

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

生态容量及环境价值损失评价/刘年丰主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 5
ISBN 7-5025-7020-9

I. 生… II. 刘… III. 环境生态评价-研究 IV. X826

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 041944 号

生态容量及环境价值损失评价

刘年丰 主 编

谢鸿宇 肖 波 副主编

责任编辑: 刘兴春

责任校对: 于志岩

封面设计: 于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 13 $\frac{3}{4}$ 字数 255 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7020-9

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第一篇 空间综合生态足迹分析框架

第 1 章 生态足迹与生态容量

本章将对生态足迹、生态容量基本概念和国内外的研究现状进行介绍。

1.1 生态足迹基本概念

1.1.1 生态足迹

生态足迹 (ecological footprint, 又译生态占用) 是由加拿大环境经济学家 William 和 Wackernagel 于 20 世纪 90 年代提出的一种基于生物物理量的度量评价可持续发展程度的概念和方法。它的设计思路是: 人类要维持生存, 必须消费各种产品、资源和服务, 人类的每一项最终消费的量都可以追溯到提供生产该消费所需的原始物质和能量的生态生产性土地的面积。所以, 人类系统的所有消费, 理论上都可以折算成相应的生态生产性土地的面积, 也即人类的生态足迹。因此, 生态足迹的定义为: “the biologically productive and mutually exclusive areas necessary to continuously provide for people’s resource supplies and the absorption of their wastes”, 即任何已知人口 (某个个人、一个城市或一个国家) 的生态足迹是生产这些人口所消费的所有资源和吸纳这些人口所产生的所有废弃物所需要的生态生产性土地的总面积 (Mathis Wackernagel, William E. Rees, 1996)。它既代表既定技术条件和消费水平下特定人口对环境的影响规模, 又代表既定技术条件和消费水平下特定人口持续生存下去而对环境提出的需求。

1.1.2 生态生产性土地

生态生产性土地 (ecologically productive land) 是生态足迹分析法为各类自然资本提供的统一度量基础。生态生产也称为生物生产, 是指生态系统中的生物从外界环境中吸收维持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的积累。生态生产是自然资本产生自然收入的原因。自然资本产生自然收入的能力由生态生产力 (ecological productivity) 衡量。生态生产力越大, 说明某种自然资本的生命支持能力越强。

由于自然资本总是与一定的地球表面相联系, 因此生态足迹分析用生态生产性土地的概念来代表自然资本。所谓生态生产性土地是指具有生态生产能力的土地或水体 (Mathis Wackernagel, Lewan L., 1997)。这种替换的一个好处是极大

地简化了对自然资本的统计，并且各类土地之间总比各种繁杂的自然资本项目之间容易建立等价关系，从而方便于计算自然资本的总量。事实上，目前主流的生态足迹分析法的所有指标都是基于生态生产性土地这一概念而定义的，换言之就是将分析中涉及的指标代换成相对应的生态生产性土地的面积。

根据生产力大小的差异，地球表面的生态生产性土地可分为：化石能源地、可耕地、牧草地、森林、建成地和水域 6 大类。

(1) 化石能源地

生态足迹分析法强调资源的再生性。从理论上讲，为了保证自然资本总量不减少，我们应该储备一定量的土地来补偿因化石能源的消耗而损失的自然资本的量。但实际情况是我们并没有做这样的保留，所以从这个角度看，我们现在是在直接消费自然资本。但是化石能源的再生是一个非常漫长的过程（如煤炭的形成要几十万年），即使预留了土地也很难保证它的再生。因此，William 和 Wackernagel 将化石能源地定义为“用于吸收化石能源燃烧排放的温室气体的森林”一般采用能源土地转化因子的办法来估计化石能源用地。确定化石能源土地转化因子的方法通常有（Gernot Stoglehner, 2003）：（a）计算提供化石能源替代物甲醇和乙醇所占用的土地面积来获得化石能源用地；（b）计算吸收燃烧化石能源排放 CO_2 所需要的森林面积；（c）计算以化石能源枯竭的速率重建资源资产替代的形式所需要的土地面积。

在本文中采用第 2 种方法计算化石能源地。

(2) 可耕地

从生态足迹分析来看，可耕地是所有生态生产性土地中生产力最大的一类，它所能积聚的生物量是最多的。目前世界上几乎所有可利用的可耕地（大约 $13.5 \times 10^8 \text{ ha}$ ）都已经处于耕种的状态，并且其中大约 $100 \times 10^4 \text{ ha}$ 的土地又因土质严重恶化而遭废耕。这就意味着，今天世界上平均每个人所能得到的可耕地面积已不足 0.25 ha 了。

(3) 牧草地

牧草地是适用于发展畜牧业的土地。目前全球大约有 $33.5 \times 10^8 \text{ ha}$ 的牧草地，折和人均约 0.6 ha 。绝大多数牧草地在生产力上远不如可耕地，不仅是因为它们积累生物量的潜力不如可耕地，而且因为由植物能量转化到动物能量过程中存在着著名的 $1/10$ 定律而使得实际上可为人所用的生物量减少了。

(4) 森林

森林是指可产出木材产品的人造林或天然林。全球现有森林约 $34.4 \times 10^8 \text{ ha}$ ，相当于人均约 0.6 ha 的面积。目前，除了少数偏远的、难以进入的密林地区外，大多数森林的生态生产力并不高。此外，牧草地的扩充已经成为森林面积减少的主要原因之一。

(5) 建成地

建成地包括各类人居设施及道路所占用的土地。这类土地的世界人均拥有量现已接近 0.03ha 。由于人类的大部分建成地位于地球最肥沃的土地上（即宜耕地），造成了全球生态能力无法挽回的损失。

(6) 水域

水域包括淡水（河流、淡水湖泊等）和非淡水（海洋、盐水湖泊等）两种。

地球上海洋的面积约 $366 \times 10^8\text{ha}$ ，相当于人均 6ha 。但是，海洋里 95% 的生态生产量来源于这 6ha 中的大约 0.5ha 的沿海岸带。由于人类喜欢吃的鱼在食物链中排位较高，人类实际能从海洋中获取的食物是比较有限的。具体说来，这



(a) 可耕地



(b) 牧草地



(c) 水域



(d) 森林



(e) 建成地



吸收化石能源
燃烧释放的温
室气体的森林



(f) 化石能源地

图 1-1 6 类生态生产性土地

0.5ha 大约每年能提供鱼类 18kg，而其中仅有 12kg 能最后落实在人们的饭桌上，其所能保证的仅是人类卡路里摄入量的 1.5%。盐水湖泊多地处于干旱地区，其生态生产量比海洋还低。

河流和淡水湖泊的生态产品的获取比海洋要容易，但是其在水域中所占比重太小，全球淡水资源，除去冰川外不到总量的 1%。因此，其对人类所能获取的生态产品总量的贡献不大。

6 类生态生产性土地如图 1-1 所示。

1.2 生态容量和生态赤字

1.2.1 生态容量

传统研究中所采用的生态容量 (ecological capacity, 又称生态承载力) 是在不损害区域生产力的前提下，一个区域有限的资源能够供养的最大人口数。早期的生态容量是以人口计量为表征的，然而，在现实世界中，贸易、技术进步、地区之间迥异的消费模式等因素，不断向这个基于人口的生态容量概念提出挑战。人们认识到人类对环境可持续性的影响不仅取决于人口本身的规模，而且也取决于人类对环境的影响规模和环境本身的承载能力。因此，从其中一个方面来衡量生态容量是不准确的。

Hardin 明确定义生态容量为“在不损害有关生态系统的生产力和功能完整的前提下，可无限持续的最大资源利用和废物生产率” (Hardin P, Barg S, 1997)。后来的可持续发展研究者接受了 Hardin 的思想，将一个地区能够提供给人类的生态生产性土地的面积总和定义为该地区的生态承载力，也就是该地区的生态容量。

以生态足迹来衡量生态容量的定义是：“在不损害有关生态系统的生产力和功能完整的前提下，一个地区能够拥有的生态生产性土地的总面积”，就是该地区的生态承载力即生态容量。因此，生态容量 (生态承载力) 可以理解为是一定自然、社会、经济技术条件下某地区所能提供的生态生产性土地的极大值。

1.2.2 生态赤字和生态盈余

将一个地区或国家的资源、能源消费、废弃物排放所占用的生态足迹同自己所拥有的生态容量相比较，就会产生生态赤字 (ecological deficit, 生态足迹大于生态容量) 和生态盈余 (ecological remainder, 生态足迹小于生态容量)。生态赤字表明该地区的人类负荷超过了其生态容量，要满足其人口在现有生活水平下的消费需求，要么从地区之外进口欠缺的资源以平衡生态足迹，要么通过消耗自然资本来弥补收入供给流量的不足。这两种情况都说明地区发展模式处于相对不可持续状态，其不可持续的程度用生态赤字来衡量。

相反，生态盈余表明该地区的生态容量足以支持其人类负荷，地区内自然资

本的收入大于人口消费的需求流量，地区内自然资本总量有可能得到增加，地区的生态容量有望扩大，该地区消费模式具有相对可持续性，可持续程度用生态盈余来衡量。

1.3 国内外生态足迹研究进展

生态足迹分析（ecological footprint analysis, EFA）方法，紧扣可持续发展理论，是涉及系统性、公平性和发展的一个综合指标；它的结果与自然资产提供生态服务的能力进行比较能反映在一定的社会发展阶段和一定的技术条件下，人们的社会经济活动与当时生态供给能力之间的差距；自 20 世纪 90 年代初被提出后，得到广泛应用。

1.3.1 国内研究现状

国内生态足迹分析的研究开始于 20 世纪 90 年代后期，研究的重点已经逐步从单纯的区域生态足迹的计算扩展到利用生态足迹分析来评价区域可持续发展能力、生态足迹计算方法的修正和理论的完善等方面。主要研究如下。

① 中国科学院地理科学和资源研究所的苏筠、成升魁、谢高地的“大城市居民生活消费的生态占用初探——对北京、上海的案例研究”（苏筠、成升魁，2001）作者分别计算了上海和北京 1999 年的生态足迹，分析了两地生态赤字的情况。此外，指出了两个城市因地理位置和饮食习惯的差异而导致的能源和食物消费对生态足迹计算的影响。

② 中国科学院地理科学和资源研究所的谢高地、鲁春霞、成升魁的“中国生态空间占用研究”（谢高地、鲁春霞，2001）作者计算了 1995 年的中国生态足迹和生态承载力的情况。

③ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所生态经济中心和兰州大学干旱农业生态国家重点实验室的徐中民、陈东景、张志强、程国栋的“中国 1999 年的生态足迹分析”（徐中民、陈东景，2002）作者计算了 1999 年的中国生态足迹和生态承载力情况。

④ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室的陈东景、徐中民的“生态足迹理论在我国干旱区的应用与探讨——以新疆为例”（陈东景、徐中民，2001）作者通过计算 1999 年新疆的生态足迹，说明我国干旱地区的生态赤字现状。

⑤ 中国科学院地理科学与资源研究所的李利锋、成升魁的“生态占用——衡量可持续发展的新指标”（李利锋、成升魁，2000）作者阐述了生态足迹的理论和计算方法。

⑥ 澳门大学科技学院的李金平、王志石的“澳门 2001 年生态足迹分析”（李金平、王志石，2003）作者计算了澳门特区 2001 年的生态足迹，分析了其

生态赤字现状。在研究中，作者将澳门特区淡水消费纳入生态足迹计算中。

⑦ 清华大学水利工程系水文水资源研究所和中国科学院地理科学与资源研究所的王书华、张义丰、王忠静的“基于生态足迹模型的城郊经济协调评估——以河北省新乐市为例”（王书华、张义丰，2003）作者利用生态足迹分析对河北省新乐市城郊经济发展对生态的影响进行了评估，对经济发展策略提出建议。

上述研究都通过引入生态足迹分析的理论和方法对研究对象的生态赤字现状或可持续发展水平进行了分析，取得了不错的研究成果。它们沿用了 William 和 Wackernagel 于 1992 年提出的并在 1996 年进行了改进的计算和评价方法。

⑧ 河南大学环境与规划学院的秦耀辰、牛树海的“生态占用法在区域可持续发展评价中的运用与改进”（秦耀辰、牛树海，2003）在研究中，作者针对生态足迹分析研究中的以下两个问题做了有益的尝试。

1) 中间产品的生态足迹难于确定。作者通过引入投入产出模式来完善生态足迹的计算，以解决中间产品的生态足迹问题。作者认为生产过程不仅是投入和产出，还包括占用。占用部分至少包括 (a) 对各类固定资产的占用；(b) 对流动资产的占用；(c) 对各类劳动力的占用。

作者将生产中的消耗系数又分为直接消耗系数和完全消耗系数，包含自然资源消耗的完全消耗系数的计算公式：

$$H = S(I - A - \beta D)^{-1} \quad (1-1)$$

式中， H 为在固定资产消耗情况下各部门完全占用系数矩阵， $H = (H_{ij})$ ； S 为直接占用系数矩阵， $S = (S_{ij})$ ； I 为单位矩阵； A 为直接消耗系数矩阵； β 为固定资产折旧率对角矩阵； D 为固定资产直接占用系数矩阵。

然后通过建立投入和占用的消耗系数表来获取最终产品中所包含的各种消费项目，从而完善生态足迹的计算。

2) 偏重反映区域发展的持续性而不是发展程度，忽略了地区人群现有的消费水平和生活质量的差异。

作者提出了用一个综合指标——综合发展度 (GIR) 来综合衡量可持续发展情况，见下式：

$$GIR = k_1(D_i - D)/D + k_2(G_i - G)/G + k_3(S_i - S)/S \quad (1-2)$$

式中， D_i 为各区域的生态赤字； D 为全国的生态赤字； G_i 为各区域人均国内生产总值； G 为全国人均国内生产总值； S 为全国的基尼系数； S_i 为各区域基尼系数，这里用各区域城镇居民人均收入与乡村居民人均收入之差再除以全国城镇居民人均收入与乡村居民人均收入的差来代替基尼系数； $K_i (i=1, 2, 3)$ 为权重系数，分别取 0.3、0.4、0.3。

如果 GIR 为正值，则说明在国家尺度上，区域为可持续发展；反之则说明在国家尺度上，区域为不可持续发展，并且可以通过各项分析得出究竟是什么因

素阻碍了可持续发展。

⑨ 东北财经大学的宋旭光的“生态占用测度问题研究”（宋旭光，2003）在研究中，作者对生态足迹的计算中三大步骤之一的等量化处理提出了非常独特的见解。

作者认为等量化处理的本意是要形成一个生态足迹的整体概念，试图把 6 类生态生产性土地通过一定的方法等量化换算并加总。这一处理方法是生态足迹测度中的第二次标准化处理。由于涉及不同类型土地的生态功能间的转化，其标准化过程较之产量调整时的标准化方法来说相对困难。因为，很难找到一个合理的均衡因子，使得各类不同的生态足迹被同度量化，而且同度量化后的数据含义也发生了变化。因此，此时的加权总量指标很难说还是与地球空间相关联的生态空间。所以，不论是从技术上还是操作上来说，做这种等量化处理都是不划算的；更聪明的方法是做到第二步就停止，只给出分类的生态足迹，而不需给出汇总的生态足迹；即使是要给出汇总生态足迹指标时，不妨单纯对各类足迹简单加和计算即可。

⑩ 张坤民、温宗国、杜斌等著的《生态城市评估与指标体系》（张坤民、温宗国，2003）。作者在宁波、扬州、苏州、广州 4 城市的生态城市建设的研究中引入了生态足迹分析法，把它作为生态城市建设的评估指标体系的一个组成部分。

作者将城市的消费归为 6 类生态足迹如表 1-1 所列。

表 1-1 4 个城市的消费账户清单

消费账户	消 费 项 目	生态生产性土地类型
食物	居民消费的动植物食品和食物产出所消耗的化石能源	可耕地、牧草地、水域、化石能源地、林地
住宅	居民住房和绿化用地以及生活消耗的能源	建成地、化石能源地、林地、可耕地
交通	城市公路、铁路、航空和水运的所消耗的能源和用地	建成地、化石能源地
商品	贸易调整后城市生产生活所消费的各种商品	牧草地、化石能源地、林地、可耕地
服务	给排水、垃圾废物、远程通讯、教育、医疗健康、财政服务、休闲娱乐、旅游、军事和其他政府服务所消耗的能源	化石能源地
废物	消纳个人消费产生的废物所需的化石能源地	化石能源地

在此基础上，计算了 4 个城市的 1991~2001 年的生态足迹，探讨了 4 城市 10 年经济快速发展对地区生态承载力的影响。最后，从生态足迹的角度提出了 4 城市在今后的发展建设中如何通过调整产业结构、改变经济增长方式来减少城市

的生态赤字实现可持续发展。

1.3.2 国外研究现状

国外生态足迹分析研究无论是深度还是广度都比国内研究深入，主要研究如下。

① Jason. Venetoulis 的 “Accessing Ecological Impact of a University the ecological footprint for the University of Redlands” (Jason. Venetoulis, 2001) 在研究中，作者根据 Redlands 分校的教学科研和师生生活对学校所在区域的环境影响用 4 类足迹来表示：水足迹 (hydro print)、固废足迹 (waste print)、能源足迹 (energy print) 和交通足迹 (transport print)。

1) 水足迹。这是作者提出的一个很新颖的观点，在以往的生态足迹研究中对人类生产和生活用水没有作为一种消费的种类纳入计算中，而作者在研究中将学校的用水单独作为一类消费列出来进行计算，其计算式如下：

$$A = \frac{Co}{yF} = \frac{Co}{Ra + Re} = \frac{Co}{Ra + Ca/Area} \quad (1-3)$$

式中， A 为区域内用水的生态生产性土地面积， ha ； Co 为区域内用水消费量（除了包括教学、实验和生活用水外，还包括用于学校绿地维护的灌溉用水）， m^3 ； yF 为产量因子； Ra 为区域内降雨量， mm ； Re 为由区域内蓄水量换算得到的等量降雨量， mm ； Ca 为区域内蓄水量， m^3 ； $Area$ 为区域面积， ha 。

作者将区域内的年降雨量和水库的蓄水量作为区域的水的生产量，其中蓄水量被换算为等量的降雨量。

2) 固废足迹。对于固体废弃物，作者主要统计了纸张、塑料、玻璃、合金、磁性金属等几个方面的消费。在计算中，作者考虑了这些废物的可回收问题，使用的是美国平均回收率 39%。在这几种消费中，纸张被归结为森林用地；塑料、玻璃、合金、磁性金属则被归结为化石能源地，可回收部分可视为相应的生态生产性土地的减少（如纸张的回收可视为对森林产品消耗的减少）。

3) 能源足迹。作者统计了取暖天然气、家用天然气、电力 3 个方面的能源消费：天然气的消费被归结为化石能源地；电力则根据发电的来源划分：火电是化石能源地，水电是建成地等。此外，作者还考虑了风力发电和太阳能发电等可再生能源的发电量，由于其生态足迹很小，可以忽略不计。作者根据这 4 种发电形式在加州发电量所占的比例，将来自风力发电和太阳能发电的电量视为用电总量的减少，分别计算了火电和水电的生态足迹。

4) 交通足迹。交通足迹主要是交通消耗的能量量，包括汽车和飞机的用油量，主要是指师生在学校区域内的交通所消耗的汽车用油以及寒暑假师生离校和返校所消耗的交通用油，都被归结为化石能源地。

通过这 4 个方面的足迹作者评估出了学校活动对校区的环境影响。

② Stefan Gossling, Carina Borgstrom Hansson 等的“Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability” (Stefan Gossling, Carina Borgstrom Hansson, 2002) 在研究中, 作者以塞舌尔群岛旅游业为例子, 利用生态足迹分析评价该岛旅游业的可持续性。作者根据该岛旅游业的特点, 对岛内的各种人类活动产生的资源消费进行分析, 最后将其归入 6 类生态生产性土地中, 得出旅游业对塞舌尔群岛的生态影响:

1) 能源消耗。包括航空运输、岛内旅游和游客住宿所消费的能源。

航空运输消费能源指游客在来岛和离岛的飞行中所消耗的能源。航空能源消耗量是通过统计塞舌尔群岛客源国到该岛的航空飞行里程计算出来的。在具体统计中, 以占 84% 的公共航空的能耗率来计算 16% 的私人航空 (游客乘坐私人飞机) 的能耗; 以占客源 74% 的欧洲和美国平均航空飞行里程作为其他 26% 的游客的航空里程。此外, 由于航空运输的废气排放是在高空进行的, 除了包括温室气体外还会对臭氧层造成损害, 所以它的产量调整因子比在地面消耗 (如汽车) 的要高些。

岛内旅游消费能源游客在岛内旅游时使用各种交通工具 (汽车、直升机、小型飞机、水上飞机和游艇) 所消费的能源。

游客住宿消费能源可根据客人住宿的不同级别的宾馆, 采用不同的能耗标准。这些能耗包括取暖、供冷、饮食、照明、清洁和海水淡化等几类。按照 4 级标准分别划分为简易旅馆和私人出租房、游艇和一到二星级宾馆、三到四星级宾馆、五星级宾馆。

2) 设施占地。包括岛上的各种旅游设施和基础辅助设施有机场、停车场、公路、住宿设施、码头、高尔夫球场等, 其中作者忽略了一部分旅游设施的建成地占地如博物馆、植物园等, 因为这些设施的占地按一年游客数平均后, 人均不足 0.1m^2 的, 而只考虑了占地面积很大的两个高尔夫球场; 在住宿设施用地的计算上也是根据游客不同住宿级别 (和游客住宿能源消费的级别一样) 的人均用地面积来计算。

3) 生活消费。将游客在岛上生活消费的食物和纺织物归结为可耕地、牧草地、森林、水域 4 类土地。一方面, 岛内不生产这些产品, 它们全部来自岛外, 也就是说岛内无这方面的生态产出; 另一方面, 由于缺乏这部分数据统计资料, 无法获取岛内的实际消费, 作者以不低于游客在其国家的食物和纺织物消费标准为原则, 以游客在其国家每天食物和纺织物的消费量乘以游客平均旅游时间来计算食物和纺织物的消费。在计算中, 以占客源 74% 的欧洲和美国的每天平均消费量代替其他 26% 的游客的消费量。因为作者认为虽然这 26% 的游客很多来自发展中国家, 但是塞舌尔群岛属于高消费旅游地, 这部分人可以负担这样的消费, 说明其在其本国的生活水平与欧洲和美国的游客相当。

通过对旅游业生态足迹的分析，作者指出塞舌尔群岛的环境和生态资源保护的成就是建立在消费世界其他地区资源的基础之上的，其发展的可持续性并不高。

③ John Barrett, Anthony Scott 的 “The Ecological Footprint: A Metric for Corporate Sustainability” (John Barrett, Anthony Scott, 2001) 在研究中，作者引入生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 理论，对某一特定的研究对象 (如城市、社区、机构、企业和行业等) 的日常生活和生产经营活动中相关的能源、商品和服务进行分类，然后逐一分析它们从原材料获取到最终产品形成的全过程中的消费项目。通过这样的分析，就可以在一定程度上避免了在其他研究中只计算了最终消费品的生态足迹，而忽略了在形成最终产品前，中间产品所消耗的原材料和能源的生态足迹的问题。与其他生态足迹的研究相比，作者尤其关注人类活动产生的垃圾问题，将垃圾作为分析中的一个重要组成部分。作者将人类活动用生命周期理论进行了分析，得出了所涉及的各种消费和废弃物，如图 1-2 所示。

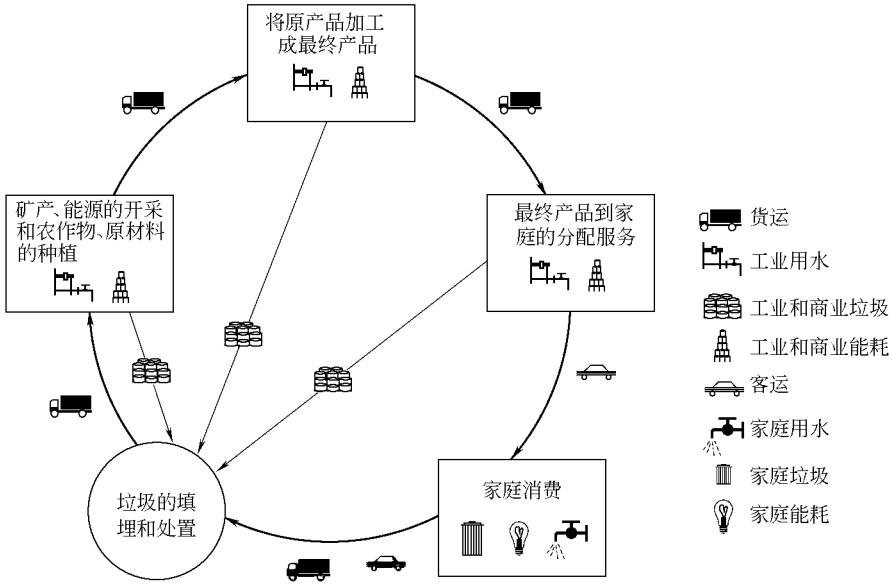


图 1-2 人类消费和废物生命周期图

作者以利物浦为研究对象，通过生态足迹分析，指出利物浦现有的生活方式需要消费巨大的能源和产品；由于这些消费最终会转化为垃圾，使得垃圾的处置成了利物浦可持续发展面临的最大问题。作者进而提出，通过使用节能技术和提高垃圾回收利用率以及改变城市运行方式 (如加大公共交通方式在城市交通中所占比例等) 可以有效地提高利物浦的可持续发展的程度。

1.4 小结

综上所述,生态足迹分析研究的发展体现在两个方面:计算方法上的改进和研究对象在范围上的扩展。

(1) 计算方法

计算方法的改进主要有 Wackernagel 对等量化因子的调整; Simpson 将无生态产出的土地如(如荒地)纳入计算; Bicknell 用投入产出模式分析生态生产的全过程; Lenzen 和 Murray 在计算中考虑到土地在生产中多种用途,利用复合土地(land multiplier)修正生态足迹等(Ree, W.E, 1996; Ree, W.E, 1997; Ree, W.E, 2000, Barrett, 2001; Bicknell, 1998; Lenzen, M, Murray, 2001; Simpson, 2000)。

(2) 研究对象

研究对象从开始的国家如澳大利亚(Simpson, 2000; Lenzen 和 Murray, 2001)、新西兰(Bicknell, 1998)、地区如威特岛(Best Foot Forward, Imperial College, 1998)、城市如智利圣地亚哥(Wackernagel, 1996)、堪培拉(Close, Forgan, 1998)逐步扩大到公共机构如大学[纽卡斯尔大学(Flint, 2001)、悉尼大学(Wood, Lenzen, 2002)];行业如旅游业[塞舌尔群岛旅游业(Gossling, Hansson, 2002)]、交通[英国交通(Best Foot Forward, 2001)]、物流(Lewis, 2000)直至商业机构的运营[Sony 公司(Best Foot Forward, 2001, 2002)]等。

上述研究都是生态足迹分析在区域可持续发展中的应用,即在区域环境影响评价中的应用,是以生态足迹作为指标表征人类活动对所在区域的环境造成的影响。但是未见到关于生态足迹分析在项目环境影响评价中的应用的报道,也未见到在生态足迹分析中引入地理信息系统的报道。

第 2 章 生态足迹和生态容量计算方法

生态足迹分析是在计算生态足迹和生态容量的基础上，以二者之差（大于 0 为生态赤字；小于 0 为生态盈余）来表征人类活动对环境所造成的影响。显然生态赤字的大小取决于生态足迹和生态容量。经研究后发现，生态容量的计算中存在一些值得商榷的地方。由于，生态容量的算法源自生态足迹，所以，本章将在介绍生态足迹计算一般方法的基础上，提出基于资源产出的计算生态容量的新方法。

2.1 生态足迹计算方法

生态足迹理论的一个基本假设是：6 类生态生产性土地在空间上是互斥的（Mathis Wackernagel, 1999），如一块土地当它被用来修建公路（即被归入建成地）时，它就不可能再作为森林、可耕地、牧草地进行生态生产等。生态生产性土地在空间上的互斥性使我们能够对各类生态生产性土地进行汇总，从宏观上认识自然系统的总供给能力和人类系统对自然系统的总需求。

生态足迹计算基于以下两个基本的事实。

1) 人类所消费的资源 and 排放的废物是能够被追踪，并找到相应的生产区域和消纳区域。由于全球化和国际贸易的发展，如何追踪其具体的生产和消纳区域还需要大量的科学研究。

2) 大多数被消费的资源 and 排放的污染可以被转化为提供或消纳它们的具有生态生产力的陆地或水域面积。

那么，如何核算区域或国家的生态足迹？以下将阐述各类生态生产性土地生态足迹的计算方法。

2.1.1 生态足迹一般计算步骤

(1) 追踪资源消耗和污染消纳

人类活动所引起的消费（包括直接的家庭消费、间接消费、最终使家庭受益的商业和政府消费、服务等）和污染消纳（包括水、气、声、固废、辐射等污染的消纳）被分门别类地归结为各种资源的消耗。然后，将资源消耗量按照区域的生态生产能力分别折算成具有生态生产力的化石能源地、可耕地、牧草地、森林、建成地和水域等 6 类生态生产性土地的面积 A_j ，计算见下式：

$$A_j = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{EP_i} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i + I_i - E_i}{EP_i} \quad (2-1)$$

式中, $j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表化石能源地、可耕地、牧草地、森林、水域、建成地; A_j 为生态生产性土地的面积, ha; EP_i 为单位生态生产力, t/ha; C_i 为资源消费量, t; P_i 为资源生产量, t; E_i 为资源出口量, t; I_i 为资源进口量, t。

计算中, 考虑到贸易因素, 本地实际资源消耗量 = 资源生产量 + 资源进口量 - 资源出口量。

(2) 产量调整

由于同类生态生产性土地的生产力在不同国家和地区之间是存在差异的, 因此各国各地区同类生态生产性土地的实际面积不能直接进行对比, 需要进行适当的调整, 方法是将其生态生产性土地的面积乘以产量调整因子 yF 。产量调整因子是一个将各国各地区同类生态生产性土地转化为可比面积的参数, 用所核算区域单位面积生态生产力与全球平均生态生产力相比较而得。如果该因子 $yF > 1$, 则意味着该地区单位面积的生态生产力或者废物吸收能力高于全球平均水平; 如果 $yF < 1$, 则意味着该地区的单位生态生产力或者废物吸收能力低于全球平均水平。调整后的面积被称之为“产量调整面积”(yield adjusted area), 见式:

$$A_j = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times yF_i}{EP_i} = \sum_{i=1}^n \frac{P_i + I_i - E_i}{EP} \times yF_i \quad (2-2)$$

式中, $yF_i = \frac{EP}{\overline{EP}}$, $j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表化石能源地、可耕地、牧草地、森林、水域、建成地; A_j 为调整后的生态生产性土地的面积, gha; yF_i 为产量调整因子; $\overline{EP}$ 为全球平均单位生态生产力, t/ha。

整理上式后如式 (2-3) 所列:

$$A_j = \frac{C}{\overline{EP}} \quad (2-3)$$

(3) 等量化处理

这 6 类土地的生态生产力是不同的, 为了将不同生态生产性土地类型的空间汇总为区域的生态生产力和生态足迹, 各种类型的生态生产性土地面积要乘以一个等价因子 eF , 这个等价因子是在比较不同类型生态生产性土地的生物生产量的基础上得到的。其计算方法为: 某类生态生产性土地等价因子 = 全球该类生态生产性土地平均生态生产力 / 全球所有各类生态生产性土地平均生态生产力。

目前采用的等价因子有: William 和 Wackernagel 提出来的, 如森林和化石能源用地为 1.1, 耕地和建筑用地为 2.8, 草地为 0.5, 水域为 0.2 (Mathis Wackernagel, William E Ress, 1996); 世界野生动物基金会提出来的, 如森林和化石能源用地为 1.8, 耕地和建筑用地为 3.2, 草地为 0.4, 水域为 0.1 等 [WWF (World Wide Fund for Nature), 1996], 本文计算采用 William 和

Wackernagel 提出的等价因子。

综合以上步骤可知，生态足迹的计算方法如下。

用以人类消费和污染消纳所消耗的各种资源（如粮食、经济作物、能源等）的区域消费量除以区域单产量，就可得到各类生态生产性土地的区域生态足迹的占用面积（单位：ha）。但由于各个地区生态生产力各不相同，因此必须乘以产量调整因子后才得到各类土地的全球生态足迹的占用面积（单位：ha）。又由于每一类土地类型的生产力不同，因此将每类土地的面积分别乘以各自的等价因子之后，将各类等价土地面积加和，得到某特定区域的生态足迹的值（单位：gha）。

在 6 种生态生产性土地中，可耕地、牧草地、森林、水域的生态足迹计算可直接使用上述计算方法，而建成地和化石能源地的计算则需要上述计算方法的基础上，进行一些改动。此外，自第二次工业革命以后，电力成为人类消费的最大宗能源，由于发电方式的不同，发电所消耗的资源也不同，相应的，所占用的生态生产性土地也不同，所以电力的生态足迹需要根据发电方式的不同分别计算。

2.1.2 建成地的生态足迹

根据生态足迹的定义，考虑到建成地一般都为宜耕地，所以将它归结为对耕地的消费，其生态足迹可视为同等面积耕地的产出被消费。计算方法如下：

$$A_j = \frac{A_B \times EP}{EP} \times yF = A_B \times yF \quad (2-4)$$

式中， A_j 为建成地的生态足迹， $j=5$ ； EP 为当地可耕地平均生态生产力，t/ha； A_B 为建成地面积，ha； yF 为本地可耕地平均产量调整因子。

其中，当地可耕地平均产量调整因子，计算方法见下式：

$$yF = \frac{EP}{EP} = \frac{\frac{\sum A_i \times eP_i}{\sum A_i}}{\frac{\sum A_i \times eP_i}{\sum A_i}} = \frac{\sum A_i \times eP_i}{\sum A_i \times eP_i} \quad (2-5)$$

式中， yF 为本地可耕地平均产量调整因子； EP 为当地可耕地平均生态生产力，t/ha； $\overline{EP}$ 为全球可耕地平均生态生产力，t/ha； A_i 为当地各耕地产品（如水稻、小麦等）的面积，ha； eP_i 为当地各耕地产品的单位生产量，t/ha； $\overline{eP_i}$ 为全球相应耕地产品的平均单位生产量，t/ha。

2.1.3 化石能源地的生态足迹

根据生态足迹的定义，化石能源地指用于吸收化石能源燃烧后排放的温室气体的森林；因此，化石能源地生态足迹的计算是将化石能源的消费转化为吸收其燃烧后释放出来的温室气体所需的森林面积。森林对温室气体的吸收能力与物

种、密度相关，以热带雨林对温室气体的吸收能力最强。由于森林对温室气体吸收能力是以热量为表征的，需要先将化石能源的消费量按其燃烧效率转化为热量，计算公式如下：

$$A_j = \sum \frac{C_i \times H_i}{EP_i} \quad (2-6)$$

式中， A_j 为化石能源地生态足迹 ($j=0$)，ha； C_i 为第 i 种能源的消费量，t； H_i 为第 i 种能源燃烧释放的热量折算系数，GJ； EP_i 为全球森林对第 i 种能源燃烧排放的温室气体的平均吸收能力，GJ/ha。

2.1.4 电力的生态足迹

现有的实用化发电方式有以下几种。

① 火力发电 以燃烧化石能源释放的热能来驱动发电，国外以石油和天然气为主要能源，国内则以煤炭为主要能源。

② 水力发电 通过水库蓄水抬高水位，以水位落差产生的势能来驱动发电，是我国目前最大的电力来源。

③ 核能发电 以核反应释放原子能来驱动发电，我国目前仅有秦山和大亚湾两座核电站，占发电量的比例很小，仅为 1%。西方国家核能发电的比例较高，如法国核能发电量占总电量的 78%，美国是核能发电量最大的国家，占总电量的 12%。

④ 可再生资源发电 现有实用化的可再生资源发电方式有风力发电、太阳能发电、潮汐发电、地热发电等。在我国已有多座风力发电站和太阳能发电站，主要分布在西部；现有 5 座地热发电站；我国现有 8 座潮汐发电站在运行。

⑤ 垃圾发电 是将植物、工农业残余物和加工废弃物、潮水、动物粪便、能源作物在高温下焚烧和熔融，得到可燃气体，利用可燃气体和余热来发电。我国目前已有多个城市开始兴建垃圾焚烧发电站，而沼气发电和工业废渣发电则已有一定规模。

以上 5 种发电方式中，前 3 种方式是主要发电方式，占全球总电量的 99%，而我国则以前 2 种发电方式为主，占总电量的近 99%。

根据生态足迹分析的理论对以上 5 种方式所属的生态生产性土地进行如下划分。

① 火力发电 发电需要燃烧能源，故视为对化石能源的消费，归入化石能源地。能源消耗量以火力发电单位能耗折算，由式 (2-6) 得式 (2-7)：

$$A_j = \sum \frac{C_i \times H_i}{EP_i} = \sum \frac{C_e \times E_{wi} \times H_i}{EP_i} \quad (2-7)$$

式中， C_e 为产生于第 i 种化石能源的电力消费量，kW·h； E_{wi} 为单位发电量消耗的第 i 种化石能源消费量，t。

② 水力发电 水库蓄水需要淹没土地，而且水电站自身需要占用土地，由于水电站属于人工设施，故视为对建成地的消费，归入建成地。计算中需要先将电量转化为热量，按照每公顷土地的发热效能折算土地面积。热量折算系数 $1\text{J} = 2.778 \times 10^{-7} \text{kW} \cdot \text{h}$ ， $1\text{GJ} = 1 \times 10^9 \text{J}$ ，水电的全球平均生产力为 1000GJ/h ，即水电占地每公顷（建成地）可提供 1000GJ 的能量（中国环境科学研究院，烟台市环境保护局）。计算公式如下：

$$A_j = A_B \times yF = \frac{C_e}{2.778 \times 10^{-7} \times 10^9 \times 1000} \times yF \quad (2-8)$$

式中， A_B 为建成地面积， ha ； C_e 为产生于水力发电的电力消费量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

③ 核能发电 核电站自身和辅助设施需要占用土地；核能发电产生的核废料目前没有太好的处理手段，一般采用填埋处理，这也需要占用土地。因此，将核电视为对建成地的消费，归入建成地，计算采用式（2-4），直接采用核电站、辅助设施和核废料填埋场的占地面积。

④ 可再生能源发电 它们的发电装置需要一定的占地，但是面积很小，可以忽略不计；没有足迹，可视为用电总量的减少。

⑤ 垃圾发电 虽然需要燃烧能源，但是它属于垃圾处理的附属品，即发电中所消耗能源已经被归入垃圾处理所消耗的能源中，不再重复计算，故没有足迹，也可视为用电总量的减少。

综上所述，电力生态足迹的计算，应在减去可再生能源和垃圾发电的电量后，按照火力、水力和核能 3 种发电方式所占比例划分电量，分开计算生态足迹。

2.2 生态容量的土地面积法

如前所述，生态容量的定义是一定自然环境和社会经济条件下，生态生产性土地的最大值。生态容量的计算与生态足迹类似，不同的是，生态足迹的计算是以人们对大米、小麦、油菜、棉花、茶叶、水果、木材、煤、石油等生物资源的实际消费量为基础；而生态容量则是以可耕地、牧草地、森林、建成地和水域的实际拥有面积为基础，经过产量调整和等量化处理得到。本文将目前国内外常用的计算生态容量的方法称为“土地面积法”简称面积法，它的计算公式由式（2-1）得：

$$A_{Ca} = \sum \frac{P_i}{EP_i} \times \overline{yF_i} \times eF_i = \sum \frac{A_i \times EP_i}{EP_i} \times \overline{yF_i} \times eF_i = \sum A_i \times \overline{yF_i} \times eF_i \quad (2-9)$$

式中， A_{Ca} 为生态容量， gha ； P_i 为影响区域内第 i 类生态生产性土地的资源生产量， t ； EP_i 为第 i 类生态生产性土地的单位产量， t/ha ； A_i 为第 i 类生态生产性土地的面积， ha ； $\overline{yF_i}$ 为第 i 类生态生产性土地的平均产量调整因子；