

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

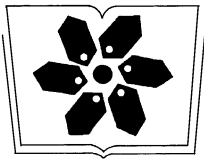
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第1期 Vol.33 No.1 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 1 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 生态整合与文明发展..... 王如松 (1)
- 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展 高光耀,傅伯杰,吕一河,等 (12)
- 城市林木树冠覆盖研究进展 贾宝全,王 成,邱尔发,等 (23)
- 环境质量评价中的生物指示与生物监测 Bernd Markert,王美娥,Simone Wünschmann,等 (33)
- 水溶性有机物电子转移能力及其生态效应 毕 冉,周顺桂,袁 田,等 (45)

个体与基础生态

- 凋落物和增温联合作用对峨眉冷杉幼苗抗氧化特征的影响 杨 阳,杨 燕,王根绪,等 (53)
- 不同浓度 5-氨基乙酰丙酸(ALA)浸种对 NaCl 胁迫下番茄种子发芽率及芽苗生长的影响
..... 赵艳艳,胡晓辉,邹志荣,等 (62)
- 缺镁胁迫对纽荷尔脐橙叶绿素荧光特性的影响 凌丽俐,彭良志,王男麒,等 (71)
- 松嫩草地 66 种草本植物叶片性状特征..... 宋彦涛,周道玮,王 平,等 (79)
- 花蜜中酚类物质对群落中同花期植物传粉的影响..... 赵广印,李建军,高 洁 (89)
- 桉树枝瘿姬小蜂连续世代种群生命表..... 朱方丽,邱宝利,任顺祥 (97)

种群、群落和生态系统

- 蒙古栎地理分布的主导气候因子及其阈值 殷晓洁,周广胜,隋兴华,等 (103)
- 河静黑叶猴果实性食物组成、选择及其对种子的扩散作用..... 阮海河,白 冰,李 宁,等 (110)
- 2010 秋季东海今生颗石藻的空间分布 靳少非,孙 军,刘志亮 (120)
- OPRK1 基因 SNP 与梅花鹿日间行为性状的相关性 吕慎金,杨 燕,魏万红 (132)
- 鄱阳湖流域非繁殖期鸟类多样性 邵明勤,曾宾宾,徐贤柱,等 (140)
- 人工巢箱条件下两种山雀鸟类的同域共存机制 李 乐,张 雷,殷江霞,等 (150)
- 桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态 李艳红,杨万勤,罗承德,等 (159)
- 三峡库区生态系统服务功能重要性评价 李月臣,刘春霞,闵 婕,等 (168)

景观、区域和全球生态

- 黄土高原小流域不同地形下土壤有机碳分布特征 李林海,郜二虎,梦 梦,等 (179)
- 海岸带地理特征对沉水植被丰度的影响..... 吴明丽,李叙勇,陈年来 (188)
- 玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质 曹国栋,陈接华,夏 军,等 (195)

资源与产业生态

- 农田开垦对三江平原湿地土壤种子库影响及湿地恢复潜力 王国栋,Beth A Middleton,吕宪国,等 (205)
- 漫溢干扰过程中微地形对幼苗定居的影响 安红燕,徐海量,叶 茂,等 (214)
- 黑龙江流域夏玉米产量提升限制因素 徐丽娜,陶洪斌,黄收兵,等 (222)
- 黑龙江省药用植物根际土壤真菌多样性 慕东艳,吕国忠,孙晓东,等 (229)

桑沟湾养殖生态系统健康综合评价 傅明珠,蒲新明,王宗灵,等 (238)

城乡与社会生态

基于“OOAO 原则”的罗源湾生态质量状况综合评价 吴海燕,吴耀建,陈克亮,等 (249)

四十里湾营养状况与浮游植物生态特征 李 斌,白艳艳,邢红艳,等 (260)

生态足迹深度和广度:构建三维模型的新指标 方 恺 (267)

中国东西部中小城市景观格局及其驱动力 齐 杨,邬建国,李建龙,等 (275)

研究简报

南海陆坡沉积物细菌丰度预测 李 涛,王 鹏 (286)

浑善达克沙地榆树疏林幼苗更新空间格局 刘 振,董 智,李红丽,等 (294)

光 and 不同打破种子休眠方法对紫茎泽兰种子萌发及幼苗状态的影响 姜 勇,李艳红,王文杰,等 (302)

学术争鸣

关于植物群丛划分的探讨 邢韶华,于梦凡,杨立娟,等 (310)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-01



封面图说:外来入侵物种紫茎泽兰——紫茎泽兰约于 20 世纪 40 年代由缅甸传入中国云南南部后迅速蔓延,现已在云南、贵州、四川、广西、重庆、湖北、西藏等省区广泛分布和危害,并仍以每年大约 30 km 的速度扩散。紫茎泽兰为多年生草本或亚灌木,号称“植物界杀手”。其对环境的适应性极强,疯长蔓延,能极大耗损土壤肥力。它的植株能释放多种化感物质,排挤其他植物生长而形成单优种群,它破坏生物多样性,威胁到农作物、畜牧草甚至林木,且花粉能引起人类过敏性疾病等,目前尚无有效治理对策。

彩图提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites. chenjw@ 163. com

DOI: 10.5846/stxb201111051670

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): 0267-0274.

Fang K. Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 0267-0274.

生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标

方 恺^{*}

(荷兰莱顿大学环境科学系, 莱顿 2333CC)

摘要: 追踪自然资本存量消耗与流量占用是当前可持续发展研究的核心议题。系统阐述了国际上新近提出的生态足迹三维模型的概念与计算方法, 重点对足迹深度和足迹广度两个指标进行了探讨, 总结了模型的主要优势, 并通过引入资本流量占用率和存量流量利用比两个新指标对模型作进一步完善, 在此基础上实证分析了 1961—2006 年的中国生态足迹。结果表明, 中国自 1978 年步入生态赤字时代以来, 足迹深度增长了近 2 倍, 足迹广度减少了 11.84%, 因自然资本流量不足导致资本存量大幅消耗已成为社会发展常态。到 2006 年时, 中国需要 2.9 倍的国土才能持续支撑其资源消费量。研究表明, 三维模型分别从时空两方面表征了人类对资本存量的消耗(足迹深度)和对流量的占用(足迹广度), 增强了生态足迹在不同区域、不同时期之间的可比性, 并在一定程度上克服了经典模型的评估缺陷。最后指出了三维模型今后发展的主要方向。

关键词: 自然资本; 生态足迹; 足迹深度; 足迹广度; 三维模型

Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model

FANG Kai^{*}

Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden 2333CC, the Netherlands

Abstract: The accelerating growth in natural resource exploration and consumption is creating serious environmental problems on a global scale, which forces people to re-examine the conflicting relationship between environmental quality and economic expansion. In this sense, it is of great importance to develop objective and forward-looking indicators and models that can be used to understand, measure, and predict the environmental impacts associated with human activities. Building on the achievements in evaluating net primary productivity of global ecosystem and its human appropriation, the ecological footprint was formally proposed by ecological economists Rees and Wackernagel. The ecological footprint is a biophysical quantitative assessment tool designed to measure the impacts of human consumption of energy and material on the global ecosystems. It measures the areas of land required to continuously supply for resource provision and waste assimilation to satisfy human consumption, compares the demand with the globe's biocapacity to regenerate the resources and to absorb the waste, by representing the amount of biologically productive land area still needed. Despite its success in the policy world and general public the method is riddled with problems. However, it is difficult for any single indicator to efficiently collect enough information related to sustainability. Progress has been made in further maturing the ecological footprint, but there is still much room for methodological improvement. From a viewpoint of ecological footprint, human society can be considered sustainable only if the demand remains within the regenerative capacity of the planet. All renewable flows and stocks of resources and ecological services may be consumed but non-renewable stocks should remain untouched. In particular, the ability to regenerate stocks necessary for human welfare must be maintained. Otherwise, the balance of ecosystems may strike. In this case, natural capital has become a limiting factor for human welfare and sustainability.

基金项目: 国家公派留学基金项目(20113005)

收稿日期: 2011-11-05; **修订日期:** 2012-03-07

*** 通讯作者** Corresponding author. E-mail: fang@cml.leidenuniv.nl

Therefore, tracking depletion of natural capital stocks and appropriation of natural capital flows are central topics in the study of sustainable development, and has gained much attention from the scientific community.

In this paper, the concepts and calculating methods of a 3D model of ecological footprint recently introduced by Niccolucci and Wackernagel, etc. are discussed systematically. In particular, a great deal of emphasis is put on two indicators of the 3D model-footprint depth and footprint size. The main strengths of this model are also studied by comparing it with the classical model. Some improvements are proposed using two new indicators-appropriation rate of capital flows and use ratio of stocks to flows. An empirical analysis on China based on the data of national footprint accounts during 1961—2006 illustrates and tests the methods discussed. It is concluded that the footprint depth has almost tripled since 1978 when China entered an ecological deficit era, while the footprint size declined by 12%. This presents a huge demand for compensating the lack of natural capital flows through depletion of stocks under the high human induced pressure. In 2006, China required also almost 3 times its land area to support its population's resource consumption. In this sense, the 3D model becomes a temporal-spatial approach to better explain the difference between human demand for natural capital flows and stocks. It enhances comparability between either different regions or different generations, and is partly able to avoid excessively conservative estimates. Room for further improvement is identified as well.

Key Words: natural capital; ecological footprint; footprint depth; footprint size; 3D model

自然资本是影响人类福祉与可持续性水平的关键因素^[1-2]。相对缓慢的资源更新速度越来越无法满足人类不断膨胀的物质需求^[3],这一矛盾成为阻碍社会可持续发展的现实威胁。因此,如何量化人类对自然资本的需求以及自然资本的供给能力,是可持续发展研究领域的优先课题^[4]。在此背景下,生态足迹作为一种评价可持续发展的生物物理方法应运而生^[5-6]。该方法从土地的生物生产功能入手,用面积大小直观地表征人类资源消费和废弃物排放过程中对生态环境的占用程度,视角新颖,思路清晰,方法简便可行,得到了学界的积极响应与普遍认同^[7-8]。

近年来,随着相关研究的深入,生态足迹模型中的一些局限也逐渐显现^[8-10],很多学者尝试引入新的分析方法或指标加以改进和完善,取得了长足的进步。例如,针对静态性评估不能预测生态足迹变化趋势的问题,Wackernagel等^[11]提出通过长时间序列计算加以克服;针对均衡因子和产量因子难以反映区域实际特征的缺陷,Haberl等^[12]利用研究区监测数据取代全球均值,以准确测度人类活动对区域生态环境的影响程度;针对生产力概念界定模糊的不足,Kitzes等^[8]建议根据生态系统的实际生产力而非潜在生产力进行计算,这样会更精确地反映人类活动的生态累积效应;针对贸易调整中存在的不确定性,Kissinger等^[13]通过追踪商品特性将生态足迹落实到具体的货源地上。最近,Niccolucci和Wackernagel等^[14-15]通过引入两个新指标——生态足迹深度和生态足迹广度(以下分别简称足迹深度和足迹广度),将原来的二维模型增加到三维,使生态足迹研究向纵深拓展。本文重点阐述生态足迹三维模型的基本概念和计算方法,总结模型的主要优势,并以中国为例进行实证分析,以期推动该方向研究在我国尽快展开。

1 生态足迹三维模型

1.1 理论基础

与传统经济学不同,生态经济学认为市场仅对特定属性的商品和服务有效,而非确定经济最优性的主要工具,从存量和流量的维度研究自然资本的属性非常必要^[16]。经典的生态足迹二维模型虽然承认自然资本在可持续发展中的重要性^[17],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。生态经济学家Daly^[18]借鉴热力学熵定律,提出了可持续发展需要遵循的三项基本准则:(1)可再生资源(如生物资源)的占用速度不应快于其再生速度;(2)不可再生资源(如化石燃料)的消耗速度不应快于相应可再生资源的替代速度;(3)污染和废弃物的排放速度不应快于生态系统无害化处理的速度。简言之,只要自然资本存量不减少,即使资本流量被完全占用,仍符合可持续发展的最低限度。Daly

准则的关键,在于如何追踪被人类利用的自然资本存量和流量。三维模型基于该准则,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。

1.2 概念与计算

经典的二维模型将生态足迹视为一条封闭曲线(圆),由内圆(生物承载力)和圆环(生态赤字)相加得到(图 1a);而三维模型将生态足迹视为一个圆柱体,由底面(生物承载力)与柱高(足迹深度)相乘得到(图 1b)。

因此,存在以下恒等关系^[14]:

$$EF = BC + ED = BC \times EF_{\text{depth}} \quad (1)$$

式中, EF 为生态足迹 (ghm^2); BC 为生物承载力 (ghm^2); ED 为生态赤字 (ghm^2); EF_{depth} 为足迹深度(无量纲); EF_{size} 为足迹广度 (ghm^2)。

下面分别阐述足迹深度和足迹广度的概念、性质和计算方法:

(1) 足迹深度

足迹深度代表了人类对自然资本存量的消耗程度,具体可表述为等价的两层含义:(1) 需要多少公顷土地才能提供人类在 1 ghm^2 土地上所消费的资源量(或者说需要多少个地球才能支撑当前全球人口的资源消费量);(2) 需要多少年才能再生人类在 1 a 中所消费的资源量。

根据式(1),足迹深度的计算公式为^[14]:

$$EF_{\text{depth}} = 1 + \frac{ED}{BC} \quad (2)$$

进一步地,足迹深度可分为自然深度和附加深度两部分:

$$EF_{\text{depth}} = EF_{\text{depth}}^{\text{NAT}} + EF_{\text{depth}}^{\text{ADD}} \quad (3)$$

式中, $EF_{\text{depth}}^{\text{NAT}}$ 为自然深度(恒为 1); $EF_{\text{depth}}^{\text{ADD}}$ 为附加深度。

由式(3)知, $EF_{\text{depth}} \geq 1$: (1) 当 $EF \leq BC$ 时,仅有自然深度, $EF_{\text{depth}} = 1$, 此时人类占用自然资本流量 (EF_{size}) 即可满足自身需求; (2) 当 $EF > BC$ 时, $EF_{\text{depth}} > 1$, 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_{depth} 越大,表明消耗的自然资本存量越多,发展越不可持续。

(2) 足迹广度

足迹广度代表了人类对自然资本流量的占用大小。根据 Hicks 经济学理论^[19], 资本流动不会减少财富总量,对生态系统而言即意味着可持续性。生物圈可提供的自然资本流量上限为生物承载力,故足迹广度取值范围为^[14]:

$$0 < EF_{\text{size}} \leq BC \quad (4)$$

1.3 主要优势

1.3.1 区分自然资本存量和流量

区分并追踪自然资本存量的消耗与流量的占用是可持续发展的核心议题。三维模型以 Daly 准则为理论基础,改变了以往生态足迹研究中不区分自然资本存量和流量的做法,以存量资本减少与否作为可持续性的基本判据,丰富了生态足迹理论的经济学内涵。

1.3.2 引入足迹深度和足迹广度

足迹深度表征了人类对超出生物承载力部分资源的累积需求,具有时间属性;足迹广度表征了人类对生物生产土地的年际需求,具有空间属性(土地是最具表现力和权威性的空间概念^[20])。因此,三维模型是一个时空模型,它既强调空间(土地)资源的稀缺性,又关注资源消费与资源再生之间的不同步性。

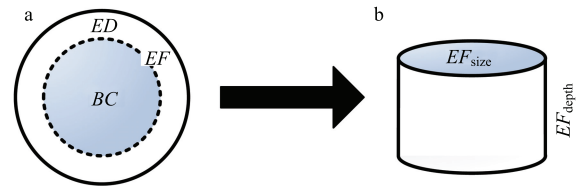


图 1 生态足迹模型由二维向三维的演变^[14]

Fig. 1 Development of the ecological footprint models from 2D to 3D

EF : 生态足迹; BC : 生物承载力; ED : 生态赤字; EF_{depth} : 足迹深度; EF_{size} : 足迹广度

1.3.3 模型维度由二维增至三维

引入足迹深度后,生态足迹模型由二维变成三维,它不再是表征面积的物理量,而是表征体积的物理量(尽管仍保留 ghm^2 作单位),其计算公式为^[15]:

$$EF_{3D} = EF_{\text{size}} \times EF_{\text{depth}} \quad (5)$$

需要指出的是,三维模型在数值上仍与经典模型一致^[15]:

$$|EF_{3D}| = |EF_{\text{classic}}| \quad (6)$$

1.3.4 强调代内公平和代际公平

不再以生态足迹或生态赤字的绝对数值作为区域间可持续性比较的唯一依据,因为较大的生态足迹或生态赤字往往并不代表发展的不可持续性,相反却表明经济开放程度较高^[21]。三维模型中,足迹广度可表征同一时期不同区域间资源消费和生态服务的公平性差异,足迹深度则能表征同一区域不同时期资源消费和生态服务的公平性差异,从而使生态足迹在不同区域、不同时期之间的可比性得到增强。

1.4 模型补充

1.4.1 引入资本流量占用率

当资本流量未被完全占用时,足迹深度处于自然原长,无法表征人类对资本流量的实际占用程度。为此,引入资本流量占用率指标,其计算公式为:

$$or_{\text{FLOW}} = \frac{EF_{\text{size}}}{BC} \times 100\% \quad (EF \leq BC) \quad (7)$$

1.4.2 引入存量流量利用比

当资本流量被完全占用时,存量资本也开始消耗。为此,引入存量流量利用比指标,以表征实际所利用自然资本中存量与流量之间的大小关系,其计算公式为:

$$r_{\text{FLOW}}^{\text{STOCK}} = \frac{EF - EF_{\text{size}}}{EF_{\text{size}}} = \frac{ED}{BC} = EF_{\text{depth}} - 1 \quad (EF > BC) \quad (8)$$

2 基于三维模型的中国生态足迹分析

2.1 生态足迹和生物承载力

1961—2006 年,中国人均生态足迹^①在波动中迅速上升,从 1961 年的 0.76 ghm^2 增加到 2006 年的 1.94 ghm^2 ,年均递增 2.10%;与此相反,同期人均生物承载力缓慢下降,从 1.43 ghm^2 减少到 0.67 ghm^2 ,年均递减 1.67%。总体上,两者呈反向变化趋势(图 2),生态足迹的波动相对剧烈,这是因为生态足迹对人为因素较敏感,而生物承载力主要受自然资源禀赋支配。1961 年,生态足迹仅占生物承载力的一半左右;而到 2006 年时,生态足迹已反超生物承载力近 1 倍,人均生态赤字高达 1.27 ghm^2 。1999 年,无论生态足迹还是生物承载力均有明显减少,很可能与金融危机和洪灾的影响有关,这也与 CCICED-WWF^[24] 的计算结果基本一致。

2.2 足迹深度和足迹广度

2.2.1 足迹深度

如图 3 所示,1961—1977 年,足迹深度一直处于自然原长,此时中国处于生态盈余状态,依靠自然资本流

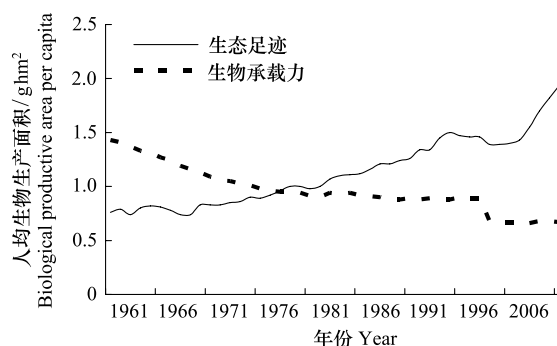


图 2 1961—2006 年中国人均生态足迹和生物承载力变化趋势

Fig. 2 Trends of ecological footprint and biocapacity per capita in China from 1961 to 2006

① 本文所需的生态足迹和生物承载力基础数据源自文献[22-23]

量完全可以满足自身的资源和生态服务需求;1978年,足迹深度首次突破1,标志着中国生态赤字时代到来,自然资本流量不足以支撑日益膨胀的消费需求,需要消耗资本存量以维持自身发展;1979—2002年,足迹深度除在个别年份(1993、1996年)短暂减少外,总体呈明显上升趋势;2003—2005年,足迹深度增速进一步加快,年均递增6.79%,表明资源消费的生态压力持续增大;到2006年时,足迹深度高达2.90(即需要近3倍的国土面积才能持续支撑当前中国的资源消费量),较1977年增长了近2倍,表明资源消费与再生之间的速度差已相当大。

进一步分析,若视生物承载力为自然资本的年际收益,生态足迹为年际支出,则生态赤字类似于一种生态债务^[25]。尽管生物承载力与生态赤字的量纲相同(ghm^2),但两者有本质性的差异:生物承载力是真实存在的土地面积,无法逐年累加;而生态赤字是具有虚拟属性的土地面积,可以逐年累加。根据“分母不变分子相加”的同分母分数相加法则,若忽略生物承载力的微小变化,则生态赤字与生物承载力的比值也应具有累加功能,由式(2)知,即足迹深度也可随时间推移不断累加。也就是说,虽然中国先前连续17a保持了生态盈余,但自然资本流量一旦无法及时替代所消费的资源,就会立即引起资本存量减少,从而导致生态赤字。此外,随着足迹深度逐渐增大,资本存量消耗加快,还会反作用于生物承载力导致其下降。

2.2.2 足迹广度

比较图3与图2发现,1961—1972年,人均足迹广度与生态足迹处于同步变化阶段,在 0.8 ghm^2 左右小幅震荡;1973—1979年,人均足迹广度迅速增加,最终达到 0.95 ghm^2 的历史高位,此时对自然资本流量的实际占用率也达到最大。这一时期,由于生物承载力被反超,足迹广度与生态足迹脱钩并与生物承载力挂钩^[26],生物生产土地开始成为中国经济社会发展的限制性因子;1980—1989年,受人口持续增长等因素影响,足迹广度随生物承载力呈波动下降趋势但降幅趋缓,尽管该时期自然资本流量的占用率均达到100%,但实际占用率已有所减少;1990—1998年,人均足迹广度基本稳定在 0.9 ghm^2 左右;1999年,人均足迹广度骤降到 0.68 ghm^2 ,除数据来源不同导致的结果误差外,如前所述,很可能与金融危机和洪灾导致自然资本流量减少有关;2000—2006年,足迹广度基本保持稳定。

2.2.3 比较分析

(1) 变化率

比较足迹深度和足迹广度的历年变化率(图4):1961—2006年,足迹深度从1.00增加到2.90,年均递增2.39%(实际上直到1978年才开始增长,故实际增速为3.84%);同期人均足迹广度从 0.76 ghm^2 减少到 0.67 ghm^2 ,年均递减0.28%(实际上总体呈先升后降趋势)。可见,足迹深度的增幅明显大于足迹广度的降幅,由式(5)知,这是生态足迹不断增加的结果。从图5也可看出,若将中国生态足迹视为一个体积逐渐增大的圆柱,其底面积和柱高呈非等比例变化:1961—1977年,柱高始终未变,仅有底面积在扩大;1978—2006年,柱高迅速增加,而底面积却缓慢缩小。这也从一个侧面反映出生态环境所承受的压力和压强都在迅速增大。

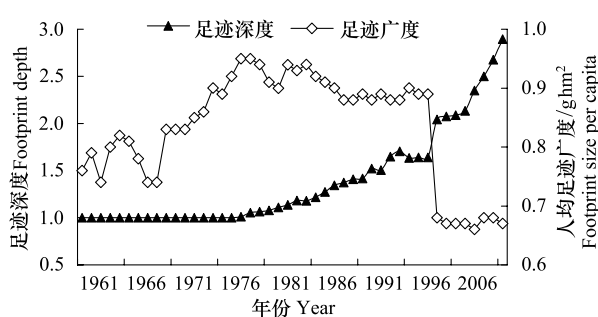


图3 1961—2006年中国足迹深度和人均足迹广度

Fig.3 Footprint depth and footprint size per capita in China from 1961 to 2006

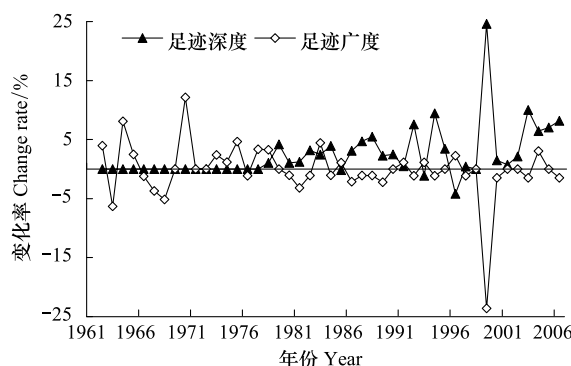


图4 1962—2006年中国足迹深度和足迹广度的变化率

Fig.4 Change rate of footprint depth and footprint size in China from 1962 to 2006

(2) 资本流量占用率和存量流量利用比

资本流量占用率和存量流量利用比的计算结果见表1。1961—1977年,资本流量占用率从53.1%倍增至95.8%,表明在占用水平大幅提高的同时,供给也接近饱和;1978—1998年,存量流量利用比从0.01增加到0.64,表明中国所利用自然资本的近40%由存量资本提供;1999年,存量流量利用比骤增62.5%,首次突破1,资本存量取代流量成为中国自然资本供给的主要来源;2000—2006年,随着生态足迹与生物承载力的差距进一步扩大,存量流量利用比继续迅速增大,资本存量消耗量已接近资本流量占用量的2倍,表明因资本流量不足导致资本存量大幅消耗已成为中国社会发展的常态。

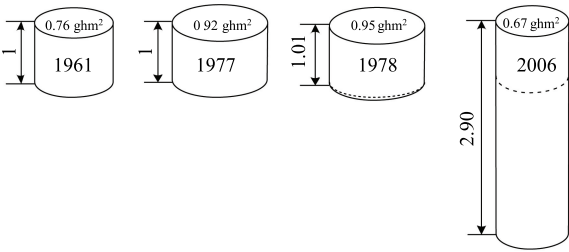


图5 特征年份的中国三维生态足迹
Fig. 5 3D ecological footprint in China in specific years

表1 1961—2006年中国资本流量占用率和存量流量利用比

Table 1 Appropriation rate of capital flows and use ratio of stocks to flows in China from 1961 to 2006					
年份 Year	资本流量占用率/% Appropriation rate of capital flows	年份 Year	存量流量利用比 Use ratio of stocks to flows	年份 Year	存量流量利用比 Use ratio of stocks to flows
1961	53.15	1978	0.01	1995	0.70
1962	56.03	1979	0.05	1996	0.63
1963	54.01	1980	0.06	1997	0.64
1964	60.15	1981	0.08	1998	0.64
1965	62.60	1982	0.11	1999	1.04
1966	63.78	1983	0.14	2000	1.07
1967	62.90	1984	0.18	2001	1.09
1968	62.18	1985	0.18	2002	1.13
1969	63.79	1986	0.22	2003	1.35
1970	73.45	1987	0.27	2004	1.50
1971	76.15	1988	0.34	2005	1.68
1972	78.30	1989	0.38	2006	1.90
1973	80.95	1990	0.41		
1974	83.50	1991	0.42		
1975	89.11	1992	0.52		
1976	90.82	1993	0.51		
1977	95.83	1994	0.65		

(3) 剪刀差^①

通过计算剪刀差分析中国足迹深度与足迹广度变化趋势的差异性。如图6所示,足迹深度与足迹广度的变化差异不断扩大。1961—1977年,两者的反向趋势相对较弱,主要是因为足迹深度一直保持不变;1978—1998年,两者的反向趋势逐步显现;1999年,剪刀差骤升到3.06,两者的拮抗作用十分明显,表明在自然资本流量急剧减少的背景下,越来越多的存量资本被动用以维持自身发展;2000—2006年,两者的反向趋势进一步显现。此外,足迹深度与足迹广度的剪刀差总体大于生态足迹与生物承载力的剪刀差,意味着资源消费供

① 剪刀差可以表征某时刻两种变化趋势之间的差异程度,其计算公式为^[27]:

$$\alpha = \arccos \frac{1 + y'_1(t_0)y'_2(t_0)}{[1 + (y'_1(t_0))^2]^{\frac{1}{2}}[1 + (y'_2(t_0))^2]^{\frac{1}{2}}} \quad 0 \leq \alpha \leq \pi$$

式中, α 为剪刀差(α 越大表明两者变化差异越大); $y'_1(t_0)$, $y'_2(t_0)$ 分别为 t_0 时刻两种指标的变化率

需矛盾在三维模型上得到更明显的反映,有助于克服经典模型对人类环境影响估计不足的局限^[28]。

3 结论与讨论

本文系统阐述了生态足迹三维模型的概念和计算方法,重点对足迹深度和足迹广度两个指标进行了探讨,总结了模型的主要优势,并通过引入资本流量占用率和存量流量利用比两个新指标对模型作进一步完善。三维模型以 Daly 准则为理论基础,不仅考虑人类资源消费对生物生产土地的年际占用(足迹广度),还考虑其在时间上的累积效应(足迹深度),在区分自然资本存量与流量的同时,保持了经典模型的基本框架和优势,在可再生资源 and 生态服务供给不足、需要动用存量资本时十分有效。此外,作为一个时空模型,它非常关注资源消费与生态服务的代内和代际公平,增强了生态足迹在不同区域、不同时期之间的可比性。

对中国的实证分析表明,1961—2006 年,人均生态足迹倍增有余,反超生物承载力近 1 倍。1978 年,尽管足迹广度达到 0.95 ghm² 的历史高位,但足迹深度也首次突破原长,中国步入生态赤字时代,由于自然资本流量不足导致资本存量消耗成为社会发展常态。在随后的 28 a 中,足迹深度增长近 2 倍,足迹广度波动下降,两者的反向趋势不断强化,生态环境压力迅速增大。到 2006 年时,中国需要近 3 倍的国土才能持续支撑其资源消费量。结果表明,资源消费供需矛盾在三维模型上反映得更为显著,一定程度上克服了经典模型的评估缺陷。

近年来,模型改进及性能测试已成为生态足迹研究的重中之重。成分法与物质流分析、投入产出分析、生命周期评价、能值分析、净初级生产力、情景分析、非线性科学理论、3S、土地利用/覆被变化、生态系统服务评估、生态补偿等方法和技术相继参与其中,在促进生态足迹理论发展与深化的同时,并未从根本上改变模型的二维尺度。三维模型的提出,为生态足迹改进研究提供了新的视角。诚然,该模型仍存在一定的局限性,主要表现为:(1) 未分析自然资本在不同类型生物生产土地上的供需关系;(2) 未测算存量资本消耗对生物承载力和土地生产力的具体影响;(3) 未考虑跨区贸易对自然资本的转移作用,这些均有待于今后研究解决。此外,本文所采用的数据来源虽然存在一定差异,但均基于相同的计算方法,数据之间的相关性也较强,所以对研究结果的影响并不明显。最后还需指出的是,本文仅分析了自然资本存量相较于以往年份的消耗程度,如能建立一个广为接受的自然资本存量测度方法(类似于经济学中估算物质资本存量的永续盘存法^[29]),则将进一步推动可持续发展研究的量化进程。

References:

- [1] Costanza R, Daly H E. Natural capital and sustainable development. *Conservation Biology*, 1992, 6(1): 37-46.
- [2] Farley J, Daly H. Natural capital: the limiting factor; a reply to Aronson, Blignaut, Milton and Clewell. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 6-10.
- [3] Tiezzi E. *The End of Time*. Southampton: Wit Press, 2002: 200.
- [4] Wackernagel M, White S, Moran D. Using Ecological Footprint accounts: from analysis to applications. *International Journal of Environment and Sustainable Development*, 2004, 3(3/4): 293-315.
- [5] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121-130.
- [6] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 160.
- [7] Xu Z M, Cheng G D, Zhang Z Q. Measuring sustainable development with the ecological footprint method — take Zhangye prefecture as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [8] Kitzes J, Galli A, Bagliani M, Barrett J, Dige G, Ede S, Erb K, Giljum S, Haberl H, Hails C, Jolia-Ferrier L, Jungwirth S, Lenzen M, Lewis K, Loh J, Marchettini N, Messinger H, Milne K, Moles R, Monfreda C, Moran D, Nakano K, Pyhälä A, Rees W, Simmons C, Wackernagel M,

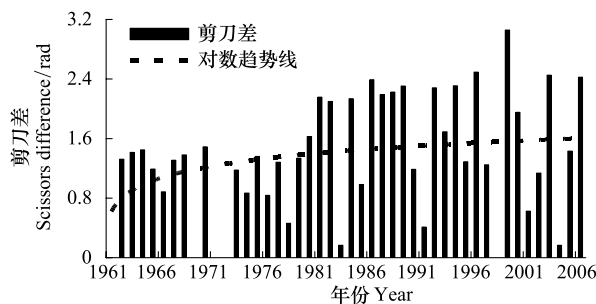


图6 1962—2006 年中国足迹深度和足迹广度的剪刀差

Fig.6 Scissors difference between footprint depth and footprint size in China from 1962 to 2006

- Wada Y, Walsh C, Wiedmann T. A research agenda for improving national Ecological Footprint accounts. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1991-2007.
- [9] Fiala N. Measuring sustainability: why the ecological footprint is bad economics and bad environmental science. *Ecological Economics*, 2008, 67(4): 519-525.
- [10] van den Bergh J C J M, Grazi F. On the policy relevance of ecological footprints. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(13): 4843-4844.
- [11] Wackernagel M, Monfreda C, Schulz N B, Erb K H, Haberl H, Krausmann F. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 271-278.
- [12] 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.
- [13] Kissinger M, Gottlieb D. Place oriented ecological footprint analysis — the case of Israel's grain supply. *Ecological Economics*, 2010, 69(8): 1639-1645.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Zhong F L, Xu Z M, Zhang Z Q. Identifying key differences between ecological economics and conventional economics. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(4): 401-407.
- [17] Rees W E. Ecological Footprints and biocapacity: essential elements in sustainability assessment // Dewulf J, van Langenhove H, eds. *Renewables-Based Technology: Sustainability Assessment*. Chichester: John Wiley and Sons, 2006: 143-158.
- [18] Daly H E, Farley J. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Washington: Island Press, 2004: 29-36.
- [19] Hicks J R. *Value and Capital: An Inquiry into Some Fundamental Principles of Economic Theory*. Oxford: Oxford University Press, 1946.
- [20] Zhang L. A resource-environmental foundation for modern urbanization. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 696-704.
- [21] Chen C Z, Lin Z S. Wavelet analysis of China's per capita ecological footprint from 1961 to 2005. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(1): 338-344.
- [22] Liu Y H. The analysis of China's human-environment relationship fluctuations between 1961—2001: Study based on the EF (ecological footprint) model. *Economic Geography*, 2005, 25(2): 219-222.
- [23] Ma C, Meng W Q, Ju M T, Li H Y, Zhang X C, Hao C. Dynamic assessment of China's sustainable development possibility based on the eco-environmental footprint during the period of 1997—2006. *Journal of Safety and Environment*, 2008, 8(6): 75-80.
- [24] Cheng S K, Xie G D, Cao S Y, Kitzes J, Buchan S, Goldfinger S. Report on Ecological Footprint in China. CCICED-WWF, 2008: 13-13.
- [25] Xie G D, Cao S Y, Lu C X, Xiao Y, Zhang Y S. Human's consumption of ecosystem services and ecological debt in China. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(1): 43-51.
- [26] Lu Z W, Wang H M, Yue Q. Decoupling indicators: quantitative relationships between resource use, waste emission and economic growth. *Resources Science*, 2011, 30(1): 2-9.
- [27] Yue D X, Xu X F, Li Z Z, Hui C, Li W L, Yang H Q, Ge J P. Spatiotemporal analysis of ecological footprint and biological capacity of Gansu, China 1991—2015: down from the environmental cliff. *Ecological Economics*, 2006, 58(2): 393-406.
- [28] Wackernagel M, Moran D, White S, Murray M. Ecological footprint accounts for advancing sustainability: measuring human demands on nature // Lawn P, eds. *Sustainable Development Indicators in Ecological Economics*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 2006: 247-267.
- [29] Goldsmith R W. A perpetual inventory of national wealth // Goldsmith R W, eds. *Studies in Income and Wealth*. New York: National Bureau of Economic Research, 1951, 14: 5-74.

参考文献:

- [7] 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. *生态学报*, 2001, 21(9): 1484-1493.
- [16] 钟方雷, 徐中民, 张志强. 生态经济学与传统经济学差异辨析. *地球科学进展*, 2008, 23(4): 401-407.
- [20] 张雷. 现代城镇化的资源环境基础. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 696-704.
- [21] 陈成忠, 林振山. 中国 1961—2005 年人均生态足迹变化. *生态学报*, 2008, 28(1): 338-344.
- [22] 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. *经济地理*, 2005, 25(2): 219-222.
- [23] 马春, 孟伟庆, 鞠美庭, 李洪远, 张晓春, 郝翠. 中国 1997—2006 年可持续发展动态测度分析. *安全与环境学报*, 2008, 8(6): 75-80.
- [24] 成升魁, 谢高地, 曹淑艳, Kitzes J, Buchan S, Goldfinger S. 中国生态足迹报告. 中国环境与发展国际合作委员会, 世界自然基金会, 2008: 13-13.
- [25] 谢高地, 曹淑艳, 鲁春霞, 肖玉, 章予舒. 中国的生态服务消费与生态债务研究. *自然资源学报*, 2010, 25(1): 43-51.
- [26] 陆钟武, 王鹤鸣, 岳强. 脱钩指数: 资源消耗、废物排放与经济增长的定量表达. *资源科学*, 2011, 30(1): 2-9.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.1 January, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Integrating ecological civilization into social-economic development WANG Rusong (1)
- The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: a review
..... GAO Guangyao, FU Bojie, LÜ Yihe, et al (12)
- The status and trend on the urban tree canopy research JIA Baoquan, WANG Cheng, QIU Erfa, et al (23)
- Bioindicators and Biomonitoring in Environmental Quality Assessment
..... Bernd Markert, WANG Mei'e, Simone Wünschmann, et al (33)
- Electron transfer capacities of dissolved organic matter and its ecological effects ... BI Ran, ZHOU Shungui, YUAN Tian, et al (45)

Autecology & Fundamentals

- Antioxidative responses of *Abies fabri* seedlings to litter addition and temperature elevation
..... YANG Yang, YANG Yan, WANG Genxu, et al (53)
- Effects of seed soaking with different concentrations of 5-aminolevulinic acid on the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*)
seeds under NaCl stress ZHAO Yanyan, HU Xiaohui, ZOU Zhirong, et al (62)
- Influence of magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence characteristic in leaves of Newhall navel orange
..... LING Lili, PENG Liangzhi, WANG Nanqi, et al (71)
- Leaf traits of 66 herbaceous species in Songnen grassland in Northeast China
..... SONG Yantao, ZHOU Daowei, WANG Ping, et al (79)
- Effects of nectar secondary compounds on pollination of co-flowering species in a natural community
..... ZHAO Guangyin, LI Jianjun, GAO Jie (89)
- The continuous life-table of *Leptocybe invasa* ZHU Fangli, QIU Baoli, REN Shunxiang (97)

Population, Community and Ecosystem

- Dominant climatic factors of *Quercus mongolica* geographical distribution and their thresholds
..... YIN Xiaojie, ZHOU Guangsheng, SUI Xinghua, et al (103)
- Fruit diet, Selectivity and Seed dispersal of Hatinh langur (*Trachypithecus francoisi hatinhensis*)
..... Nguyen Haiha, BAI Bing, LI Ning, et al (110)
- The distribution of living coccolithophore in East China Sea in autumn, 2010 JIN Shaofei, SUN Jun, LIU Zhiliang (120)
- The association of OPRK1 gene SNP with sika deer (*Cervus nippon*) diurnal behavior traits
..... LÜ Shenjin, YANG Yan, WEI Wanhong (132)
- Preliminary study on bird composition and diversity in Poyang Lake watershed during non-breeding period
..... SHAO Mingqin, ZENG Binbin, XU Xianzhu, et al (140)
- Coexistence mechanism of two species passerines in man-made nest boxes LI Le, ZHANG Lei, YIN Jiangxia, et al (150)
- Dynamics on soil faunal community during the decomposition of mixed eucalypt and alder litters
..... LI Yanhong, YANG Wanqin, LUO Chengde, et al (159)
- RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section)
..... LI Yuechen, LIU Chunxia, MIN Jie, et al (168)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The distribution of soil organic carbon as affected by landforms in a small watershed of gully region of the Loess Plateau
..... LI Linhai, GAO Erhu, MENG Meng, et al (179)
- Effects of coastal geographical characteristics on the abundance of submerged aquatic vegetation
..... WU Mingli, LI Xuyong, CHEN Nianlai (188)
- Analysis of soil physical properties under different vegetation types in the alluvial fan area of Manas River watershed
..... CAO Guodong, CHEN Jiehua, XIA Jun, et al (195)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of farming on wetland soil seed banks in the Sanjing Plain and wetland restoration potential
..... WANG Guodong, Beth A Middleton, LÜ Xianguo, et al (205)

Effects of the microhabitats on the seedling emergence during the flooding disturbance	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (214)
Analysis on the limiting factors to further improve yield of summer maize in Heilonggang River Valley	XU Lina, TAO Hongbin, HUANG Shoubing, et al (222)
Fungal diversity in rhizosphere soil of medicinal plants in Heilongjiang Province	MU Dongyan, LÜ Guozhong, SUN Xiaodong, et al (229)
Integrated assessment of mariculture ecosystem health in Sanggou Bay	FU Mingzhu, PU Xinming, WANG Zongling, et al (238)
Urban, Rural and Social Ecology	
The integrative assessment on ecological quality status of Luoyuan Bay based on ‘OOAO principle’	WU Haiyan, WU Yaojian, CHEN Keliang, et al (249)
Trophic state of seawater and ecological characteristics of phytoplankton in Sishili Bay	LI Bin, BAI Yanyan, XING Hongyan, et al (260)
Ecological footprint depth and size: new indicators for a 3D model	FANG Kai (267)
Landscape dynamics of medium- and small-sized cities in eastern and western China: a comparative study of pattern and driving forces	QI Yang, WU Jianguo, LI Jianlong, et al (275)
Research Notes	
Prediction of bacterial species richness in the South China Sea slope sediments	LI Tao, WANG Peng (286)
Spatial pattern of seedling regeneration of <i>Ulmus pumila</i> woodland in the Otindag Sandland	LIU Zhen, DONG Zhi, LI Hongli, et al (294)
Impacts on seed germination features of <i>Eupatorium adenophorum</i> from variable light stimulation and traditional dormancy-broken methods	JIANG Yong, LI Yanhong, WANG Wenjie, et al (302)
Opinions	
Discus for classification of plant association	XING Shaohua, YU Mengfan, YANG Lijuan, et al (310)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 1 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 1 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元