

# 基于改进三维生态足迹模型的张家口市生态可持续性评价

刘超, 许月卿, 孙丕苓, 刘佳

(中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** [目的] 定量分析张家口市 2003—2013 年的生态可持续发展状态, 并对未来生态可持续发展趋势进行预测, 以期对张家口市生态系统结构优化及生态建设和管理提供决策依据。[方法] 应用改进三维生态足迹模型, 核算张家口市各土地利用类型的三维生态足迹, 并运用 GM(1,1) 灰色预测模型预测其未来生态可持续变化趋势。[结果] 2003—2013 年张家口市人均生物承载力整体不断减少, 人均生态足迹、人均生态赤字、人均生态足迹深度与人均生态足迹广度均呈整体增加趋势; 化石燃料土地、建筑用地、水域、耕地、草地与林地的人均生态足迹均呈增加趋势; 除草地和林地外, 其他生物生产性土地人均生物承载力不断减少; 建筑用地、耕地与林地表现为生态盈余, 人均生态足迹深度处于自然原长; 化石燃料土地、草地与水域呈生态赤字状态, 草地与水域人均生态足迹深度不断增加; 2014—2020 年人均生态足迹将逐年增加, 人均生物承载力将逐年减少, 张家口市生态发展处于不可持续状态。[结论] 未来应采取开发新型能源, 发展生态农业、旅游业, 增加生态用地面积等措施来缓解生态环境压力, 提高区域可持续发展能力。

**关键词:** 生态可持续性; 三维生态足迹; GM(1,1)模型; 张家口市

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2016)06-0169-08

**中图分类号:** F062.2

**文献参数:** 刘超, 许月卿, 孙丕苓, 等. 基于改进三维生态足迹模型的张家口市生态可持续性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 169-176. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.029

## Evaluation of Ecological Sustainability Based on Revised Three-dimensional Model of Ecological Footprint in Zhangjiakou City

LIU Chao, XU Yueqing, SUN Piling, LIU Jia

(College of Resource and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** [Objective] Taking Zhangjiakou City as a case, the purpose of this study was to analyze quantitatively the ecological sustainable development of Zhangjiakou City in 2003—2013, and to predict the trend for decision basis of ecological system structure optimization and ecological construction and management. [Methods] Revised three-dimensional model of ecological footprint was adopted to calculate its dynamic changes of consumption and supply of all land types from 2003 to 2013. And GM(1,1) gray predictive dynamic model was constructed to predict the trend of ecological sustainable development in the next seven years. [Results] From 2003 to 2013, biocapacity per capita in Zhangjiakou City decreased from 1.460 7 hm<sup>2</sup> to 1.321 0 hm<sup>2</sup>; ecological footprint per capita increased from 2.271 6 hm<sup>2</sup> to 5.490 0 hm<sup>2</sup>; ecological deficit per capita increased from 1.845 9 hm<sup>2</sup> to 4.671 9 hm<sup>2</sup>; ecological footprint depth per capita increased from 5.336 2 hm<sup>2</sup> to 7.254 4 hm<sup>2</sup>, and ecological footprint size per capita increased from 0.425 7 hm<sup>2</sup> to 0.747 0 hm<sup>2</sup>. Meanwhile, ecological footprint per capita of fossil fuel land, construction land, water area, arable land, grassland and forest land showed a trend of increase. Expect for grassland and forest land, ecological carrying capacity per capita of other ecological productive lands were decreasing. Construction land, arable land and forest land presented a state of ecological surplus, and their ecological footprint depth per capita were in natural growth stage. However, fossil fuel land, water area and grassland were in the condition of ecological deficit, ecologi-

收稿日期: 2016-04-06

修回日期: 2016-05-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于多源数据融合的冀北贫困带土地利用多功能演变研究”(41571087)

第一作者: 刘超(1990—), 男(汉族), 河北省唐山市人, 博士研究生, 研究方向为土地利用与覆被变化, 土地利用评价与规划。E-mail: liuchaonwu@163.com。

通讯作者: 许月卿(1972—), 女(汉族), 河北省定州市人, 博士, 副教授, 主要从事土地利用变化与可持续利用、土地资源利用与评价等方面的研究。E-mail: xmoonq@sina.com。

cal footprint depth per capita of water area and grassland present an increasing trend. In the period of 2014—2020, ecological footprint per capita were predicted in a rise trend; whereas, ecological carrying capacity per capita would decline year after year. [Conclusion] Therefore, in order to realize the sustainable development of local economy, society and ecological environment, some major counter measures of reducing ecological deficit and alleviating the pressure of ecological environment should be adopt positively, such as promoting the use of clean energy, controlling the population quantity, increasing the ecological land area, etc.

**Keywords:** ecological sustainability; three-dimensional ecological footprint; GM(1,1) model; Zhangjiakou City

自然资源和生态环境是维持区域社会经济发展的根本。随着工业化和城镇化进程的不断加快,人们生产与消费水平得到极大提高,而气候变暖、资源枯竭和环境恶化等一系列问题也随之出现,并日益成为区域可持续发展的阻碍因素,因此,如何协调区域发展和生态保护之间的矛盾是实现可持续发展战略的关键所在,也是国际社会和学术界关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。

生态可持续性既是可持续发展的重要内容,也是可持续发展的环境基础,是指要比以往的经济获得更大的效益,使以往的生态环境得到进一步的改善,使人的生活质量得到更大的提高,并满足生态环境系统在“时间上的可持续性”、“空间上的可持续性”和“资源优化上的可持续性”<sup>[4]</sup>。自然资本是生态系统所提供的自然资源与生态服务的总称,分为流量资本和存量资本两部分<sup>[3]</sup>,人类对自然资本需求及供给的测度,即生态可持续性评价,是衡量可持续发展的重要标准,最常用的分析方法是生态足迹法(ecological footprint, EF)<sup>[4]</sup>。生态足迹法是由著名生态经济学家 Ree 等<sup>[5]</sup>在 1992 年提出,1996 年 Wackernagel 等<sup>[6]</sup>进一步发展为计算和衡量人类对自然资源利用程度以及自然界为人类提供服务功能大小的一种新方法,并在国内外得到了广泛应用和实践<sup>[7-10]</sup>。为了克服传统生态足迹模型评估结果信息量不足、政策相关性较弱的缺陷,Niccolucci 等<sup>[11]</sup>提出了三维生态足迹(three dimensional ecological footprint, EF<sub>3D</sub>)的概念,即引入足迹广度(footprint size, EF<sub>size</sub>)和足迹深度(footprint depth, EF<sub>depth</sub>)两项新指标,分别表征人类对流量资本和存量资本两方面的利用程度。方恺等首次将三维生态足迹基本概念和计算方法引入国内,并以中国为例进行实证研究<sup>[12]</sup>。之后,方恺等<sup>[13]</sup>对三维生态足迹模型进行了优化改进,深化了生态可持续发展的量化研究。但以往研究多基于省级、国家、国际等宏观尺度,分析其三维生态足迹的总体变化,而深入地全面分析某一区域内各土地利用类型的三维生态足迹动态变化的微观研究明显不足。

生态脆弱区指对环境因素改变的反应敏感而维持自身稳定的可塑性小的生态环境系统,在空间上表达为城乡交接带、农牧交错带、干湿交错带、水陆交错带等<sup>[14]</sup>。生态脆弱区既是生态环境破坏最典型、最

强烈的区域,也是贫困问题最集中的区域<sup>[15]</sup>。张家口市地处北方农牧交错带,生态环境脆弱而敏感,河湖断流、土地沙化、草场退化、沙尘暴频发,人地矛盾突出,经济发展水平低下,是环京津冀北贫困带的重要组成部分。同时,张家口又是京津冀的生态屏障、供水水源地,担负着保护京津地区生态安全的重要任务。因此,张家口面临着经济发展与生态保护的双重压力,地区资源环境与社会经济发展的矛盾突出,严重制约了张家口市的协调和可持续发展。随着京津冀一体化和区域协作发展的推进,张家口市将成为京津产业梯度转移和功能分散的重要承接地之一,生产及基础设施建设用地必然挤占生态空间,进而对张家口市的生态可持续发展产生深远影响。本研究以张家口市为研究区,采用改进三维生态足迹模型定量分析研究区 2003—2013 年的各土地利用类型的三维生态足迹动态变化特征,进而分析区域生态可持续发展态势,应用 GM(1,1)灰色预测模型预测未来生态可持续发展趋势,以期对张家口市生态系统结构优化及生态建设和管理提供决策依据。

## 1 研究区概况

张家口市位于河北省西北部,位于东经 113°50′—116°30′,北纬 39°30′—42°10′。地处蒙古高原与华北平原之间,是典型的农牧交错带地区,地势西北高、东南低,以阴山山脉大马群山分水岭为界,划分为坝上、坝下两大地貌类型。属于东亚半干旱大陆性季风气候,干旱、风沙、霜冻、雹灾是主要自然灾害。作为首都的上风上水之地,生态区位十分重要,是实施京津风沙源治理工程的重点建设地区。2000 年,张家口市开始实施退耕还林(草)试点工程;2002 年,退耕还林工程在全市范围内实施。2013 年张家口市辖 4 区、13 个县,土地总面积  $3.68 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,总人口 467.02 万人。国民生产总值 1 317.02 亿元,人均生产总值 29 908 元。近年来,张家口市农业生产结构不断调整,畜牧、蔬菜、果品三大农业主导产业初步形成,奶业、肉类、蔬菜、葡萄、杏扁等成为当地农业特色主导产业,2013 年农业总产值 235.50 亿元。工业化速度加快,能源、食品加工、装备制造和冶金矿山 4 大主导产业初步形成,2013 年工业总产值 554.58 亿

元,经济发展与环境保护的矛盾日益突出。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源与处理

数据来源于《张家口经济统计年鉴(2004—2014年)》、《河北经济年鉴(2004—2013年)》《河北农村统计年鉴(2004—2014年)》以及张家口市国土局、农牧局调研数据等。根据生态足迹计算方法和张家口实际状况,收集了生物资源消费和能源消费两大类数据。其中生物资源消费品包括:农产品,包括粮食,谷物,豆类,薯类,油料和蔬菜,归为生物生产性土地类型中的耕地;动物产品,包括牛肉,羊肉,猪肉,牛奶和禽蛋,归为草地;林产品与水果产品,包括葡萄,苹果,鲜果和干果,归为林地;水产品归为水域。能源消费品包括:煤炭,焦炭,焦炉煤气,液化石油气,汽油,柴油,归为化石燃料土地;电力归为建筑用地。

由于耕地、林地、草地、化石燃料土地、建筑用地和水域等单位面积的生物生产能力差异很大,在计算生态足迹和生物承载力过程中,各种物质消费、能源消费等均须按相应的换算比例折算成相应的土地面积。因此,为使这几类不同的土地面积和计算结果可以比较和加总,需要乘以相应的均衡因子和产量因子,参考已有的研究成果<sup>[9,16-17]</sup>,均衡因子采用全球一致因子,即耕地和建筑用地均为2.19,林地为1.38,化石燃料用地为1.14,草地为0.48,水域为0.36。产量因子则采用1997年Wackernagel等<sup>[16]</sup>对中国生态足迹计算时的取值,即耕地和建筑用地取1.66,森林取0.91,草地取0.19,水域取1.0,化石能源用地为0。

### 2.2 研究方法

2.2.1 改进三维生态足迹模型 传统生态足迹模型的生态足迹、生物承载力和生态赤字等指标的说明和计算方法参见文献<sup>[8]</sup>。传统生态足迹模型及其后来的一系列改进模型,虽然承认自然资本在可持续发展中的重要性<sup>[7]</sup>,但并未对存量和流量作实质性区分,无法体现资本存量恒定对全球生态系统平衡所起的不可替代的作用<sup>[12]</sup>。三维生态足迹模型为弥补传统生态足迹模型的这一不足,将资本存量是否减少及减少的程度作为判断可持续性强弱的基本依据,由此提出足迹深度和足迹广度两个指标,以分别表征人类消耗自然资本存量和占用自然资本流量的程度<sup>[12]</sup>。生态足迹广度指实际所占用的生物生产性土地的面积,反映了人类占用自然资本流量的水平。生态足迹深度是指需要多少倍现有土地面积才能再生区域实际消费的资源量,反映了超出生物承载力部分的自然资本存量消耗。在生态足迹计算方面,三维生态足迹模

型与传统生态足迹模型一致,认为一个区域的生态足迹等于各地类生态足迹之和。三维生态足迹是表征体积的物理量(尽管其数值和单位在形式上仍与经典模型一致),其计算方法参见文献<sup>[11-12]</sup>。但是,三维生态足迹模型忽视了生态赤字与生态盈余的自然资本性质差异,对流量资本与存量资本的区分和追踪局限于区域尺度,若对单一地类(如耕地)而言,生态赤字等于该地类的生态足迹与生物承载力的差值,但一个区域通常包含多种地类,若仍由各地类生态足迹之和与生物承载力之和相减得到区域生态赤字(盈余),会高估足迹广度、低估足迹深度<sup>[13]</sup>。因此,对三维生态足迹模型进行改进,将存量资本和流量资本的分类测度扩展到区域以下具体的地类层面,对自然资本流动路径的追踪更为细致,从而避免了可能存在的生态赤字与生态盈余错误抵消的情况,其计算公式为:

$$ED_{\text{region}} = \sum_{i=1}^n ED_i = \sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\} \quad (1)$$

式中:  $ED_{\text{region}}$ ——区域生态赤字;  $ED_i$ —— $i$ 地类的生态赤字;  $n$ ——地类数;  $EF_i$ —— $i$ 地类的生态足迹;  $BC_i$ —— $i$ 地类的生物承载力。

$$EF_{\text{size, region}} = \sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \quad (2)$$

式中:  $EF_{\text{size, region}}$ ——区域生态足迹广度。

$$EF_{\text{depth, region}} = 1 + \frac{ED_{\text{region}}}{BC} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^n BC_i} \quad (3)$$

式中:  $EF_{\text{depth, region}}$ ——区域生态足迹深度。

$$EF_{3D, \text{region}} = EF_{\text{size, region}} \cdot EF_{\text{depth, region}} =$$

$$\sum_{i=1}^n \min\{EF_i, BC_i\} \times \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^n \max\{EF_i - BC_i, 0\}}{\sum_{i=1}^n BC_i}\right) \quad (4)$$

式中:  $EF_{3D, \text{region}}$ ——区域三维生态足迹。

由公式(3)可知,  $EF_{\text{depth, region}} \geq 1$ : (1) 当  $EF_i \leq BC_i$  时, 仅有自然深度,  $EF_{\text{depth, region}} = 1$ , 此时人类占用自然资本流量 ( $EF_{\text{size, region}}$ ) 即可满足自身需求; (2) 当  $EF_i > BC_i$  时,  $EF_{\text{depth, region}} > 1$ , 表明自然资本流量已无法完全满足人类需求, 需要动用存量资本。  $EF_{\text{size, region}}$  越大, 表明消耗的自然资本存量越多, 发展越不可持续。

相应地, 生态足迹广度和生态足迹深度在地类尺度上的普适性计算公式为:

$$EF_{\text{size, i}} = \min\{EF_i, BC_i\} \quad (5)$$

式中:  $EF_{\text{size, i}}$ —— $i$ 地类的生态足迹广度。

$$EF_{\text{depth},i} = 1 + \frac{\max\{EF_i - BC_i, 0\}}{BC_i} \quad (6)$$

式中:  $EF_{\text{depth},i}$ —— $i$  地类的生态足迹深度。注意的是,由于能源用地的生物承载力 0,生态足迹即为生态赤字,公式(5)–(6)不适用这一地类,其三维生态足迹与传统生态足迹算法一致。

2.2.2 灰色预测模型 灰色系统理论由中国学者邓聚龙<sup>[18]</sup>于 1982 年首先提出并建立,灰色系统预测模型是利用较少的表示系统行为特征的原始数据序列进行生成变换后,对生成数据序列建立微分方程,从而预测事物未来的发展趋势和状态。GM(1,1)模型是最典型的灰色预测模型,其实质是对原始数据序列作一次累加生成,使生成数据序列呈一定规律性,然后建立一阶线性微分方程模型,求得拟合曲线对系统进行预测,其计算方法及模型精度检验详见参考文献[18-19]。

### 3 结果与分析

#### 3.1 三维生态足迹变化分析

3.1.1 三维生态足迹供需变化分析 2003—2013 年,张家口市人均生态足迹总体增加比较明显,由 2.271 6  $\text{hm}^2$  增加至 5.419  $\text{hm}^2$ ,以 12.60% 的年速率递增(表 1),而人均生物承载力总体呈现稳定减少趋势,由 2003 年的 1.460 7  $\text{hm}^2$  减少到 2013 年的 1.321 0  $\text{hm}^2$ ,减少了 0.139 7  $\text{hm}^2$ ,这造成张家口市始终存在生态赤字现象,且人均生态赤字量总体上不断增加。2003 年张家口市的人均生态赤字为 1.845 9  $\text{hm}^2$ ,到 2013 年达到 4.671 9  $\text{hm}^2$ ,增加了 2.826  $\text{hm}^2$ ,即全市人均生态足迹已超过人均承载力的 2.8 倍多,表明张家口市的生态容量渐少,生态压力渐增。这与张家口社会经济的发展,人口的不断增加,各种生物产品、农业资源、能源的消费量增加密切相关。

表 1 张家口市 2003—2013 年人均三维生态足迹、人均生物承载力和人均生态赤字

$\text{hm}^2$

年份	人均三维生态足迹	人均生物承载力	人均生态赤字
2003	2.271 6	1.460 7	-1.845 9
2004	2.592 4	1.453 4	-2.025 7
2005	2.785 6	1.445 9	-2.284 7
2006	3.252 4	1.426 4	-2.679 9
2007	3.714 1	1.422 3	-3.233 3
2008	3.728 2	1.391 9	-3.141 5
2009	3.446 2	1.342 6	-3.007 6
2010	4.379 0	1.332 5	-3.767 0
2011	4.666 3	1.329 4	-3.988 7
2012	4.821 1	1.323 3	-4.119 7
2013	5.419 0	1.321 0	-4.671 9
变化量/ $\text{hm}^2$	3.147 4	-0.139 7	-2.826 0
年均变化率/%	12.60	-0.87	13.92

#### 3.1.2 地类组分变化分析

(1) 生态足迹构成变化。2003—2013 年化石燃料土地人均生态足迹占人均生态足迹总量的比例一直最大(图 1),为 57.21%~69.61%,由 1.342 9  $\text{hm}^2$  迅速增加到 3.772 4  $\text{hm}^2$ ,年均增长 16.45%,表明张家口市经济发展是以占用大量的化石燃料用地为代价的。近年来张家口市北方能源基地建设的快速推进,以能源、钢铁(如宣钢)、煤化(如宣化、万全煤化工园区)为主的工业迅速发展,增加了煤、铁等矿产资源的消费需求,如冀蔚矿区、宣东矿区的建设,提高了化石燃料土地生态足迹。草地人均生态足迹所占比例位居第 2,为 16.25%~21.80%,其人均生态足迹持续增加,2013 年是 2003 年的 1.81 倍,年均增长 7.38%;耕地人均生态足迹所占比例为 10.93%~

20.03%,波动增加了 0.276 0  $\text{hm}^2$ ,年均变化率为 6.55%;林地人均生态足迹呈持续增加趋势,年均增长 14.56%。

张家口地处农牧交错区,近年来农业结构不断调整,畜牧业迅速发展,如察北、塞北、张北等大型现代化奶牛养殖和乳品加工基地的建成,已占据农业生产主导地位,蔬菜的产量不断增加,且在耕地生物资源账户中所占比例一直处于首位,以及林果业的较快发展导致了上述变化。同时也表明了人民生活水平的提高,使得人们对蛋、禽、肉奶及林产品的需求提高,导致草地、耕地和林地的人均生态足迹呈不断增加趋势。建筑用地人均生态足迹稳中有升,即由 2003 年的 0.009 6  $\text{hm}^2$  增加到 2013 年的 0.020 4  $\text{hm}^2$ ,年均增长 10.23%,这是由于张家口市煤炭资源丰富,电

力消耗以火电为主。水域人均生态足迹所占比例仅为 0.59%~1.27%，研究期间仅增加了 0.002 8 hm<sup>2</sup>，这与张家口市作为京津水源涵养功能区，水产品养殖业的发展受到一定限制有关。

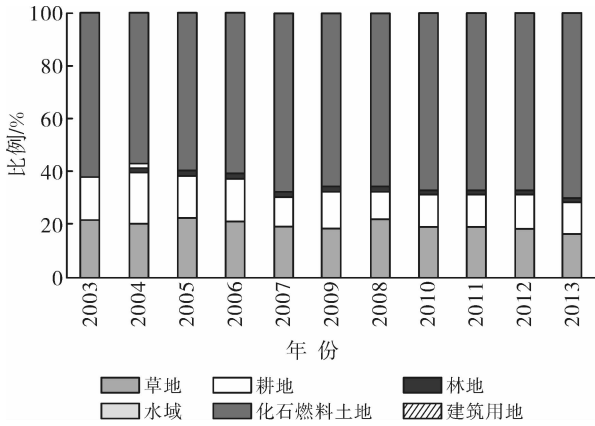


图 1 张家口市不同生物生产型土地人均生态足迹所占比例

(2) 生物承载力构成变化分析。研究期间，耕地人均生物承载力从 1.182 1 hm<sup>2</sup> 持续减少到 1.026 7 hm<sup>2</sup>，这是由于近年来退耕还林还草政策的实施，以及建设用地占用、水土流失等导致耕地资源数量和质量下降造成的。但值得注意的是，耕地人均生物承载力占全市人均生物承载力的比例一直最大，为 77.72%~80.93%(图 2)，说明耕地是张家口市生物承载力的最主要构成，是造成张家口市人均生物承载力减少的主要原因。建筑用地人均生物承载力呈现稳中有降的趋势，从 0.143 2 hm<sup>2</sup> 减少到 0.122 7 hm<sup>2</sup>，所占比例由 9.80% 减少到 9.29%。林地和草地的人均生物承载力均呈逐渐增加趋势，所占比例也不断增加，其中林地人均生物承载力从 0.123 3 hm<sup>2</sup> 增加到 0.158 6 hm<sup>2</sup>，其年均增长 2.60%，所占比例也由 8.44% 增加到 12.00%；草地人均生物承载力从 0.008 9 hm<sup>2</sup> 波动增加到 0.009 9 hm<sup>2</sup>，其年均增长 1.07%，所占比例由 0.61% 增加到 0.75%。这主要是由于塞北林场、退耕还林还草及农田防护林工程等生态建设工程的实施，以及舍饲养殖业的发展，促使粮食、经济作物二元种植结构向粮食、经济、饲料作物三元种植结构的转变，饲草业得到较快发展，使得林地和草地面积不断增加，导致其生物承载力不断增加。水域人均生物承载力在 0.002 9~0.003 2 hm<sup>2</sup> 之间震荡式变化，总体上呈略微减小趋势，年均减少 0.28%，这主要与近年来水域面积减少有关。

(3) 生态赤字(盈余)构成变化分析。研究期间，化石燃料土地、草地、水域的人均生物承载力均小于

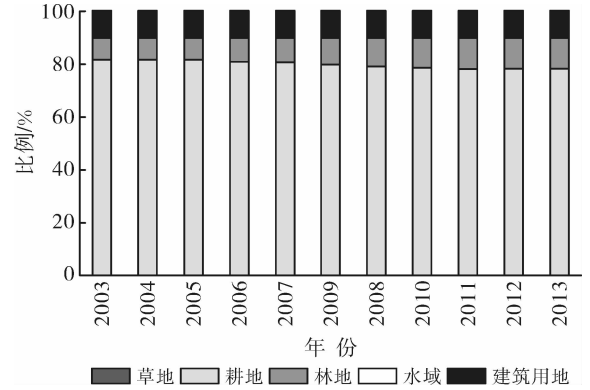


图 2 张家口市不同生物生产型土地人均生物承载力所占比例

其人均生态足迹(表 1)，呈生态赤字状态。其中，化石燃料土地人均生态赤字变化速度最快，与人均生态足迹变化趋势相同，期间共增加了 2.429 1 hm<sup>2</sup>。其次是草地，研究期间面积虽不断增加，但产量因子较小，其人均生物承载力一直小于人均生态足迹，呈生态赤字的状态，且人均生态赤字量逐年增加，由 2003 年的 0.477 3 hm<sup>2</sup> 增加到 2013 年的 0.870 9 hm<sup>2</sup>，年均增长 7.50%。水域在 2003—2008 年期间，人均生态赤字处于波动减少的阶段，2009—2013 年人均生态赤字不断增加，年均增长了 1.03%。耕地、林地与建筑用地的人均生物承载力一直大于人均生态足迹，处于生态盈余状态。其中，耕地人均生态盈余总体呈波动减少趋势，其年均减少了 4.91%；林地人均生态盈余呈现波动增加趋势，年均增加了 0.15%；建筑用地人均生态盈余总体上持续减少，年均减少了 2.13%。

### 3.2 生态足迹深度变化分析

3.2.1 总体变化 2003—2013 年张家口市人均生态足迹深度以增加趋势为主，并呈现出阶段性变化特点(表 2)。由表 2 可以看出，2003—2007 年人均生态足迹深度先减少后增加，2004 年较之 2003 年减少 0.762 5 之后，到 2007 年增加至 7.724 8；2007—2009 年呈“V”形变化，继 2008 年比 2007 年减少了 1.370 3 之后，2009 年达到最高值 7.855 5；2009—2013 年先减少后增加，2012 年比 2009 年减少了 0.982 0 之后，2013 年比 2012 年增加了 0.380 9。这说明张家口市自然资源流量已不足以支撑日益膨胀的消费需求，对自然资源存量的消耗程度加大，生态发展愈发不可持续。

3.2.2 地类组分变化 从人均生态足迹深度构成来看，草地人均生态足迹深度变动明显，期间增加 34.340 5，其中 2003—2007 年持续增加，由 54.629 2 增加到 78.044 4，2008 年减少至 73.771 7，2009—2011 年快速增长至 95.855 6，到 2013 年减少至

88.969 7; 水域人均生态足迹深度波动增加, 由 9.031 3 增加到 10.225 8, 表明张家口市过度使用了草地和水域等自然资本存量。耕地、林地与建筑用地的人均生态足迹深度处于自然原长, 始终为 1, 是因

为其人均生物承载力大于人均生态足迹, 处于生态盈余状态, 张家口市对耕地、林地及建筑用地等自然资本流量的消耗即可满足对耕地、林地及建筑用地等自然资源的消费需求。

表 2 张家口市 2003—2013 年人均生态足迹深度、人均生态足迹广度

年份	人均生态足迹深度					全市	人均生态足迹广度/hm <sup>2</sup>					全市
	草地	耕地	林地	水域	建筑用地		草地	耕地	林地	水域	建筑用地	
2003	54.629 2	1.000 0	1.000 0	9.031 3	1.000 0	5.336 2	0.008 9	0.383 0	0.021 0	0.003 2	0.009 6	0.425 7
2004	59.011 2	1.000 0	1.000 0	9.250 0	1.000 0	4.573 7	0.008 9	0.5194	0.024 8	0.003 2	0.010 5	0.566 8
2005	69.348 3	1.000 0	1.000 0	6.193 5	1.000 0	5.561 2	0.008 9	0.451 2	0.027 2	0.003 1	0.010 5	0.500 9
2006	77.438 2	1.000 0	1.000 0	9.354 8	1.000 0	5.682 0	0.008 9	0.520 3	0.030 2	0.003 1	0.009 9	0.572 4
2007	78.044 4	1.000 0	1.000 0	8.000 0	1.000 0	7.724 8	0.009 0	0.425 4	0.032 7	0.003 0	0.010 7	0.480 8
2008	73.771 7	1.000 0	1.000 0	8.466 7	1.000 0	6.354 5	0.009 2	0.528 5	0.035 0	0.003 0	0.011 0	0.586 7
2009	83.455 6	1.000 0	1.000 0	9.069 0	1.000 0	7.855 5	0.0090	0.376 7	0.038 5	0.002 9	0.011 6	0.438 7
2010	92.477 8	1.000 0	1.000 0	9.466 7	1.000 0	7.155 2	0.009 0	0.546 8	0.038 7	0.003 0	0.014 5	0.612 0
2011	95.855 6	1.000 0	1.000 0	9.806 5	1.000 0	6.887 5	0.009 0	0.604 6	0.041 8	0.003 1	0.019 0	0.677 5
2012	87.899 0	1.000 0	1.000 0	9.906 3	1.000 0	6.873 5	0.009 9	0.620 8	0.047 1	0.003 2	0.020 4	0.701 4
2013	88.969 7	1.000 0	1.000 0	10.225 8	1.000 0	7.254 4	0.009 9	0.659 0	0.054 6	0.003 1	0.020 4	0.747 0

### 3.3 生态足迹广度变化分析

3.3.1 总体变化 由表 2 可知, 2003—2013 年张家口市人均生态足迹广度整体上呈增加趋势, 人均生态足迹广度由 0.425 7 hm<sup>2</sup> 震荡式增加至 0.747 0 hm<sup>2</sup>, 共增加了 0.321 3 hm<sup>2</sup>, 反映了张家口市占用的自然资本流量日益增多。

3.3.2 地类组分变化 分析可知, 张家口市一直处于生态赤字状态, 需动用自然资本存量以满足其消费需求。由于生态足迹广度实际取生态足迹和生物承载力中的较小值<sup>[13]</sup>, 草地和水域的人均生物承载力小于人均生态足迹, 其人均生态足迹广度与其人均生物承载力一致; 耕地、林地与建筑用地的人均生态足迹小于人均生物承载力, 其人均生态足迹广度与其人均生态足迹一致。其中, 耕地人均生态足迹广度所占全市人均生态足迹广度比例为 88.22%~91.64%, 林地占 4.38%~8.78%, 建筑用地占 1.85%~2.91%, 草地占 1.33%~2.09%, 水域占 0.42%~0.75%, 表明张家口市的人均占用土地面积中以耕地和林地为主。

### 3.4 生态足迹预测分析

3.4.1 生态足迹和生物承载力预测精度比较 根据表 3 所示的 2003—2013 年张家口市人均生态足迹和人均生物承载力的计算结果, 利用灰色系统方法建立

灰色预测模型 GM(1,1)。

即人均生态足迹的 GM(1,1) 模型为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 33.939\ 707e^{0.076\ 209k} - 31.668\ 093 \quad (7)$$

人均生物承载力的 GM(1,1) 模型为:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = -116.609\ 457e^{-0.012\ 585k} + 118.068\ 05 \quad (8)$$

对人均生态足迹和人均生物承载力的 GM(1,1) 模型分别进行检验, 得到结果如表 4 所示, 平均相对误差分别为 4.592 898% 和 0.839 842%, 后验差比值  $c$  分别为 0.210 662 和 0.243 494, 小误差概率  $p$  均为 1, 表明其灰色预测模型的精度均为一级标准, 具有较高的可信度。

3.4.2 生态足迹和生物承载力预测 2014—2020 年张家口市人均生态足迹、人均生物承载力及人均生态赤字的预测结果详见表 4, 2014—2020 年张家口市人均生态足迹逐年增加, 由 5.758 883 hm<sup>2</sup> 增加到 9.097 473 hm<sup>2</sup>, 增加了 3.338 590 hm<sup>2</sup>, 年均增长 8.28%; 生物承载力逐年减少, 由 1.285 867 hm<sup>2</sup> 减少到 1.207 447 hm<sup>2</sup>, 减少了 0.093 521 hm<sup>2</sup>, 年均减少 1.04%, 以上结果将导致生态赤字逐年加大, 表明张家口市对资源的消费量已经大大超过了本地的生物承载力, 人地关系日益紧张, 生态环境处于不安全状态, 生态发展状态不可持续。

表3 张家口市2003—2013年人均生态足迹和人均生物承载力实际值与预测值比较

年份	人均生态足迹/hm <sup>2</sup>			人均生物承载力/hm <sup>2</sup>		
	实际值	预测值	残差	实际值	预测值	残差
2003	2.271 614	2.271 614	0.000 000	1.460 591	1.460 591	0.000 000
2004	2.592 383	2.687 616	0.095 233	1.453 291	1.458 319	0.005 028
2005	2.785 557	2.900 444	0.114 887	1.445 991	1.440 081	-0.005 910
2006	3.252 362	3.130 123	-0.122 239	1.426 421	1.422 071	-0.004 350
2007	3.714 098	3.377 992	-0.336 106	1.422 498	1.404 286	-0.018 212
2008	3.728 246	3.645 488	-0.082 758	1.392 081	1.386 724	-0.005 357
2009	3.446 173	3.934 167	0.487 994	1.342 831	1.369 381	0.026 550
2010	4.378 994	4.245 705	-0.133 289	1.332 636	1.352 256	0.019 620
2011	4.666 311	4.581 915	-0.084 396	1.329 427	1.335 343	0.005 916
2012	4.821 119	4.944 747	0.123 628	1.323 277	1.318 644	-0.004 633
2013	5.419 012	5.336 311	-0.082 701	1.321 032	1.302 153	-0.018 879
相对平均误差/%		4.592 898			0.839 842	
精度/%		95.407 102			99.160 158	
后验差比值 <i>c</i>		0.210 662			0.243 494	
小误差概率 <i>p</i>		1.000 000			1.000 000	

表4 张家口市2014—2020年人均生态足迹和人均生物承载力预测

年份	人均生态足迹/hm <sup>2</sup>	人均生物承载力/hm <sup>2</sup>
2014	5.758 883	1.285 867
2015	6.214 917	1.269 786
2016	6.707 063	1.253 906
2017	7.238 183	1.238 224
2018	7.811 359	1.222 739
2019	8.429 926	1.207 447
2020	9.097 473	1.192 346
变化量	3.338 590	-0.093 521
年均变化率/%	8.28	-1.04

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

随着张家口市经济的快速发展,工业化和城镇化进程的加快,以及人口的不断增长,人们对各种生物产品、农业资源及各类服务的消费需求不断加大,如张家口市2003年人均生态足迹为2.271 6 hm<sup>2</sup>,高于全国水平(1.580 0 hm<sup>2</sup>)<sup>[20]</sup>,特别是2003年以来,张家口市人均生态足迹与全国人均生态足迹的差距日渐拉大。与其它生态脆弱区,如天山北坡经济带<sup>[21]</sup>、宁夏<sup>[22]</sup>、内蒙古锡林郭勒盟<sup>[23]</sup>、甘肃民勤绿洲<sup>[2]</sup>地区相比,张家口市人均生态足迹均高于这些地区相应年份的值,而人均生物承载力均小于这些地区相应年份的值,相应地,其人均生态赤字也高于这些地区。可

见,与全国及类似地区比较而言,张家口市过度消费了自然资源,生态环境更加脆弱,自然资源供需矛盾更加突出,严重制约着区域可持续发展,应引起高度重视。

要实现张家口市生态持续发展,维持生态系统良性循环,应从以下几个方面加强政策引导和管理:(1)人口发展方面。适当控制人口增长速度,提高人口素质;改善消费环境,转变消费模式和消费观念,提高居民生活质量;(2)产业发展方面。抓住京津冀一体化发展的机遇,利用京津的人才、技术、资金等,促进产业结构优化升级,发展循环经济,提高资源利用效率,开发新型能源;结合当地资源优势 and 生态特色,发展蔬菜、马铃薯、杏扁等高效生态特色农业,发展冬季滑雪、草原避暑、始祖文化等生态特色旅游;(3)生态发展方面。继续贯彻退耕还林还草政策,推广舍饲养殖,增加生态用地面积;合理开发利用山地丘陵区草地、林地资源,减少对草原、森林生态系统的破坏;(4)城市发展方面。合理规划建设用地范围,协调工业化、城镇化发展与生态环境保护之间的关系,实现人口、经济、资源与环境的协调可持续发展。

本研究基于现有生产力及科技水平对张家口市生态足迹与生物承载力进行预测,如何考虑社会经济、科学技术、农业现代化等因素不断变化对生物生产性土地的供需关系,即对未来生态足迹变化趋势产生的影响,有待今后进一步研究。

### 4.2 结论

2003—2012年张家口市人均生态足迹持续增

加,而人均生物承载力逐渐减少,因而造成生态足迹供给需求难以平衡,主要依靠消耗存量资本以维系自身发展,生态赤字现象始终存在,且人均生态赤字量不断增长,当地生态环境的压力与日俱增。此外,人均生态足迹深度与人均生态足迹广度不断上升,表明张家口市经济发展对自然资本存量与流量的消耗程度日渐加大,生态环境处于不可持续发展状态。经预测,到 2020 年,张家口市人均生态足迹将逐年增加,人均生物承载力逐年减少,人类需求与环境供给能力矛盾日益突出,亟需缓解生态环境压力,提高可持续发展能力。

在各类生物生产性土地中,化石燃料土地人均生态足迹与人均生态赤字均不断增加,已成为全市人均生态足迹的最主要构成,体现了张家口市经济发展主要靠高能耗、高污染的工业经济推动,消费模式相对单一,煤炭、铁等能源消耗占主要地位。除草地和水域以外,耕地、林地和建筑用地等流量资本能够满足张家口消费需求,其中耕地、草地和林地人均生态足迹均呈增加趋势,耕地和林地表现为生态盈余。草地资源的过度使用造成其生态赤字现象日益严重,发展最不可持续。建筑用地人均生态足迹整体上呈增加趋势,人均生物承载力与人均生态盈余持续减少。水域人均生态赤字先波动减少再不断增加,人均生态足迹深度波动增加,这与该市水域面积不断减少相关。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 岳书平,闫业超,张树文. 30 年来中国东北样带生态可持续性的时空分异[J]. 自然灾害学报,2010,19(3): 31-37.
- [2] 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,2010,24(6):32-36.
- [3] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析:选取 11 个国家为数据源[J]. 生态学报,2015,35(11):3766-3777.
- [4] 方炫,刘德林,曹阳,等. 陕西省人均生态足迹动态变化及驱动模型研究[J]. 水土保持通报,2013,33(4):54-58.
- [5] Ree W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [6] Wackernagel M, Rees W E, Testemale P. Our ecological footprint: Reducing human impact on the earth[J]. Population and Environment, 1996, 1(3): 171-174.
- [7] McDonald G W, Patterson M G. Ecological Footprints and interdependencies of New Zealand regions[J]. Ecological Economics, 2004, 50(1/2): 49-67.
- [8] 徐中民,程国栋,张志强. 生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法:以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例[J]. 生态学报,2001,21(9):1484-1493.
- [9] 许月卿. 基于生态足迹的北京市土地生态承载力评价[J]. 资源科学,2007,29(5):37-42.
- [10] 孟丽红,叶志平,袁素芬,等. 江西省 2007—2011 年水资源生态足迹和生态承载力动态特征[J]. 水土保持通报,2015,35(1):256-261.
- [11] Niccolucci V, Galli A, Reed A, et al. Towards a 3D national ecological footprint geography[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J]. 地理学报,1996,51(5):553-557.
- [15] 祁新华,叶士琳,程煜,等. 生态脆弱区贫困与生态环境的博弈分析[J]. 生态学报,2013,33(19):6411-6417.
- [16] 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.
- [17] 张芳怡,濮励杰,张健. 基于能值分析理论的生态足迹模型及应用:以江苏省为例[J]. 自然资源学报,2006, 21(4):653-660.
- [18] 赖红松,祝国瑞,董品杰. 基于灰色预测和神经网络的人口预测[J]. 经济地理,2004,24(2):197-201.
- [19] 刘晶. 能值生态足迹的灰色预测模型及应用研究[D]. 甘肃 兰州:兰州大学,2010.
- [20] 黄宝荣,崔书红,李颖明. 中国 2000—2010 年生态足迹变化特征及影响因素[J]. 环境科学,2016,37(2): 420-426.
- [21] 向秀容,潘韬,吴绍洪,等. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测[J]. 地理研究,2016,35(5):875-884.
- [22] 马明德,马学娟,谢应忠,等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报,2014,34(3): 682-689.
- [23] 杨艳,牛建明,张庆,等. 基于生态足迹的半干旱草原区生态承载力与可持续发展研究:以内蒙古锡林郭勒盟为例[J]. 生态学报,2011,31(17):5096-5104.