

生态足迹模型的多尺度分析及其预测研究

◎ 陈成忠 著



地质出版社

生态足迹模型的多尺度分析 及其预测研究

陈成忠 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是作者在博士论文基础上修改而成,主要针对生态足迹模型过于静态性、缺乏预测性和结论单一性的缺陷,以中国为例,基于可变均衡因子、世界不变平均单产法计算生态足迹,基于可变均衡因子、国家不变产量因子法计算生物承载力;将经验模态分解、动力学建模方法应用于生态足迹模型的综合或单项指标多尺度分析和多情景预测研究;基于熵值法提出生态足迹构成指数和生物承载力构成指数两个新概念,评价区域系统的可持续发展潜力,完善生态足迹理论的指标体系,并运用求和自回归滑动平均建模原理进行模拟及预测;将经验模态分解多尺度分析和偏最小二乘回归分析或因子分析相结合,应用于生态足迹不同组分变化的驱动因素研究;运用能值法、投入产出法,对传统生态足迹模型中的进出口贸易足迹进行计算改进。

本书观点新颖独特,方法科学严谨,论述深刻透彻,所涉及研究内容均为生态经济学研究的前沿或热点问题。本书可供生物科学、生态学、环境科学、地理科学以及有关学科的研究人员和教学人员参考,也可作为有关学科高年级本科生或研究生用书。

图书在版编目(CIP)数据

生态足迹模型的多尺度分析及其预测研究/陈成忠著.

北京:地质出版社,2009.6

ISBN 978-7-116-06179-8

I. 生… II. 陈… III. ①生态经济-模型-研究②生态环境-模型-研究 IV. F062.2 X171.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 107934 号

责任编辑:王倩倩 李 莉

责任校对:杜 悦

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324519 (办公室);(010) 82324513 (编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787 mm × 1092 mm¹/₁₆

印 张:12.75

字 数:260 千字

印 数:1—600 册

版 次:2009 年 6 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价:30.00 元

书 号:ISBN 978-7-116-06179-8

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

前 言

20 世纪中叶以来，随着科学技术的飞速进步和社会生产力的迅猛发展，人类创造了前所未有的物质财富，加速了人类社会经济的发展进程。然而，正当人类为所取得的物质文明感到欣喜的时候，却出现了世界性的资源枯竭、能源危机和生态环境恶化等一系列威胁人类未来生存与发展的问題，同时蕾切尔·卡逊《寂静的春天》、罗马俱乐部《增长的极限》也为人类的发展敲响了警钟。为此，人类开始关注地球生态系统平衡和资源合理利用问题，可持续发展理念应运而生。但要使可持续发展从理念落实到实践操作层面，定量评价的指标体系必不可少，这正是目前国内外可持续发展领域的研究热点和前沿。由加拿大生态经济学家 William Rees 和 Mathis Wackernagel 等提出的生态足迹（ecological footprint, EF）模型作为一种衡量自然资源可持续利用的生物物理定量评价工具，以理论思想的新颖性、概念的形象性、内涵的丰富性、可操作性、易接受性、全球可比性、计算项目的综合性、教育性等优点很快得到有关国际机构、政府部门、非政府组织、研究机构和众多学者的广泛关注。世界自然基金会（WWF）在《2006 地球生命力报告》中指出“为了管理好向可持续发展的转变，我们需要那些能够显示生态超载过去到什么程度，今天到什么程度以及还要走多远的测量数据。生态足迹指标能帮助我们建立基准线、设定目标，并监测所取得的成绩和遭受的失败”。但生态足迹模型存在着静态性，缺乏预测性和结论单一性等许多令人遗憾的不足之处，在学术界引起了较大争议，甚至遭到一些研究者批评。因此，发展改进生态足迹模型，开展生态足迹模型的多尺度分析及其预测研究具有重要的理论意义和学术价值。

中国作为一个人口众多，自然资源相对短缺，经济基础和技术能力较为薄弱的发展中国家，伴随着改革开放 30 年来经济的迅速发展，各项自然资源消费急剧增加。如何在工业化和城市化双重压力下，处理好经济与人口、资源、环境的关系对中国来说是一个巨大挑战。因此，中国的可持续发展问题成为社会、政府和学术界关注的焦点。新中国成立以来的生态发展演变规律、发展趋势和驱动因素是什么？中国生态可持续发展的前景如何？具体的应对

策略是什么？这些问题的研究，对指导中国制定区域政策乃至西部开发规划具有深远的理论意义和重大的现实意义。

本书正是针对当前可持续发展研究领域研究热点，以及国家对可持续发展政策的需求，以资料收集为起点，以中国生态足迹计算为基础，将生态足迹模型、非线性科学方法、传统生态学研究方法和计算机科学有机结合起来，对中国人均生态足迹过去的演变规律和未来发展趋势进行多尺度分析及其预测研究。其中，“多尺度分析”主要体现在：第一，时间上的多尺度，即经验模态分解（empirical mode decomposition, EMD）提取的多时间尺度；第二，研究层次的多尺度，即从生态足迹的综合研究到组成成分的单项研究。“预测性研究”主要体现在：基于 EMD 多尺度分析的动力学多情景预测研究，基于熵值法的生态足迹构成和生物承载力构成 ARIMA 模型预测研究，能源足迹、生态足迹和生物承载力各组分构成比例的动力学模拟及预测研究，贸易足迹的动力学预测研究等。具体说，就是本书实现了以下三点突破：①将最新的 EMD 方法应用于生态足迹模型不同组分的长时间序列内在变化过程、演化规律、动力学机制分析，建立具有普适意义的带周期性波动的系列非线性动力学模型，并对能源足迹、生态足迹、生物承载力的变化进行多情景数值模拟及预测。②基于熵值法提出生态足迹构成指数和生物承载力构成指数两个新概念，发展完善生态足迹理论的指标体系；构建基于熵值法的生态足迹和生物承载力构成指数 ARIMA 预测模型，进行模拟预测；采用动力学建模方法研究能源足迹、生态足迹和生物承载力各组分构成的变化规律；将生态足迹传统计算方法、能值法、投入产出分析方法相结合分析贸易足迹对区域生态足迹和生态赤字的影响机制。③将 EMD 多尺度分析和偏最小二乘回归分析或因子分析相结合，应用于生态足迹变化和能源足迹增长率变化的驱动因素研究；将偏最小二乘回归分析应用于生态足迹构成指数和贸易足迹变化的驱动因素研究。这些指标的提出和方法的运用，不仅发展完善了生态足迹模型的理论指标体系，为生态足迹模型的多尺度分析和预测性研究提供了一些新思路、新途径；而且，对国家资源管理和环境战略决策，对全球和区域可持续发展状态的预测、预警和相关政策制定具有一定的决策咨询作用和现实指导意义，对科学地协调人地关系具有一定的理论指导意义。

全书共八章，其中，第一章是生态足迹基本理论概述，第二章简介主要研究方法、数据资料来源及计算，第三章是中国生态足迹的多尺度分析及多情景预测，第四章是中国生态足迹和生物承载力构成指数研究，第五章是中

国生态足迹和生物承载力构成的动力学研究，第六章是中国能源足迹变化的多尺度分析及多情景预测，第七章是中国进出口贸易足迹的动态分析及预测，第八章则概括了本书的主要研究结论及讨论，并给出了研究展望。尽管本书的许多结论是在各种假设和模拟条件下得出的，但并不影响生态足迹模型在评价可持续发展中所具有的独特优越性，正如林振山教授所说“基于简单假设和数值模拟方法是当今自然科学各学科解释现象和结果的最有力、最科学的方法之一”。

作者
2009年3月

目 次

前 言

第一章 生态足迹理论概述	(1)
第一节 基本理论	(1)
一、理论背景	(1)
二、基本假设	(2)
三、基本概念	(2)
四、计算方法	(4)
第二节 实证应用及发展改进	(8)
一、实证应用	(8)
二、主要争论	(9)
三、发展改进	(12)
第二章 基本方法与数据资料	(20)
第一节 基本方法	(20)
一、经验模态分解方法 (EMD)	(20)
二、动力建模方法	(22)
三、熵值法	(23)
四、求和自回归滑动平均模型 (ARIMA)	(24)
五、单因变量的偏最小二乘回归分析	(25)
六、因子分析方法	(28)
第二节 数据资料	(29)
一、数据来源	(29)
二、数据计算	(30)
第三章 中国生态足迹的多尺度分析及多情景预测	(40)
第一节 基于生态足迹指数和生态足迹效率的中国生态可持续性分析	(41)
一、中国 1949 ~ 2007 年生态足迹指数动态变化	(41)
二、中国 1952 ~ 2007 年生态足迹效率动态变化	(42)
第二节 中国生态足迹和生物承载力变化的多尺度分析	(43)
一、中国生态足迹和生物承载力变化的基本态势	(43)
二、多尺度分析	(43)

第三节 中国生态足迹变化的驱动因素分析	(45)
一、1953 ~ 2007 年中国生态足迹多尺度分析	(45)
二、指标选取	(47)
三、各指标 EMD 分解	(47)
四、驱动因素分析	(54)
五、政策建议	(57)
第四节 中国生态足迹和生物承载力变化的多情景预测	(58)
一、模型建立	(58)
二、拟合检验及调试	(59)
三、多情景动力学预测	(60)
四、未来 42 年中国生态持续性预测	(68)
五、转型为可持续发展的可能选择	(69)
第四章 中国生态足迹和生物承载力构成指数研究	(72)
第一节 中国 1949 ~ 2007 年的生态足迹和生物承载力构成指数	(73)
一、生态足迹构成指数和生物承载力构成指数概念及计算公式	(73)
二、中国 1949 ~ 2007 年生态足迹和生物承载力构成指数动态变化	(74)
第二节 中国生态足迹和生物承载力构成指数 ARIMA 模型预测	(75)
一、数据平稳性检验	(76)
二、模型定阶及参数估计	(78)
三、模型检验	(81)
四、2008 ~ 2013 年生态足迹和生物承载力构成指数预测	(89)
第三节 中国生态足迹构成指数驱动因素分析	(90)
一、指标选取	(90)
二、偏最小二乘回归分析	(91)
三、政策建议	(92)
第五章 中国生态足迹和生物承载力构成的动力学研究	(93)
第一节 普适模型建立	(93)
一、年变化趋势项预测模型	(93)
二、年变化随机项预测模型	(94)
三、构成比例预测模型	(94)
第二节 中国能源足迹构成比例的模拟及预测	(95)
一、中国能源足迹构成比例年变化趋势项动力模型	(95)
二、模型调试与检验	(97)

三、2008 ~ 2015 年中国能源足迹构成比例预测	(99)
第三节 中国生态足迹构成比例的模拟及预测	(100)
一、中国生态足迹比例年变化趋势项动力模型	(101)
二、模型调试与检验	(103)
三、2008 ~ 2015 年中国生态足迹构成比例预测	(105)
第四节 中国生物承载力构成比例的模拟及预测	(106)
一、中国生物承载力比例年变化趋势项动力模型	(107)
二、模型调试与检验	(109)
三、2008 ~ 2015 年中国生物承载力构成比例预测	(112)
第五节 能源足迹的部门分解和生态足迹的产业分解	(113)
一、能源足迹的部门分解	(113)
二、生态足迹的产业分解	(115)
第六章 中国能源足迹变化的多尺度分析及多情景预测	(117)
第一节 中国能源足迹增长率的多尺度分析及预测	(118)
一、中国能源足迹增长的基本态势	(118)
二、多尺度分析	(118)
三、多尺度预测	(120)
第二节 能源足迹增长率的主要时间尺度因子分析	(121)
一、指标选取	(121)
二、各指标 EMD 分解	(122)
三、准 4.2 年尺度因子分析	(137)
四、准 9.8 年尺度因子分析	(140)
五、准 18.0 年尺度因子分析	(142)
六、准 26.0 年尺度因子分析	(144)
七、政策建议	(146)
第三节 中国能源足迹变化的多情景预测和生态足迹效率分析	(147)
一、1953 ~ 2007 年能源足迹 EMD 分析	(147)
二、模型建立	(148)
三、拟合检验及调试	(148)
四、多情景动力学预测	(149)
五、万元 GDP 能源足迹	(154)
第七章 中国进出口贸易足迹的动态分析及预测	(156)
第一节 1995 ~ 2005 年中国进出口贸易足迹	(157)

一、基于能值方法的计算	(157)
二、基于投入产出方法的计算	(161)
三、三种方法比较分析	(165)
第二节 中国人均贸易足迹动力学预测	(167)
一、动力学建模预测	(167)
二、进出口贸易对中国生态可持续性的影响	(168)
第三节 贸易足迹变化的驱动因素分析	(171)
一、指标选取	(171)
二、偏最小二乘回归分析	(171)
三、政策建议	(173)
第八章 结论与展望	(174)
一、结论	(174)
二、展望	(180)
参考文献	(183)
后 记	(191)

第一章 生态足迹理论概述

自 1992 年联合国环境与发展大会制订的《21 世纪议程》号召世界各国、国际组织和非政府组织建立和运用可持续发展指标体系以来，国际上定量测度可持续发展的指标体系不断被提出。如国家财富指标、可持续经济福利指数、真实发展指标、人文发展指数、可持续性晴雨表等，已在不少国家和地区的可持续发展评价中得到应用（张丽君，2004；杜斌等，2004；温宗国等，2004）。然而，发展的可持续性主要取决于自然资源的多寡和优劣，核心是确定人类是否生存于人类强烈干预下的自然生态系统的承载力范围之内，是否实现人与自然、人与人之间的和谐共存，这需要具体的生物物理评价指标（徐中民等，2000）。货币化测量的指标体系，可能掩盖真正物理库存的测定，或多或少地偏离真实的可持续发展方向。生态足迹指标作为一种衡量自然资源可持续利用的生物物理定量评价工具，在提高生态环境意识、增强生态环境资源危机感、进行生态环境预警和研究生态环境对策等方面具有重要战略意义。本章主要对生态足迹模型产生的理论背景、基本假设、基本概念、计算方法、实证应用、主要争论及发展改进等进行简要概述。

第一节 基本理论

一、理论背景

国际上的生态足迹研究可以追溯到 20 世纪 70 年代，诸多生态经济学背景研究者们的相关研究成果有：1967 年 Borgstrom 提出“虚拟英亩（ghost acreage）”概念，Odum 称之为“影子面积（shadow area）”；Jasson 分析了波罗的海哥特兰岛海岸渔业所要求的海洋生态系统面积；Vitousek 测算了人类占用自然系统的净初级生产力（net primary productivity）；Ehrlich 和 Commoner 提出 IPAT 可持续评价经典等式，Waggoner 将 IPAT 等式革新成 ImPACT，Dietz 和 York 扩展 IPAT 等式提出 STIRPAT 随机回归模型（徐中民等，2005a，2005b）。在前人研究基础上，Rees 于 1992 年提出生态足迹的概念，Wackernagel 等将其逐步完善发展为生态足迹模型。可以说，生态足迹分析框架与 IPAT 等式有密不可分的联系，IPAT 等式是生

态足迹分析框架建立的最原始母体（徐中民等，2006）。

二、基本假设

为定量测度人类对自然资源的需求和自然资源的再生能力，Rees 和 Wackernagel 等提出的生态足迹理论基于六个基本假设：①人类要维持生存，必须消耗自然界提供的各种资源（各种自然产品和服务），人类可以确定消费的绝大多数资源、能源及其所产生的废弃物数量；②大部分资源消费量和废物流量可折算为生态生产性土地面积；③可赋予各种不同类型的土地面积一定的权重，将其转换成一个标准化的全球公顷（global hectares, gha, 1gha 指生物生产力和吸纳废物能力等同于全球平均值的 1 hm² 土地）单位；④各种土地利用都是排他性的，因而总需求可通过加总各种资源利用与废物吸收的面积得到；⑤总的人类活动占用的生态生产性土地面积与自然提供的生态生产性土地面积可直接对比；⑥总需求可超过总供给。

三、基本概念

生态足迹理论主要有以下基本概念：生态生产性土地（或生物生产性土地）、生态足迹、生物承载力、生态赤字或生态盈余。

（一）生态生产性土地（bioproductive areas）

生态生产性土地指具有生态生产能力的土地和水体。生态生产指生态系统中的生物从外界环境中吸收生命过程所必需的物质和能量，然后转化为新的物质，从而实现物质和能量的积累和转化。生态生产是自然资本产生自然收入的原因，而自然资本总是与一定的地球表面相联系。因此，生态足迹分析法用生态生产性土地的概念代表自然资本，并为各类自然资本在全球尺度上的比较提供了一个统一的度量标准，即全球公顷（gha）。每一全球公顷代表同等量的生物生产数量，是地球上 112 亿公顷生物生产性土地的平均生产力。这里的生产力不表示生物生产量的比率，如净初级生产量，而是指在一定投入水平上所获得的最大农业生产潜力。因此，高产量的一公顷土地与低产量的一公顷土地相比具有更多的全球公顷数。全球公顷是标准化的数值，地球上实际的生产性土地和海域面积之和等于地球上的全球公顷数。根据生产力大小，地球表面的生态生产性土地可分六大类：

1. 耕地（cropland）

耕地是所有生态生产性土地中生产力最大的一类，人类赖以生存的食品绝大多数来自耕地，其生态生产力用单位面积产量表示。根据联合国粮农组织（FAO）

的报告，目前世界上几乎所有最好的耕地都处于开发状态，而且每年都有大量耕地被建设用地占用或退化，世界人均耕地面积已不足 0.25 hm^2 。

2. 草地 (pasture)

草地对人类的贡献主要是提供放牧，其生态生产力可通过单位面积承载的牛羊数及牛奶、肉类产量计算得到。绝大多数草地因为积累生物量的潜力不如耕地，所以其生产力远不及耕地。此外，由于人类的不合理开发、过度放牧等，草地质量和数量都有下降趋势。

3. 森林 (forest)

森林包括人工林和天然林，有生产木材、净化空气、防风固沙、涵养水源、保护物种多样性等作用，森林的生态生产力主要指提供木材的量。全球现有森林 34.4 亿 hm^2 ，人均 0.6 hm^2 。目前，除少数偏远、难以进入的密林地区外，大多数森林的生态生产力不高，且面临着面积急剧减少的威胁。

4. 能源用地 (energy land)

能源用地是指吸收化石燃料燃烧释放的 CO_2 、缓冲核辐射、建设水电站等所需要的土地面积。原则上讲，为保证自然资本总量不减少，应该储备一定量的土地以补偿因化石能源消耗而损失的自然资本量，但目前还没有证据表明哪个国家专门拿出一部分土地用于吸收 CO_2 ，出于生态经济研究的谨慎性原则，在生态足迹需求方面考虑了吸收 CO_2 所需要的化石能源用地。

5. 建设用地 (built-up area)

建设用地指各种人居设施和道路、工矿设施等所占用的土地，这是人类生存必需的场所。据估计，世界人均建设用地已接近 0.03 hm^2 ，由于城市化的急速发展，大量可用于生产的耕地已被建设用地侵占。

6. 水域 (water area)

水域包括淡水（河流、淡水湖泊等）和非淡水（海洋、盐水湖泊等）。海洋为人类提供鱼类等海产品，其生态生产力主要指鱼类的单位面积产量。全球海洋面积约 366 亿 hm^2 ，人均 6 hm^2 。实际上，人类所消费的海产品主要归功于这 6 hm^2 中的大约 0.5 hm^2 。目前由于海洋污染越来越严重，海洋生态生产力有下降的趋势。

(二) 生态足迹 (ecological footprint, EF)

生态足迹指特定区域内一定人口的自然资源消费、能源消费和吸纳这些消费产生的废弃物所需要的生态生产性土地面积（包括陆地和水域），表明人类社会

发展对环境造成的生态负荷。生态足迹越大，对环境的破坏越大。

（三）生物承载力（biocapacity, BC）

传统研究中的生物承载力指在不损害区域生产力前提下，特定区域资源能供养的最大人口数。人口承载力不具备空间可比性，比如，中国能承载 16 亿人口，是指承载中国的人口，如换成美国人口，就不可能是 16 亿。为此，生态足迹分析法将生物承载力定义为一个地区所能提供给人类的生态生产性土地和水域的面积总和，又叫生态容量。

（四）生态赤字或生态盈余（ecological deficit/remainder, ED/ER）

将人类消费需要的自然资本的“利息”（生态足迹）与自然资本产生的“利息”（生物承载力）转化为可以共同比较的土地面积，二者之差就是生态赤字或盈余，用来判断人类对自然资源的利用情况。区域的生态赤字或生态盈余，反映了该区域人口对自然资源的利用状况及计算时刻该区域的可持续性。

四、计算方法

按照分析过程，传统的生态足迹计算方法分综合法和成分法。综合法最初由 Wackernagel（1996）提出，经 Wackernagel（1997，2004）、Monfreda（2004）等改进，日趋完善。综合法自上而下获取统计数据，通常用于国家层级的生态足迹计算，如 Wackernagel 对世界 52 个国家和地区，Bicknell（1998）对新西兰，Lenzen（2001）对澳大利亚的研究。成分法最早由 Simmons（2000）提出，Barrett（2002）、Wright（2002）等进行了改进完善。成分法以人们的衣食住行为出发点，自下而上通过物质流分析获取主要消费品消费量及废物产生的数据，借助生态足迹了解物流带来的环境压力，适用于地方、企业、学校、家庭乃至个人的生态足迹核算，计算方法实质上与综合法一致（徐中民等，2006）。Best Forward Ltd 运用成分法和生命周期估算法（life cycle assessment, LCA）分析不同生产线生产铝制或玻璃饮料罐的生态足迹，为不同生态足迹计算方法的兼容性进行了初步探索（胡森等，2006）。不论综合法还是成分法，基本计算步骤如下：

（一）生态足迹的计算

1. 追踪资源消费和废物吸纳

计算方法：从统计部门、统计年鉴或亲自调查获取区域人口消费资料（均须考虑进出口贸易调整），按生物资源消费和能源消费两部分分门别类进行统计和

计算。

生物资源消费包括农产品（粮食、油料、棉花、蔬菜等）、动物产品（肉、奶、蛋、毛等）、林产品（核桃、板栗等）、水果（苹果、梨、葡萄等）和木材、水产品等。用每类消费品总量除以该类消费品同年世界平均产量得到提供该类消费品的生物生产性土地面积，按耕地（农产品）、林地（核桃、板栗、水果、木材等）、草地（肉、奶、蛋、毛等）、水域（水产品）等分类汇总。计算公式为：

$$A_i = C_i/Y_i = (P_i + I_i - E_i)/(N \times Y_i) \quad (1-1)$$

$$EF_j = \sum_{i=1}^n A_i \quad (1-2)$$

式中： A_i 为第 i 类消费项目折算的人均生态生产性面积（即人均生态足迹，gha/cap）； i ($i=1, 2, \dots, n$) 为消费品类型； C_i 为第 i 类消费项目的总消费量（kg）； Y_i 为第 i 类消费项目的世界年平均产量（kg/hm²）； P_i 为第 i 类消费项目的年生产量（kg）； I_i 为第 i 类消费项目年进口量（kg）； E_i 为第 i 类消费项目的年出口量（kg）； N 为区域总人口数量； EF_j 为第 j 类土地人均生态足迹（gha/cap）（ $j=1, 2, 3, 4$ 为生物生产性土地类型，即耕地、林地、草地、水域）。

能源消费通常包括煤、焦炭、燃料油、煤油、汽油、柴油、液化石油气、电力及其他石油制品和其他燃料等。根据一定的转化标准，一般将煤、焦炭、燃料油、煤油、汽油、柴油等的消费转化为化石能源用地，电力视为建设用地。作为生态足迹争议最大的化石能源足迹，传统的三种计算方法是：①替代法：生产能够产生与化石燃料燃烧相同能量的乙醇（或甲醇）的农田或林地面积即为化石能源生态足迹；②碳吸收法：估算用于吸收化石燃料燃烧所释放 CO₂ 的林地面积；③自然资本存量法：计算用于以同等速率补偿化石燃料能源消耗的生态生产性土地面积。因为采用替代法计算的足迹一般大于碳吸收法计算的足迹，同时考虑到公众的接受性，在生态足迹计算中大多采用碳吸收法。

折算系数及转化标准（Wackernagel et al. , 1999；Chen et al. , 2006；刘森等，2006）如下：1 kg 原煤 = 0.7143 kg 标准煤，1 kg 原油 = 1.4286 kg 标准煤，1 m³ 石油天然气 = 1.3300 kg 标准煤，1 kW·h 电力 = 0.1229 kg 标准煤，1 kg 标准煤 = 7000 kcal，1 kcal = 4.1868 kJ，1 MJ = 1 × 10⁶ J，1 GJ = 1 × 10⁹ J。全球平均足迹为煤炭 55 GJ/gha、石油 93 GJ/gha、天然气 93 GJ/gha、水电 1000 GJ/gha。可按公式（1-3）分别计算化石能源足迹和水电（建设足迹）为：

$$EEF = \sum_i^n \frac{c_i \times J_i \times 7000 \times 4.1868}{m_i \times 10^6 \times N} \quad (1-3)$$

式中： EEF 为人均能源足迹（gha/cap）； i ($i=1, 2, \dots, n$)，分别表示能源消

费项目煤、焦炭、燃料油、煤油、汽油、柴油、液化石油气、电力等； c_i 为当年第 i 项能源消费量（kg 标准煤）； J_i 为第 i 项能源消费的折算系数； m_i 为第 i 项能源消费的全球平均足迹（GJ/gha）； N 为区域总人口数量。

2. 均衡处理及加总

由于耕地、草地、森林、水域、建设用地及能源用地等土地类型的生态生产力不同，Wackernagel 想到用均衡因子进行标准化处理，使不同类型的空间面积能够加总。均衡因子是某一类土地潜在生物生产力与世界所有六类土地平均潜在生物生产力的比值，它捕获了不同土地类型间生物生产能力的差异。最初基于不同土地类型的实际产量计算，目前已更新为使用全球农业生态区根据土壤类型、生长季节、坡度、温度和降水给出的土地适宜性指数计算。表 1-1 显示了过去 40 多年均衡因子只发生了轻微调整。

表 1-1 历年均衡因子表

年份 土地类型	1961 *	1971 *	1981 *	1991 *	1999 *	2001(WWF) **	2003(WWF) ***
建设用地	2.23	2.23	2.23	2.23	2.17	2.19	2.21
基本耕地	2.23	2.23	2.23	2.23	2.17	2.19	2.21
牧草地	0.50	0.49	0.48	0.47	0.47	0.48	0.49
林地	1.31	1.32	1.32	1.32	1.35	1.38	1.34
海洋和内陆水域	0.35	0.35	0.35	0.36	0.35	0.36	0.36
能源用地	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1

注：* 引自 Wackernagel, et al. (2004)；** 引自 WWF, et al. (2004)；*** 引自 WWF, et al. (2006)

将据式（1-2）计算的耕地、林地、草地、水域四类生物资源足迹，据式（1-3）计算的化石能源足迹和水电（建设）足迹，还有非水电建设足迹（实际建设面积乘以耕地产量因子得到，产量因子将在下一小节详述），分别乘以相应的均衡因子，得到可以加总的各类人均生态足迹。计算公式为：

$$EF = \sum_{j=1}^6 (r_j EF_j) \tag{1-4}$$

式中： EF 为人均生态足迹（gha/cap）； r_j 为第 j 类土地均衡因子； EF_j 为第 j 类土地人均生态足迹（ $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$ ，分别为耕地、林地、草地、水域、能源用地、建设用地，gha）。

（二）生物承载力的计算

1. 产量因子的计算

由于不同国家和地区同类生态生产性土地生产力存在差异，实际面积不能直

接对比，需要乘以产量因子进行调整。产量因子表示某一国家或地区的某一生态生产性土地的产量与世界该土地类型平均产量的比。每个国家或地区有各自相对于各个土地类型的一套产量因子，如秘鲁 2001 年耕地的产量因子是秘鲁耕地的产量与世界耕地平均产量的比值（表 1-2）。由表 1-2 可见，秘鲁基本耕地的生产力比世界耕地平均生产力低，但贫瘠耕地由于橄榄业的超常生产，其生产力比世界贫瘠耕地生产力高。产量因子反映了一个国家内在的可再生资源的生产能力以及常规的技术管理措施，一个国家或地区的产出依赖于土壤的肥沃程度和种植技术。对于一个国家来说，产量因子反映了全国的平均水平，对于智利、加拿大来说，有多个气候带，各地产量差异很大，在进行精确的地方分析时，每个地区要有自己的产量因子。当前有两种方法计算产量因子：获取同样数量商品所需世界面积与国家面积的比值，不同类型土地国家平均产量与世界平均产量的比值。后者计算公式为：

$$y_j = \text{一个国家(或地区)第} j \text{类土地平均产量} / \text{世界同类土地平均产量} \tag{1-5}$$

表 1-2 2001 年秘鲁的产量因子

生态生产性土地	产量因子	生态生产性土地	产量因子
基本耕地	0.98	海域	3.39
贫瘠耕地	2.57	内陆水域	2.96
森林	0.82	建设用地	0.98
牧草地	1.81		

注：转引自刘钦普（2008）

2. 生物承载力的计算

确定耕地、林地、草地、水域和建设用地的实际面积，分别乘以均衡因子，得出该区域各类生态生产性土地面积；再乘以产量因子，加总就得出该区域带有世界平均产量的总生物承载力。考虑到化石能源是不可再生能源，储量是有限的，故传统生物承载力计算方法将化石能源用地生物承载力视为 0。

$$BC = \sum_{j=1}^5 (a_j r_j y_j) / N \tag{1-6}$$

式中： BC 为人均生物承载力（gha/cap）； a_j 为第 j 类实际土地面积（ hm^2 ）； y_j 为产量因子，其他同上； j 为生物生产性土地类型（耕地、林地、草地、水域、建设用地）。