

DOI: 10.5846/stxb201811282581

郭慧,董士伟,吴迪,裴顺祥,辛学兵.基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算.生态学报,2020,40(4):1405-1412.

Guo H, Dong S W, Wu D, Pei S X, Xin X B. Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1405-1412.

# 基于生态系统服务价值的生态足迹模型均衡因子及产量因子测算

郭 慧<sup>1</sup>,董士伟<sup>2</sup>,吴 迪<sup>1</sup>,裴顺祥<sup>1</sup>,辛学兵<sup>1,\*</sup>

1 中国林业科学研究院华北林业实验中心,北京 102300

2 国家农业信息化工程技术研究中心,北京农业信息技术研究中心,北京 100097

**摘要:**均衡因子和产量因子是生态足迹模型中的关键参数,现有的测算方法多根据物质生产和消费实现,忽略生态系统提供服务的能力。本研究提出基于生态系统服务价值的均衡因子和产量因子测算方法,并以 1990、2005 和 2015 年北京市门头沟区为例,研究生态涵养发展区生态承载力,并与通用因子计算结果对比。结果表明:(1)基于生态系统服务价值获取的均衡因子:水域>林地>耕地。水域均衡因子最高,平均值达到 8.37。耕地均衡因子最低,平均值仅为 0.24。林地均衡因子高于耕地,均衡因子平均值为 0.71。说明该方法较好的表现了不同生态系统提供生态服务能力的差异;(2)基于该研究方法获取的不同生态系统的产量因子接近,耕地>林地>水域,均值分别为 0.90,0.87 和 0.86,且呈逐年递减趋势;(3)1990 年到 2015 年,门头沟区生态承载力先降低后提高,生态足迹先提高,再降低,2005 年出现生态赤字,其森林、耕地和区域生态承载力与生态足迹小于通用因子生态足迹模型结果,水域生态承载力和生态足迹高于通用因子生态足迹模型结果。与通用因子相比,基于生态系统服务价值的均衡因子和产量因子更好的体现了研究区内各类生态系统生态服务的承载力。

**关键词:**均衡因子;产量因子;生态承载力;生态足迹;生态系统服务价值

## Calculation and analysis of equivalence factor and yield factor of ecological footprint based on ecosystem services value

GUO Hui<sup>1</sup>, DONG Shiwei<sup>2</sup>, WU Di<sup>1</sup>, PEI Shunxiang<sup>1</sup>, XIN Xuebing<sup>1,\*</sup>

1 *Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China*

2 *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China*

**Abstract:** Equilibrium factors and yield factors are important parameters in ecological footprint model. The existing researches on the parameters of ecological footprint model were mostly aimed at large scale areas on the basis of material production and consumption. The material evaluation can't meet the requirements of ecological carrying capacity evaluation with the construction of ecological civilization. This article proposed the concept and model of equilibrium factors and yield factors based on ecosystem services value. We took Mentougou district of Beijing as an example in 1990, 2005 and 2015 to study the ecological carrying capacity and ecological footprint of forest, cultivated land, and water area in ecological conservation development area. The results are compared with the general factor ecological footprint model. The results showed that (1) the equilibrium factors based on ecosystem service value was water>forest>cultivated land. The equilibrium factor of water was much higher than that of other ecosystems with average 8.37. The equilibrium factor of the cultivated land

**基金项目:**“十二五”农村领域国家科技计划课题(2015BAD07B0202);北京市优秀人才培养资助项目(2015000020060G136);华林中心主任基金(ECFNC2014-03)

收稿日期:2018-11-28; 网络出版日期:2019-11-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinxb01@163.com

was the lowest, and its average was 0.24. The equilibrium factor of forest was higher than that of the cultivated land value, and its average was 0.71. The results showed the difference of ecosystem services' capacity of different ecosystems. (2) The yield factors of different ecosystems were close to each other, but they decreased year by year. The average yield factor of forest, the cultivated land, and water area were 0.87, 0.90 and 0.86, respectively. It showed that the ecosystem services provided by Mentougou ecosystem failed to reach the national average level. (3) From 1990 to 2015, the ecological carrying capacity of Mentougou district decreased firstly and then increased. The ecological footprint increased at first and then decreased. The ecological deficit was found in the study area in 2005. The ecosystem service carrying capacity of the forest land firstly decreased and then increased, and it had decisive effect on the ecological carrying capacity due to the advantages of forest resources in Mentougou district. The ecological carrying capacity and ecological footprint obtained by ecosystem service value were smaller than the results of the generic factor ecological footprint model except the water area. The equilibrium factors and yield factors based on ecosystem service value can well reflect the changes of ecological carrying capacity and ecological footprint in the study area compared with the traditional ecological footprint model.

**Key Words:** equilibrium factors; yield factors; ecological carrying capacity; ecological footprint; ecosystem services value

随着社会经济的发展,人口的膨胀,资源消耗,环境污染等日益超过生态环境的承载力,可持续发展成为人类共识。生态承载力的合理评估,社会经济发展评价体系的不断完善和生态文明建设的开展,均可以为生态环境和社会可持续发展提供理论支持。生态足迹法以其简洁易懂的定量测量生态状态原理,在生态承载力和资源消耗的研究中被广泛使用<sup>[1]</sup>。国内外学者提出很多有价值的方法构建生态足迹模型并进行改进,是目前生态足迹模型研究的重要方向<sup>[2-15]</sup>。

生态足迹模型中最重要的两个参数是均衡因子和产量因子,对生态承载力的评估结果有决定性影响。国外针对均衡因子和产量因子时间序列动态变化特征研究较多<sup>[16-18]</sup>,但国内大部分生态足迹模型应用多借用全球或者国家等大尺度的均衡因子和产量因子<sup>[19-20]</sup>,也有部分研究开展本地化参数研究<sup>[8,20-22]</sup>。李金城等人<sup>[20]</sup>研究表明,不同计算方法获得的均衡因子和产量因子差距较大,全国/全球尺度的均衡因子和产量因子不适用于小尺度生态足迹模型核算。本地化参数的研究目前有两种,一种是基于研究区域生物性土地的产量,选择主要的产品进行统计计算。该方法较难避免产品统计不全的问题,而且将研究区假设一个封闭的环境,根据生物性生产产品为基础构建研究生态足迹模型的均衡因子和产量因子,模拟区域生态承载力。在物质流通迅速的现代社会,不同地区存在生产分工,物质生产也并非区域发展的限制因素,该种方式并不能体现生态环境的压力。刘某承等<sup>[21-22]</sup>基于植被的净初级生产力对生态足迹模型中均衡因子和产量因子进行研究,避免了在主要产品统计不完整的问题,但是依然以植被生产力为基础计算均衡因子和产量因子,并未考虑人类活动带来消耗和污染后,生态系统的自净能力和吸纳废弃物等生态服务<sup>[23]</sup>。生态系统提供服务的能力是可持续发展的重要框架<sup>[24]</sup>,但如何将生态服务引入到生态足迹模型中,还在不断研究中。闵庆文等<sup>[25]</sup>提出基于生态系统服务的生态足迹模型(ESEF)概念,通过构建污染足迹的理论初步完善该概念。张义等<sup>[26]</sup>提出构建基于生态系统服务的水生态足迹,通过水生态系统的物质生产、水资源供应和水环境净化研究区域水生态系统的生态承载力。曹智等<sup>[27]</sup>将生态系统服务看作生态系统提供给人类生存和发展的限制性资源,构建“生态系统-生态系统服务-人口和经济(承载力)”的主线研究生态承载力。上述研究放弃了均衡因子和产量因子,只能进行分类比较,无法形成总体判断。焦雯珺等<sup>[28]</sup>以水生态系统为突破点,构建水污染的均衡因子和污染物吸纳能力因子,评估了水污染物对水环境的影响,局限于单一水生态系统。综上,基于生态系统服务构建不同类型生态系统均衡因子和产量因子研究区域生态足迹模型的相关成果不足。

本研究以北京市门头沟区为例,计算基于生态系统服务价值的均衡因子和产量因子,以北京市生态涵养发展区门头沟为例,对区内森林生态系统、农田生态系统和水生态系统的生态系统服务承载能力进行研究,并结合通用因子的生态足迹模型计算结果进行对比分析,为门头沟区作为“生态涵养发展区”经济发展和进一

步合理规划提供理论参考和科学依据,以期推动基于生态系统服务的生态足迹模型的不断发展和完善。

## 1 研究区概况

门头沟区地处北京西部山区(115°25'00"—116°10'07"E,39°48'34"—40°10'37"N),位于华北平原向蒙古高原的过渡地带,地势西北高,东南低,国土面积 1455 km<sup>2</sup>,山地面积占 98.5%(图 1),森林资源丰富,是北京市重要生态涵养发展区。区内山地山高谷深,为宜林地;近山麓与河谷阶地区有较厚的土壤,但是由于有一定坡度,因此宜林果;永定河冲积平原是城市化地区,该区内土层肥厚,宜耕。门头沟区属于中纬度大陆性季风气候,西部山区(年均温 10.2℃)与东部平原(年均温 11.7℃)气候差异显著,年均降水量约 600 mm。东部耕地是严格保护的土地利用类型,也是门头沟区的城市化地区,城市化不断发展和保护耕地之间形成突出的矛盾;门头沟社会经济的发展导致区内人口不断增长、经济迅速发展,门头沟区生态环境压力日益增大。区内采矿历史久远,生态环境脆弱,近年来矿山修复工程、京津风沙源治理工程、三北防护林工程和太行山绿化工程对区内生态环境好转有巨大贡献。

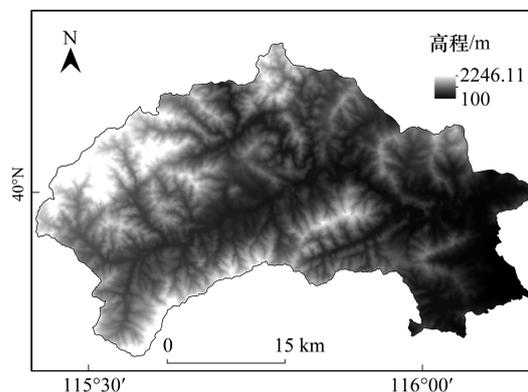


图 1 门头沟区概况  
Fig.1 Study area

## 2 研究方法数据来源

本研究通过遥感影像数据获取门头沟区 1990、2005 和 2015 年土地利用,以此为基础构建基于生态系统服务价值的均衡因子和产量因子,计算区域生态承载力和生态足迹,并与常用的国际通用 Wackernagel 和 Rees<sup>[29]</sup>的均衡因子和产量因子计算结果进行对比分析。

### 2.1 生态足迹模型

传统的生态承载力指特定区域可以提供给人类生态服务面积的总和,生态足迹指的是特定区域人口在某一时段所消费的服务所需要的生物生产性土地面积。计算公式如下:

$$ECC = N \times \sum_{j=1}^n ecc_j = N \times \sum_{j=1}^n (a_j \times r_j \times y_j) \quad (1)$$

$$EF = N \times ef = N \times \sum_{j=1}^n (a_j \times r_j) \quad (2)$$

式中,ECC 为地区总生态承载力,是各类土地生态承载力之和,单位:ghm<sup>2</sup>;N 为总人口数,单位:人;ecc<sub>j</sub> 为人均生态承载力,单位:ghm<sup>2</sup>;a<sub>j</sub> 为人均占有 j 类生物生产土地面积,单位:hm<sup>2</sup>;r<sub>j</sub> 为均衡因子;y<sub>j</sub> 为产量因子;n 为参与评估的生态系统种类数量.EF 为生态足迹,单位:ghm<sup>2</sup>,ef 为人均生态足迹单位:ghm<sup>2</sup>/人。

生态赤字(盈余)可用来计量人地系统间生态服务的供需情况和可持续程度。如出现生态赤字,则表明该地区的人类负荷超过其生态容量;反之,为生态盈余。计算公式如下:

$$ED = ECC - EF \quad (3)$$

ED ≥ 0, ED 为生态盈余,单位:hm<sup>2</sup>;ED < 0, ED 为生态赤字,单位:ghm<sup>2</sup>。

传统的均衡因子和产量因子的计算均假定每类土地只具有生物生产功能,模型的计算主要集中在初级产品供给和消耗方面,对生态系统提供的调节和支持服务考虑较少。承认生态系统的多功能性,将生态足迹模型构建于生态系统服务的基础上,可以更加全面衡量人类活动对生态系统产生的影响。

### 2.2 均衡因子

在生态足迹模型的计算中,由于不同类型的生物生产性土地具有生产力不同,为了便于比较,需将面积转换为具有相同生物生产力的土地面积,该转换系数为均衡因子<sup>[22,30]</sup>。本研究中,以生态系统服务价值为基础

研究区域均衡因子,对比分不同类型的生物生产性土地具有的生态系统服务价值。本文采用的计算公式为:

$$r_j = \frac{P_j}{P_{NP}} = \frac{D_t \times F_j}{\left( \sum_0^n (D_t \times F_j \times S_j) \right) / \sum_0^n S_j} \quad (4)$$

式中,  $r_j$  为均衡因子,指研究区中,某一生态系统类型单位面积提供某种生态系统服务的能力与所有生态系统类型单位面积提供该种生态系统服务的平均能力的比值;  $P_j$  为  $j$  种生态系统类型单位面积的生态系统服务价值,单位:元;  $\overline{P_{NP}}$  为所有用地类型的单位面积平均生态系统服务价值,单位:元;  $D_t$  表示  $t$  年度研究区内 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量,单位:元/hm<sup>2</sup>;  $F_j$  表示研究区内第  $j$  类生态系统的生态系统服务价值当量因子之和,不同生态系统服务价值当量见谢高地等<sup>[31]</sup>的当量因子法;  $n$  为研究区内涉及的提供生态系统服务的生态系统种类;  $S_j$  为第  $j$  类生态系统的面积,单位:hm<sup>2</sup>。

式 3 中,  $D_t$  的计算公式为:

$$D_t = S_r \times F_r + S_w \times F_w + S_c \times F_c \quad (5)$$

式中,  $S_r$ ,  $S_w$  和  $S_c$  分别表示研究区  $t$  年度稻谷、小麦和玉米的播种面积占三种作物播种总面积的百分比(%);  $F_r$ ,  $F_w$  和  $F_c$  分别表示  $t$  年度研究区稻谷、小麦和玉米的单位面积平均净利润,单位:元/hm<sup>2</sup>。

### 2.3 产量因子

产量因子是为了便于不同区域之间生物生产性土地面积的对比,体现定区域某一类土地面积的生产能力与对应的整体平均水平的差异<sup>[21,30]</sup>。本研究中,以生态系统服务价值研究区域内产量因子,对比分析区域内生物生产性土地与全国生物生产性土地提供生态系统服务的差异。计算公式为:

$$y_j = \frac{P_j}{E_j} = \frac{D_t \times F_j}{D_{qt} \times F_j} = \frac{D_t}{D_{qt}} \quad (6)$$

式中,  $y_j$  为产量因子,指区域内某一生态系统类型提供某种生态系统服务的能力与该类生态系统服务的国家平均水平的比值。 $\overline{E_j}$  对应  $j$  土地利用类型的全国平均单位面积生态系统服务价值;  $D_{qt}$  表示  $t$  年度全国 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量,单位:元/hm<sup>2</sup>,计算方法同公式(5)。

由于本研究基于生态系统服务价值的方法构建生态足迹模型中的均衡因子和产量因子,因此本文主要研究对象为研究区内具有生态系统服务价值的森林生态系统、农田生态系统、水生态系统。

### 2.4 数据来源

(1) 遥感数据:本文所需遥感数据为 Landsat TM 123/032 1990-09-18 影像 L2 数据产品(分辨率为 30 m),来源于美国地质勘探局; Landsat TM 123/032 2005-05-06 影像 L4 数据产品(分辨率为 30 m)、Landsat OLI 123/032 2014-09-04 影像 L4 数据产品(分辨率为 30 m)(由于 2015 年数据质量较差,根据华北地区植被特点,选择 2014 年 9 月数据代替,以下内容均写为 2015 年),来源于中国科学院遥感与数字地球研究所。本研究通过 ENVI5.1 对遥感影像进行预处理。1990 年 Landsat TM 数据为 L2 级,需进行坐标转换和几何精纠正,像元匹配误差小于 0.5 个像元。2005 年 Landsat TM 数据和 2014 年 Landsat OLI 数据为 L4 级,可直接进行分类。土地利用类型分类标准采用中国科学院资源环境数据中心的二级类型分类标准。根据门头沟地区用地特点,采用最大似然法将门头沟区土地覆被分为 5 类:林地、耕地、建筑用地、水域和未利用土地。通过野外 GPS 野外观测点和年鉴资料对三期土地覆被数据分类结果进行评价。1990 年、2005 年和 2015 年的全国土地覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

(2) 社会经济数据:由于受年鉴数据限制,本文所需社会经济数据以中国和北京市数据为基础进行计算。社会经济数据主要包括中国和北京市的稻谷、小麦、玉米的净产值,来源于 1991 年、2006 年和 2016 年出版的《全国农产品成本收益资料汇编》;中国和北京市的稻谷、小麦、玉米的种植面积,来源于 1991 年、2006 年和 2016 年出版的《中国农村统计年鉴》、《中国统计年鉴》和《北京统计年鉴》。

### 3 结果与分析

#### 3.1 均衡因子

由表 1 可看出,门头沟区三种生态系统的均衡因子每年不同。其中水域的均衡因子变化最大,最高值出现在 2015 年,达到 8.90,最低值出现在 2005 年,为 8.01,其峰值变化达到 0.89。耕地的均衡因子变化最小,最高值为 2005 年,达到 0.25,最低值出现在 1990 年,为 0.23,峰值变化仅为 0.02。林地的均衡因子也有较为显著的变化,最高值出现在 2005 年,为 0.74,最低值出现在 2015 年,为 0.67,其峰值变化为 0.07。对各类生态系统土地的均衡因子进行比较可知,水域的均衡因子最高,平均值达到 8.37,林地和耕地的均衡因子均小于 1,耕地均衡因子最小,平均值仅有 0.24,林地的均衡因子平均值为 0.71。

表 1 门头沟区 1990 年、2005 年和 2015 年 3 种生态系统的均衡因子

Table 1 Equilibrium factors of different land types in Mentougou in 1990, 2005 and 2015

生态系统类型 Ecosystem-type	1990	2005	2015	峰值变化 Peak change	均值 Mean
林地 Forest	0.73	0.74	0.67	0.07	0.71
耕地 Cultivated land	0.23	0.25	0.24	0.02	0.24
水域 Water area	8.21	8.01	8.9	0.89	8.37

#### 3.2 产量因子

基于上述研究方法,本文计算了门头沟区 1990 年、2005 年和 2015 年的林地、耕地和水域三类生态系统土地的产量因子。由表 2 可以看出,门头沟区 1990 年、2005 年和 2015 年 3 类生态系统土地的产量因子差别较小,且变化趋势相同,均为 1990 年最高,其次为 2005 年,2015 年最低。其中耕地的产量因子最高,平均值可达 0.90,1990 年最高,为 1.13,2015 年最低,为 0.75。其次为林地的产量因子,平均值为 0.87,最高值为 1.1,出现在 1990 年,最低值出现在 2015 年,为 0.73。水域的产量因子最低,平均值为 0.86,其最高值出现在 1990 年,为 1.09,最低值出现在 2015 年,为 0.72。三种生态系统的土地产量因子变化差别较小,最大为耕地,峰值变化为 0.38,林地和水域的峰值变化均为 0.37。

表 2 北京市 1990 年、2005 年和 2015 年三种生态系统的产量因子

Table 2 Yield factors of different land types in Beijing in 1990, 2005 and 2015

生态系统类型 Ecosystem-type	1990	2005	2015	峰值变化 Peak change	均值 Mean
林地 Forest	1.1	0.79	0.73	0.37	0.87
耕地 Cultivated land	1.13	0.81	0.75	0.38	0.90
水域 Water area	1.09	0.78	0.72	0.37	0.86

#### 3.3 生态承载力及生态足迹测算结果

以土地利用结果为基础,根据 2.1 的研究结果,采用公式 1、公式 2 和公式 3 计算获取的生态承载力和生态足迹结果见表 3。由表 3 可知,门头沟区人均生态承载力从 1990 年到 2005 年减少了 25.95%,从 2005 年到 2015 年增加了 21.29%,整体降低了 10.19%;人均生态足迹从 1990 年到 2005 年提高了 3.20%,从 2005 年到 2015 年降低了 11.62%,整体降低 8.79%。总生态承载力从 1990 年到 2005 年减少了 24.90%,从 2005 年到 2015 年增加了 36.50%,整体提高了 1.66%;总生态足迹从 1990 年到 2005 年提高了 5.74%,从 2005 年到 2015 年降低了 2.37%,整体降低 3.23%。在门头沟区生态承载力和生态足迹的足迹成中,林地所占比例最大。1990 年,门头沟区为生态盈余,2005 年区内生态赤字严重,到 2015 年,区内恢复生态盈余状态。不同土地利用类型的生态承载力状况不同。1990 年,区内林地、耕地和水域均为生态盈余;2005 年,三种用地类型全部为

生态赤字状态;到 2015 年,区内耕地和水域依然为生态赤字,且生态赤字有所增加,但林地转换为生态盈余状态。

表 3 门头沟区 1990、2005、2015 年各土地利用类型的生态承载力及生态足迹/ $\text{ghm}^2$

Table 3 Ecological carrying capacity and ecological footprint of land use types in 1990, 2005, and 2015 in Mentougou district

土地利用类型 Land-use type	1990			2005			2015		
	ECC	EF	ED	ECC	EF	ED	ECC	EF	ED
林地 Forest	98293.78	89357.98	8935.80	73821.07	93444.39	-19623.32	100766.78	91606.17	9160.62
耕地 Cultivated land	1822.65	1612.96	209.69	36.54	45.11	-8.57	334.19	445.59	-111.40
水域 Water area	1982.90	1819.17	163.73	3608.85	4626.74	-1017.88	2692.71	3739.87	-1047.16
门头沟区 Mentougou area	102099.32	92790.12	9309.21	77466.46	98116.24	-20649.77	103793.68	95791.62	8002.06

ECC: 生态承载力 Ecological carrying capacity; EF: 生态足迹 Ecological footprint; ED: 生态赤字 Ecological deficit

### 3.4 与通用因子生态足迹模型结果比较

本文利用通用因子生态足迹模型<sup>[29]</sup>计算门头沟区 1990 年、2005 年和 2015 年的生态足迹与生态承载力,并与基于生态系统服务价值的获取均衡因子和产量因子的生态足迹模型结果进行比较,具体计算结果见表 4。表 4 中,通用因子生态足迹模型计算的门头沟地区的生态承载力和生态足迹均大于基于生态系统服务价值的生态足迹模型计算结果。其中林地和耕地的生态承载力和生态足迹均大于基于生态系统服务价值的生态足迹模型计算结果,但是水域的生态承载力和生态足迹结果小于基于生态系统服务价值的生态足迹模型计算结果,说明基于生态系统服务价值的生态足迹模型更加看重水域对人类生活环境的调节和影响。基于传统生态足迹模型获取的门头沟区均为生态盈余。由于水域的生产因子为 1,因此水域的生态盈余/赤字为 0。

表 4 门头沟区通用因子生态足迹模型的生态承载力及生态足迹计算结果/ $\text{ghm}^2$

Table 4 Ecological carrying capacity and ecological footprint of land use types in 1990, 2005, and 2015 in Mentougou district based on generic factor

土地利用类型 Land-use type	1990			2005			2015		
	ECC	EF	ED	ECC	EF	ED	ECC	EF	ED
林地 Forest	616937.28	342742.93	274194.35	645150.29	358416.83	286733.46	632459.02	351366.12	281092.90
耕地 Cultivated land	9257.01	7714.18	1542.84	238.19	198.50	39.70	2450.73	2042.27	408.45
水域 Water area	44.32	44.32	0.00	115.52	115.52	0.00	84.04	84.04	0.00
门头沟区 Mentougou area	626238.61	350501.43	275737.18	645504.01	358730.85	286773.16	634993.78	353492.43	281501.35

## 4 讨论

### (1) 与不同研究中生态足迹模型因子对比

本文采用的通用因子为 Wackernagel 和 Rees<sup>[29]</sup>研究所得,其均衡因子分别为:林地 2.8、耕地 1.1,水域 0.2;产量因子分别为林地 1.8,耕地 1.2,水域 1。其中林地和耕地的均衡因子均大于本文研究结果,水域的均衡因子仅为本研究水域均衡因子的 1/42。通用因子的产量因子均略大于基于生态系统服务价值获得的产量因子。李金城等<sup>[20]</sup>统计国内引用量前 20 的文章,发现不同研究内容采用的均衡因子和产量因子存在极大差异,在林地、耕地和水域三种生态系统类型中,变化最大的是耕地的均衡因子和产量因子,见表 5。本研究中获取的林地和耕地均衡因子均低于最低值,水域均衡因子高于最高值。三种生态系统类型的产量因子均低于最低值。该结果同时受到研究地点和因子计算研究方法的影响。与刘某承等<sup>[21-22]</sup>基于植被净初级生产力测算获取的北京市均衡因子和产量因子相比,本研究获取的水域均衡因子较高,林地和耕地均衡因子较低,林地产量因子较高,耕地的产量因子与刘某承等的结果近似,水域产量因子较低。该结果主要由于研究方法不同造成,说明水域生态系统服务较高,体现了目前水是区域可持续发展的重要制约因素。基于生态系统服务价值获取的耕地的产量因子与基于净初级生产力获得的耕地产量因子结果近似,说明耕地的生态服务价值与其

生产力直接相关。

表 5 不同研究中生态足迹模型因子对比

Table 5 The comparison of different ecological footprint model factors in different studies

土地利用类型 Land-use type	均衡因子 Equilibrium factors				产量因子 Yield factors			
	最大值 <sup>[20]</sup> Maximun	最小值 <sup>[20]</sup> Minimum	刘某承等 <sup>[22]</sup> Liu Moucheng et al	本研究均值 Average of this study	最大值 <sup>[20]</sup> Maximun	最小值 <sup>[20]</sup> Minimum	刘某承等 <sup>[22]</sup> Liu Moucheng et al	本研究均值 Average of this study
林地 Forest	2.23	0.88	0.60	0.71	1.20	0.91	0.59	0.87
耕地 Cultivated land	3.16	0.76	1.30	0.24	2.24	1.66	0.83	0.90
水域 Water area	0.48	0.37	0.48	8.37	1.00	1.00	1.94	0.86

### (2) 基于生态系统服务价值获取的因子特点

均衡因子和产量因子是生态足迹模型中的重要参数,直接决定生态足迹模型的结果。由 3.4 研究结果可知,国际通用的均衡因子和产量因子与本研究计算的门头沟区实际均衡因子和产量因子相差较大,因此在中小尺度研究生态足迹和生态承载力时,采用国际通用的研究成果,会与实际区域有很大差别。基于生态系统服务的均衡因子和产量因子的获取,建立在多个生态系统的多种生态功能基础上,不仅能够衡量生态系统获取生物生产性产品的能力,还能够衡量人类对非生物生产性产品的利用情况。本研究通过当量因子法将多个生态系统纳入到基于生态系统服务的生态足迹模型均衡因子和产量因子的测算中,为从生态服务角度衡量生态涵养区的生态环境承载能力提供方法和实现途径。

基于生态系统服务价值的水域均衡因子远高于其他生态系统用地类型的均衡因子,说明该方法充分认定了水域提供生态系统服务的能力。该方法林地的均衡因子高于耕地,主要由于虽然林地保护导致林产品有限,但是森林提供生态系统服务的能力远高于耕地。因此耕地虽然获得产品最高,但是考虑提供生态系统服务的能力,耕地均衡因子最低。已有研究结果证明<sup>[32]</sup>,均衡因子变化较小,不容易受时间影响,因此较为稳定,规律性明显。本研究结果中,三种生态系统用地类型的均衡因子均较为稳定,与已有研究趋势一致。产量因子的引入是为了将本地的各类土地面积转化为一个对应的整体性面积。基于生态系统服务价值获取的产量因子呈现逐年减小,说明北京市的各类土地生产力低于全国平均生产力水平。从侧面反映北京地区生态环境巨大的压力,如何更好地提升区内土地生产力是改善区内生态环境,缓解环境压力的有效途径。

### (3) 自然资源及政策对区域生态承载力的影响

自然资源特点决定门头沟区的生态承载力和生态足迹特点。门头沟区林地面积广阔,是区内生态涵养发展区建设的主要内容,对门头沟区生态承载力的影响起主导作用,是平衡区内生态系统服务赤字的重要生态系统类型。区内多山地,水域和耕地不足,在区域经济发展中,存在服务提供的欠缺,主要表现为水资源的短缺。社会经济发展对门头沟区生态承载力有极大的影响。1990 年到 2005 年,门头沟区经济和人口飞速发展,区内生态赤字严重;2006 年到 2015 年,随着区内经济结构的调整,虽然经济发展速度有所减缓,但整体生态环境得到极大改善。政策导向对门头沟区生态承载能力的提高有极大的促进作用。2006 年,门头沟区被确定为生态涵养发展区,关停大部分煤炭企业和全部砂石厂、石灰厂,矿山修复和永定河清淤工作全面展开,本研究选择 2005 年作为时间节点,较好的反映了政府政策因素对生态环境的引导作用。在生态足迹模型中,引入生态系统服务价值计算均衡因子和产量因子,计算结果体现了区内生态环境的变化,采用大尺度研究的均衡因子和产量因子计算的生态足迹模型针对小尺度区域计算结果则较难反应区内现状。因此,根据区域特点制定政策,优化门头沟区内森林建设和发展,合理规划区内经济结构,对提高门头沟区生态承载力,降低生态足迹有重要作用。

## 5 结论

本研究以 1990 年、2005 年和 2015 年的遥感影像作为信息源,提取门头沟地区 3 个时段的土地利用/覆被

变化信息,采用基于生态系统服务价值计算的生态足迹模型均衡因子和产量因子,研究门头沟地区林地、耕地和水域的生态足迹和生态承载力。研究发现:在基于生态系统服务价值获取不同生态系统类型的均衡因子和产量因子中,水域均衡因子最高,其次为林地,耕地均衡因子最低,该顺序充分体现了不同生态系统类型目前为人类提供服务的能力;产量因子较为稳定,各生态系统类型差别较小,受气候环境影响较大,反映了门头沟区生态系统提供服务的能力与国家平均水平的差异。门头沟地区整体生态承载力从生态盈余转变为生态赤字再转变为生态盈余,耕地和水域生态服务消耗一直增大,林地提供的生态服务则从生态盈余转变为生态赤字,再完善为生态盈余。本研究结果与通用因子获取生态足迹模型相比,凸显了不同生态系统提供生态服务的能力,从一定程度上实现了生态足迹模型的参数本地化,较好的实现对生态涵养发展区的生态承载力评估,为从生态系统服务的角度深入理解区域可持续发展提供新思路,为进一步优化生态足迹模型提供理论支持。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 周静, 管卫华. 基于生态足迹方法的南京可持续发展研究. 生态学报, 2012, 32(20): 6471-6480.
- [ 2 ] 潘洪义, 朱晚秋, 崔绿叶, 冯茂秋, 朱芳. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异. 生态学报, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [ 3 ] 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.
- [ 4 ] De Alvarenga R A F, Da Silva Junior V P, Soares S R. Comparison of the ecological footprint and a life cycle impact assessment method for a case study on Brazilian broiler feed production. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 28: 25-32.
- [ 5 ] Bicknell K B, Ball R J, Cullen R, Bigsby H R. New methodology for the ecological footprint with an application to the New Zealand economy. *Ecological Economics*, 1998, 27(2): 149-160.
- [ 6 ] Kratena K. From ecological footprint to ecological rent; an economic indicator for resource constraints. *Ecological Economics*, 2008, 64(3): 507-516.
- [ 7 ] Venetoulis J, Talberth J. Refining the ecological footprint. *Environment, Development and Sustainability*, 2008, 10(4): 441-469.
- [ 8 ] 马高, 任志远, 韩红珠. 基于净初级生产力的陕西省生态足迹测算. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 84-89.
- [ 9 ] Zhao S, Li Z Z, Li W L. A modified method of ecological footprint calculation and its application. *Ecological Modelling*, 2005, 185(1): 65-75.
- [ 10 ] Pereira L, Ortega E. A modified footprint method; the case study of Brazil. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 113-127.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] 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. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667.
- [ 15 ] 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. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777.
- [ 16 ] Haberl H, Erb K H, Krausmann F. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time; the case of Austria 1926-1995. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25-45.
- [ 17 ] Wackernagel M, Monfreda C, Erb K H, Haberl H, Schulz N B. Ecological footprint time series of Austria, the Philippines, and South Korea for 1961-1999: comparing the conventional approach to an 'actual land area' approach. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 261-269.
- [ 18 ] Lammers A, Moles R, Walsh C, Huijbregts M A J. Ireland's footprint; a time series for 1983-2001. *Land Use Policy*, 2008, 25(1): 53-58.
- [ 19 ] 张恒义, 刘卫东, 王世忠, 单娜娜, 梁红梅. "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. 自然资源学报, 2009, 24(1): 82-92.
- [ 20 ] 李金城, 严长安, 高伟. 基于本土参数的流域生态足迹评估与不确定分析. 生态学报, 2019, 39(2): 739-747.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] 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. 生态与农村环境学报, 2010, 26(5): 401-406.
- [ 23 ] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): 399-410.
- [ 24 ] 邬建国, 郭晓川, 杨劼, 钱贵霞, 牛建明, 梁存柱, 张庆, 李昂. 什么是可持续性科学? 应用生态学报, 2014, 25(1): 1-11.
- [ 25 ] 闵庆文, 焦雯璐, 成升魁. 污染足迹: 一种基于生态系统服务的生态足迹. 资源科学, 2011, 33(2): 195-200.
- [ 26 ] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析. 生态学报, 2013, 33(13): 4111-4124.
- [ 27 ] 曹智, 闵庆文, 刘某承, 白艳莹. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1-11.
- [ 28 ] 焦雯璐, 闵庆文, 李文华, Fuller A M. 基于生态系统服务的生态足迹模型构建与应用. 资源科学, 2014, 36(11): 2392-2400.
- [ 29 ] Wackernagel M, Rees W. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 61-83.
- [ 30 ] 田玲玲, 罗静, 董莹, 刘和涛, 曾菊新. 湖北省生态足迹和生态承载力时空动态研究. 长江流域资源与环境, 2016, 25(2): 316-325.
- [ 31 ] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [ 32 ] 陈敏, 张丽君, 王如松, 怀保光. 1978 年—2003 年中国生态足迹动态分析. 资源科学, 2005, 27(6): 132-139.