

# 中国城镇化的生态足迹影响 ——基于系统动力学模型的模拟仿真分析

中国科学技术信息研究所 北京 100086

佟贺丰 杨岩

**摘要** 众多研究表明生态足迹与城镇化进程密切相关。本研究通过构建系统动力学模型，进行综合和单一情景分析，就不同的城镇化路径选择进行仿真模拟。结果显示：未来 15 年中国的生态足迹变化将经历两个不同的阶段。2015-2025 年，产业结构仍然为资源消耗型，生态足迹仍在逐步增加，碳足迹占比达到峰值，但逐渐接近生态足迹的峰值。2026-2030 年，城镇化转向以集约的方式发展，使得人均生态足迹的增值效应逐渐减弱，在达到峰值后开始下降。中国的人均生态足迹将在 2029 年达到峰值。情景对比分析表明，走绿色发展的城镇化道路对生态足迹的降低有重要影响。最后对我国未来城镇化的发展从生态足迹角度提出了相应的建议。

**关键词：**城镇化，生态足迹，系统动力学，仿真

**中图分类号：**G353.1, N941.3

开放科学（资源服务）标识码（OSID）



## Ecological Footprint of China's Urbanization: A Simulation Analysis Based on System Dynamics Model

Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038, China

TONG HeFeng YANG Yan

**基金项目：**本文受北京市财政项目“京津冀协同发展对北京能源-环境-经济系统的影响分析模型研发”（PXM2016-178215-000014）资助。

**作者简介：**佟贺丰（1977-），研究员，研究方向：系统动力学模型、科技政策，Email: thf2003@istic.ac.cn；杨岩（1986-），助理研究员，研究方向：系统动力学模型。

**Abstract** Many studies show that the ecological footprint is closely related to the process of Urbanization. In this study, a system dynamics model for ecological footprint simulation of China was constructed to simulate the different urbanization path selection based on comprehensive and single scenarios. The results indicated that there are two stages for the ecological footprint variation in the next 15 years. The first stage is during the year 2015–2020, in this stage, the industrial structure of China is still a resource consumption type, the ecological footprint was gradually increased, and the carbon footprint accounted for the peak while approaching the ecological footprint. The second stage is during year 2026–2030, in this stage, the urbanization process of China turned to intensive development, which lead to the gradually decrease of appreciation effect of ecological footprint per capita, and the ecological footprint will reach its peak at 2029 then decreased gradually. The results also indicated that the urbanization can reduce the ecological footprint under the green development scenario. Moreover, we also promoted few suggestions for the future urbanization selection path of China based on the scenario analysis of ecological footprint for supporting the decision making in the near future.

**Keywords:** Urbanization, ecological footprint, system dynamics, simulation

## 1 引言

随着中国城镇化进程的推进，快速增长的城镇人口规模和日益增长的城乡居民收入对资源和环境产生多方面影响。如何破解城镇化发展进程对生态环境造成的巨大压力，是中国推进新型城镇化亟须考虑的现实问题。生态足迹 (Ecological Footprint) 是衡量国家和区域可持续发展的一个重要指标<sup>[1]</sup>，由加拿大生态经济学家 William Rees 等在 1992 年提出，此后，以 Wackernagel 为代表的“加拿大生态足迹小组”应用生态足迹法在全球、区域和城市三个层面上分析了生态足迹的应用效果<sup>[2]</sup>。生态足迹将一个地区或国家的资源、能源消费同自己所拥有的生态能力进行比较，判断一个国家或地区的发展是否处于生物承载力的范围内，是否具有安全性。生态足迹与生物承载力核算包括六类土地利用：耕地、草地、林地、渔业用地（生产性水域）、碳足迹（即碳吸收用地）与建设

用地。除了碳吸收用地外，每一种土地利用类型都有一种生物承载力组分与之对应。世界自然基金会 WWF 和发展重定义组织 RP 两个非政府机构自 2000 年起每两年公布一次世界各国的生态足迹资料<sup>[2-4]</sup>。研究显示，目前中国城乡之间的人均“生态足迹”差异非常明显，城镇居民比乡村居民的人均“生态足迹”要高 1.4-2.5 倍，并具有快速拉大的特征<sup>[3]</sup>。

城镇化对生态足迹的影响主要体现在两个方面。城镇化进程中，人口结构、生活方式等转变，影响人类活动的生态负荷；土地利用方式的变化，改变了自然系统的承载能力，这些变化就会表现为生态足迹的变化<sup>[5-6]</sup>（见图 1）。

国内外学者对城镇化与生态足迹的关系进行了很多案例研究。Ivan 和 Anna 的研究表明生态足迹会随着收入增加而增长，随着就业率降低而减少<sup>[7]</sup>。Karl 和 Erling 以挪威为案例的研究发现，紧凑型的城市结构会导致家庭生态足迹的减少<sup>[8]</sup>，因为这样的城市结构缩短了家庭

与公共和私人机构间的距离,从而减少交通运输足迹;其次紧凑型的住房结构减少了供暖所需的能源和其他技术配备。Xie 等人提出生态足迹距离 (Ecological Footprint Distance, D-EF) 指标,用于测量城市快速扩张过程中的生态足迹延伸,其研究表明北京的生态足迹距离从 2008 年的 567 公里增加到 2012 年的 677 公里<sup>[9]</sup>。Marrero 等人从建设项目的角度,以五个建筑为实证研究对象,证明可以将该指标用于分析农村城镇化进程中建筑垃圾的经济影响与生态足迹评价,新建建筑和老旧建筑分解的生态足迹 98% 来自于土方作业和砍伐树木<sup>[10]</sup>。在国内,李晋玲以西安市研究对象,将城镇化的发展分为人口城镇化、经济城镇化、生活方式城镇化和地域景观城镇化四个方面,其中经济城镇化水平对人均生态足迹影响最为强烈,这说明随着经济水平、人均收入与消费水平的提高,人均生态占用土地也会相应地提高<sup>[11]</sup>。赵卫等以吉林省为对象的研究表明,生态足迹随城镇化率的增长而增大,而且城镇化率对建设用地、草地和碳吸收用地的影响较显著,对耕地、林地和渔业用地生态足迹的影响不显著<sup>[6]</sup>。

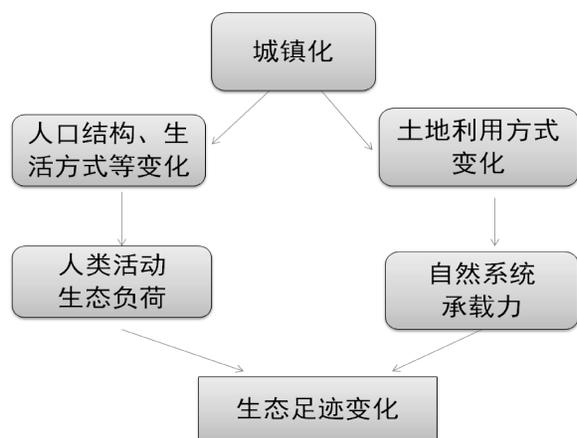


图1 城镇化对生态足迹的影响路线

从以上研究进展可以看出,现有的生态足迹相关研究大多是静态的统计分析,即利用历史数据推算当前的生态足迹,很少体现未来的变化趋势。面向未来的分析更有决策参考价值。同时,决策者还需要知道不同的政策选择,会对未来产生什么样的影响。碳足迹在中国生态足迹中所占比例较高<sup>[3]</sup>,中国政府在气候变化巴黎峰会上承诺 2030 年会达到排放峰值,那么在 2030 年前中国的生态足迹与城镇化率能否脱钩也成为一个问题。本研究将通过构建中国生态足迹的系统动力学模型,从系统思考的视角出发,分析不同城镇化情景对中国生态足迹的影响,然后提出一些有针对性的政策建议。

## 2 生态足迹模型与理论分析

### (1) 生态足迹模型

根据生态足迹基本模型,国家生态足迹基于国家净消费(生产+进口-出口)进行核算。因此,人均生态足迹可以用公式 1 表示。

$$A_i = \frac{P_i + I_i - E_i}{Y_i \times N} \quad (\text{公式 1})$$

在公式(1)中, $A_i$ 代表第*i*种消费项目折算的人均生态足迹分量( $\text{hm}^2/\text{人}$ ), $Y_i$ 是第*i*种消费项目的全球平均产量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ), $P_i$ 是第*i*种消费项目的国内年生产量( $\text{kg}$ ), $I_i$ 是第*i*种消费项目的年进口量( $\text{kg}$ ), $E_i$ 是第*i*种消费项目的年出口量( $\text{kg}$ ), $N$ 为人口数。生态足迹使用全球公顷作为单位,1单位的全球公顷指的是1公顷土地具有全球平均产量的生产力空间。

生态生产性土地是指具有从外界环境中吸

收生命过程所必需的物质和能量并转化为新的物质从而实现物质和能量积累能力的土地或水体。六类生态生产性土地的人均生物承载力的计算公式如下:

$$C_j = A_j \times R_j \times Y_j \quad (j=1,2,3,\dots,n) \quad (\text{公式 2})$$

在公式(2)中,  $C_j$  代表第  $j$  种土地的人均生物承载力,  $A_j$  是第  $j$  种土地的面积,  $R_j$  是第  $j$  种土地的均衡因子(某类型生态生产性土地的全球平均生产力与全球各类生物生产性土地的平均生产力的比值),  $Y_j$  是第  $j$  种土地产量因子(不同国家或地区生产力水平不同, 因此引入一个当地产出因子, 它是某一地区单位面积土地生产能力与全球平均水平的比值)。

一个地区或国家的生态承载力小于生态足迹时, 出现生态赤字, 其大小等于生态承载力减去生态足迹的差数。生态赤字表明该地区的人类负荷超过了其生态容量。

### (2) 生态足迹与城镇化关系的理论分析

前文已经概述了城镇化对生态足迹影响的两个方面, 这两个方面又可以划分为不同的因素。对于环境的影响因素, 前人已有很多研究可供参考。为了展现不同因素对环境的影响, Erlich 和 Holdren 提出了 IPAT 模型<sup>[12]</sup>:

$$I = P \times A \times T \quad (\text{公式 3})$$

公式(3)中,  $I$  为环境影响;  $P$  为人口数量;  $A$  为富裕程度;  $T$  为技术水平。

Dietz 和 Rose 将 IPAT 模型进一步改造为 STIRPAT 模型<sup>[13]</sup>:

$$I = \alpha \times P^{\beta_1} \times A^{\beta_2} \times T^{\beta_3} \times \varepsilon \quad (\text{公式 4})$$

公式(4)中,  $I$ 、 $P$ 、 $A$ 、 $T$  与 IPAT 模型中变量意义相同;  $\alpha$  为模型系数;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  分别为  $P$ 、 $A$ 、 $T$  的弹性系数;  $\varepsilon$  为随机误差项。

邵磊在保持概念一致性的基础上, 将 STIRPAT 模型改造为针对生态足迹影响相关因素模型<sup>[14]</sup>:

$$\begin{aligned} \ln(\text{EF}) = & \alpha + \beta_1 \ln(\text{UR}) + \beta_2 \ln(\text{GDP}) + \beta_3 \ln(\text{RD}) + \\ & \lambda_1 \ln(\text{TR}) + \lambda_2 \ln(\text{PR}) + \lambda_3 \ln(\text{UE}) + \\ & \lambda_4 \ln(\text{OD}) + \lambda_5 \ln(\text{FD}) + \varepsilon \end{aligned} \quad (\text{公式 5})$$

公式(5)中, EF 指生态足迹, UR 指城镇化水平, GDP 代表经济发展水平, RD 代表研发投入表征技术进步, TR 代表产业结构, PR 代表城市交通水平, UE 代表恩格尔系数表征城镇居民生活水平, OD 代表贸易开放程度, FD 代表财政分权程度, 其他与公式(4)中相同。

### (3) 本研究的理论选择

从影响生态足迹的关键因素出发, 构建系统性、整体性的计算模拟系统是生态足迹研究的一个重要方向<sup>[15,16]</sup>。系统动力学作为一种可持续发展研究中常用的模型方法, 很适合用于生态足迹研究<sup>[17,18]</sup>。Jin 等采用 SD 模型的模拟影响生态足迹的驱动力之间的相互作用。基于不同的政策可行性和可持续发展的目标, 设置了四个政策方案, 探索未来的可持续发展前景, 并制定综合政策, 模拟可能的发展情况对生态足迹的影响<sup>[19]</sup>。吴亮运用系统动力学方法和可持续发展理论, 研究了广州市生态足迹状况, 在分析广州市 1986—2007 年各种资源消耗状况的基础上, 运用系统动力学软件 STELLA 建立了广州市生态足迹及生态承载力系统动力学模型。其结果表明广州市生态足迹需求与生态承载力供给矛盾尖锐, 广州市人均生态承载力呈先上升后减小的趋势<sup>[20]</sup>。李磊等以生态足迹衡量居民对生态资源的需求, 基于模型预测了无锡市“十二五”期间的生态足迹数值, 显示未

来5年无锡市的生态足迹将继续呈现递增趋势，反映出居民对生态资源需求和对环境潜在压力不断增大<sup>[21]</sup>。

系统动力学模型把经济、社会、环境与资源系统看成一个统一的整体（见图2），以系统视角分析城镇化道路选择对生态足迹的影响。模型是动态的，其中任何一个政策的变动，都会对未来产生影响。在系统动力学模型中，城镇化的选择不是公式(5)中UR（城镇化水平）这一个变量，而是一系列变量的组合，所以在进行情景分析的时候，是通过改变一系列外生变量的值，形成新的道路选择，然后进行模拟仿真。

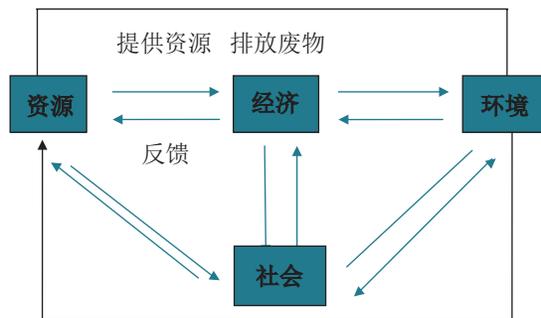


图2 模型中经济、环境、社会与资源的关系

本研究以1990年的各组分人均生态足迹为基年数据，在模型中模拟影响生态足迹的基本因素，计算出 $t+1$ 年的生态足迹，即

$$EF_{t+1} = EF_{t0} \times [( \text{消费总量}_{t+1} / \text{全球平均单产}_{t+1} ) / \text{总人口}_{t+1}] / [ ( \text{消费总量}_{t0} / \text{全球平均单产}_{t0} ) / \text{总人口}_{t0} ]$$

### 3 系统动力学生态足迹模型构建

#### (1) 模型的构建思路

本研究以中国科学技术信息研究所开发的

中国可持续发展模型为基础<sup>[22]</sup>，增加与生态足迹相关的各个足迹成分及其相关子模块。模型中，耕地产品主要包括谷物、大豆、蔬菜及其他产品。林地产品主要包括木材、纸浆和薪柴等。草地产品主要包括牛奶、牛肉、羊肉等。建设用地主要包括建筑用地（住宅和公共建筑）、工业用地、公路铁路用地、水利项目用地等。碳吸收用地涉及的能源包括煤、石油、天然气、电力（也将其转化为一次能源）。渔业用地根据渔获数据推算支持捕捞淡水和海水产品生产所需初级生产量来计算。

模型针对具体的土地类型还需要更详细的模拟过程，以耕地为例，就需要计算出直接的作物消费、酒精等间接使用的消费以及饲料用粮等主要内容（见图3）。作物消费和肉类消费又与营养水平及卡路里的消耗密切相关。

#### (2) 主要参数的确认与选择

模型中使用了表函数，用于处理众多非线性问题。对于部分现实资料无法取得，或资料来源缺乏可靠性合理性的变量，本研究在建模过程中，将假设其初始值，或依据历史经验加以推论其合理值。在模型的校准过程中，会根据模拟结果与历史数据的比较，对一些参数进行调整，优化计算参数的最佳值，那些与历史数据达成最佳匹配结果的参数被选出来输入模型。

模型中一些外生变量的设置依据主要来自三个方面。一是来自中国政府关于未来发展的整体和行业的发展规划、报告，如“十三五”相关规划纲要，2020年相关规划等。二是来自国内外研究机构和学者的研究成果。如世界银行与国务院发展研究中心联合课题组所做的

《2030年的中国》<sup>[23]</sup>，清华大学国情研究中心胡鞍钢等人所著的《2030中国迈向共同富裕》<sup>[24]</sup>，2050中国能源和碳排放研究课题组的《2050中国能源和碳排放报告》<sup>[25]</sup>，国际能源署的《全

球能源展望》年度系列报告<sup>[26]</sup>等众多研究成果。三是充分使用《中国统计年鉴》，各类专业统计年鉴，联合国人口数据库、世界银行的数据库等多种数据来源进行计算和分析。

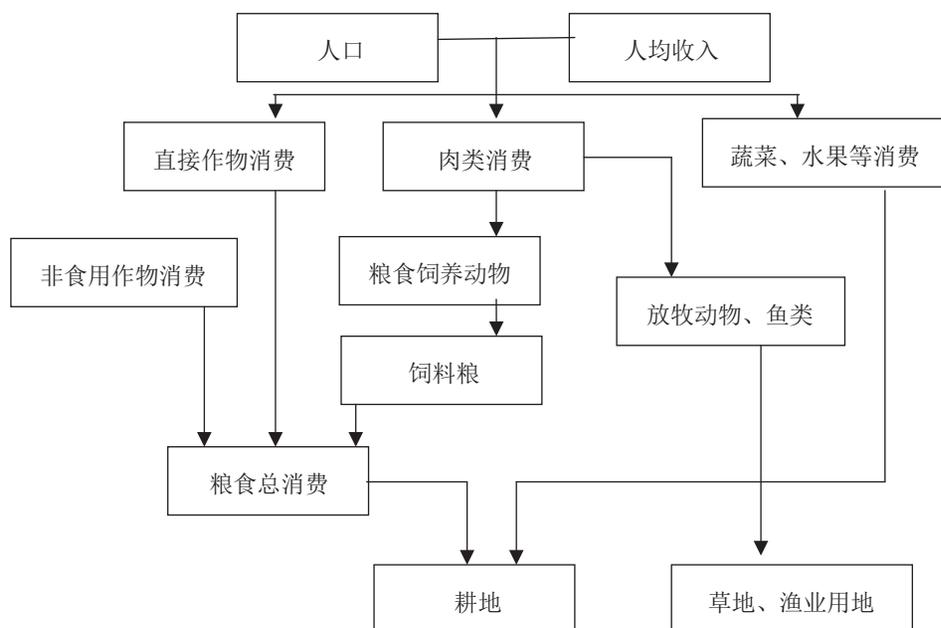


图3 耕地、草地与渔业用地的消费计算因果图

表1 模型中一些主要外生变量的取值设置

指标名称	单位	2020年	2030年
城镇化率	%	60	65
户籍人口城镇化率	%	45	53
城镇公共供水普及率	%	90	95
城市生活垃圾无害化处理率	%	95	98
城市污水处理率	%	95	98
全球谷物平均产量	公斤/公顷	3800	4000
全球大豆平均产量	公斤/公顷	2500	2600
全球蔬菜平均产量	公斤/公顷	20000	21000
全球肉类平均产量	公斤/公顷	80	85
全球水产品平均产量	公斤/公顷	1500	1550
全球林产品平均产量	立方米/公顷	1.99	2.1
全球人均二氧化碳排放	吨/人	5.5	5.8

注：全球水产品平均产量根据海水、淡水的捕捞与养殖合并后加权计算。

模型的模拟时间为1990-2030年,其中1990年的数据需要输入模型,作为模型的启动数据,1990-2015年的数据作为历史数据用来校准模型。模型中的价格以2000年为基准,除非特殊说明一律以2000年价格计价。

## 4 情景模拟与分析

城镇化的发展进程有多种路径,模型的情景只是呈现可能的方案。改变模型中的任何一个政策变量,都可以进行一次新的模拟,生成一个新的情景。本模型共进行三种情景的模拟:1)基准情景,依据联合国环境署构建的中国绿色经济模型(UNEP, 2014)的基准情景<sup>[27,28]</sup>,以及《国家新型城镇化规划(2014-2020年)》中关于2020年新型城镇化主要指标的设置。2)绿色发展情景,是指在基准情景的基础上以绿色发展为导向进行参数设置。3)单变量情景:

只改变某一种城镇化情景,分析其对生态足迹的影响。

### (1) 基准情景

基准情景中对城镇可再生能源消费比重、绿色建筑占新建建筑比重、城市建成区绿地率、百万以上人口城市公共交通占机动化出行比例等主要的绿色指标都设置了具体的目标值。并在征求多位专家意见的基础上将这些主要指标值延伸到2030年。

模型基准情景的模拟结果显示,中国的生态足迹对城镇化水平的依赖十分明显,但这种依赖在2029年后逐步脱钩。国家层面的时间序列数据显示,在2029年以前城镇化水平提高,人均生态足迹也提高。到2029年以后,城镇化率还在提高,但人均生态足迹已经开始下降(见图4)。2015年以后,中国的城镇化速度明显放缓,而且生态足迹增长的速度放缓更加明显。

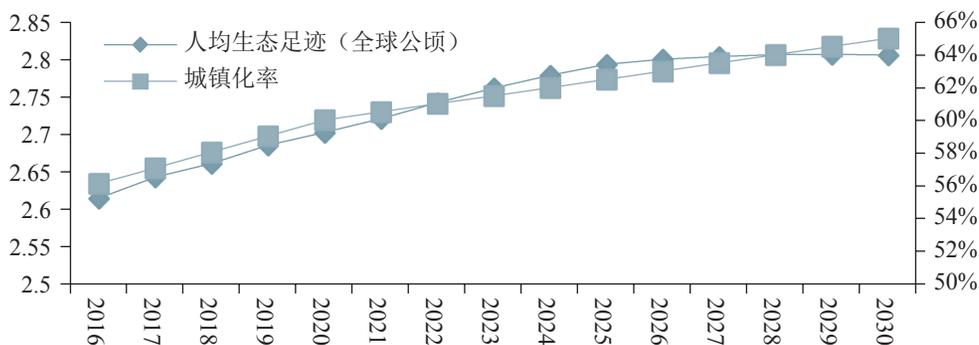


图4 中国的人均生态足迹与城镇化率 (2016-2030)

2020年和2030年中国的经济、社会、环境的模拟状态。中国人口数量在2030年前还将保持持续的增长,但人口老龄化程度越来越严重,2030年60岁以上老年人口比例将达到24.1%。中国的经济还将保持适度增长,

2020至2030年还可以保持5%左右的年均增长率,第三产业比例持续上升,2030年将达到63.2%。中国的一次能源消费还将持续增长,但因为可再生能源比例的持续上升,二氧化碳排放将迎来峰值(表2)。

表2 2020年和2030年部分经济、社会和资源指标模拟值

指标	单位	2020年	2030年
人口总数	亿人	14.1	14.5
城镇常住人口	亿人	8.5	9.4
60岁以上人口比例	%	17.8	24.1
国内生产总值	万亿(2000年不变价)	57.0	89.8
第三产业比例	%	53.4	63.2
一次能源消费总量	亿吨标准煤	46.76	53.7
可再生能源比例 <sup>①</sup>	%	13.0	19.2

中国的人均生态足迹将在2029年达到峰值,人均2.81全球公顷(见图5)。碳足迹是生态足迹变化的最主要因素。1961年至2008年,全球碳足迹占生态足迹的比例增长了28.4%,从36%上升到55%<sup>[4]</sup>。在模型中,中国的二氧化碳排放<sup>②</sup>在2028年达到了排放峰值,人均碳排放在2026年达到峰值。中国的人均碳足迹在2023年达到峰值后开始下降,此时碳足迹占生态足迹的比例为50%。

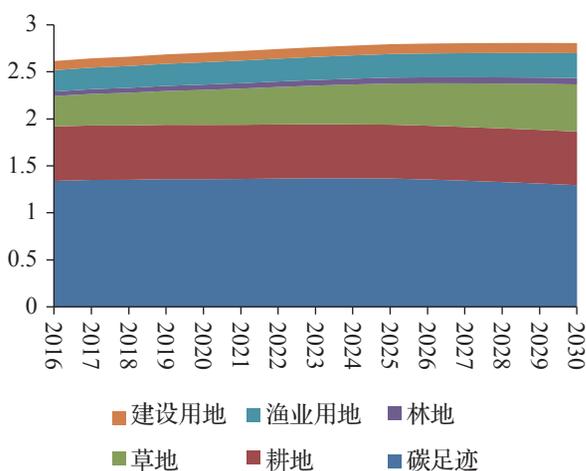


图5 中国生态足迹各组分变化情况(2016-2030)

从生态足迹各组分的增长速度看,草地和

林地的增长速度最快。2016-2030年,草地的生态足迹增长55.15%,林地的生态足迹增长41.823%。草地足迹的快速增长,主要源自城乡居民对牛奶和牛羊肉的需求在未来的巨大增长空间。林地生态足迹的增长,源于中国快速增长的木材和纸浆需求。2020年中国的木材需求(含纸浆)总计约8.19亿立方米,2030年则将达到9.79亿立方米。其中增长最快的是纸及纸板制品和家具的木材需求,成为木材消耗最主要的部门。来自建筑、装修和薪柴的木材需求,在2020年以后,随着建筑面积增长的放慢,都有所下降。耕地生态足迹略有下降,一方面是中国对谷物、大豆、蔬菜的需求增长放缓,另一方面全球的耕地产量也在稳步提升。

2029年以后中国的生态超载情况将有所缓解。人均生物承载力在人口持续增长的情况下略有下降,人均生态赤字在2029年达到2.01全球公顷后开始下降。生态赤字最严重时,中国需要3.52倍的生物供给能力来满足自身的消费需求。

除林地以外,中国的所有土地类型都已经出现生态赤字。从各组分的生态赤字看,碳吸收用地的赤字情况最严重,也是导致中国生态赤字的主要原因。碳吸收用地生态赤字在2023年以后将有所缓解。耕地的生态赤字整体处于缓解状态,赤字逐步减小。但草地、建设用地和渔业用地的生态赤字还将继续上升。林业用地可以保持较为平稳的生态盈余,这主要归功于中国大面积的植树造林和退耕还林政策(图6)。

从以上分析可以看出,未来十五年,中国的生态足迹变化将经历2个不同的阶段。2015-

<sup>①</sup>本研究构建的模型中,未包括薪柴等传统可再生能源,故数值较真实值略低。

<sup>②</sup>包括化石能源与水泥产业的二氧化碳排放。

2025年,产业结构仍然为资源消耗型,生态足迹仍在逐步增加,碳足迹占比达到峰值,但逐渐接近生态足迹的峰值。2026-2030年,城镇化转向以集约的方式发展,使得生态足迹的增值效应逐渐减弱,在达到峰值后逐渐下降。

## (2) 绿色情景

模型通过对农业、林业、建筑、水泥、交通、可再生能源和核电等主要绿色产业和行业从绿色生产、绿色消费和绿色投资的角度进行模拟,分析绿色城镇化道路对中国的生态足迹的影响,并且会带来多大规模的绿色投资需求(基准情景与绿色情景的指标具体设置对比见表3)。

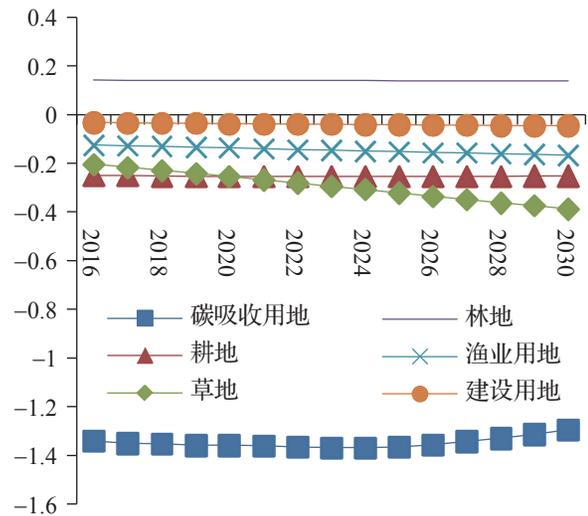


图6 中国各种土地类型的生态盈余或生态赤字 (2016-2030)

表3 基准情景与绿色情景的指标设置对比

	单位	2020年		2030年	
		基准情景	绿色情景	基准情景	绿色情景
每年植树造林占森林面积比例	%	1.8	2.5	1	2
退耕还林还草	万公顷/年	8	10	6	8
绿色耕地的比例	%	18	20	30	35
节水灌溉的比例	%	60	70	70	80
绿色耕地每亩化肥使用量	公斤/公顷	200	180	200	150
城市人均居住面积	平方米	39.97	36.59	45	40
农村人均居住面积	平方米	41.01	37.63	45	40
城市居民建筑的寿命	年	45	50	50	70
城市新建建筑 65% 节能的建筑比例 *	%	50	70	80	90
风能规划装机	万千瓦	21000	25000	40000	45000
太阳能规划装机	万千瓦	10500	14000	35000	40000
水电规划装机	万千瓦	34000	38000	40000	45000
核能规划装机	万千瓦	5800	7000	13600	15000
生物柴油规划产量	万吨	200	400	400	600
非常规天然气的发现	10亿立方米	220	250	250	300
燃煤发电效率	克标准煤/千瓦时	305	300	290	280
水泥替代原料中来自垃圾焚烧残余的比例	%	2	5	5	10
水泥替代燃料的比例	%	5	10	10	15
水泥余热利用比例	%	90	95	95	98
水泥厂 CCS 装置比例	%	0	5	10	20
公共交通占机动车出行比例 **	%	53	55	54	58
普通私人小汽车百公里油耗	升/公里	10	9	10	8
节能私人小汽车百公里油耗	升/公里	7	6.3	6	4.8
重型货车的比例	%	80	85	85	90

注1: 在《国家新型城镇化规划(2014-2020年)》设置的新型城镇化主要指标中,城镇绿色建筑占新建建筑比重2020年为50%。模型中以65%节能的建筑来表示绿色建筑。

注2: 在《国家新型城镇化规划(2014-2020年)》设置的新型城镇化主要指标中,百万以上人口城市公共交通占机动化出行比例2020年为60%,因为一般大城市的公共交通更发达,所以在模型中,将全国城镇的公共交通比例在2020年设置为53%。

绿色情景可以带来更高的生物承载力，消费更少的生态足迹，具有更好的可持续性（见图7）。基准情景和绿色情景的人均生态足迹差距在0.04-0.12全球公顷。随着时间的推移，绿色情景的资源效率的提高越发明显。生态足迹的减少，主要源自碳足迹和林地足迹的减小，碳足迹占生态足迹的比例，在2030年将下降到43.8%。在绿色情景下，中国在2026年就可以达到人均生态足迹的峰值，人均2.7全球公顷。

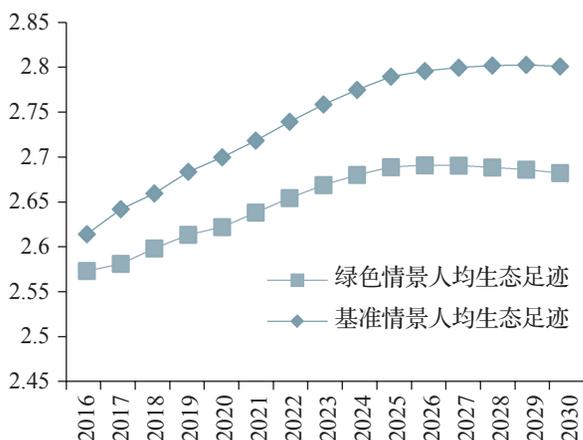


图7 2个情景下中国的人均生态足迹（2012-2030）

绿色情景下的生物承载力在2020年以后逐步增长，主要源自林地和耕地生物承载力的增长（见图8）。更大的森林面积带来林地生物承载力的增长。耕地的面积虽然没有变化，但水资源利用效率的提高，促进了亩产的上升，增加了耕地的生物承载力。

### （3）单变量情景模拟

提高城镇化率将刺激生态足迹的增长。在模型中，如果将2020年和2030年的城镇化率都提高一个百分点（2020年从60%提高到61%；2030年从65%提高到66%），则年均生态足迹上升0.03~0.05全球公顷，这种增长效应

在2020年前后最为明显，2025年以后同步增长的效应则逐渐下降。这与邵磊研究的结果，城镇人口比重每提高1%将使人均生态足迹上升0.240%相比，比例略低<sup>[15]</sup>。

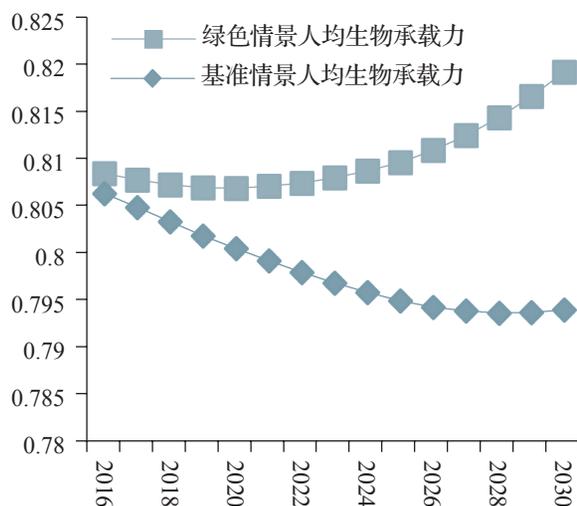


图8 2个情景下中国的人均生物承载力（2012-2030）

加强对农村建设用地的精细化利用，可以减少生态足迹。2000—2011年，中国农村人口减少1.33亿人，农村居民点用地却增加了3045万亩。这主要是因为虽然很多农村人口进城工作，但仍然回到农村盖房。如果将这种情况减少一半，则人均生态足迹可以下降0.005-0.01全球公顷。

## 5 结论与建议

生态足迹与城镇化密切相关，如果不能很好地认识两者关系，将进一步加剧中国的生态环境压力。中国严峻的生态赤字压力，要求中国必须走更加绿色的城镇化道路。当生态赤字最严重时，中国需要3.52倍的生态供给能力来满足自身的消费需求。走更加绿色的发展道路，

可以有效降低生态足迹。中国必须抓住城镇化进程中的机遇,避免城镇化的“锁定效应”,让城镇化进程与生态足迹的增长尽快脱钩。

创新财税体制,拓展投资渠道,增加绿色投资来源。走更加绿色的城镇化道路,就对绿色投资提出了更高的要求。在基准情景下,农业、林业、建筑、水泥、可再生能源和核电等、城市生活垃圾处理等主要绿色产业和行业的绿色投资需求约 11.8 万亿,绿色情景比基准情景又高出 1.8 万亿。政府提供的财政补贴、税收减免等政策具有很强的示范作用和撬动效应,应该充分利用绿色投资与金融政策,发挥私营部门的作用,利用它们大量的知识、资产和经验,调动它们参与关于目标和行动的对话,让政府行动产生显著的、有利于国家的乘数效应。

通过绿色建筑建设和既有建筑的节能改造降低生态足迹。根据先行城镇化国家的经验,建筑和交通将逐渐成为城市最重要的能源消耗来源。中国首先需要控制人均建筑面积的增长。然后应尽快将节能 65% 的建筑在新建建筑中的比例提升到 50% 或更高,避免刚刚建成的建筑又面临节能改造。最后要抓紧开始既有建筑节能示范改造,在基准情景下,到 2030 年仍有 20% 以上的节能 30% 的建筑,这需要及时探索激励政策,总结技术经验。只有既有建筑节能改造取得成效,全国建筑能耗才能大幅下降。

加强土地的精细化管理,促进空间的高效集约利用。2014 年 7 月住建部 and 国土部共同确定了全国 14 个城市开展划定城市开发边界试点工作。城市边界的无限制扩大,将带来人均机动出行距离的大幅增长。“城镇开发边界”将有效约束城镇建设用地粗放增长,应尽快总结经

验在全国范围内推广示范。同时,要加强对农村居民点用地的精细化控制,不能让农村人口在减少,但居民点用地仍在粗放增长。

## 参考文献

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

[2] Wackernagel M and Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[3] 世界自然基金会(WWF).2012.地球生命力报告2012 [R]. 世界自然基金会, 瑞士, 格兰德.

[4] 世界自然基金会(WWF). 地球生命力报告—中国2015 [R]. <http://www.wwfchina.org/specialdetail.php?pid=208&page=1>.

[5] 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[J]. *Ecological Economics*, 2001, 38(1): 25-45.

[6] 赵卫, 刘景双, 孔凡娥, 等. 城市化对区域生态足迹供需的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 120-126.

[7] Muñiz I, Galindo A. Urban form and the ecological footprint of commuting. The case of Barcelona[J]. *Ecological Economics*, 2005, 55(4): 499-514.

[8] Høyer K G, Holden E. Household Consumption and Ecological Footprints in Norway – Does Urban Form Matter?[J]. *Journal of Consumer Policy*, 2003, 26(3): 327-349.

[9] Xie G, Chen W, Cao S, et al. The Outward Extension of an Ecological Footprint in City Expansion: The Case of Beijing[J]. *Sustainability*, 2014, 6(12):

9371-9386.

[10] Marrero M, Puerto M, Rivero-Camacho C, et al. Assessing the Economic Impact and Ecological Footprint of Construction and Demolition Waste During the Urbanization of Rural Land[J]. Resources Conservation & Recycling, 2017, 117: 160-174.

[11] 李晋玲, 刘人境, 汪应洛. 基于生态足迹的城市化研究——以西安市为例[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2007, 36(3): 103-109.

[12] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of Population Growth[J]. Science, 1971, 171(3977): 1212.

[13] Dietz T, Rosa E A. Effects of Population and Affluence on CO<sub>2</sub> Emissions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(1): 175.

[14] 邵磊. 中国城镇化进程生态足迹的时空演变研究[D]. 合肥: 安徽财经大学, 2014.

[15] 王子超, 晁敏. 基于Stella的江苏近海海域生态足迹模拟分析[J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 576-586.

[16] 张爱儒. 三江源生态功能区产业生态化模式研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.

[17] 杨青, 逯承鹏, 周锋, 等. 基于能值-生态足迹模型的东北老工业基地生态安全评价——以辽宁省为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1594-1602.

[18] 狄乾斌, 张海红, 曹可. 基于能值的山东省海洋生态足迹研究[J]. 海洋通报(英文版), 2015, 17(2): 68-81.

[19] Jin W, Xu L Y, Yang Z F. Modeling a Policy Making Framework for Urban Sustainability: Incorporating System Dynamics into the Ecological Footprint [J]. Ecological Economics, 2009(68): 2938-1949.

[20] 吴亮. 广州市生态足迹的系统动力学研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2009.

[21] 李磊, 刘洁, 刘学. 无锡市生态足迹的系统动力学仿真研究[J]. 资源开发与市场, 2012, 28(1): 21-24.

[22] 黄振中, 王艳, 李思一, 等. 中国可持续发展系统动力学仿真模型[J]. 计算机仿真, 1997(4): 3-7.

[23] 世界银行、国务院发展研究中心联合课题组. 2030年的中国[M]. 北京: 中国财政经济出版社, 2013.

[24] 胡鞍钢等(清华大学国情研究中心). 2030中国——迈向共同富裕[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011.

[25] 2050中国能源和碳排放研究课题组. 2050中国能源和碳排放报告[M]. 北京: 中国科学出版社, 2009.

[26] IEA. Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems [R]. OECD/IEA, 2016.

[27] 佟贺丰, 杨阳, 王静宜. 中国绿色经济发展展望——基于系统动力学模型的情景分析[J]. 中国软科学, 2015(6): 20-34.

[28] 佟贺丰, 杨岩. 基于系统动力学模型的中国城市生活垃圾回收过程中的就业问题研究[J]. 情报工程, 2016, 2(5): 104-111.