

广州市科技计划项目 (2007J1 - C0491)
广州市教育局市属高校科技计划项目 (62037)

资助出版

生态足迹评价模型的 改进与应用

谢鸿宇 王羚娜 陈贤生 等著



化学工业出版社

广州市科技计划项目 (2007J1 - C0491)
广州市教育局市属高校科技计划项目 (62037)

资助出版

生态足迹评价模型的 改进与应用

谢鸿宇 王羚娜 陈贤生 等著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书针对生态足迹评价模型在以往案例中暴露的部分问题,尝试从各种生态产品和服务的“生产-消费-废弃”过程入手,分析此过程的能源流动和物质消耗,建立起相应的资源消费和污染消纳清单,基于此重新划分各种生态产品和服务的生态生产性土地的归属,以提高生态足迹定量分析的合理性。在此基础上,应用改进后的生态足迹评价模型。以广州市和广州大学为实例,评估了广州市的可持续发展程度,以及广州大学师生对环境造成的影响,为广州大学及其他区域未来可持续发展提供科学的决策依据。

本书适合环境、规划、经济等领域内的广大政策决策者、科技工作者、工程技术人员参考使用,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

生态足迹评价模型的改进与应用/谢鸿宇,王羚郦,陈贤生等著. —北京:化学工业出版社,2008.1
ISBN 978-7-122-01857-1

I. 生… II. ①谢…②王…③陈… III. ①生态经济-评价模型②生态环境-评价模型 IV. F062.2 X171.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第001409号

责任编辑:刘兴春

文字编辑:郑直

责任校对:宋玮

装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风装订厂

720mm×1000mm 1/16 印张12¼ 字数233千字 2008年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:38.00元

版权所有 违者必究

前言

生态足迹是加拿大的 William 教授和 Wackernagel 博士于 20 世纪 90 年代提出的用生物物理量定量描述生态承载力（生态容量），并以此度量可持续发展程度的一种新兴的理论方法。它是将人类的全部消费即社会经济运行过程中的物质吞吐量定量地归结为提供相应生态产品和服务的六类生态生产性土地（化石能源地、可耕地、牧草地、森林、建成地、水域等）的面积，并用此量纲衡量人类究竟消耗了多少用于延续自身发展的自然资源。它以较为科学完善的理论基础、清晰的概念框架、精简的指标体系和统一的量纲，应用于国家、地区、社区、行业等的生态承载力、生态赤字的测算。

利用生态足迹作为评价模型来分析人类活动对生态环境的影响，近年来有很多成功的案例，但是也暴露出很多问题，主要有：①生态足迹分析试图将人类的各种资源消费和污染消纳归于六类土地中，归类时往往忽视了不同经济结构、社会组织形式、生产技术和人类消费模式所造成的生态产品和服务的用地不同，由此低估或高估人类活动对生态环境的影响；②生态足迹分析对自然系统的生态功能描述得不完整，如污染对生态环境的影响估算不足，由此造成污染处理的用地归属不明；③忽略了各类土地的生物生产通常所具有多功能性这一特点，可能会掩盖生态足迹与生态承载力之间不协调的矛盾，如土地可以混种多种作物，森林既提供给人类木材产品，也吸收二氧化碳等；④生态足迹分析的计算是基于现有的经济统计数据的，较难预测未来的可持续趋势，不足以监测变化的过程；⑤六类土地等量化处理后很难说还是与地球空间相关联的生态空间；⑥没有区分资源利用、土地生物生产是否有可持续性；⑦生态足迹分析中没有充分重视贸易在实现可持续发展进程中的影响。

这一系列问题的解决，亟须冷静的思考和科学的分析。显然，全面的回答还存在许多的困难。

针对上述的部分问题，本书试图从以下角度进行完善：从各种生态产品和服务的“生产-消费-废弃”过程入手，分析此过程中的能源流动和物质消耗，建立起相应的资源消费和污染消纳的清单，基于此重新划分各种生态产品和服务的生态生产性土地的归属，以提高生态足迹定量分析实用性和评价结果的合理性。

本书将应用改进后的生态足迹评价模型，以广州市和广州大学为实例。前者是宏观的区域可持续发展程度评价的实例；后者为微观的生态环境影响评价的实例，着重阐述如何通过调查和分析广州大学一年中各种资源消费和污染排放情况，来定量地分析广州大学师生活动对生态环境造成的影响，进而研究削减方

案，为广州大学未来的可持续发展提供科学的决策依据。

本书由谢鸿宇、王羚邴、陈贤生、谭韵静负责撰写，学生莫东明、杨建、赵美婵、招华庆、叶慧珊、林智恩、陈妃端参与了部分研究和撰写工作。

本书共分9章，其中第1章介绍生态足迹和生态容量相关基本概念，以及国内外研究现状；第2章以联合国粮农组织（FAO）统计数据库及国家农业部、国家林业局和国家统计局的数据为基础，重新计算了生态足迹计算中的重要参数农产品全球平均产量；第3章从我国畜牧业产品的生产过程分析入手，重新划分畜牧产品的生态生产性土地的归属，据此计算我国畜牧产品的生态足迹；第4章从全球碳循环分析入手，重新划分化石能源地的生态生产性土地归属，并据此计算化石能源及电力生态足迹；第5章考虑废纸回收的影响，重新计算纸张的生态足迹；第6章通过在分析学校餐具“生产-使用-废弃”过程中的资源消耗，比较公用餐具和一次性餐具对生态环境的影响；第7章总结改进后的生态足迹评价模型的计算方法，并在此基础上，提出生态容量的计算方法；第8章以改进后的生态足迹算法，计算和分析了广州市2003~2005年3年间生态足迹、生态容量和生态赤字的变化情况，并为分析广州大学师生活动对生态环境的影响提供背景资料；第9章以改进后的模型计算广州大学师生活动的生态足迹，并从纸张、交通、能源和餐具四个方面，探讨了广州大学生态足迹的削减方案。

本书是在广州市科技计划项目（2007J1-C0491）、广州市教育局市属高校科技计划项目（62037）的支持下完成的。本书在出版过程中得到广州市教育局研究生学位点扶持建设项目经费的支持。在本书编著过程中，得到了广州大学地理科学学院林媚珍教授和夏丽华教授、广州市自来水公司南洲水厂、广州市沥窖污水处理厂等部门、专家、学者的大力支持与帮助，在此，一并向他们表示衷心的感谢。

限于时间和水平，书中不妥之处在所难免，希望读者和有关专家批评指出，并将意见反馈给作者，以便今后改正。

著者

2008年1月于广州大学城

目 录

1	生态足迹的基本概念和研究现状	1
1.1	生态足迹基本概念	1
1.1.1	生态足迹概念	1
1.1.2	生态生产性土地	1
1.1.3	生态容量	3
1.1.4	生态赤字和生态盈余	3
1.2	生态足迹一般计算步骤	4
1.3	研究现状	6
1.3.1	国外研究现状	6
1.3.2	国内研究现状	9
1.4	小结	11
2	农业初级产品的全球平均产量	12
2.1	种植产品	12
2.2	林产品	14
2.2.1	水果	14
2.2.2	热带作物	15
2.2.3	木材产品	15
2.2.4	非木材林产品	16
2.3	水产品	17
2.3.1	水产捕捞平均产量	18
2.3.2	水产养殖平均产量	19
2.3.3	全球水产品平均产量	19
2.3.4	水生植物的平均产量问题	20
2.4	农业初级产品全球平均产量对比	21
2.5	小结	22
3	中国主要畜牧业产品的生态足迹分析	24
3.1	猪肉	25
3.1.1	猪饲料配方	25
3.1.2	猪肉的生态足迹	27
3.2	禽肉禽蛋	28
3.2.1	家禽(鸡)的饲料配方	28
3.2.2	禽肉禽蛋的生态足迹	30
3.3	我国草地的资源分布	31
3.4	牛肉	32

3.4.1	牛饲料配方	32
3.4.2	牛肉的生态足迹	33
3.5	羊肉	34
3.5.1	羊饲料配方	34
3.5.2	羊肉的生态足迹	35
3.6	牛奶	36
3.6.1	奶牛的精饲料配方	37
3.6.2	牛奶的生态足迹	37
3.7	畜牧产品的生态足迹比较	38
3.8	生态足迹结果差异原因分析	40
3.8.1	禽肉、禽蛋、猪肉	40
3.8.2	牛肉、羊肉、牛奶	41
3.9	小结	43
4	基于碳循环的化石能源及电力生态足迹分析	45
4.1	地球碳库及碳循环	45
4.1.1	地球上的主要碳库	45
4.1.2	全球碳循环	46
4.1.3	陆地生态系统碳库	47
4.1.4	陆地生态系统碳循环	48
4.2	基于碳循环的化石能源生态足迹	49
4.2.1	化石能源地定义的修正	49
4.2.2	化石能源足迹的计算方法	49
4.2.3	森林及草原的 <i>NEP</i> 分析	49
4.2.4	化石能源的排碳量计算	51
4.2.5	各种化石能源的生态足迹	53
4.2.6	结果对比	54
4.3	电力生态足迹(以中国为例)	55
4.3.1	火电生态足迹	56
4.3.2	水电生态足迹	57
4.3.3	核电生态足迹	58
4.3.4	可再生能源发电的生态足迹	59
4.3.5	垃圾发电的生态足迹	59
4.4	小结	59
5	纸张生态足迹	62
5.1	造纸业纸浆结构分析	63
5.1.1	全球纸浆结构分析	63
5.1.2	废纸回收对全球纸浆结构的影响	65
5.2	纸浆耗木估算	67
5.3	废纸回收对造纸用木量的影响	69

5.3.1	废纸的成浆率	69
5.3.2	废纸回收利用的影响	70
5.4	纸张耗木生态足迹	72
5.4.1	纸张耗木量的新估算	72
5.4.2	纸张的生态足迹	75
5.4.3	结果比较	75
5.5	小结	75
6	学校公用餐具生态足迹分析	77
6.1	餐具的生态足迹	77
6.1.1	一次性餐具的生态足迹	77
6.1.2	耐用餐具(公用餐具)的生态足迹	79
6.2	餐具的生态足迹比较分析	82
6.3	小结	84
7	生态足迹和生态容量的计算方法	85
7.1	生态足迹计算方法	85
7.1.1	建成地生态足迹的计算	85
7.1.2	水产品生态足迹的计算	86
7.1.3	肉类和牛奶生态足迹的计算	86
7.1.4	化石能源地生态足迹的计算	87
7.1.5	电力生态足迹的计算	87
7.1.6	纸张生态足迹的计算	89
7.1.7	餐具生态足迹的计算	90
7.2	生态容量计算方法	90
7.2.1	生态生产性土地的供给者	91
7.2.2	生态容量的计算	91
7.3	小结	93
8	案例研究 1: 广州市生态赤字现状分析	95
8.1	广州市自然环境、社会经济概括	95
8.1.1	地理位置、行政区划、人口	95
8.1.2	气候、土壤、植被	95
8.1.3	水源特征	97
8.1.4	经济状况	97
8.2	数据处理	97
8.2.1	生物资源	98
8.2.2	平均产量	101
8.2.3	可耕地平均产量调整因子	105
8.2.4	化石能源和电力	106
8.2.5	生态产品产出量	107
8.3	广州市生态足迹估算	108

8.3.1	生物资源生态足迹	108
8.3.2	化石能源、电力生态足迹	111
8.3.3	建成地生态足迹	113
8.3.4	广州市生态足迹	113
8.4	广州市生态容量估算	115
8.5	生态赤字现状分析	119
8.6	小结	120
9	案例研究 2: 广州大学生态足迹分析	121
9.1	广州大学概况	121
9.2	广州大学交通生态足迹	122
9.2.1	学校公务车	122
9.2.2	教工私家车	127
9.2.3	公共交通	129
9.2.4	小计	131
9.3	食物生态足迹	132
9.4	广州大学能源生态足迹	134
9.4.1	电力	134
9.4.2	用水	135
9.4.3	燃气	136
9.4.4	制冷	137
9.4.5	热水	138
9.5	广州大学纸张生态足迹	139
9.5.1	教学用纸量	139
9.5.2	学校公共用纸量	142
9.5.3	广州大学纸张生态足迹	143
9.6	垃圾生态足迹	145
9.6.1	广州大学城垃圾处理流程	145
9.6.2	广州大学垃圾产出量	145
9.6.3	广州大学垃圾生态足迹	146
9.7	污水处理生态足迹	147
9.7.1	广州大学城污水处理流程	147
9.7.2	广州大学污水排放量	147
9.7.3	广州大学污水处理生态足迹	149
9.8	广州大学餐具生态足迹	150
9.8.1	广州大学餐具使用概况	150
9.8.2	广州大学餐具生态足迹	150
9.9	广州大学生态足迹分析	152
9.9.1	广州大学 2005~2006 学年各项目的生态足迹汇总	152
9.9.2	广州大学生态足迹与广州生态足迹比较	152

9.9.3 广州大学生态足迹结构分析	153
9.10 能源生态足迹削减方案	154
9.10.1 用电生态足迹削减	154
9.10.2 用水生态足迹削减	154
9.11 纸张生态足迹削减方案	155
9.11.1 作业用纸	155
9.11.2 教师用纸	155
9.11.3 学生课本	156
9.11.4 广州大学用纸生态足迹削减	156
9.12 交通生态足迹削减方案	157
9.12.1 公共交通替代私人交通	157
9.12.2 共用私人交通工具	158
9.13 餐具生态足迹削减方案	159
9.13.1 自带餐具生态足迹	159
9.13.2 餐具生态足迹削减方案	159
9.14 小结	160
结论与展望	161
附录	165
附录 1 广州大学餐具清洗流程	165
附录 2 交通线路相关数据	168
附录 3 污水处理流程	171
附录 4 广州大学纸张相关数据	174
参考文献	182

1 生态足迹的基本概念和研究现状

1.1 生态足迹基本概念

1.1.1 生态足迹概念

生态足迹 EF (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^[1]。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(个人、城市、国家、社区)的生态足迹是生产相应人口所消费的所有资源和消耗所产生的废物所需要的生态生产性土地面积(包括陆地和水域)。它代表了既定技术条件和消费水平下特定人口对环境的影响规模和持续生存对环境提出的需求^[2]。

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^[2]。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^[1]。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六大类:化石能源地、可耕地、牧草地、森林、建成地、水域。

(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”,一般采用化石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:①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;②计算吸收燃烧化石能源排放的 CO_2 所需要的森林面积;③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。

(2) 可耕地

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 $13.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$)都已经处于耕种的状态,并且其中大约 $100 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 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 hm^2 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 $34.39 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 的常年草场,折合人均面积约 0.52 hm^2 。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,也因为由植物能量转化到动物能量过程中存在着著名的 $1/10$ 率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 $39.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$,相当于人均约 0.65 hm^2 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达 0.03 hm^2 。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 $361 \times 10^8 \text{ hm}^2$,相当于人均 6 hm^2 。但是,海洋里大部

分的生态生产量来源于只占海洋总面积 5% 的沿海大陆架地区。由于人类所食用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 5% 沿海大陆架每年能提供鱼类人均 18kg, 而其中仅有 12kg 能最后落在人们的饭桌上, 其所能保证的仅是人类热量摄入量的 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。

1.1.3 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”^[3]。

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。

1.1.4 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。

1.2 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、建成地和水域六类生态生产性土地的面积 A_j ,计算方法见式(1-1):

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

式中 A_j ——生态生产性土地的面积, hm^2 , 其中 $j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表化石能源地、可耕地、牧草地、森林、水域、建成地。;

EP_i ——单位生态生产力, t/hm^2 ;;

C_i ——资源消费量, t ;

P_i ——资源生产量, t ;

E_i ——资源出口量, t ;

I_i ——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 (yield factor)。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出。如果该因子 >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 <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。调整后的面积被称为“产量调整面积”(yield adjusted area),如式(1-2)所列:

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

式中 A_j ——调整后的生态生产性土地的面积, hm^2 , 其中 $j=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 分别代表化石能源地、可耕地、牧草地、森林、水域、建成地;

yF_i ——产量调整因子, $yF_i = \frac{EP}{\overline{EP}}$;

$\overline{EP}$ ——全球平均单位生态生产力, hm^2 。

整理后如式(1-3) 所列:

$$A_j = \frac{C_i}{\overline{EP}} \quad (1-3)$$

(3) 等量化处理

这六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 (equivalence factors), 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几类, 如 William 和 Wackernagel 提出的: 森林和化石能源用地为 1.1, 可耕地和建成地为 2.8, 牧草地为 0.5, 水域为 0.2^[1]; 世界自然基金会 (WWF) 1996 年提出的: 森林和化石能源用地为 1.8, 耕地和建筑用地为 3.2, 牧草地为 0.4, 水域为 0.1 等^[4]。2004~2006 年 WWF 发布的等价因子见表 1-1, 本文计算采用 WWF 在 2006 年提出的等价因子^[5]。

表 1-1 2004~2006 年世界自然基金会提出的土地等价因子^[5]

年份	可耕地	森林	牧草地	水域	建成地	化石能源地
2004	2.19	1.48	0.48	0.36	2.19	1.48
2005	2.17	1.37	0.48	0.35	2.17	1.37
2006	2.21	1.34	0.49	0.36	2.21	1.34

综合以上步骤可知, 生态足迹的计算方法是: 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 (单位为 hm^2)。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能得到各类土地全球生态足迹的占用面积 (单位为 hm^2)。又由于每一类土地类型的生产力不同, 因此还应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相加, 就可得到某特定区域生态足迹的值 (单位: 全球标准公顷)。

在六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在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。

1.3 研究现状

1.3.1 国外研究现状

生态足迹自 20 世纪 90 年代初被提出后,得到广泛应用。近些年来,在以 Wackernagel 为代表的“加拿大生态足迹小组”和“发展重定义组织”(Redefining Progress, RP)的努力下,生态足迹理论目前发展较为成熟,已经用于测算世界、国家或地区的生态足迹,具有代表性的成果有以下几项。

(1) Stefan Gossling, Carina Borgstrom Hansson 等的“Ecological footprint analysis as a tool to assess tourism sustainability”^[6]

在研究中,作者以塞舌尔群岛旅游业为例,利用生态足迹为量纲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,最后将其归入六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。

航空运输所消费的能源是指游客在来岛和离岛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% 的公共航空能耗率来计算 16% 的私人航空(游客乘坐私人飞机)能耗;以占客源 74% 的欧洲和美国平均航空飞行里程作为 26% 的其他地区游客的航空里程。此外,由于航空运输的废气排放是在高空进行的,除了排放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。

岛内旅游所消费的能源是指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。

游客住宿所消费的能源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,如机场、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足迹如博物馆、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 ,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、水域四类土地。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母国的食物和纺织物消费标准为原则,以游客在其母国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26%其他地区游客的消费量。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,说明其在母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功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。

(2) Jason Venetoulis 的 “Assessing Ecological Impact of a University the ecological footprint for the University of Redlands”^[7]

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四类生态足迹来表示:水足迹、固废足迹、能源足迹和交通足迹。

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没有将人类生产和生活用水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,其计算公式如式(1-4)所列:

$$A = \frac{Co}{yF} = \frac{Co}{(Ra + Re)} = \frac{Co}{(Ra + Ca/Area)} \quad (1-4)$$

式中 A ——区域内用水的生态生产性土地面积, hm^2 ;

Co ——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 ——产量因子;

Ra ——区域内降雨量, mm ;

Re ——区域内蓄水量的等量降雨量, mm ;

Ca ——区域内蓄水量, m^3 ;

$Area$ ——区域面积, hm^2 。

作者将区域内的年降雨量和水库的蓄水量作为区域水的生产量,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,作者主要统计了如下几个方面的消费:纸张、塑料、玻璃、合金、磁性金属等。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