

DOI: 10.5846/stxb201601310224

靳相木.基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究——以温州市为例.生态学报,2017,37(9): - .

Jin X M, Liu Q K. Analysis of a land carrying capacity index based on an expanded three-dimensional ecological footprint model: a case study of Wenzhou. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

基于三维生态足迹模型扩展的土地承载力指数研究 ——以温州市为例

靳相木, 柳乾坤*

浙江大学土地与国家发展研究院, 杭州 310058

摘要:生态足迹模型是土地承载力评价的重要方法。通过将 Niccolucci 三维生态足迹模型中足迹深度的取值范围从大于等于 1 扩展到大于等于 0, 将生态盈余状态的分析纳入一个统一的三维模型框架, 实现了自然资源消费对资源流量和资源存量占用程度在核算上的统一。以温州市为例, 运用扩展后的三维模型计算了 2000—2012 年间温州市的生态足迹、足迹深度、生态赤字(盈余)。在此基础上, 引入粮食压力指数、水资源压力指数、碳汇压力指数、建设压力指数和土地综合负担指数等土地承载力评价指标, 判断当前市域土地是否处于超载状态, 以及超载程度。研究表明: 2000—2012 年间, 温州市人均生态足迹从整体呈逐年上升的趋势, 人均生态生产性土地面积基本保持不变, 生态赤字严重且逐年上升, 温州市土地承担着巨大压力; 2000—2012 年间温州市足迹深度在 4—6 之间, 自然资源流量远远不能满足自然资源需求, 需要消耗大量的自然资源存量来支撑当前的发展和消费; 温州市粮食压力指数、水资源压力指数、碳汇压力指数、土地综合压力指数均大于 1, 耕地、水域、林地均处于超载状态, 且自 2000 年以来, 温州市土地所承载的自然资源消费压力是其承载能力的 4 倍以上。

关键词:三维生态足迹模型; 足迹深度; 扩展; 土地承载力评价

ANalysis of a land carrying capacity index based on an expanded three-dimensional ecological footprint model: a case study of Wenzhou

JIN Xiangmu, LIU Qiankun*

Land Academy for National Development, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: The ecological footprint method was initially proposed by Rees in the early 1990s, and Wackernagel and Niccolucci subsequently developed this method into two-and three-dimensional models. Ecological footprint models, as tools to estimate the appropriation of natural resources by humans, are important to evaluate the land carrying capacity. Using the three-dimension model, this paper expanded the footprint depth value range from ≥ 1 to ≥ 0 , and the ecological deficit and remainder were then analyzed. Using a modified three-dimensional model, the ecological footprint, footprint depth, and ecological deficit (remainder) in Wenzhou City were calculated from 2000 to 2012. On this basis, the food pressure, water pressure, carbon sink pressure, construction pressure, and land comprehensive load indexes were introduced to the indicator system of land carrying capacity, and the condition of load carrying of Wenzhou City was determined. The results showed that from 2006 to 2012, the ecological footprint per capita increased annually, and since the biologically productive land remained unchanged, the ecological deficit worsened and a greater load was imposed on the land in Wenzhou City. The footprint depth value ranged from 4 to 6, which meant that natural resource flows could not meet the demand of everyday residential consumption, and natural resource stocks were extensively depleted. The food pressure, water pressure, carbon

基金项目: 国家自然科学基金项目(71273226)

收稿日期: 2016-01-31; 网络出版日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuqiankun234@163.com

sink pressure, and land comprehensive load indexes were >1 , which indicated that arable land, sea, and forest were overloaded. Since 2000, the load, primarily from food and carbon sink pressures, imposed on biological productive land was three times greater than its carrying capacity.

Key Words: three-dimensional ecological footprint model; footprint depth; expansion; land carrying capacity evaluation

人类对土地承载力的认识,最早可以追溯到史前畜牧部落的生产实践^[1]。到了近代,随着西方学界提出了“人地关系论”、“地理决定论”和“人口论”等理论议题,对土地承载力的认识从生产实践提升到了理论概念的高度。到 20 世纪,尤其是二战结束后,学界对土地承载力的概念做了明确的定义,即在不损害土地生产能力的前提下,一个区域所能持续供养的最大人口数量,即主要探讨粮食生产对人口增长的限制作用^[2-3]。之后,随着社会经济的不断发展,粮食问题逐步得以解决,但人口膨胀,环境恶化等负面效应不断显现,对土地承载力的研究重点开始从耕地的粮食生产扩展到了水资源、气候资源等限制因素^[4-6]。总的看,这期间对土地承载力的研究,虽然有的文献考虑了除耕地之外的其他资源对人口增长的限制,但主要还是以土地的人口承载量来表征土地承载力,仍是以土地的养育功能为出发点,遵循的是一种“地→人”的评价路线。

随着社会的发展,人类可以通过科学技术进步、进口本地稀缺资源、消灭其他竞争物种等方式来大幅度提高上述所谓区域的人口承载量,因而区域土地的最大人口容量“天花板”经常被突破,试图探求土地最大人口容量的评价路线也随之失色。Catton 另辟路径,对土地承载力做了新的定义:土地承载力是区域所能持续承担的最大负担(Load),这个负担不仅是人口的函数,还是人均消费的函数^[7]。20 世纪 90 年代初,Rees 从土地最原始的生态系统底色出发,提出了生态足迹的概念,以度量这些“负担”:通过跟踪区域的资源消费,将它们转化为提供这些资源以及同化所产生废弃物所必须的各种生态生产性土地面积,这些土地面积叫做生态足迹^[8]。Wackernagel 将 Rees 的生态足迹概念进一步发展为二维生态足迹模型,通过将区域人口的生态足迹和区域内拥有的生态生产性土地面积大小进行比较,计算区域土地生态盈余或赤字状态,评价当前人类活动对区域自然资源的占用情况^[9]。随后,Niccolucci 等进一步引入和区分了自然资源流量和自然资源存量,提出了足迹广度和足迹深度两个新指标刻画人类活动对区域自然资源的占用情况,将传统生态足迹模型中二维平面分析拓展至三维时空分析,赋予了负担以时间维度^[10-11]。

三维生态足迹模型作为一维^①、二维模型的深化,它在继承一维模型用生态生产性土地面积来量化人口的自然资源消费负担、二维模型计算区域土地生态盈余或赤字状态的基础上,提出足迹广度和足迹深度概念,从时间尺度上形象表达区域土地生态盈余或赤字程度。生态足迹模型的这一深化发展,开拓了区域土地承载力评价的新视野,开创了突出生态底色的“人→地”的土地承载力评价路线^[12-14],与前述“地→人”的评价体系相得益彰。

本文通过扩展足迹深度的取值范围,对 Niccolucci 等提出的三维生态足迹模型作了扩展,并以温州市为例,基于扩展的三维生态足迹模型,构建土地承载力评价指数体系,计算了粮食压力指数、水资源压力指数、碳汇压力指数、建设压力指数和土地综合负担指数等相关指数,用于判断当前区域人口粮食消费、水资源消费、化石燃料消费、以及城市建设对区域生态的占用情况,以及土地承载力系统的超载程度。

1 评价模型及数据来源

1.1 三维生态足迹模型

Wackernagel 在 Rees 提出生态足迹概念的基础上,将其发展为二维生态足迹模型,并进行了详细介绍^[9]。

① Rees 所提出的生态足迹方法,用土地面积这一数值来表征自然资源消费对生态占用的大小。本文是从逻辑一贯性的角度,相对于 Wackernagel 的二维模型、Niccolucci 的三维模型而言,将 Rees 提出的生态足迹方法称为“一维”,故这里的“一维”是个“指称”,目的是行文的便利。

生态足迹的计算公式如下:

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{i=1}^n a_i = N \times \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{p_i} \quad (1)$$

$$ED = EF - BC \quad (2)$$

$$ER = BC - EF \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中: i 为消费商品的类型, p_i 为*i*种消费商品的全球平均生产能力, c_i 为*i*种商品的人均消费量, a_i 为人均*i*种商品折算的生物生产性土地面积, N 为人口数, ef 为人均生态足迹, EF 为总的生态足迹, ED 为生态赤字, ER 为生态盈余, BC 为区域所能提供的生态生产性土地面积。

Niccolucci 等在原有二维模型的而基础上,引入了足迹深度和足迹广度两个新的指标,以此来解释人类对自然资源流量和自然资源存量的占用情况,将传统二维模型的平面分析拓展至三维模型的时空分析,实现了生态足迹研究的纵向拓展^[10]。与二维模型引入区域所能提供的生态生产性土地面积来表征自然资源流量相比,在三维模型中引入自然资源存量的概念。自然资源存量是相对于自然资源流量而言的,当自然资源流量不能满足人类消耗时,额外的消耗来自于自然资源存量。

在 Niccolucci 等的三维生态足迹模型中,当生态足迹小于区域所能提供的生态生产性土地面积时,以足迹广度指标来表征人类活动对自然资源流量的占用程度,此时的生态足迹即为足迹广度;当生态足迹大于区域所能提供的生态生产性土地面积时,就会引入足迹深度指标来表征人类活动对自然资源存量的占用程度。足迹深度等于生态足迹与区域所能提供的生态生产性土地面积之比,该比值可以表示为满足区域发展需求,再生产人类一年中资源消费量所需要的年数。可以认为,足迹深度是一个在时间尺度上反映区域生态压力的指标。

生态足迹模型由二维向三维的演变过程如图 1 所示,在二维模型中(图 1a)存在以下关系:

$$EF = BC + ED \quad (4)$$

式(4)中, EF 为生态足迹, BC 为区域所能提供的生态生产性土地面积, ED 为生态赤字。

在模型演变过程中(如图 1),存在着以下关系:

若 $EF - BC < 0$,则:

$$EF_{size} = EF \quad (5)$$

若 $EF - BC > 0$,则:

$$EF_{size} = BC \quad (6)$$

$$EF_{depth} = \frac{EF}{BC} = 1 + \frac{EF - BC}{BC} = 1 + \frac{ED}{BC} \quad (7)$$

式(5)、(6)、(7)中, EF_{size} 为足迹广度, EF_{depth} 为足迹深度, $EF_{depth} \geq 1$ 。

1.2 三维生态足迹模型扩展

1.2.1 纳入自然资源流量结余核算的三维模型

二维生态足迹模型,通过对比生态足迹和区域所能提供的生态生产性土地面积,计算区域生态赤字或者盈余,来判断一个区域人类消费对自然资源的索取是否超过了区域自然资源的供给能力。三维生态足迹模型在二维生态足迹模型生态赤字或盈余计算结果的基础上,通过引入自然资源流量和自然资源存量的概念,构建足迹广度与足迹深度指标,表征一个区域自然资源消费对自然资源流量的占用情况和对自然资源存量的透支程度。Niccolucci 等的三维模型重点在于对生态赤字情况下自然资源存量透支程度的计量,而对生态盈余情况

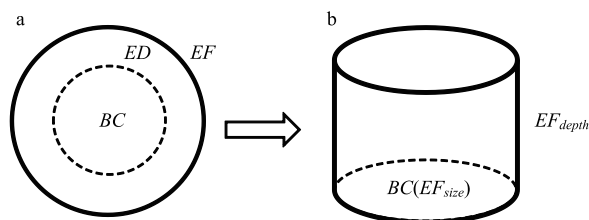


图 1 生态足迹模型由二维向三维的演变^[10]

Fig.1 Ecological footprint model evolving from two-dimension to three dimension

下自然资源流量的占用以及结余数量则未予涉及。因此,本研究通过将足迹深度的分析拓展至生态盈余情况,将自然资源消费对自然资源流量的占用程度也用足迹深度表征,将生态盈余情况统一到同一个三维模型框架中。

在 Niccolucci 等的三维模型中,足迹广度是一个二维平面概念,在生态盈余情况时,用足迹广度这个面积概念来表征生态足迹的大小(如图 2a)。而在本文扩展后的三维模型中,生态盈余情况时的生态足迹转以圆柱体体积的形式来表达,不再使用足迹广度这一指标。

扩展后的三维生态足迹模型如下所示(图 2b):

$$EF_{\text{depth}} = \frac{EF}{BC} \quad (8)$$

式(8)中, $EF_{\text{depth}} \geq 0$ 。

当 $0 \leq EF_{\text{depth}} < 1$ 时(如 M 点),

$$EF_{\text{depth}}^M = \frac{EF^M}{BC} \quad (9)$$

$$EF^M = BC \times EF_{\text{depth}}^M \quad (10)$$

式(9)、(10)中, EF_{depth}^M 表示 M 点时的足迹深度, EF^M 表示 M 点的生态足迹。此时处于生态盈余情况,自然资源流量存在结余。足迹深度表示自然资源消费对自然资源流量的占用程度,或者区域的生态生产性土地需要几分之一年的时间才能生产出人类所消费的自然资源流量。因此,扩展后的模型从时间尺度上对生态盈余情况进行了分析,以圆柱体体积来表征算自然资源流量结余数量即生态盈余的大小,实现了自然资源消费对自然资源流量占用情况的三维表征。计算如下:

$$ER^M = BC \times (1 - EF_{\text{depth}}^M) \quad (11)$$

式(11)中, ER^M 表示 M 点时的生态盈余大小,它表示自然资源流量除去自然资源消费后的结余数量。

当 $EF_{\text{depth}} = 1$ 时(如点 N),

$$EF^N = BC \quad (12)$$

式(12)中 EF^N 表示 N 点时的生态足迹。此时自然资源流量与自然资源消费数量相等,处于生态盈余与生态赤字的临界状态。

当 $EF_{\text{depth}} > 1$ 时(如 P 点),

$$EF_{\text{depth}}^P = \frac{EF^P}{BC} \quad (13)$$

$$EF^P = BC \times EF_{\text{depth}}^P \quad (14)$$

式(13)、(14)中, EF_{depth}^P 表示 P 点时的足迹深度, EF^P 表示 P 点时的生态足迹。此时处于生态赤字状态,人类自然资源消费耗尽了自然资源流量,并占用了自然资源存量。足迹深度表示自然资源消费对自然资源存量的占用程度,或者说区域生态生产性土地需要几年的时间才能生产出人类所消费的自然资源。生态赤字的计算如下所示:

$$ED^P = BC \times (EF_{\text{depth}}^P - 1) \quad (15)$$

式(15)中, ED^P 表示 P 点时的生态赤字大小, EF_{depth}^P 表示 P 点时的足迹深度。

扩展后的三维模型仍然视生态足迹为一个圆柱体,但与 Niccolucci 等的三维模型不同的是,将足迹深度的取值范围从 $EF_{\text{depth}} \geq 1$ 扩展到 $EF_{\text{depth}} \geq 0$,将足迹深度的分析延伸至生态盈余情况,通过计算自然资源消费对资源流量占用深度,与生态赤字情况下对自然资源存量的占用深度相联系,使得生态盈余与生态赤字两种状态的刻画融合为一体,弥补了 Niccolucci 等的三维模型中缺少生态盈余状态三维表达的缺陷,实现了自然资源消费对自然资源流量和自然资源存量占用程度在核算上的统一。扩展后的三维模型中,无论生态盈余,还是生态赤字情况,生态足迹均以圆柱体体积的形式来表征,可以十分便捷、直观地计算出生态赤字或者生态

盈余的大小。

1.2.2 地类间生态赤字和盈余的处理

通常,在二维和三维模型的应用中,均将自然资源的消费折算到 6 种生态生产性土地上,即:耕地、林地、草地、化石燃料用地、建设用地、水域。通过均衡因子,对 6 种地类的土地面积进行修正,对修正后的结果进行加总得到区域的生态足迹。因此,二维和三维模型计算出的是整个区域生态足迹,但各类生态生产性土地面积加总也就意味着不同类型土地的生产力以及功能存在替代关系。并且,由于生态足迹计算结果是 6 种地类面积之和,因而无法反映区域各地类的土地供求关系,不同地类土地的空间分布及结构是否合理等问题也都得不到体现^[15]。此外,也有学者认为,自然资源流量和自然资源存量属性不同,直接加总各地类的生态足迹会使得生态盈余抵消生态赤字,产生低估区域生态赤字的问题^[16-18]。故有学者建议,分地类核算生态足迹即可,并不需要给出总的生态足迹^[11,19-21]。

与扩展后的三维生态足迹模型的内在逻辑相一致,本研究坚持计算各个地类的足迹深度、生态赤字(或盈余),分析各地类当前的供需情况,旨在为调整区域土地结构以缓解资源需求压力提供指导;同时,坚持将所有地类资源看做一个整体,运用均衡因子调整后加和得到温州市生态足迹和生态生产性土地总面积,来计算温州市足迹深度,以此来表征温州市土地对当前人类活动的承载状况。这虽然在一定程度上忽视了不同类型土地在生态系统中各自功能的不可替代关系,但是经过均衡因子调整后的各类土地面积,实现了各类土地资源的功能在量纲上的统一,生态赤字和盈余加总有利于全面反映区域土地承载状态总体情况。

1.3 数据来源

生态足迹模型中,自然资源消费核算包括生物资源消费和能源消费两类。生物资源消费以日常消费的食物为主,如农产品、动物产品、水产品、水果和木材等,包括 4 类土地占用:耕地、草地、水域、林地等,各消费项目的折算系数采用联合国粮农组织计算的有关生物资源的世界平均产量标准。能源消费包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、天然气、热力、电力等,其中电力和热能的消费折算通过《中国能源统计年鉴 2010》中公布的标准煤系数折算成标准煤,根据全球平均标准煤能源足迹折算成建设用地面积;其他的化石能源消费折算为化石燃料用地,折算的标准采用世界上单位化石燃料生产土地面积的平均发热量标准。生物消费和能源消费的数据主要来自于《温州市统计年鉴》(2001—2013 年)。均衡因子采用 WWF 发布的《Living Planet Report 2008》^①中公布的 2005 年的数值,产量因子采用刘某承等计算的 2001 年中国各地类的产量因子^[22]。

温州市所能提供的生态生产性土地面积,根据 2001—2013 年温州市土地利用变更调查数据整理获得。

2 土地承载力指数构建

基于扩展的三维生态足迹模型,从自然资源消费对土地所施加的粮食压力、水资源压力、碳汇压力、建设压力出发,分别构建相对应的指数,建立土地承载力指数体系,用以评价当前土地对人类自然资源消费活动的承载状况,实现对前人提出的生态压力指数以及土地综合承载力指标体系进行进一步细分和完善^[23-24]。

2.1 粮食压力指数

粮食压力来源于人类对土地粮食产出的需求^[25-26]。理论上,一个区域所承受的粮食压力的大小与该区

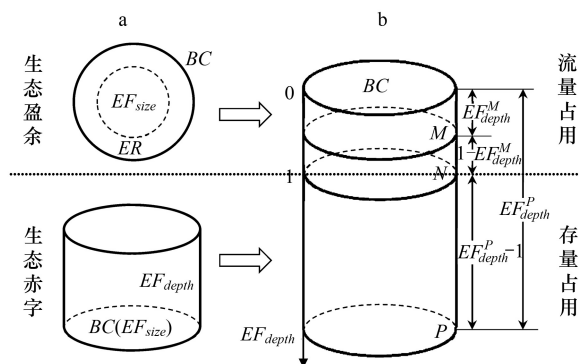


图 2 Niccolucci 三维模型的扩展

Fig.2 Expanding of Niccolucci's three-dimension model

① 世界自然基金会(WWF)自 2001 年起,每两年发布一次名为《Living Planet Report》的报告,其中对全球以及部分国家的生态足迹计算是其中的重要部分。

域人口数量和人均粮食需求量成正比,可表示为:

$$Gp = Ga \times P \quad (18)$$

式(18)中, Gp 表示一个区域的粮食压力, Ga 表示人均粮食年需求量, P 表示该区域的人口总量。

区域所能提供的粮食生产能力与该区域耕地面积和耕地生产能力成正比,可表示为:

$$Ga = Pa \times A \quad (19)$$

式(19)中, Ga 表示区域的粮食生产能力, Pa 表示单位面积耕地粮食产出量, A 表示该区域的耕地面积;

区域粮食压力指数与粮食生产能力成反比,与粮食压力成正比。可以表示为:

$$I_{\text{food}} = \frac{Gp}{Ga} = \frac{Ga \times P}{Pa \times A} = \frac{Pa}{A} = \frac{EF_{\text{depth}}^{\text{arable}}}{BC^{\text{arable}}} = EF_{\text{depth}}^{\text{arable}} \quad (20)$$

式(20)中, I_{food} 表示粮食压力指数,即耕地足迹深度 $EF_{\text{depth}}^{\text{arable}}$, EF^{arable} 和 BC^{arable} 分代表区域人口粮食消费的生态足迹和区域的耕地数量。

2.2 水资源压力指数

一个区域内土地所承担的水资源压力主要来自居民对水资源的需求。其中,对水资源的需求主要为直接生活生产用水和消费产品中包含的虚拟水^[27-28]。本研究参考生态足迹模型中对水资源消费账户的划分以及模型中所提出的生态生产性土地的概念,在计算水资源压力指数时,将生产水产品所需要的水资源数量作为区域水资源压力,区域内具有生态生产能力的水域所能提供的水资源数量作为区域水资源承载力。理论上,一个区域所支撑的水资源压力的大小与该区域人口数量和人均消费水产品所需用水量成正比。可表示为:

$$Wp = Wa \times P \quad (21)$$

式中: Wp 表示一个区域所承担的水资源压力, Wa 表示人均消费水产品所需用水量, P 表示该区域的人口总量。

一个区域内具有生态生产性功能的水域所能提供的水资源数量为该区域水资源的承载力,用 Ws 表示。与粮食压力指数类似,水资源压力指数与水资源承载力成反比,与水资源压力成正比,可表示为:

$$I_{\text{water}} = \frac{Wp}{Ws} = \frac{Wa \times P}{Ws} = \frac{\frac{Wa \times P}{S}}{\frac{S}{S}} = \frac{EF^{\text{sea}}}{BC^{\text{sea}}} = EF_{\text{depth}}^{\text{sea}} \quad (22)$$

式(22)中, I_{water} 表示水资源压力指数,即水域的足迹深度 $EF_{\text{depth}}^{\text{sea}}$, S 表示单位面积水域所能提供的水资源数量, EF^{sea} 和 BC^{sea} 表示水资源消费的生态足迹和区域水资源面积。

2.3 建设压力指数

人类活动对建设用地需求的数量越多,区域建设压力越大。建设压力指数可以用公式表示:

$$I_{\text{built-up}} = \frac{CD}{CS} = \frac{EF^{\text{built-up}}}{BC^{\text{built-up}}} = EF_{\text{depth}}^{\text{built-up}} \quad (23)$$

式(23)中, $I_{\text{built-up}}$ 表示建设压力指数,即建设用地的足迹深度 $EF_{\text{depth}}^{\text{built-up}}$, CD 表示建设用地需求量, CS 表示区域建设用地供给量, $EF^{\text{built-up}}$ 表示生态足迹中的建设用地部分, $BC^{\text{built-up}}$ 表示区域建设用地的面积。

2.4 碳汇压力指数

碳汇压力是指区域生物圈所承担的同化人类使用化石能源所排放的 CO_2 的压力。人类所排放的 CO_2 越多,区域生物圈所承担的碳汇压力越大。碳汇压力可以分别表示为:

$$Cp = Ea \times P \quad (24)$$

式(24)中, Cp 表示一个区域所承担的碳汇压力, Ea 表示人均 CO_2 排放量, P 表示该区域的人口总量。

林地主要承担同化 CO_2 的功能,林地面积越大,生物圈的碳汇能力越强。土地碳汇能力用一个区域林地所能同化的 CO_2 数量来衡量,用 Pa 表示。碳汇压力指数可以表示为:

$$I_{\text{sink}} = \frac{Cp}{Pa} = \frac{\frac{CP}{A}}{\frac{Pa}{A}} = \frac{EF^{\text{fossil}}}{BC^{\text{forest}}} = EF_{\text{depth}}^{\text{fossil}} \quad (25)$$

式(25)中, I_{sink} 表示碳汇压力指数,即化石能源用地的足迹深度 $EF_{\text{depth}}^{\text{fossil}}$, A 表示单位面积林地所能同化的 CO_2 数量, EF_{fossil} 表示化石燃料消费的生态足迹, BC^{forest} 表示区域林地的面积。

2.5 土地综合压力指数

在三维模型框架下,将区域人口的农产品消费、水资源消费、建设用地需求和二氧化碳排放等以各类生态生产性土地面积的形式进行量化,并通过均衡因子平衡各地类之间的生产力差异,将各地类土地面积进行加和,得到区域人口的生态足迹。在此基础上,引入土地综合压力指数对土地承载压力状况进行评价。土地综合压力指数可以用足迹深度表示,即

$$I_{\text{comprehensive}} = \frac{EF}{BC} = EF_{\text{depth}} \quad (26)$$

式(26)中, $I_{\text{comprehensive}}$ 表示土地综合压力指数,即区域足迹深度 EF_{depth} , EF 表示区域生态足迹, BC 表示区域所能提供的生态生产性土地面积。

3 计算结果与分析

3.1 生态足迹分析

根据世界环境与发展委员会的建议,在统计区域生态生产性土地面积时,需扣除 12% 的土地面积,用以保护生物多样性。参考 Wackernagel 对消费账户的划分,以及各消费账户对应的生态生产性土地类型,计算得出 2000—2012 年温州市生态足迹及其变化趋势如表 1、图 3 所示:

从整体上看,2000—2012 年间温州市的生态足迹从整体上呈逐年扩大的趋势,在 2012 年达到最高的 2.04 hm^2 /人。人均生态生产性土地面积基本保持稳定,维持在 0.36 hm^2 /人上下。生态足迹的增加,意味着温州市居民生活所消费自然资源越来越多,人类活动对土地生态系统的占用越来越大。对比人均生态足迹和人均生态生产性土地面积,可以明显看出,当前温州市土地的自然资源供给能力,即土地承载力,已经难以支撑当前的消费水平和发展程度,人类施加给生态系统的压力已经大大超过了生态系统所能承担的负荷。

分地类来看,温州市生态足迹中耕地部分基本保持稳定,13 年间一直维持在 0.33 hm^2 /人上下。生态足迹中的草地和水域呈不断扩大的趋势,水域部分 2012 年达到最高的 0.91 hm^2 /人,相比最低的 2000 年 0.75 hm^2 /人,人均扩大了 0.16 hm^2 。在 Wackernagel 所建立的地类—消费矩阵中,耕地、草地和水域分别扮演着为人类提供粮食、畜牧产品、水产品的角色,生态足迹中耕地部分保持不变,草地和水域部分的扩大说明了温州市居民最基本的粮食需求已经得到满足,吃饭问题已经不是限制居民生活水平提高的主要因素,居民生活进入了改善饮食结构、提升饮食质量的阶段。

林地发挥着为人类提供果类和木材等生物资源的功能,也承担着同化燃烧化石燃料产生的 CO_2 的功能。在生态足迹的计算中,分别计算木材消费的生态足迹以及化石燃料消费的生态足迹。而在区域生态生产性土地面积的统计中,不对林地中提供木材和同化 CO_2 的部分进行区分,默认所有林地均具有此两种功能。计算结果显示,2000 到 2012 年间,温州市人均林木产品的消费量基本保持不变,林木产品消费的生态足迹维持在 0.15 hm^2 /人。在此期间,化石能源消费的生态足迹呈逐年扩大的趋势,并在 2012 年达到最高的 0.52 hm^2 /人,与最低时期 2000 年的人均 0.14 hm^2 相比,增加了 2.7 倍。从生态足迹中林地和化石能源用地的大小及变化情况可以看出,人类所消费的化石能源数量的增长速度要大大高于生物资源,区域内林地同化 CO_2 的压力越来越大。

2000—2012 年间,温州市生态足迹中的建设用地部分呈扩大趋势,而建设用地面积较为稳定,增加较少。这与温州市城市的发展、居民居住需要越来越多的建设用地,而温州市为保证了耕地红线、生态用地红线不被

打破,相关规划对建设用地数量做了严格管控有关。

表 1 2000—2012 年温州市人均生态足迹 (hm²)

地类 Land use categories	2000		2002		2004		2006	
	EF	BC	EF	BC	EF	BC	EF	BC
耕地 Arable land	0.3261	0.0521	0.3458	0.0507	0.3395	0.0501	0.3386	0.0476
草地 Pasture	0.0197	0.0010	0.0205	0.0010	0.0234	0.0010	0.0207	0.0010
林地 Forest	0.1488	0.0637	0.1502	0.0640	0.1516	0.0633	0.1499	0.0679
化石燃料用地 Fossil energy land	0.1389	0.0637	0.1875	0.0640	0.3457	0.0633	0.3810	0.0679
水域 Sea	0.7454	0.1561	0.7917	0.1561	0.8453	0.1559	0.8083	0.1501
建设用地 Built-up area	0.0006	0.0081	0.0007	0.0078	0.0012	0.0079	0.0044	0.0092
总计 Total	1.4741	0.3674	1.6022	0.3643	1.8105	0.3613	1.8369	0.3675

地类 Land use categories	2008		2010		2012	
	EF	BC	EF	BC	EF	BC
耕地 Arable land	0.3223	0.0466	0.3306	0.0472	0.3318	0.0461
草地 Pasture	0.0197	0.0010	0.0216	0.0009	0.0240	0.0009
林地 Forest	0.1502	0.0665	0.1495	0.0664	0.1506	0.0651
化石燃料用地 Fossil energy land	0.3902	0.0665	0.5181	0.0664	0.5164	0.0651
水域 Sea	0.8376	0.1500	0.8760	0.1492	0.9149	0.1491
建设用地 Built-up area	0.0039	0.0091	0.0052	0.0092	0.0051	0.0093
总计 Total	1.8210	0.3614	2.0167	0.3623	2.0364	0.3569

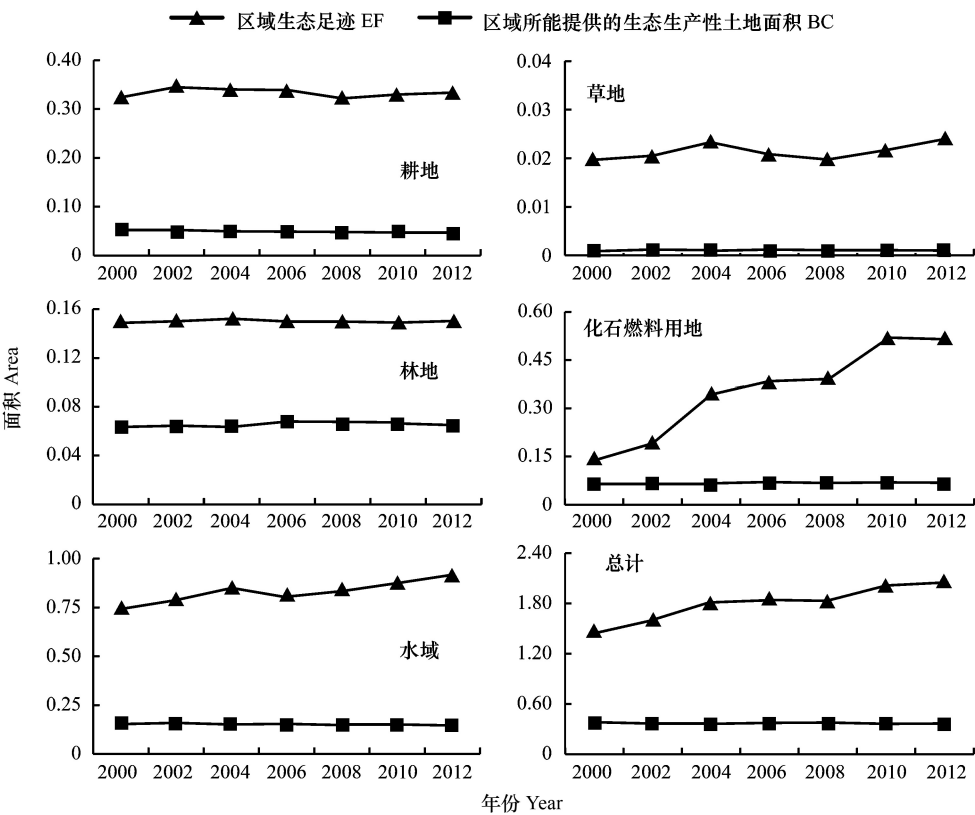


图 3 温州市生态足迹与区域生态生产性土地面积变化趋势 (hm²)

Fig.3 Changing of ecological footprint and regional biological productive land area of Wenzhou

3.2 足迹深度分析

温州市 2000—2012 年的生态足迹深度的计算结果如表 2 所示。温州市足迹深度在 4 到 6 之间变化,也就是说,温州市的自然资源流量远远不能支撑其自然资源消费,所消耗的自然资源存量相当于温州市土地面积的全球平均生物生产空间 3—5 年的自然资源积累。分地类看,耕地、草地、林地、化石燃料用地和水域的足迹深度均大于 1。其中,耕地的足迹深度自 2002 年以来稳定在 7 左右,即要实现温州市区域粮食的足迹自足,还需要 7 倍于当前的耕地面积,或者需要消耗 7 年耕地上所生产的自然资源。由于温州市地处山地丘陵地区,林地面积较大,草地面积较小,林木产品的供给能力较强,畜牧产品供给能力较弱,且由于温州市居民较高的生活水平,林地的足迹深度仍然在 2 之上,草地的足迹深度在 2002 年突破 20 并呈逐年增大的趋势。化石燃料用地的足迹深度 2002 年以前在 3 以下,而自 2004 年以来大幅增大,从 2004 年的 5.46 增大至 2012 年的 7.92,并成为温州市足迹深度的主要来源之一。虽然温州市林地面积较大,但其较高的经济发展水平以及高能耗的生产、生活方式,使得现有的林地远不能同化区域所排放的 CO_2 。2000—2012 年间,水域的足迹深度一直维持在较大的数值,且逐年增大,温州市居民在日常饮食中对水产品偏好明显是水域的生态足迹深度较大的主要原因。在表 1 中,建设用地生态足迹始终小于温州市建设用地数量,这是因为生态足迹模型中假设建设用地都是占用耕地,而在温州市实际情况中,很多建设用地是来自较低生产能力的林地、草地和滩涂,这实际高估了温州市建设用地的承载能力。有学者认为,基本模型中,生态足迹中建设用地部分总是等于区域实际建设用地,因为本质上两者都同指建筑设施已实际占用的生物生产性土地^[29]。因此,本研究亦将温州市生态足迹中的建设用地部分与温州市实际建设用地面积做等同处理,从而建设用地足迹深度始终为 1(参见表 2)。

表 2 2000—2012 年温州市足迹深度

Table 2 Footprint depth of Wenzhou from 2000 to 2012

地类 Land use categories	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012
耕地 Arable land	6.2655	6.8141	6.7822	7.1146	6.9123	7.0045	7.1964
草地 Pasture	19.3493	20.1804	23.2824	20.8770	20.2787	23.0053	26.3471
林地 Forest	2.3377	2.3478	2.3950	2.2089	2.2580	2.2531	2.3117
化石燃料用地 Fossil energy land	2.1824	2.9315	5.4604	5.6150	5.8684	7.8075	7.9279
水域 Sea	4.7739	5.0729	5.4210	5.3842	5.5826	5.8707	6.1360
建设用地 Built-up area	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
总计 Total	4.0123	4.3981	5.0110	4.9978	5.0384	5.5669	5.7054

3.3 生态盈余与生态赤字分析

在扩展后的三维模型框架下,通过足迹深度计算,实现了生态盈余或赤字三维分析的统一。土地作为自然资源的母体,生态盈余与生态赤字反映了人类自然资源消费活动对生态生产性土地的需求是否超出区域供给,以及结余或超出部分的大小。

参照图 2,根据表 2 中足迹深度的计算结果,运用公式(11)、(15),对 2000 至 2012 年间温州市的生态盈余或赤字进行了计算,计算结果如表 3 所示。2000 至 2012 年间,温州市总体上始终处于生态赤字状态,且生态赤字不断增加,在 2012 年达到最高 $1.68\text{hm}^2/\text{人}$,相比 2000 年的 $1.11\text{hm}^2/\text{人}$,增加了 51.76%。从整体上看,温州市的生态赤字较严重,自然资源消费已经超过自然资源流量,维持温州市的发展需要消耗自然资源存量或者从国内其他区域甚至是国外输入自然资源,当地的自然资源流量远远不能满足当前温州市的生活、发展水平,温州市的土地承载力面临着严峻的挑战。

从各个地类上看,6 类生态生产性土地中,除建设用地以外,其他 5 种地类均处于生态赤字状态。其中,耕地、草地、林地的赤字基本保持稳定,化石燃料用地、水域的生态赤字则逐年增加,这与温州市居民对粮食、畜牧产品、林木产品稳定的需求,而对水产品、化石能源不断增加的消费量有关。

表 3 2000—2012 年温州市生态赤字(盈余)表(hm²)Table 3 Ecological deficit (remainder) of Wenzhou from 2000 to 2012(hm²)

地类 Land use categories	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012
耕地 Arable land	-0.2741	-0.2950	-0.2894	-0.2910	-0.2757	-0.2834	-0.2857
草地 Pasture	-0.0187	-0.0195	-0.0224	-0.0197	-0.0187	-0.0207	-0.0231
林地 Forest	-0.0852	-0.0862	-0.0883	-0.0820	-0.0837	-0.0832	-0.0854
化石燃料用地 Fossil energy land	-0.0753	-0.1236	-0.2824	-0.3132	-0.3237	-0.4518	-0.4513
水域 Sea	-0.5892	-0.6356	-0.6894	-0.6582	-0.6875	-0.7268	-0.7658
建设用地 Built-up area	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
总计 total	-1.1067	-1.2379	-1.4492	-1.4694	-1.4596	-1.6544	-1.6794

生态赤字用负数表示,生态盈余用正数表示

3.4 土地承载力指数分析

根据公式(20)、(22)、(23)、(25)、(26),计算得出温州市 2000—2012 年各指数值,如表 4。

表 4 2000—2012 年温州市土地承载力指数

Table 4 Land carrying capacity index of Wenzhou from 2000 to 2012

土地承载力指数 Land carrying capacity index	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012
I_{food}	6.2655	6.8141	6.7822	7.1146	6.9123	7.0045	7.1964
I_{water}	4.7739	5.0729	5.4210	5.3842	5.5826	5.8707	6.1360
I_{sink}	2.1824	2.9315	5.4604	5.6150	5.8684	7.8075	7.9279
$I_{\text{built-up}}$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$I_{\text{comprehensive}}$	4.0123	4.3981	5.0110	4.9978	5.0384	5.5669	5.7054

2000—2012 年,温州市粮食压力指数从 6 逐渐增加至 7,这说明,温州市耕地承载的压力较大,粮食消费已经超出区域耕地生产能力的 5—6 倍,这与温州市“七山二水一分田”自然禀赋以及居民较高的生活消费水平有关。居民对粮食需求的不断增加,以及耕地保护政策的贯彻落实,是温州市粮食压力指数逐年增加但增幅较小的主要原因。

温州市地处沿海地区,居民日常饮食中对水产品偏好明显,水产品在养殖过程中需消耗大量的水资源,因而温州市水资源压力指数较高。从 2000—2012 年间,水资源压力指数整体上呈上升趋势,2000 年为 4.77,到 2012 年达到最高的 6.14,这说明居民对水产品的消耗量越来越大,并且近几年温州市陆续开展围海造地工程,可利用的海洋资源趋于减少。因此,随着温州市水产品的消费量增加,水域面积的减少,温州市水资源超载程度将不断加重。

2000—2012 年,温州市林地的面积基本稳定,但使用化石燃料的数量却逐年增加,这使得碳汇压力指数不断升高,从 2000 年的 2.18 升高至 2012 年的 7.93,且自 2004 年以来温州市 CO₂排放量已经超过其同化能力的近 4—7 倍。在碳汇上,林地处于严重的超载状态。

2000—2012 年,温州市土地综合承载力指数逐年升高,由 2000 年的 4.01 升高至 2012 年的 5.71。这说明随着近几年温州市社会经济的快速发展,居民生活水平的不断提高,各类自然资源消费对土地造成的压力不断增加,土地的承载能力已经不能支撑当前自然资源消费,区域土地压力已经超出其土地承载力的 3—5 倍,土地处于严重的超载状态。或者说,要维持目前温州市的发展速度和消费水平,还需要 3—5 个当前温州市的土地面积来支撑。

减少土地负担、提升土地承载力是缓解温州市土地生态超载状态的两个最主要途径。减少食品浪费、控制温室气体排放,可以有效的缓解耕地、水域和林地的承载负担。严格控制建设用地数量占用耕地,坚守耕地红线,提高农业耕作水平以及对盐碱土壤进行改良,保证温州市耕地数量不减少,质量有提高,是提升耕地承载力水平的主要途径。减少林木砍伐,恢复荒山、荒草地的林草植被覆盖,保证林地数量有增加,以此提高温

州市林地对碳汇压力的承载能力。

4 结论与讨论

4.1 结论

基于扩展后的三维生态足迹模型,计算了温州市 2000—2012 年的生态足迹、足迹深度和生态盈余(赤字),实现了对温州市土地所承载的自然资源消费负担的测算。同时,在三维生态足迹模型框架下,建立粮食压力指数、水资源压力指数、碳汇压力指数、建设压力指数以及土地综合压力指数,对温州市土地承载力进行了评价。研究结果显示:

(1)2000—2012 年间,温州市人均生态足迹从整体上呈逐年上升的趋势,人均生态生产性土地面积基本保持不变,生态赤字逐年上升,并在 2012 年达到最高的 $1.68\text{hm}^2/\text{人}$ 。由此可见,温州市生态赤字严重,土地承担着巨大压力,土地所能提供的自然资源远远不能满足当前的生活水平和社会经济活动需要,土地承载力面临着严峻的挑战。其原因主要是温州市经济的发展和居民生活水平的提高对自然资源的需求不断增加,而温州市贫瘠的资源禀赋难以满足自然资源需求,这使得温州市发展和消费超过了土地承载能力而处于严重的生态透支状态。温州市只有通过动用自然资源存量或者通过贸易,从其他区域进口生态资源,才能来满足区域自然资源的需求。

(2)扩展后的三维生态足迹模型是在 Niccolucci 的三维模型基础上,通过拓宽足迹深度的取值范围,对自然资源存量和流量占用程度予以统一解释。2000—2012 年温州市人均足迹深度在 4—6 之间,自然资源流量远远不能满足日益膨胀的自然资源需求,需要消耗大量的自然资源存量来支撑当前的发展和消费。自然资源流量的大小用主要由自然禀赋决定,而人类自然资源消费对自然资源存量的占用程度受消费水平和社会经济发展水平的影响。温州市较高的消费水平和经济发展水平以及贫瘠的自然资源禀赋决定了,温州市只能通过消耗自然资源存量来支撑当前的自然资源消费。温州市土地超载程度严重,区域生产、生活对自然资源存量的占用程度较高,可能影响生态占用的代际公平。

(3)在扩展后的三维生态足迹模型的基础上,建立粮食压力指数、水资源压力指数、碳汇压力指数、建设压力指数以及土地综合负担指数,对温州市土地承载力进行评价。评价结果显示,温州市粮食压力指数、水资源压力指数和碳汇压力指数均大于 1,其耕地、水域和林地处于超载状态;土地综合负担指数在 4—6 之间,温州市的经济生产和居民生活对土地所施加的压力已经大大超过了土地的承载能力,其压力主要来自粮食消费和碳汇压力。

4.2 讨论

扩展后的三维模型将生态盈余状态的分析纳入了模型框架,消除了 Niccolucci 的模型使用的限制条件。基于扩展后的三维生态足迹模型的土地承载力评价,与其他研究中通过建立综合指标体系有所不同。生态足迹模型是通过生态生产性土地面积来量化当前的生态压力以及生态环境的支撑能力,面积数值不仅可以在不同区域之间进行对比,并且在三维模型中可以通过足迹深度对土地的承载状态赋予时间概念,更加形象地反映生态系统中人类的自然资源消费和土地的生态供给之间的关系。

需要说明的是,由于受到森林固碳能力数据的限制,本研究未能对林地中用于提供林木产品和同化 CO_2 部分进行区分,默认为所有的林地均具有提供林木产品和同化 CO_2 的功能。其次,有关生态足迹中水域部分的计算结果,其表征的是满足水产品生产所需的水域面积,并不涵盖生产生活中的淡水足迹和水污染足迹。再者,在建设用地足迹深度的计算中,尽管由于将生态足迹中建设用地部分和实际建设用地面积做等同处理,足迹深度始终为 1,但本研究土地承载力指数体系中仍保留建设压力指数,目的在于留出今后改进生态足迹中建设用地核算方法的空间。此外,三维生态足迹模型下,将研究区域看做一个封闭模型,假定所有的自然资源消费均由本区域提供,其排放物的吸纳同化也都在本区域土地上完成,没有考虑现实中区域间可以通过贸易实现自然资源流动。探索在开放系统下,区域间土地承载力的协作关系,是今后研究改进的一个重要方向。

参考文献 (References):

- [1] Evelyn J. Sylva; or A Discourse of Forest-Trees, and the Propagation of Timber in His Majesties Dominions. London: John Martyn, 1679.
- [2] Allan W. The African Husbandman. Edinburg: Oliver and Boyd, 1965.
- [3] Solow R M. Is the end of the world at hand?. Challenge, 1973, 16(1): 39-50.
- [4] Millington R, Gifford R. Energy and How We Live. Sydney: Australian UNESCO Seminar, 1973.
- [5] FAO. Potential Population Supporting Capacities of Lands in the Developing World. Rome: FAO, 1982.
- [6] UNESCO, FAO. Carrying Capacity Assessment with a Pilot Study of Kenya: A Resource Accounting Methodology for Exploring National Options for Sustainable Development. Paris, Rome: UNESCO, FAO, 1985.
- [7] Catton W R. Carrying capacity and the limits to freedom//XI World Congress of Sociology. New Delhi: Social Ecology Session, 1986.
- [8] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [9] Wackernagel M. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: a tool for planning toward sustainability [D]. Columbia: University of British Columbia, 1994.
- [10] Niccolucci V, Bastianoni S, Tiezzi E B P, Wackernagel M, Marchettini N. How deep is the footprint? A 3D representation. Ecological Modelling, 2009, 220(20): 2819-2823.
- [11] Niccolucci V, Galli A, Reed A, Neri E, Wackernagel M, Bastianoni S. Towards a 3D national ecological footprint geography. Ecological Modelling, 2011, 222(16): 2939-2944.
- [12] 王万茂, 李俊梅. 生态足迹分析法及其在持续性规划中应用研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 153-155.
- [13] 刘东, 封志明, 杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析. 自然资源学报, 2012, 27(4): 614-624.
- [14] 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.
- [15] Hanley N, Moffatt I, Faichney R, Wilson M. Measuring sustainability: a time series of alternative indicators for Scotland. Ecological Economics, 1999, 28(1): 55-73.
- [16] 方恺, Heijungs R. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700-1707.
- [17] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274.
- [18] 方恺. 基于改进三维生态足迹模型的自然资本利用特征分析——选取 11 个国家为数据源. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [19] 宋旭光. 生态占用测度问题研究. 统计研究, 2003, (2): 44-47.
- [20] 陈成忠, 林振山. 生态足迹模型的争论与发展. 生态学报, 2008, 28(12): 6252-6263.
- [21] 安宝晟, 程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析. 生态学报, 2014, 34(4): 1002-1009.
- [22] 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. 生态学杂志, 2010, 29(3): 592-597.
- [23] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析. 地理学报, 2005, 60(4): 597-606.
- [24] 王书华, 毛汉英. 土地综合承载力指标体系设计及评价——中国东部沿海地区案例研究. 自然资源学报, 2001, 16(3): 248-254.
- [25] 朱会义. 北方土石山区的土地压力及其缓解途径. 地理学报, 2010, 65(4): 476-484.
- [26] 朱红波, 张安录. 中国耕地压力指数时空规律分析. 资源科学, 2007, 29(2): 104-108.
- [27] 段锦, 康慕谊, 江源. 基于淡水资源账户和污染账户的生态足迹改进模型. 自然资源学报, 2012, 27(6): 953-963.
- [28] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 范晓秋. 水资源生态足迹计算方法. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286.
- [29] 周涛, 王云鹏, 龚健周, 王芳, 冯艳芬. 生态足迹的模型修正与方法改进. 生态学报, 2015, 35(14): 4592-4603.