

# 基于改进模型的区域生态足迹动态分析

## ——以江苏省南通市为例<sup>\*1</sup>

李莹<sup>1</sup> 林文鹏<sup>1,2\*</sup> 宗玮<sup>1</sup>

(1. 上海师范大学旅游学院, 上海 200234;

2. 上海师范大学城市发展研究院, 上海 200234)

**【摘要】** 20世纪90年代以来,生态足迹模型作为定量化可持续评价的重要理论方法得到了广泛的应用。基于传统生态足迹模型,结合遥感产品净初级生产力数据,构建了基于净初级生产力的生态足迹模型,调整了均衡因子和产量因子,并增加了污染物账户。在此基础上,应用传统模型和改进后的模型分别计算了南通市2000~2013年的生态足迹。结果表明:(1)传统生态足迹模型和改进模型下的南通市2000~2013年人均生态足迹都是稳步增长的,改进后的模型变化较小;(2)南通市2000~2013年生态承载力虽有所波动,但整体上呈下降趋势;(3)南通市连续14年出现生态赤字,从2000年的0.3086 hm<sup>2</sup>/人上升到0.5877 hm<sup>2</sup>/人,生态系统处于不安全状态,生态系统的稳定性降低。可见,改进的生态足迹模型能更准确地反映研究区自然资源利用状况。最后,针对南通市生态不安全状况,从土地结构、能源消费等方面提出减少生态足迹的建议。

**【关键词】** 生态足迹; 生态承载力; 净初级生产力; 模型修正; 南通市

**【中图分类号】** X22   **【文献标识码】** A   **【文章编号】** 1004-8227(2017)04-0500-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201704003

近年来,工业化、城市化不断发展,植被破坏、水土流失等环境和资源问题正威胁着人类的安全和自身的发展。在环境保护迫在眉睫的背景下,可持续发展成为人们的共识。自William Rees和Wackernagel于1992年提出有关生态足迹的概念以来<sup>[1]</sup>,生态足迹模型已经成为评价可持续发展程度的重要方法之一。目前,国内外学者对生态足迹的研究尚处于不断发展阶段<sup>[2]</sup>,一些有意义的方法和模型也正在逐步完善中<sup>[3]</sup>。

对于生态足迹模型的研究,国内学者已经取得了不少的成果。有对生态足迹的概念方法和优缺点等进行的,如张志强等<sup>[4]</sup>、杨开忠等<sup>[5]</sup>、翟胜等<sup>[6]</sup>介绍了生态足迹的理论模型及研究进展。还有对生态足迹的应用研究,如刘宇辉<sup>[7]</sup>、徐中民等<sup>[8]</sup>对中

<sup>1</sup> 收稿日期: 2016-08-25; 修回日期: 2016-09-23

**基金项目:** 国家自然科学基金(41571047) [The National Natural Science Foundation of China (41571047)]; 上海市自然科学基金项目(15ZR1431000) [The Shanghai Natural Science Fund (15ZR1431000)]

**作者简介:** 李莹(1993~),女,硕士研究生,主要从事城市生态与环境遥感研究。E-mail: liying\_505@163.com

\*通讯作者 E-mail: linwenpeng@163.com

---

国的生态足迹进行测算并分析了区域发展能力。安宝晟等<sup>[9]</sup>采用生态足迹模型对西藏 2005~2010 年的生态足迹和承载力进行了测算, 研究发现西藏生态足迹呈震荡式上升趋势。总的来说, 国内的研究大多是采用传统生态足迹模型, 主要参数也是采用全球的研究成果, 这样可能不是很符合本地区的实际情况。鉴于此, 一些学者对生态足迹模型进行了改进, 通过引入净初级生产力来更好地为生态足迹模型服务。如刘某承等<sup>[10~12]</sup>为实现本地化研究, 根据植被净初级生产力对中国及各地的均衡因子和产量因子进行了测算。方恺<sup>[13]</sup>通过建立基于净初级生产力的能源足迹模型对吉林省的能源足迹进行了研究, 并进行多因素分析。

目前利用 MODIS (中分辨率成像光谱仪) 数据, 根据植被的净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 对生态足迹进行的研究日益增加。本研究采用 2000、2005、2008 和 2010 年的 MODIS 数据, 计算出江苏省的均衡因子和南通的产量因子, 实现对生态足迹模型中均衡因子和产量因子的改进, 并对能源足迹计算方法进行调整, 另外增加了污染物账户的计算。然后基于改进的模型对南通市 2000~2013 年的生态足迹和生态承载力进行测算, 与传统模型进行比较验证, 并结合相关指标对南通生态足迹进行分析与评价, 提出促进南通可持续发展的合理建议。

## 1 研究区与数据

### 1.1 研究区概况

南通位于北纬  $31^{\circ} 41' \sim 32^{\circ} 43'$ 、东经  $120^{\circ} 12' \sim 121^{\circ} 55'$  之间 (图 1), 邻近长江和黄海, 与上海、苏州隔江相望, 和泰州、盐城接壤; 属于亚热带和暖温带季风气候, 气候温和、降雨丰沛; 全市总面积  $8001 \text{ km}^2$ , 土地资源和水产资源丰富, 物产种类众多。南通自从成为对外开放沿海城市之后, 经济发展迅速, 2013 年全市的生产总值达到 5038.9 亿元, 人均国内生产总值达 69050 元。

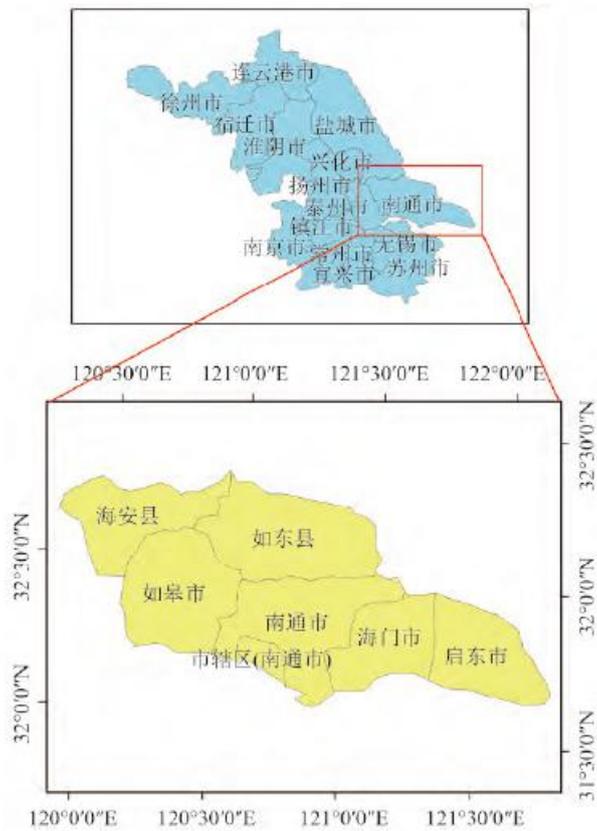


图1 研究区  
Fig.1 Study Area

## 1.2 数据来源及处理

本研究的NPP数据是采用ArcGIS 10.2软件对4年的江苏省1:10万土地利用数据(长江三角洲科学数据共享平台)和MOD17A3数据(美国国家航空航天局网, <http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)处理得到。MOD17A3数据的拟合模型为BIOME-BGC模型,空间分辨率为1km。因MOD17A3数据是以分图幅的形式保存的,需先利用美国国家航天局提供的MRT(Modis Reprojection Tool)软件进行拼接和重投影,选择Albers等积投影,然后通过剔除异常值、乘以比例因子等操作将MODIS数据转换为NPP实际值。利用中国基础地理信息矢量图中的江苏省行政区划矢量图对MODIS数据进行裁剪,选取2010年数据显示(图2)。由图可知:NPP从东南向西北递减,主要集中在 $500\sim 600\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,沿海地区的NPP值高于内陆。将江苏省土地利用图按照土地资源分类系统重分类,然后与裁剪后的图进行空间叠置分析,统计得到江苏省和南通市的6种土地类型的平均NPP及各类的面积。

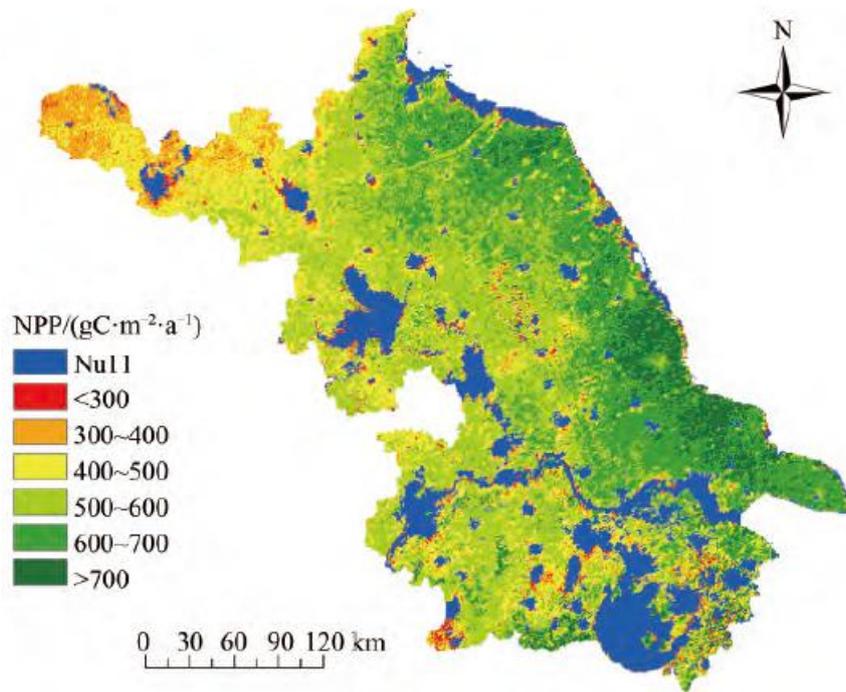


图2 2010年江苏省植被年NPP空间分布图

Fig.2 Vegetation NPP Spatial Distribution of Jiangsu Province in 2010

南通生物资源和能源数据来源于《南通统计年鉴》(2001 - 2014 年); 江苏省的平均产量数据为《江苏省统计年鉴》(2003 - 2014 年)上的生物资源消费数据和其对应面积之比; 南通污染物排放量来自《南通环境状况公报》(2002 - 2013 年)。生物资源项目主要包括农产品、林产品、畜产品和水产品四大类。能源项目包括原煤、焦炭、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气和电力。污染物账户项目包括二氧化硫、烟(粉)尘、生活垃圾、工业固体废弃物、生活废水、工业废水。其中生物资源项目中牛肉产自耕地和草地的产量比例为 86% : 14%, 羊肉为 67% : 33%, 牛奶为 74% : 26%, 分别将这 3 种项目按此比例划分到耕地和草地足迹中<sup>[14]</sup>。改进模型中, 畜产品包括禽蛋、禽肉、猪肉、兔肉、其他肉和产自耕地的牛肉、羊肉、奶类的平均产量采用中国农业科学院公布的粮食折算系数计算<sup>[15]</sup>, 草地部分的畜产品平均产量参照中国的平均产量值。传统模型中, 粮食、棉花、油料、糖料、蔬菜、果用瓜和水果的世界平均产量数据采用 FAO(联合国粮食及农业组织)库中 2000~2004 年的平均数; 蚕茧采用中国 2001 年的单产数据; 水产品采用谢鸿宇等<sup>[16]</sup>计算出的全球平均产量数据, 整理结果取整显示见表 1, 能源的全球平均产量和折算系数采用 Wackernagel<sup>[17]</sup>的数值。

表 1 世界平均产量数据(kg/hm<sup>2</sup>)

Tab.1 World Average Yield Data

消费项目	世界平均产量	消费项目	世界平均产量
谷物	3 150	其他肉	1 465
豆类	2 263	牛肉(耕地)	1 658
棉花	1 087	羊肉(耕地)	1 658
油料	1 605	奶类(耕地)	8 751
糖料	65 791	牛肉(草地)	33
蔬菜	17 135	羊肉(草地)	33
果用瓜	17 135	奶类(草地)	502
禽蛋	1 909	水产品	1 475
禽肉	1 465	水果	6 787
猪肉	1 050	蚕茧	711
兔肉	1 465		

## 2 方法

### 2.1 传统的生态足迹模型

#### 2.1.1 生态足迹的计算

生态足迹计算基于两个基本事实：一是可以确定人类对资源的消费量和所产生的废弃物数量；二是它们可以转换成对应的生物生产面积。生态足迹就是计算生产一定人口(个人、城市、国家)所消费的资源以及吸纳这些人口产生的废弃物所需的生物生产土地面积。生物生产土地面积主要有 6 种土地类型：可耕地、林地、草地、水域、化石燃料土地和建筑用地。计算公式为：

$$EF = N \times ef = N \times \sum r_i \frac{c_i}{p_i} \quad (1)$$

式中：N 为研究区域的总人口数量；ef 为人均生态足迹 (hm<sup>2</sup>/人)；r<sub>i</sub> 为均衡因子；c<sub>i</sub> 指第 i 种消费品的人均消费数量 (kg/人)；p<sub>i</sub> 为第 i 种消费品的平均产量 (kg/hm<sup>2</sup>)。

#### 2.1.2 生态承载力计算

某地区的生态承载力是指该地区能够提供的土地面积。计算公式为：

$$EC = N \times ec = (1 - 0.12) \sum a_i \times r_i \times y_i \quad (2)$$

式中：a<sub>i</sub> 为第 i 类土地的人均土地面积 (hm<sup>2</sup>/人)；r<sub>i</sub> 为均衡因子；y<sub>i</sub> 为产量因子；ec 为人均生态承载力 (hm<sup>2</sup>/人)；EC 为总生态承载力。

## 2.2 改进的生态足迹模型

生态足迹分析法因其简明形象、可操作性强，已经广泛应用于城市发展、土地利用规划、旅游等领域，但还存在不足之处<sup>[18]</sup>：<sup>19)</sup> (1) 参数的选取缺乏针对性。目前大部分的研究采用全球的成果，对于不同研究地区采用全球统一的均衡因子和产量因子不能准确地反映其生态足迹，达不到有效评价的目的。(2) “空间互斥性”这一假设违背基本事实。“空间互斥性”假设认为，土地功能是单一的互斥的，这样假设虽使得生态足迹模型容易理解，但它却违背了土地功能具有多样性的事实。研究发现各类土地类型都有一定的碳吸收能力<sup>[13]</sup>。(3) 生态足迹分析没有将污染物纳入考虑范围，忽视了污染账户对生态环境的影响。针对传统模型的不足，本研究进行了如图3所示的改进。

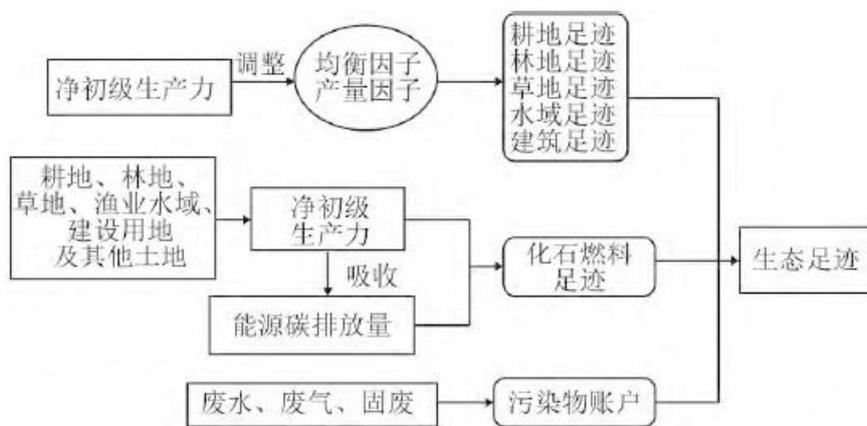


图3 改进模型的计算流程图

Fig.3 Calculation Flow Chart of Improved Model

### 2.2.1 均衡因子和产量因子的调整

本研究从“省公顷”角度出发来分析南通的生态足迹，以便进行省内地级市之间的对比。“省公顷”模型是指根据传统生态足迹模型，利用江苏省的平均生产力来计算均衡因子和产量因子<sup>[20]</sup>。某类土地的均衡因子为该类土地的平均生产力和省域各类土地的平均生产力之比。产量因子为区域某类土地的平均生产力和省域该类土地的平均生产力之比。本研究采用净初级生产力NPP来代表土地的生物生产力，是因为NPP指绿色植物在扣除自氧呼吸部分后，单位时间和面积所生产的有机物数量，它能够直接反映植物的生产能力，进而反映不同土地的生产力差别，从而能较准确地评估地区的发展状况。

NPP由耕地、林地、草地、水域4类土地各自的NPP及其面积加权求和得到，计算公式为：

$$\overline{NPP} = \frac{\sum_j (A_j \times NPP_j)}{\sum_j A_j} \quad (3)$$

式中： $A_j$ 为各类土地类型的面积( $m^2$ )。

江苏省耕地、林地、草地、水域 4 类土地均衡因子的计算公式为：

$$r_j = \frac{NPP_j}{NPP} \quad (4)$$

式中： $NPP_j$  为第  $j$  类土地类型的平均 NPP ( $gC/m^2 \cdot a$ )； $NPP$  为 4 类土地类型的平均 NPP ( $gC/m^2 \cdot a$ )。

南通耕地、林地、草地、水域 4 类土地产量因子的计算公式为：

$$y_i = \frac{NPP'_j}{NPP_j} \quad (5)$$

式中： $NPP'_j$  为南通各类土地类型的平均 NPP ( $gC/m^2 \cdot a$ )； $NPP_j$  为江苏省各类土地类型的平均 NPP ( $gC/m^2 \cdot a$ )。

### 2.2.2 基于净初级生产力的能源足迹改进方法

本研究考虑各类土地对二氧化碳的吸收作用而不仅仅是林地的吸收作用，以净初级生产力来表征各类土地类型的碳吸收能力，采用上文所述计算出的区域综合净初级生产力。能源足迹计算公式为：

$$EEF = N \cdot eef = \frac{Mc}{NPP} \quad (6)$$

式中：EEF 为能源足迹 ( $hm^2$ )； $N$  为人口数 (人)； $eef$  为人均能源足迹 ( $hm^2$ )； $Mc$  为能源碳排放量 (t)。

能源碳排放量的计算公式为<sup>[21]</sup>：

式中： $Qc_i$  为能源消费量 (t)； $NCV_i$  为能源净发热值 (TJ/Gg)； $A_i$  为能源缺省碳含量系数 (kg/GJ)； $B_i$  为缺省氧化碳因子； $1/1000$  为单位换算系数；能源燃料取值的参数来自 IPCC 报告<sup>[22]</sup>。

### 2.2.3 增加污染物账户

本研究将污染物分为废气、废水和固体废弃物。据相关研究表明<sup>[23]</sup>，林地对二氧化硫的平均吸纳能力为  $88.65 \text{ kg}/hm^2$ ，对烟粉尘的滞尘能力为  $10.11 \text{ t}/hm^2$ ；单位面积水域对废水的平均消纳量是  $365 \text{ t}/h \text{ m}^2$ ；单位面积固体废弃物可堆积量是  $10.9 \times 10^4 \text{ t}/hm^2$ 。计算公式为：

$$EF = \frac{Q_c}{AC} r_i \quad (8)$$

式中： $Q_c$ 为污染物的排放量(t)； $A_c$ 为各类土地对相应污染物的吸纳能力； $r_i$ 为均衡因子；EF为污染物生态足迹( $\text{hm}^2$ )。

### 3 结果与分析

#### 3.1 改进模型生态足迹计算分析

根据式(3)~式(5)计算得到2000、2005、2008和2010年的江苏省的均衡因子和南通的产量因子，中间年份的因子数据通过面积加权插补计算求得。对计算结果进行汇总(表2)，结果显示：南通人均生态足迹总体上呈现增长的趋势，从2000年的0.4228  $\text{hm}^2$ /人增长为2013年的0.6974  $\text{hm}^2$ /人，增长了65%。其中2005年和2010年增长较快，增幅分别为21.07%和17.75%，2007~2009年呈现下降趋势，其余年份增长相对较缓慢。2005年和2010年生态足迹的增加主要是因为化石燃料土地和建筑用地的增加，这两个年份分别处于“十五”规划和“十一五”规划的末尾之年，对南通的资源和能源消费总体有所增加，有政策方面的因素。

表2 基于改进模型的南通2000~2013年人均生态足迹汇总( $10^{-4}\text{hm}^2$ /人)

Tab.2 Footprint Summary of Nantong Based on the Modified Model During 2000–2013

年份	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	化石燃料土地	合计
2000	1 542.53	1 111.87	264.02	473.20	1.15	835.25	4 228
2001	1 489.97	1 092.09	282.76	485.33	1.39	958.84	4 310
2002	1 502.43	1 095.63	318.71	484.58	1.55	1 056.59	4 459
2003	1 719.88	1 028.25	330.09	438.19	1.67	1 108.67	4 627
2004	1 580.99	1 202.67	392.48	492.01	1.68	1 122.15	4 792
2005	1 621.71	1 458.05	423.02	521.72	4.46	1 772.74	5 802
2006	1 577.47	1 448.26	451.40	567.86	5.58	1 852.39	5 903
2007	1 607.57	1 305.19	271.51	584.48	6.76	1 959.69	5 735
2008	1 675.05	1 111.10	312.93	524.43	7.29	1 962.23	5 593
2009	1 676.89	1 052.75	331.77	539.83	7.91	1 930.82	5 540
2010	1 716.19	992.36	360.83	543.17	8.85	2 901.67	6 523
2011	1 700.23	1 156.27	360.29	672.79	9.25	3 143.40	7 042
2012	1 663.84	1 123.64	390.60	835.84	9.92	3 106.15	7 130
2013	1 641.67	1 014.36	410.18	782.35	10.54	3 114.93	6 974

从各土地类型足迹在总生态足迹的占比来看，2000~2013年耕地和林地的生态足迹比重总体呈下降趋势，而化石燃料土地的生态足迹比重总体呈上升趋势，同时建筑用地的占比也相对增加。这表明人类对化石能源的消费需求变大并且城市建筑面积也有所增加，这与城市化进程的加快有很大关系，城市的发展加剧了资源和能源的消耗，南通的生态系统压力也会随之增大。

#### 3.2 传统模型生态足迹计算分析

对传统模型生态足迹进行计算汇总(表3)可知，传统模型的生态足迹总体上是呈稳步增长的，从2000年的0.9624  $\text{hm}^2$ /人到2013年的2.1275  $\text{hm}^2$ /人，增长了1.21倍。其中2005年和2010年增长快速，增幅分别为25.64%和28.49%；其余年份增长缓慢，少数年份呈负增长。传统模型的结果说明人类对生物资源和能源的消费在增加，进而对生态系统的影响也在加大。

表3 基于传统模型的南通2000~2013年人均生态足迹汇总( $10^4\text{hm}^2/\text{人}$ )

Tab.3 Footprint Summary of Nantong Based on the Traditional Model During 2000–2013

年份	耕地	林地	草地	水域	建筑用地	化石燃料土地	合计
2000	5 571.20	106.10	131.80	182.20	2.30	3 630.50	9 624
2001	5 458.20	125.80	141.90	187.70	2.70	4 189.00	10 105
2002	5 435.90	136.40	159.40	192.30	3.00	4 618.50	10 546
2003	5 481.70	138.50	164.80	197.70	3.30	4 842.60	10 829
2004	5 704.40	140.70	195.20	210.60	3.30	4 908.20	11 162
2005	5 611.90	134.20	212.40	219.00	8.70	7 838.00	14 024
2006	5 675.10	165.30	220.90	229.10	10.90	8 405.10	14 707
2007	5 832.10	147.90	131.00	241.50	13.20	8 899.80	15 265
2008	6 123.10	139.80	146.80	242.90	14.30	9 139.20	15 806
2009	6 240.10	129.20	155.80	243.20	15.50	8 926.70	15 710
2010	6 386.70	133.80	170.50	252.50	17.30	13 225.90	20 187
2011	6 406.30	122.90	170.80	261.90	18.10	14 297.10	21 277
2012	6 484.30	119.50	185.30	270.40	19.40	14 118.40	21 197
2013	6 511.20	104.80	195.20	276.10	20.60	14 166.70	21 275

### 3.3 改进后模型与传统模型对比分析

将改进模型和传统模型的生态足迹进行对比,改进模型的结果明显比传统模型的结果小,仅为其 32.31%~43.93%,而且二者的绝对差距有增大的趋势,到 2013 年差距最大,为  $1.43 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,但二者的变化趋势基本一致,2005 年和 2010 年都是显著变化年份。

两种模型的结果存在一定的差异有两方面的原因:首先,是因为它们的前提条件不同,改进模型考虑了各类土地类型对二氧化碳的吸收能力,而传统模型则只考虑了林地的碳吸收。前提条件的不同导致均衡因子的选取和化石燃料的计算方法不同。对比改进模型和传统模型的均衡因子可知,耕地、林地数据较小,草地和水域的数据相差不大。计算得到的耕地的均衡因子为 1.12,相比 Wackernagel 和 WWF(世界自然基金会)公布的数据而言偏小。因为耕地是最具生物生产能力的土地且其绝对面积大,所以江苏省的四类土地平均生产力较高,进而导致改进模型中的生态足迹的结果偏小。其次,改进模型采用的是省公顷,而传统模型为全球公顷,比较生物资源的世界平均产量和江苏省平均产量,发现江苏省的数据偏高,所以结果有差距。对于面积不大的南通而言,采用江苏省的数据相对于全国的来说更精确些。

改进模型综合考虑了能源足迹和各类土地利用类型的关系,弥补了传统模型在土地利用方面的信息缺失,所以改进模型可以更真实地反映出南通的生态足迹变化情况,具有其合理性。

### 3.4 南通可持续发展动态分析与评价

对改进模型的生态足迹作相关评价指标计算(表 4),可知南通从 2000~2013 年一直存在生态赤字。2000 年的人均生态赤字为  $0.3086 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,2013 年达到  $0.5877 \text{ hm}^2/\text{人}$ ,生态赤字有增大的趋势,表明南通的生态系统处于不安全状态,区域发展为不可持续。

表 4 南通2000~2013年评价指标数据

Tab.4 Nantong Evaluation Index Data During 2000-2013

年份	人口数 (万人)	人均生态足迹 ( $\times 10^{-4} \text{hm}^2/\text{人}$ )	人均生态承载力 ( $\times 10^{-4} \text{hm}^2/\text{人}$ )	人均生态赤字 ( $\times 10^{-4} \text{hm}^2/\text{人}$ )	生态压力 指数	生态多样性 指数	万元GDP生态足迹 ( $\times 10^{-4} \text{hm}^2/\text{万元GDP}$ )
2000	784.53	4 228.03	1 142.40	3 085.63	3.70	1.46	4 603.20
2001	782.46	4 310.38	1 131.46	3 178.91	3.81	1.48	4 271.34
2002	780.26	4 459.48	1 141.87	3 317.62	3.91	1.49	4 021.77
2003	777.62	4 626.75	1 153.98	3 472.77	4.01	1.46	3 670.60
2004	773.79	4 791.98	1 161.96	3 630.02	4.12	1.49	3 101.00
2005	770.86	5 801.70	1 150.94	4 650.76	5.04	1.48	3 014.09
2006	769.79	5 902.97	1 098.42	4 804.55	5.37	1.49	2 540.86
2007	766.13	5 735.19	1 114.22	4 620.97	5.15	1.45	2 030.74
2008	763.72	5 593.05	1 066.26	4 526.79	5.25	1.44	1 647.25
2009	762.66	5 539.97	1 077.16	4 462.81	5.14	1.45	1 470.73
2010	762.92	6 523.07	1 084.04	5 439.03	6.02	1.37	1 435.97
2011	764.88	7 042.23	1 087.97	5 954.26	6.47	1.38	1 320.14
2012	765.2	7 129.99	1 093.16	6 036.83	6.52	1.41	1 196.81
2013	766.51	6 974.02	1 096.85	5 877.17	6.36	1.40	1 060.88

南通生态压力指数从2000年的3.701增加到2013年的6.358,生态压力指数连续14年都大于1,其中2005年和2010年的增幅较大,增幅分别为22.23%和17%,说明南通的生态系统压力在不断增大,2005年和2010年变化明显,生态系统的承受能力与人类的社会经济活动矛盾加剧。

南通生态多样性指数波动较大,但总体趋势是下降的,个别年份如2010年降幅较大,降幅为5.2%,2004年相比于上一年增长较大,为2.42%。生态系统的多样性与系统进化演替密切相关,多样性越高,系统越稳定<sup>[24]</sup>。南通的生态多样性指数呈下降趋势,表明南通的生态系统稳定性正在降低。

南通万元GDP(国内生产总值)生态足迹从2000年的0.4603  $\text{hm}^2/\text{万元}$ 下降到2013年的0.1061  $\text{hm}^2/\text{万元}$ ,平均年降幅10.51%。其中降幅又分为3个阶段:2000~2003年,降幅最小,平均年降幅为7.26%,2004~2009年,降幅较大,为13.95%,2010~2013年,降幅较小,为7.78%。万元GDP生态足迹能够直观地反映人类对资源的利用程度,数值越大,说明对资源的利用效率越低<sup>[25]</sup>。南通万元GDP生态足迹处于下降趋势,表明南通的资源消耗虽然有所增加,但由于经济和科技水平的提高,对资源的利用效率是越来越高的。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

本研究对传统模型作了三点改进:①调整均衡因子与产量因子,采用“省公顷”计算生物资源足迹,以体现出本地化研究;②利用净初级生产力计算化石能源足迹,落实到具体土地利用类型上,地域性强;③增加污染物账户以反映现实情况,更加合理。两种模型比较结果总体的变化趋势一致,改进模型的结果比传统模型小,主要是因为改进模型的参数和计算方法有所变化,改进模型的结果更符合南通的实际情况,能更有效地对南通的发展作出评价。

从改进模型的分析中发现,南通生态足迹总体上呈增长的趋势,耕地、林地和化石燃料土地的占比较大,耕地、林地比例在减少,而化石燃料土地的比例在增大。南通的生态承载力虽有所波动,总体是呈现下降的趋势。

(3)将生态足迹与相关指标结合起来对南通进行评价,发现南通连续14年出现生态赤字,生态压力指数不断攀高,生态系统处于不安全状态;生态多样性指数总体在降低,万元GDP生态足迹不断减少,说明生态系统不够繁荣,稳定性不高,但资源的利用效率是在不断提高的。

---

(4) 本文采用的 NPP 产品空间分辨率不高, 计算方法中也存在一定的不足, 在处理遥感数据和土地利用类型数据时存在一定的误差, 势必导致 NPP 计算结果的准确性不够, 在今后的研究中需要完善与提高。生态足迹分析方法一般适用于省级以上尺度研究, 用于市级的研究较少, 本文从净初级生产力角度出发研究生态足迹旨在为地区的可持续发展提供一定的参考, 更精细的改进方法仍有待进一步研究。

## 4.2 建议

针对南通市生态系统不安全的现状, 本文提出以下几点建议:

(1) 调整能源结构, 转变发展方式。南通化石燃料土地的足迹比重较大且处于增长状态, 应大力开发清洁能源如太阳能、风能、潮汐能等, 关闭能耗高、污染大的企业, 发展低污染、技术水平和产值高的产业。提高资源利用率, 发展循环经济, 促进区域的可持续发展。

(2) 规划土地利用, 加强生态建设。南通的生态承载力处于下降趋势, 因此要合理规划土地结构, 提高土地利用率, 保护耕地和增加绿色植被的覆盖率, 严格控制建设用地的规模。对于受污染地区, 控制污染物的排放量, 加强生态恢复建设, 改善区域生态环境。

(3) 提高科技创新, 促进对外交流。科技水平的提高可以推动产业的发展, 对外交流的加强可以引进先进的生产技术和管理经验, 进而提高资源的利用效率, 达到减少生态足迹的目的。

### 参考文献:

[1] REES W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121 - 130.

[2] 章锦河, 张捷. 国外生态足迹模型修正与前沿研究进展[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 196 - 203.

【ZHANG J H, ZHANG J. Research progress and model modification of ecological footprint[J]. Resources Science, 2006, 28(6): 196 - 203.】

[3] 陈成忠, 林振山. 生态足迹模型的争论与发展[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6252 - 6263.

【CHEN C Z, LIN Z S. Debate and development of ecological footprint model during the last 10 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6252 - 6263.】

[4] 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.

【ZHANG Z Q, XU Z M, CHENG G D. The concept of ecological 'footprints' and computer models[J]. Ecological Economy, 2000(10): 8 - 10.】

[5] 杨开忠, 杨咏, 陈洁. 生态足迹分析理论与方法[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 630 - 636.

【YANG K Z, YANG Y, CHEN J. Ecological footprint analysis: concept, method and cases[J]. Advances in Earth Science,

---

2000, 15(6):630 - 636.】

[6] 翟胜, 梁银丽, 王巨媛. 生态足迹模型研究进展[J]. 西北植物学报, 2005, 25(1): 200 - 204.

【ZHAI S, LIANG Y L, WANG J Y. Latest research advance of ecological footprint model[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(1): 200 - 204.】

[7] 刘宇辉. 中国 1961-2001 年人地协调度演变分析——基于生态足迹模型的研究[J]. 经济地理, 2005, 25(2): 219 - 222, 235.

【LIU Y H. The analysis of China's human-environment relationship fluctuations between 1961-2001: study based on the EF (Ecological Footprint) model[J]. Economic Geography, 2005, 25(2): 219 - 222, 235.】

[8] 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.

【XU Z M, ZHANG Z Q, CHENG G D, et al. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 280 - 285.】

[9] 安宝晟, 程国栋. 西藏生态足迹与承载力动态分析[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 1002 - 1009.

【AN B S, CHENG G D. Dynamic analysis of the ecological footprint and carrying capacity of Tibet[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4):1002 - 1009.】

[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, 24(9): 1550 - 1559.

【LIU M C, LI W H. The calculation of China's equivalence factor under ecological footprint mode based on net primary production[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1550 - 1559.】

[11] 刘某承, 李文华. 基于净初级生产力的中国各地生态足迹均衡因子测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401 - 406.

【LIU M C, LI W H. Calculation of equivalence factor used in ecological footprint for China and its provinces based on net primary production[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(5):401 - 406.】

[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, 29(3): 592 - 597.

【LIU M C, LI W H, XIE G D. Estimation of China ecological footprint production coefficient based on net primary productivity[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(3): 592 - 597.】

[13] 方恺. 基于净初级生产力的能源足迹模型及其实证研究[D]. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2011.

---

【FANG K. A modified model and its case study for assessing energy ecological footprint based on net primary productivity[D]. Changchun:Master Dissertation of Jilin University, 2011.】

[14] 陈冬冬, 高旺盛. 近 30 年来中国农村居民食物消费的生态足迹分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1738 - 1747.

【CHEN D D, GAO W S. Ecological footprint analysis of food consumption of Chinese rural households in the latest 30 years[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(8): 1738 - 1747.】

[15] 王冬阳, 程广燕. 人均粮食消费 430 公斤必不可少 [EB/OL]. 农业部食物与营养发展研究所, (2013-05-27) [2015-05-19]. <http://www.caas.cn/ysxw/zjgd/73028.shtml>.

[16] 谢鸿宇, 叶慧珊. 中国主要农产品全球平均产量的更新计算[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2008, 7(1): 76 - 80.

【XIE H Y, YE H S. The update computation for global average yield of main agricultural products in China[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2008, 7(1): 76 - 80.】

[17] 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.

[18] 李楠. 基于生态足迹改进模型的天津市可持续发展评价[D]. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2009.

[19] 普连仙, 吴学灿. 生态足迹模型的缺陷及改进研究进展[J]. 环境科学导刊, 2010, 29(1): 15 - 19.

【PU L X, WU X C. Study on defects and improvement of ecological footprint model[J]. Environmental Science Survey, 2010, 29(1): 15 - 19.】

[20] 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, 24(1): 82 - 92.

【ZHANG H Y, LIU W D, WANG S Z, et al. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on sub-national hectare: a case study of Zhejiang[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 82 - 92.】

[21] 叶懿安, 朱继业, 李升峰, 等. 长三角城市工业碳排放及其经济增长关联性分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(3): 257 - 262.

【YE Y A, ZHU J Y, LI S F, et al. Correlation analysis of industrial carbon emissions and economic growth in the Yangtze river delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(3): 257 - 262.】

[22] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: volume II [EB/OL]. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/Methodologyreports.htm>.

[23] 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[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 953 -

---

963.

【DUAN J, KANG M Y, JIANG Y. Improvement of ecological footprint model based on freshwater resource account and pollution accounts[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(6): 953 - 963.】

[24] 周 嘉, 尚金城. 绥化市可持续发展状况的生态足迹分析[J]. 地理科学, 2004, 24(3): 333 - 338.

【ZHOU J, SHANG J C. Ecological footprint of sustainable development of Suihua city[J]. Scientia Geographica Sinica, 2004, 24(3): 333 - 338.】

[25] 樊云龙, 苏孝良, 李 伟. 贵州省 1996~2006 年生态足迹变化分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2008, 26(4): 22 - 25.

【FAN Y L, SU X L, LI W. Analysis on ecological footprint variety of Guizhou Province from 1996 to 2006[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2008, 26(4): 22 - 25.】