1597	0.0152	0.6127	0.0053	0.1859	0.0000	0.9788	0.1175	0.8613	2.2146

注:建筑用地面积采用国际统一标准;没有专门留出用于吸纳CO₂的土地,因而化石能源承载力为0。各列数据单位均为hm²/per capita。

县畜牧养殖业是经济的支柱产业,在经济利益驱动下,牲畜存栏量远远超出草地载畜量,同时地处沙漠地带的民勤草地进一步退化,使草地供养能力下降。耕地生产足迹为 0.4385hm²,生态承载力为 0.1597hm²,生态赤字达到了 0.2788hm²,是其承载力的 1.75 倍,表明民勤县耕地也处于失衡状态。民勤县的草地生态足迹远高于其承载能力,正说明了民勤县草地生产力高,但照此长期发展则会带来草地退化、土地荒漠化加剧的危害,民勤属于荒漠生态系统,一旦遭到破坏便难以恢复。所以针对荒漠生态系统,不仅要关注生态足迹与生态承载力整体状况,更要关注各组分的供需状况,避免发展失衡。

(二)可持续发展指标

万元 GDP 生态足迹将经济发展指标与生态足迹相结合,可以同生态赤字更全面地衡量区域经济—环境发展的协调状况。计算结果见图 2,万元 GDP 生态足迹逐年递减,从 2010 年的 2.5397 hm² 降低至 2014 年的 1.4666 hm²,降幅达到了 42.25%,说明民勤县的资源利用效率在逐渐提高,产业结构也逐渐调整,从而使万元 GDP 生态足迹有效地降低。

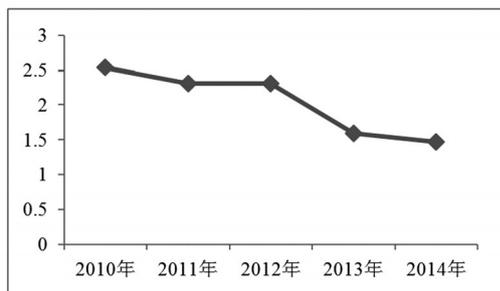


图 2 2010—2014 年民勤县人均 GDP 生态足迹

(三)生态足迹预测模型

文中选用 2010—2014 年生态足迹和生态赤字分别作为原始数据进行预测。根据表 1、表 2 的生态足迹和生态承载力序列,建立灰色预测 GM(1, 1) 模型,通过 Matlab 编程实现,详细的预测结果见表 3,模型精度符合要求。2015—2019 年人均生态足迹预测公式为:

$$\hat{ef}^{(1)}(k+1) = (35.4369 \times e^{0.0784k}) - 33.1148$$

$$\hat{ef}^{(0)}(k+1) = \hat{ef}^{(1)}(k+1) - \hat{ef}^{(1)}(k)$$

2015—2019 年人均生态足迹的预测公式为:

$$\hat{ec}^{(1)}(k+1) = (16.4790 \times e^{0.0491k}) - 15.7495$$

$$\hat{ec}^{(0)}(k+1) = \hat{ec}^{(1)}(k+1) - \hat{ec}^{(1)}(k)$$

根据结果,2015—2019 年人均生态足迹仍然呈递增趋势,将会带来逐渐扩大的生态赤字,生态失衡的状态仍将持续。同期的人均生态承载力也有增加的趋势,增幅也有增加,可见民勤县现期采取的绿化政策具有一定的效果。

表 3 2015—2019 年民勤县人均生态足迹供需预测结果

年份	2015	2016	2017	2018	2019
人均生态足迹	2.3221	2.8901	3.1258	3.3807	3.6563
人均生态承载力	0.7295	0.8294	0.8711	0.9150	0.9611

注:各列数据单位均为 hm²/per capita。

四、结论与讨论

(一)讨论

在生态足迹核算过程中,由于国内外统计口径的差异,兼顾民勤县小尺度的研究思路,选用《中国农业年鉴甘肃省卷》的数据替代传统生态足迹模型使用的 FAO 的平均生产力数据,一定程度上更加贴近民勤的实际情况^[16],但统计资料中部分生物账户和能源账户项目的缺失,对于生态足迹的计算难免造成误差。通过纵向时间序列的对比,其显示的趋势变化以及生态足迹供需关系同其他研究成果一致^[17-18],因此研究具有一定意义。

(二)结论与建议

民勤县 2010—2014 年平均生态足迹为 3.0760 hm²,平均承载力为 0.8613 hm²,平均生态赤字则达到了 2.2157 hm²,表明人类活动对生态环境的影响已经远远超出其承载能力,不利于生态环境的稳定与修复。预测结果显示,生态足迹仍将继续增长,生态承载力也有所提高,但仍然处于生态赤字状态,而且逐年扩大。分析表明,需采取措施减少生态足迹同时提高生态承载力,否则,民勤县的可持续发展状态将会引发更严重的生态和经济的全方面危机。

第一,优化三次产业结构,提高能源利用效率。化石能源用地占到了生态足迹的 38.86%,构成了生态足迹的重要部分,也是形成赤字的主要原因。民勤县必须扭转经济发展单纯依靠传统能源的不利现状,积极调整产业结构,提高土地类型利用的多样性,合理工、农、牧、林等产业的配置。同时提高能源的利用效率,借助民勤得天独厚的光照优势,积极开发新能源并推广使用,缓解对传统能源的依赖。

第二,发展优势农业,加大技术投入。农业是民勤发展的基础,但是民勤光照充足、降雨量少而蒸发量大,不适于发展大多数传统种植业,应当根据自然条件发展抗盐碱、耐旱的作物,不利于本地种植的作物可以适当依赖进口,抵消对本地的生态压力。

第三,合理规划,转变畜牧业增长方式。民勤草地生态赤字极为严重,应当根据经济生态协调发展的原则进行合理规划,优化土地开发格局,采用合理的管理制度,并转变畜牧业增长方式,发展生态型的畜牧养殖,如种植适宜类型的牧草以便进行补饲,减轻对自然环境的过度依赖。

第四,坚持生态文明道路。脆弱的生态状况是限制民勤经济发展的根源,应当通过政策引导与支持,普及生态文明建设的重要性。民勤县林地生态承载力的稳定增长说明了其植树造林、构建城市绿化带等措施的有效性。以防沙治沙为中心,加大科技投入与资金支持,加强生态系统的生产性和生态性功能,是提高生态承载力的有效方法。

参考文献:

- [1] 陈英姿. 中国东北地区资源承载力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [2] Wackernagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island, B C and Philadelphia, P A: New Society Publishers, 1995: 1-120.
- [3] 张志强, 徐中民, 程国栋, 等. 中国西部12省(区市)的生态足迹[J]. 地理学报, 2001(5): 598-609.
- [4] 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(1): 82-92.
- [5] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National Natural Capital Accounting the Ecological Footprint Concept [J]. Ecological Economics, 1999, 29: 375-390.
- [6] 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.
- [7] 张改景, 龙惟定, 苑翔. 区域建筑能源规划系统的能值分析研究[J]. 建筑科学, 2008(12): 22-26.
- [8] 张坤民, 温宗国, 杜斌, 等. 生态城评估与指标体系[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 222-259.
- [9] Venetoulis J, Talberth J. Refining the Ecological Footprint [J]. Environment, Development and Sustainability, 2008(4): 441-469.
- [10] 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(9): 1550-1559.
- [11] 杨亮洁, 潘晶, 王录仓. 可持续发展观视角下的绿洲生态承载力研究——以民勤绿洲为例[J]. 干旱区资源与环境, 2011(9): 25-31.
- [12] 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(3): 592-597.
- [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(14): 4592-4603.
- [14] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 86-205.
- [15] Cheng G, Yue X P, Cheng G, et al. Research and Prediction of Ecological Security in Jiangsu Province Based on the Ecological Footprint [J]. Asian Journal of Agricultural Research, 2011(4).
- [16] Wang S, Yang F L, Xu L, et al. Multi-scale Analysis of the Water Resources Carrying Capacity of the Liaohe Basin Based on Ecological Footprints [J]. Journal of Cleaner Production, 2013(16): 158-166.
- [17] 岳东霞, 巩杰, 熊友才, 等. 民勤县生态承载力动态趋势与驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010(6): 37-44.
- [18] 刘晓荣, 曹方, 杜英, 等. 基于生态足迹模型的生态脆弱区生态承载力分析——以民勤绿洲为例[J]. 干旱区资源与环境, 2010(6): 32-36.

责任编辑: 夏莹

(Email: silvermania@qq.com)