

赵晟, 吴常文. 2009. 中国、韩国 1980~2006 年能值足迹与能值承载力 [J]. 环境科学学报, 29(10): 2231–2240
Zhao S, Wu C W. 2009. Time series of national average energy footprint and energy carrying capacity in China and Korea between 1980 and 2006 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(10): 2231–2240

中国、韩国 1980~2006 年能值足迹与能值承载力

赵晟*, 吴常文

浙江海洋学院 海洋科学学院, 舟山 316000
收稿日期: 2009-01-04 修回日期: 2009-06-22 录用日期: 2009-08-10

摘要: 根据基于能值分析理论改进的生态足迹计算模型——能值足迹和能值承载力模型, 在空间尺度上从地区一级上升到国家尺度, 探讨能值足迹和能值承载力在国家层面上若干年时间序列的变化趋势, 并以中国和韩国为例, 对两国在 1980~2006 年 (韩国 1980~2004 年) 期间的能值足迹和能值承载力进行了计算与分析, 探讨中国和韩国的可持续发展状况. 结果表明, 中国人均能值承载力由 1980 年的 $2\,7362\text{hm}^2$ 下降到 2006 年的 $2\,0547\text{hm}^2$, 同时, 人均能值足迹却由 1980 年的 $1\,7715\text{hm}^2$ 上升到 2006 年的 $5\,7903\text{hm}^2$. 中国自 1987 年以来出现能值足迹赤字, 且赤字数额逐年增加, 到 2006 年已达到 $-3\,7356\text{hm}^2$. 韩国人均能值承载力由 1980 年度 $3\,1871\text{hm}^2$ 下降到 2004 年度 $2\,5271\text{hm}^2$, 人均能值足迹由 1980 的 $1\,1339\text{hm}^2$ 上升到 2004 年的 $4\,2419\text{hm}^2$, 韩国自 1992 年出现能值足迹赤字, 之后虽有小幅波动, 但总体趋势与中国类似, 赤字数额逐年上升, 到 2004 年已达 $-1\,7147\text{hm}^2$. 目前, 中国已不能满足基本可持续性的要求, 而韩国能够满足这一要求.

关键词: 生态足迹; 能值足迹; 能值承载力; 模型; 中国; 韩国

文章编号: 0253-2468(2009)10-2231-10 中图分类号: X32 文献标识码: A

Time series of national average energy footprint and energy carrying capacity in China and Korea between 1980 and 2006

ZHAO Sheng*, WU Changwen
Marine Science College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000

Received 4 January 2009; received in revised form 22 June 2009 accepted 10 August 2009

Abstract We aim to demonstrate a new sustainable development index for energy footprint and energy carrying capacity from calculations combining the energy analyses with the ecological footprint model and the concept of basic sustainability. We calculated the national average energy footprint and energy carrying capacity in China and Korea from 1980 to 2006. Our results showed that the per capita energy carrying capacity in China dropped from $2\,7362\text{hm}^2$ in 1980 to $2\,0547\text{hm}^2$ in 2006, whereas the per capita energy footprint increased from $1\,7715\text{hm}^2$ to $5\,7903\text{hm}^2$ during the same time period. The results indicate that since 1987, China has been running an ecological deficit which has been increasing every year. The national average energy footprint and carrying capacity in Korea showed similar trends to those in China based on our calculations. The per capita energy carrying capacity in Korea dropped from $3\,1871\text{hm}^2$ in 1980 to $2\,5271\text{hm}^2$ in 2004 while the per capita energy footprint increased from $1\,1339\text{hm}^2$ to $4\,2419\text{hm}^2$ during the same period. The ecological deficit in Korea has been increasing with small fluctuations since it first appeared in 1992. We concluded that China can hardly meet the requirement of basic sustainability for fast economic development while Korea may be able to meet the requirement for sustainable development.

Keywords ecological footprint; energy footprint; energy carrying capacity; modeling; China; Korea

1 引言 (Introduction)

自 1987 年世界环境与发展委员会在其报告《我们共同的未来》(WCED, 1987) 中提出可持续发展 (Sustainable development) 概念以来, 可持续发展

的观念已经被普遍用于作为社会-自然-经济复合系统发展及环境管理的指导原则, 已从定性的描述走向定量的测度和评价. 定量测度和评价主要以定量研究可持续发展的程度, 量化人类对自然资源的利用状况, 测度人类对地球生态系统所产生的影响和

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 40971295); 国家科技支撑计划 (No. 2007BAD43B00); 国际科技合作项目 (No. 2009DFB20290); 浙江省教育厅科研计划项目 (No. 20070332)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40971295), the National Science & Technology Pillar Program (No. 2007BAD43B00), the International Joint Research Project of the Chinese Ministry of Science and Technology (No. 2009DFB20290) and the Educational Commission of Zhejiang Province of China (No. 20070332)
作者简介: 赵晟 (1973—), 男, 副教授 (博士), E-mail: zhaos@zjou.edu.cn * 通讯作者 (责任作者)
Biography: ZHAO Sheng (1973—), male, associate professor (Ph.D.), E-mail: zhaos@zjou.edu.cn * **Corresponding author**
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压力为主要内容,并已成为可持续发展研究的重要内容之一.近年来,各国学者先后提出了一些可持续发展评价指标体系、分析方法及其计算模型,其中,较有影响的有 Odum (Odum, 1988; 1996)的能值分析理论, Rees和 Wackemagel的生态足迹方法 (Rees, 1996; Wackemagel *et al.*, 1999; Wackemagel and Rees, 1996)等.

各种生态系统和人类社会经济系统均可视为能量系统,系统各组分及其作用无不涉及能量的流动、转化与贮存,能量可用于表达和了解生命与环境、人与自然的关系.但不同类别的能量存在质与价值的根本差异,不可作简单的加减和比较 (Odum, 1988). 20世纪 80年代以美国著名生态学家、系统能量分析先驱 Odum 为首的学者在系统生态学、能量生态学和生态经济学基础上创立了能值分析理论和方法 (Odum, 1988; 1996; Odum *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 1997; 2003; 2004; Ulgenti and Brown, 1998),应用能值这一新的科学概念和度量标准及其转换单位-能值转换率 (Transformity),可将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为同一标准的能值,为生态系统和生态经济系统的定量分析研究开拓了新途径.目前,能值理论已经在各种生态或生态经济系统分析中得到了广泛应用 (Huang, 1998; Bastianoni and Marchettini, 2001; Lefroy and Rydberg, 2003; Yang *et al.*, 2003).我国于 20世纪 90年代初由蓝盛芳引入能值理论 (蓝盛芳, 1992),随后在国家与地区 (李双成等, 2001; 董孝斌等, 2005)、农业 (严茂超等, 2001)、自然保护区 (万树文等, 2000)和城市 (李金平等, 2006)等方面进行了能值分析和理论方法研究,能值分析方法日益发展完善成为复合生态系统生态经济分析与评价的成熟方法,近年的应用研究数量更是急剧上升,成为生态经济领域研究中新的热点.

生态足迹自 1992年提出以来,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,生态足迹理论提供了一种测算人类对自然生态服务的需求与自然所能提供的生态服务的简明框架,众多学者对此进行了大量的实证研究 (Monfreda, 2004; Lenzen and Murray, 2001; Gerbens-Leenes and Nonhebel, 2002),并得到国际机构、政府部门和研究机构认可 (World Wildlife Fund, 2000; 2002; 2004; Global Footprint Network, 2007).尽管如此,生态足迹模型无论在理论上还是在方法上都被认为

存在诸多明显不足与缺陷,引起了较大的争论,甚至遭到了一些研究者的严厉批评 (Roth *et al.*, 2000; Lenzen and Murray, 2001; Luck *et al.*, 2001; Moffatt, 2000; Levett, 1998).虽然对于该方法提出了不同的看法,有些甚至被认为是该方法无法克服的内在缺陷,该方法还是得到了越来越多的应用与肯定 (Hunter, 2002; Van den Bergh and Verbruggen, 1999; Ayres, 2000; Ferguson, 1999).生态足迹方法已经成为评价区域或国家生态系统服务的起点,该方法具有许多优点:首先,计算的结果易于理解;其次,也是非常重要的,即人类“消费”的生态空间很容易与自然所能够“提供”的生态空间进行对比 (Wackemagel and Yount, 1998);第三,与其它综合指标一样,它把众多人类消费和自然提供的资源数据综合为单一的数据 (Costanza, 2000).

上述指标体系和评价方法虽然各有不同,但是其出发点都是为了表达生态系统发展状况的可测量性,通过测算人类对自然生态服务的需求与自然所能提供的生态服务之间的差距,评价人类对自然资源的利用情况,从而较准确地判定评价对象的可持续发展程度和状况.能值分析的土地直接及间接使用与生态足迹将相关资源转化为面积的概念非常相似,能值足迹提供了一种真实测量生态足迹与生态承载力的有效方法,它为我们描绘了人类活动对地球影响及人类对自然资本消费的清晰框架.由于此新方法对自然资源使用的真实测量,可以让我们更好的了解人类活动对地球的影响及未来所要采取的措施.本文根据改进的生态足迹计算模型-能值足迹和能值承载力 (Emergy Footprint and emergy carrying capacity) (Zhao *et al.*, 2005),探讨了能值足迹和能值承载力在国家层面上若干年时间序列里的变化趋势,并以中国和韩国为例,探讨了中国、韩国两国的可持续发展状况.

2 方法 (Methods)

生态足迹概念来源于承载能力.生物学家界定承载能力是在给定的栖息地范围内,某一种群能够永续生存下去,该栖息地所能容纳的该种群的最大数量 (Odum, 1989; Rees, 1992).如果种群数量超出特定生境的承载力,种群将面临崩溃的危险.环境的承载力是其最大可支持负荷 (Carton, 1986).目前人类还无法摆脱对于自然的依赖 (Rees, 1990),因此,承载力仍然是可持续发展中关

注的焦点. 为了实现可持续发展, 必须保证一定数量的关键资本能够得以保护, 并保证其完整. 在这种情况下, 生态可持续性的最根本的问题是剩余的自然资本储备 (包括物种种群、生态系统等) 是否能够满足未来一段时间预期人口数量的各种消费及吸收消化这些人口产生的各种废弃物, 同时保证生态支持系统的正常的功能状态 (Rees 1996). 如果定义承载力为健康、安全、完整的自然环境所提供的“负荷”, 而不是其所支撑最大的人口数量, 问题就会变得更加明确一些. 将各种自然资源划分为可再生资源 and 不可再生资源能够更好地理解承载力概念, 对于可再生资源, 如果以某种可再生的方式来利用其时, 这样的承载力才是可持续的; 对于不可再生资源, 如矿产资源和化石能源来说, 虽然自然过程能够形成矿产和化石能源, 但增加量很有限, 从人类开发利用角度来看, 形成的速度也极其缓慢. 因此, 在计算承载力时, 只考虑了可再生资源. 综上, 通过转换传统承载力和扩展“负荷”这两个概念, 我们可以利用生态足迹方法 (以面积作为度量单位) 来评估承载力.

能值足迹与能值承载力模型的基本思路是将某一区域 6 种生物生产土地的实际消费量和自然提供的可更新资源量, 应用能值理论将这些实物量转化为可以相加的共同度量标准——能值, 通过引入能值密度概念, 转化为人们易于理解的面积概念. 能值足迹是将人类对自然生态的需求与自然所能提供的生态服务, 应用能值分析的方法将二者转化为人们易于理解的面积概念, 评价人类对各种自然资源的利用情况, 从而较准确地判定评价对象的发展程度和状况. 能值足迹定义为 (Zhao *et al*, 2005): 任何已知人口 (一个地区或一个国家) 所能获得的自然资源 (可更新资源) 与消费的各种资源及消费这些资源时产生的废弃物所对应的能值面积. 它包括两方面的含义, 一方面是人类所能获得的自然资源对应的能值面积, 称为能值承载力; 另一方面是人类消费的自然资源及消费这些资源产生的废弃物所对应的能值面积, 称为能值足迹. 具体的计算模型如下:

能值足迹的计算如下:

$$ef = \sum_{i=1}^n a_i = \sum_{i=1}^n \frac{G_i}{p_i} \tag{1}$$

式中, ef 为人均能值足迹 (hm^2 或 m^2); i 为消费资源类型; a_i 为人均第 i 种资源消费对应的能值面积 (hm^2 或 m^2); G_i 为人均第 i 种资源消费的能值数量, 单位为太阳能焦耳 (Solar em jou les 缩写为 Sej); p_i 为区域能值密度, 即单位时间 (1 年) 单位面积 (m^2) 上的能值数量, 单位为 $Sej m^{-2} a^{-1}$.

p_i 的计算公式如下:

$$p_i = \frac{\text{区域总能值}}{\text{区域面积}}$$

在计算区域总能值中, 取区域获得的太阳能值、雨水势能值、雨水化学能值、风能值、地球旋转能值中的最大值项与潮汐能值的和作为区域总能值. 能值足迹的计算包括生物资源、能源资源和废弃物 3 个部分. 其中, 生物资源主要包括: 农产品、林产品、畜产品、水产品; 能源包括煤、石油、天然气和电力; 废弃物包括废气、废水、固体废物及生活垃圾. 分别计算这些消费项目的总能值、人均能值和能值足迹, 最后相加得到人均能值足迹 ef .

能值承载力即是区域内部的生物生产性土地数量, 计算公式为:

$$ec = \frac{e}{p} \tag{2}$$

式中, ec 为人均能值承载力 (hm^2 或 m^2); e 为人均可获得资源的能值数量 (Sej); p 为全球能值密度 ($Sej m^{-2} a^{-1}$), 计算公式如下:

$$p = \frac{\text{地球的总能值}}{\text{地球的面积}} = \frac{1.583 \times 10^{25}}{5.1 \times 10^{14}} = 3.1 \times 10^{10} \text{ (Sej m}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)}$$

式中, 地球生物圈主要能值基准值 $1.583 \times 10^{25} Sej a^{-1}$ 取自参考文献 (Odum *et al*, 2000).

3 中国、韩国 1980~ 2006 年能值足迹与能值承载力 (Emergy footprint and emery carrying capacity of China and Korea from 1980~ 2006)

根据能值足迹、能值承载力的概念与计算公式, 对中国、韩国 1980~ 2006 (韩国至 2004 年) 年能值足迹、能值承载力进行了计算与分析, 计算结果见表 1~ 表 4. 表 1 是中国 2004 年能值足迹和能值承载力计算过程表 (韩国能值足迹和能值承载力的计算方法相同, 韩国能值密度 $p_i = 4.30 \times 10^{15} Sej m^{-2}$). 根据表 1 中的计算方法分别对中国、韩国 1980 年至 2006 年 (韩国至 2004 年) 的能值足迹、

* 数据来源: 韩国国家统计局, 中国国家统计局
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

能值承载力、人均能值足迹、人均能值承载力以及 6 种不同土地利用类型的人均能值足迹进行了计算, 结果见表 2 表 3 和表 4 根据文献(WCED, 1987), 在表 2 中的人均能值承载力计算部分中扣除了 12% 的生物多样性保护面积. 由表 2 可知, 中国人均能值承载力由 1980 年的 $2\ 7362\text{hm}^2$ 下降到 2006 年的 $2\ 0547\text{hm}^2$, 同时, 人均能值足迹却由 1980 年的 $1\ 7715\text{hm}^2$ 上升到 2006 年的 $5\ 7903\text{hm}^2$, 自 1987 年出现能值足迹赤字以来, 赤字数额逐年增加, 到

2006 年已达到 $-3\ 7356\text{hm}^2$. 韩国自 1992 年出现能值足迹赤字, 之后虽有小幅波动, 但总体趋势与中国类似, 赤字数额呈逐年上升, 到 2004 年赤字数额达 $-1\ 7147\text{hm}^2$. 由表 3、4 可以看出, 中国和韩国的能值足迹组成差异表现在组成成分上, 中国能值足迹主要由耕地、林地和化石燃料组成, 韩国的能值足迹主要由草地、化石燃料和建筑用地组成. 相同点主要表现在化石燃料都是两国能值足迹的最主要组成成分.

表 1 中国 2004 年能值足迹和能值承载力计算
Table 1 Calculations for energy footprint and energy carrying capacity in China (2004)

能量类型 Types of energy	原始数据 Raw Data/J	能值转换率 Transformity/(Sej J ⁻¹)	总能值 Total energy/Sej	人均能值 Energy per cap/Sej	人均能值承载力 Carrying capacity per cap/hm ²
$p = 3\ 104 \times 10^{10} \text{ (Sej m}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)}$					
生态承载力			$9\ 53 \times 10^{23}$	7.33×10^{14}	2 3611
可更新资源			$9\ 53 \times 10^{23}$	7.33×10^{14}	2 3611
太阳能	5.97×10^{22}	1	$5\ 97 \times 10^{22}$	4.59×10^{13}	0 1480
雨水化学能	3.03×10^9	18199	$5\ 51 \times 10^{23}$	4.24×10^{14}	1 3667
雨水势能	8.86×10^9	10488	$9\ 29 \times 10^{23}$	7.15×10^{14}	2 3030
风能	5.84×10^9	1496	$8\ 74 \times 10^{22}$	6.72×10^{13}	0 2165
地球循环	1.39×10^9	34377	$4\ 78 \times 10^{23}$	3.68×10^{14}	1 1843
潮汐	1.39×10^8	16842	$2\ 34 \times 10^{22}$	1.80×10^{13}	0 0580
海浪	1.05×10^8	30550	$3\ 21 \times 10^{22}$	2.47×10^{13}	0 0795
$P_1 = 9.92 \times 10^{10} \text{ (Sej m}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)}$					
能值足迹			$6\ 63 \times 10^{24}$	5.10×10^{15}	5 1383
生物资源			$3\ 45 \times 10^{24}$	2.65×10^{15}	2 6722
主要农产品产量			$1\ 25 \times 10^{24}$	9.64×10^{14}	0 9719
1 粮食			$4\ 02 \times 10^{23}$	3.09×10^{14}	0 3119
1 1 谷物	5.04×10^8	35900	$1\ 81 \times 10^{23}$	1.39×10^{14}	0 1403
1 2 豆类	3.20×10^7	690000	$2\ 21 \times 10^{23}$	1.70×10^{14}	0 1714
1 3 薯类	8 19 1016	2700	$2\ 21 \times 10^{30}$	1.70×10^{11}	0 0002
2 油料	7.83×10^7	690000	$5\ 40 \times 10^{23}$	4.15×10^{14}	0 4186
3 棉花	1.19×10^7	1900000	$2\ 26 \times 10^{23}$	1.74×10^{14}	0 1755
4 糖料	2.68×10^7	84900	$2\ 28 \times 10^{22}$	1.75×10^{13}	0 0177
5 蔬菜	2.31×10^8	27000	$6\ 22 \times 10^{22}$	4.79×10^{13}	0 0482
林产品			$2\ 10 \times 10^{23}$	1.62×10^{14}	0 1630
木材	6.61×10^7	34900	$2\ 31 \times 10^{22}$	1.78×10^{13}	0 0179
水果	3.53×10^7	530000	$1\ 87 \times 10^{23}$	1.44×10^{14}	0 1451
畜产品			$1\ 53 \times 10^{24}$	1.18×10^{15}	1 1874
1 肉类总产量	3.34×10^7	3170000	$1\ 06 \times 10^{24}$	8.14×10^{14}	0 8198
2 奶类	1.09×10^7	1700000	$1\ 85 \times 10^{23}$	1.43×10^{14}	0 1437
3 蛋类	1.25×10^7	2000000	$2\ 51 \times 10^{23}$	1.93×10^{14}	0 1945
4 羊毛	8.61×10^5	4400000	$3\ 79 \times 10^{22}$	2.92×10^{13}	0 0294
水产品			$4\ 51 \times 10^{23}$	3.47×10^{14}	0 3500
水产品产量	2.26×10^7	2000000	$4\ 51 \times 10^{23}$	3.47×10^{14}	0 3500
能源资源			$3\ 02 \times 10^{24}$	2.32×10^{15}	2 3423
煤	5.84×10^9	39800	$2\ 32 \times 10^{24}$	1.79×10^{15}	1 8013
石油	7.36×10^8	53000	$3\ 90 \times 10^{23}$	3.00×10^{14}	0 3025
天然气	1.59×10^8	48000	$7\ 64 \times 10^{22}$	5.88×10^{13}	0 0592
电	1.45×10^8	159000	$2\ 31 \times 10^{23}$	1.78×10^{14}	0 1793
火电		159000	0	0	0
水电	1.27×10^8	159000	$2\ 02 \times 10^{23}$	1.56×10^{14}	0 1569
核电	1.82×10^7	159000	$2\ 89 \times 10^{22}$	2.22×10^{13}	0 0224
污染物排放			$1\ 60 \times 10^{23}$	1.23×10^{14}	0 1238
废水	2.41×10^7	660000	$1\ 59 \times 10^{23}$	1.22×10^{14}	0 1234
工业固体废物排放量	8.81×10^3	1800000	$1\ 59 \times 10^{30}$	1.22×10^{11}	0 0001
工业废气排放量	2.13×10^4	1800000	$3\ 83 \times 10^{30}$	2.95×10^{11}	0 0003

表 2 中国、韩国 1980~ 2006 年人均能值足迹与人均能值承载力

Table 2 Emery footprint and emery carrying capacity of China and Korea from 1980~ 2006

年代 Year	中国			韩国		
	人均能值承载力	人均能值足迹	能值足迹赤字	人均能值承载力	人均能值足迹	能值足迹赤字
	Carrying capacity per cap /hm ²	Emery footprint per cap /hm ²	Emery Deficit/hm ²	Carrying capacity per cap /hm ²	Emery footprint per cap/hm ²	Emery Deficit/hm ²
1980	2 7362	1. 7715	0 9647	3. 1872	1 1339	2 0533
1981	2 6989	1. 8322	0 8667	3. 1379	1 1618	1 9761
1982	2 6598	1. 6393	1 0205	3. 0898	1 2078	1 8820
1983	2 6351	1. 7364	0 8987	3. 0446	1 4042	1 6404
1984	2 6069	1. 8403	0 7666	3. 0072	1 4543	1 5529
1985	2 5515	2 4437	0 1078	2 9777	1 5448	1 4330
1986	2 5515	2 4437	0 1078	2 9483	1 7763	1 1719
1987	2 4710	2 5454	- 0 0744	2 9194	2 0014	0 9179
1988	2 4326	2 5817	- 0 1491	2 8910	2 1109	0 7800
1989	2 3964	2 7517	- 0 3554	2 8625	2 2588	0 6036
1990	2 3622	2 9050	- 0 5428	2 8344	2 4858	0 3487
1991	2 3318	2 9640	- 0 6322	2 8065	2 6579	0 1486
1992	2 3050	3. 0030	- 0 6980	2 7775	2 8958	- 0 1183
1993	2 2788	3. 2194	- 0 9406	2 7494	2 7769	- 0 0275
1994	2 2535	3. 4325	- 1 1791	2 7219	3 1660	- 0 4441
1995	2 2298	3. 7253	- 1 4954	2 6946	3 4244	- 0 7298
1996	2 2067	3. 7332	- 1 5265	2 6691	3 6548	- 0 9857
1997	2 1847	3. 8406	- 1 6560	2 6442	3 8246	- 1 1804
1998	2 1648	3. 8001	- 1 6354	2 6251	3 5634	- 0 9383
1999	2 1471	3. 6331	- 1 4860	2 6066	3 8252	- 1 2186
2000	2 1309	3. 9864	- 1 8555	2 5849	3 9339	- 1 3490
2001	2 1162	3. 9395	- 1 8233	2 5660	3 9554	- 1 3895
2002	2 1026	4. 2163	- 2 1137	2 5519	4 3729	- 1 8209
2003	2 0900	4. 6007	- 2 5108	2 5394	4 3729	- 1 8334
2004	2 0777	5. 1383	- 3 0606	2 5271	4 2419	- 1 7147
2005	2 0655	5. 5069	- 3 4414			
2006	2 0547	5. 7903	- 3 7356			

表 3 中国 6种土地分类的人均能值足迹 (1980~ 2006)

Table 3 Emery footprint and its components in China from 1980~ 2006

年代 Year	人均能值足迹 Emery footprint per cap /hm ²							人均能值承载力 Emery canying capacity per cap /hm ²
	小计 total	耕地 A rable	林地 Forest	草地 Pasture	水域 Water	化石燃料 Fossil	建筑用地 Built-up	
1980	1 7715	0. 4661	0 0328	0 1905	0 0423	1. 0058	0 0340	2 7362
1981	1 8322	0. 5252	0 0317	0 2164	0 0427	0 9784	0 0378	2 6989
1982	1 6393	0. 2441	0 0316	0 2562	0 0471	1. 0180	0 0423	2 6598
1983	1 7364	0. 2633	0 0342	0 2670	0 0494	1. 0739	0 0486	2 6351
1984	1 8403	0. 2689	0 0393	0 2831	0 0555	1. 1452	0 0483	2 6069
1985	2 4437	0. 6834	0 0403	0 3527	0 0618	1. 2552	0 0503	2 5515
1986	2 4437	0. 6834	0 0403	0 3527	0 0618	1. 2552	0 0503	2 5515
1987	2 5454	0. 6852	0 0450	0 3944	0 0811	1. 2870	0 0528	2 4710
1988	2 5817	0. 6296	0 0435	0 4361	0 0887	1. 3271	0 0567	2 4326
1989	2 7517	0. 6128	0 0433	0 4537	0 1991	1. 3818	0 0610	2 3964
1990	2 9050	0. 7033	0 0423	0 4856	0 2033	1. 4062	0 0643	2 3622

续表 3

年代 Year	人均能值足迹 Emery footprint per cap /hm ²							人均能值承载力 Emery carrying capacity per cap /hm ²
	小计 total	耕地 Arable	林地 Forest	草地 Pasture	水域 Water	化石燃料 Fossil	建筑用地 Built-up	
1991	2 9640	0. 7213	0. 0458	0. 5295	0. 2050	1. 4000	0. 0626	2 3318
1992	3 0030	0. 6831	0. 0494	0. 5697	0. 2252	1. 4102	0. 0654	2 3050
1993	3 2194	0. 7774	0. 0556	0. 6270	0. 2428	1. 4414	0. 0753	2 2788
1994	3 4325	0. 7729	0. 0608	0. 7284	0. 2676	1. 5150	0. 0878	2 2535
1995	3 7253	0. 8044	0. 0680	0. 8346	0. 2952	1. 6260	0. 0970	2 2298
1996	3 7332	0. 7891	0. 0715	0. 7718	0. 3461	1. 6593	0. 0955	2 2067
1997	3 8406	0. 8042	0. 0740	0. 8544	0. 3822	1. 6276	0. 0983	2 1847
1998	3 8001	0. 8297	0. 0754	0. 8950	0. 3959	1. 5013	0. 1028	2 1648
1999	3 6331	0. 8338	0. 0799	0. 9097	0. 4102	1. 2990	0. 1006	2 1471
2000	3 9864	0. 8890	0. 0773	0. 9562	0. 4222	1. 5326	0. 1091	2 1309
2001	3 9395	0. 9003	0. 0804	0. 9935	0. 4315	1. 4004	0. 1335	2 1162
2002	4 2163	0. 9058	0. 0823	1. 0429	0. 4436	1. 6008	0. 1408	2 1026
2003	4 6007	0. 8675	0. 1549	1. 1161	0. 4563	1. 8597	0. 1461	2 0900
2004	5 1383	0. 9719	0. 1633	1. 1874	0. 4734	2. 1630	0. 1794	2 0777
2005	5 5069	0. 9983	0. 1709	1. 2799	0. 4960	2. 3631	0. 1987	2 0655
2006	5 7903	1. 0236	0. 1841	1. 3386	0. 5094	2. 5193	0. 2154	2 0547

表 4 韩国 6种土地分类的人均能值足迹 (1980~ 2004)

Table 4 Emery footprint and its components in Korea from 1980~ 2004

年代 Year	人均能值足迹 Emery footprint per cap /hm ²							人均能值承载力 Emery carrying capacity per cap/hm ²
	小计 total	耕地 Arable	林地 Forest	草地 Pasture	水域 Water	化石燃料 Fossil	建筑用地 Built-up	
1980	1 1339	0. 0545	0. 0029	0. 2868	0. 1353	0. 4969	0. 1575	3 1872
1981	1 1618	0. 0549	0. 0031	0. 2865	0. 1554	0. 5064	0. 1555	3 1379
1982	1 2078	0. 0545	0. 0031	0. 3573	0. 1439	0. 4971	0. 1519	3 0898
1983	1 4042	0. 0604	0. 0028	0. 4689	0. 1497	0. 5169	0. 2054	3 0446
1984	1 4543	0. 0603	0. 0027	0. 4689	0. 1541	0. 5429	0. 2254	3 0072
1985	1 5448	0. 0599	0. 0025	0. 4974	0. 1627	0. 5519	0. 2704	2 9777
1986	1 7763	0. 0637	0. 0025	0. 5847	0. 1900	0. 5765	0. 3589	2 9483
1987	2 0014	0. 0729	0. 0023	0. 6802	0. 1713	0. 6109	0. 4640	2 9194
1988	2 1109	0. 0759	0. 0028	0. 7281	0. 1634	0. 6961	0. 4446	2 8910
1989	2 2588	0. 0695	0. 0030	0. 7637	0. 1673	0. 7446	0. 5107	2 8625
1990	2 4858	0. 1485	0. 0029	0. 7549	0. 1596	0. 8567	0. 5632	2 8344
1991	2 6579	0. 1490	0. 0023	0. 8257	0. 1436	0. 9673	0. 5700	2 8065
1992	2 8958	0. 1646	0. 0024	0. 9042	0. 1566	1. 1011	0. 5671	2 7775
1993	2 7769	0. 1542	0. 0023	0. 6686	0. 1615	1. 2030	0. 5873	2 7494
1994	3 1660	0. 1663	0. 0024	0. 9473	0. 1666	1. 3084	0. 5750	2 7219
1995	3 4244	0. 1741	0. 0024	1. 0203	0. 1589	1. 4109	0. 6578	2 6946
1996	3 6548	0. 1743	0. 0026	1. 0835	0. 1526	1. 5302	0. 7116	2 6691
1997	3 8246	0. 1811	0. 0028	1. 0828	0. 1510	1. 6674	0. 7394	2 6442
1998	3 5634	0. 1636	0. 0028	0. 9647	0. 1311	1. 4501	0. 8513	2 6251
1999	3 8252	0. 1584	0. 0031	1. 0032	0. 1336	1. 5616	0. 9652	2 6066
2000	3 9339	0. 1647	0. 0033	0. 9976	0. 1144	1. 6414	1. 0126	2 5849
2001	3 9554	0. 1526	0. 0031	0. 9776	0. 1204	1. 6718	1. 0298	2 5660
2002	4 3729	0. 1527	0. 0035	1. 2273	0. 1453	1. 7340	1. 0059	2 5519
2003	4 3729	0. 1616	0. 0032	1. 0992	0. 1476	1. 7530	1. 2083	2 5394
2004	4 2419	0. 1513	0. 0040	0. 9658	0. 1121	1. 7824	1. 2264	2 5271

另外, 将能值足迹中各种人类占用的资源划分为两种类型: 生物资源 (包括生物资源提供的吸收人类产生的各种废弃物的服务) 和非生物资源 (能源资源). 根据能值足迹和能值承载力概念及计算方法, 面对能源资源 (不可更新资源) 消耗殆尽的现实, 要满足后代人的发展需求, 至少要保证目前占用的各种生物资源 (生物资源的能值足迹) 要在其承载力 (能值承载力) 范围之内. 根据对中国 (1980~ 2006年)、韩国 (1980~ 2004年) 的人均能值承载力和人均生物资源能值足迹 (只计算生物资源) 的计算, 结果表明 (图 1、2): ①中国自 1998年以后, 人均生物资源能值足迹就超过了人均能值承载力, 不能满足可持续性发展的要求, 而韩国的人均生物资源能值足迹一直保持在其承载力范围之内, 满足可持续性发展要求; ②韩国在 20 世纪 80~ 90 年代期

间, 人均生物资源能值近乎直线式上升, 从 1990 年以后, 人均生物资源能值波动不大, 并逐渐趋于稳定. 中国除 1980 年之初波动不大以外, 从 1985 年以来, 人均生物资源能值呈现近乎直线式的上升趋势.

4 讨论 (Discussion)

生态足迹分析以其方法简便, 不需要大量数据, 已经成为一种测量可持续发展状况的简明而综合的方法. 但生态足迹方法在基本理论和分析模型方面还存在一些缺陷. 运用能值分析理论, 将各种能量流转化成同一标准, 并引入能值密度的概念, 将这些能量流换算成对应生态足迹和生态承载力, 从而能够定量研究区域的可持续发展状况. 与传统生态足迹模型相比, 改进模型可以更真实地反映区域可持续发展状况.

能值足迹与生态足迹都是评价人类对自然资源利用情况的指标, 并最终以面积的形式表现出来. 而且二者的计算是基于相同的假设基础之上. 能值足迹和能值承载力分别与生态足迹理论的生态足迹与生态承载力相对应, 所不同的是在计算能值承载力时只考虑可更新资源的供给. 能值足迹是以研究系统中能量流为出发点, 完全通过能量的角度, 将系统中各种能量流转化为相对应的土地面积; 而生态足迹的出发点是系统的物流, 也可以称之为价值流, 特别是生物资源, 即耕地、林地、草地、水域的生态足迹计算中, 是将这些资源以实物形式转化为相对应的土地面积. 在具体的计算过程中, 能值足迹是建立在能值分析理论基础之上, 通过引入能值密度 (p) 的概念, 将人类消费的和自然提供的各种资源转化为易于理解的面积概念, 即能值足迹和能值承载力. 而生态足迹则通过世界平均生物产量以及均衡因子和产量因子的调整最终得到计算结果.

虽然在生态足迹的定义中指出, 生态足迹应该包括吸纳人类产生的各种废弃物所需的面积, 但在实际的计算中这部分面积并没有纳入足迹中. 在能值足迹中不但在定义中包括了废弃物, 而且在实际的计算中也考虑了这部分足迹, 并根据废弃物的具体情况, 将吸纳这些废弃物的生物面积类型分为水域、林地、建筑用地 3 种类型. 在传统生态足迹计算中假设各类土地在空间上是互斥的. 例如, 一块土地当它被用来修建公路时, 它就不可能同时是森林、草地、牧地等. 这种空间互斥性使得能够对各类

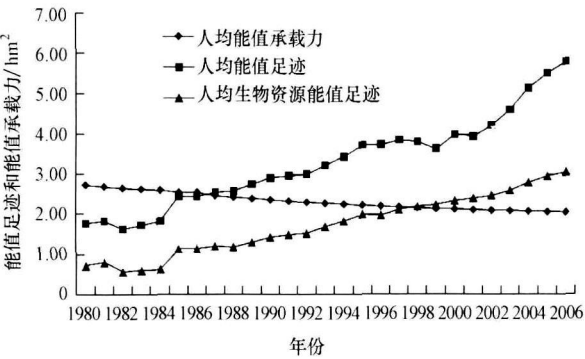


图 1 中国人均能值承载力、人均能值足迹和人均生物资源能值足迹 (1980 ~ 2006)

Fig. 1 Energy carrying capacity per capita, energy footprint per capita and energy footprint per capita of biological resources for China from 1980 ~ 2006

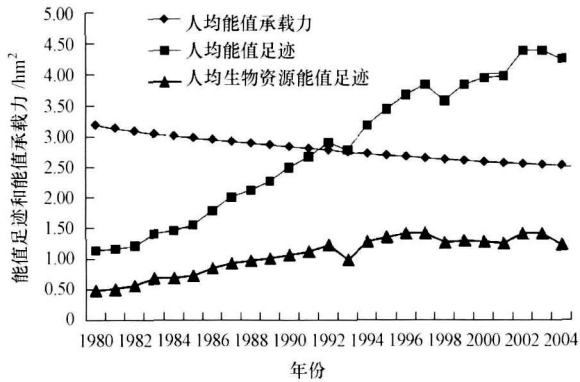


图 2 韩国人均能值承载力和人均能值足迹 (1980 ~ 2004)

Fig. 2 Energy carrying capacity per capita, energy footprint per capita and energy footprint per capita of biological resources for Korea from 1980 ~ 2004

生态生产性土地进行加总,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.但是对于吸纳废弃物的各类土地(含水域),如林地,当它被用于提供木材的同时,它也可以吸纳废弃物,因此,在足迹计算时可能存在土地重复计算的问题.因为,同一块林地在足迹计算过程中被计算了两次.在改进模型方法中避免了这类重复计算,因为,在能值承载力和能值足迹计算中是完全以能量为基础,不需要完全满足土地空间互斥的假设.例如,假设一块林地它所能提供的能量(承载力)为100个单位,如果用于生产木材的能量为100个单位,那末它不可能有多余的能量用于吸纳废弃物;但如果用于生产木材的能量为80个单位,假设剩余20个单位的能量全部用于吸纳废弃物,此时,如果不计算这20个单位的吸纳废弃物的足迹,显然是不合理的,在传统生态足迹中这部分足迹被漏算了,而在能值足迹中考虑了这部分足迹,因此,并不存在重复计算的问题.

根据自然资本和人造资本之间的替代性以及总资本存量的变化,可持续发展可以分为两种基本情况(徐中民等, 2003):强可持续性和弱可持续性.强可持续性要求自然资本不随时间而下降,在世代之间保持或增加自然资本存量.自然资本是人类赖以生存的基础,根据组成自然资本的各种资源间的差异,资源可以归类为非生物资源和生物资源.生物资源和非生物资源之间最重要的差别是:生物资源是自我更新的,其更新能力受人类活动的影响;而非生物资源是不可更新资源(化石燃料),或是其他实际上不容易破坏的资源(太阳能).但随着不可更新资源的消耗殆尽,人类社会越来越转向依赖于可更新资源.生物资源包括经济生产和人类生存依赖的原材料,为人类生存提供生活环境的生态服务以及使我们免于为自己产生的各种废弃物所窒息的吸收能力.因此,要满足强可持续性的要求,一个国家的自然资本的重要组成部分,即生物资源必须不随时间而减少.

5 结论 (Conclusions)

能值足迹应用能值分析理论,将生态系统和经济系统中各种不同种类、不可直接比较的资源、产品转化为同一标准能值,可以计算某一区域或国家的能值足迹和能值承载力两个部分,一方面分析了自然环境为人类提供的生态空间的大小,另一方面

分析了人类在发展过程中实际应用的各种资源的状况,并将其转化为人们易于理解的面积概念,由于采用数据涵盖范围有限,这种描绘仅仅是一个国家对于自然资本的消费、对于生态系统的相对压力的基本轮廓.

在传统生态承载力计算中,仅仅考虑了以人类目的为中心的生物生产性土地,而忽略了诸如沙漠、冰盖等土地(Wackemagel *et al.*, 2002),这种忽略是人为主观性的.这些处在极端环境中的土地对于人类来说都有其直接或间接的利用价值,只是目前我们对于这些价值还不甚了解,因此,在计算生态承载力时,这些土地面积不能不考虑.在能值足迹中生态承载力的计算部分考虑了所有这些土地面积.

在传统生态足迹计算中,生态系统的物质流数据通过应用不同年份的全球平均产量将其转化为生物生产土地面积.但是在这种以全球平均产量为基础的转化过程中,许多有关对地区生态系统影响的信息丢失了.相反,改进模型能够克服这些缺点,它以能值作为统一的度量单位,计算的结果更加真实准确.但是改进模型本身存在着一些问题,需要进一步完善.由于生态经济系统的复杂多样,这就使得系统内各种产品、服务的能值转换率计算存在很多不确定性,计算过程也很复杂.对于任何产品、过程都没有一个统一的、固定不变的能值转化率,在能值转化率的计算中会因为所选择的原材料、生产方式、途径和效率的不同而变化,因此,难以给出确定的数值.这种能值转化率数值的误差会影响到计算结果的精度要求.

生态经济系统是复杂系统,实际研究中,在强调复杂性多与多变性的同时将其分解为简单而不变的问题,循序渐进、逐次逼近求解才是解决问题的科学态度与方法.总体而言,改进生态足迹模型部分克服了传统生态足迹模型存在的缺陷,计算结果能够更接近真实地反映研究区域发展状况.

责任作者简介:赵晟(1973—),博士,副教授,主要从事生态经济、海洋生态等方面研究.

参考文献 (References):

- Ayres R U. 2000. Commentary on the utility of the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics* 32: 347—349
- Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M, *et al.* 2001. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy) [J]. *Journal of*

- Cleaner Production 9: 365—373
- Bastianoni S, Marchettini N. 2000. The problem of co-production in environmental accounting by energy analysis [J]. *Ecological Modelling* 129: 187—193
- Brown M T, Buranakarn V. 2003. Energy indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options Resources [J]. *Conservation and Recycling* 38: 1—22
- Brown M T, Ulgati S. 1997. Energy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation [J]. *Ecological Engineering* 9: 51—69
- Brown M T, Ulgati S. 2004. Energy quality, energy, and transformity: H. T Odum's contributions to quantifying and understanding systems [J]. *Ecological Modelling* 178: 201—213
- Carton W. 1986. Carrying capacity and the limits to freedom [C]. In: Paper prepared for Social Ecology Session 1, XI World Congress of Sociology, International Sociological Association, New Delhi 68—75
- Costanza R. 2000. The dynamics of the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics* 32: 341—345
- 董孝斌, 严茂超, 董云, 等. 2005. 基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析 [J]. *农业工程学报*, 21(11): 1—6
- Dong X B, Yan M C, Dong Y, *et al*. 2005. Energy evaluation of the coupling effects of ecological economic systems of two selected counties in the eco-tone between agriculture and pasture in the North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 21(11): 1—6 (in Chinese)
- Ferguson A. 1999. The logical foundation of ecological footprints [J]. *Environment Development and Sustainability* 1: 149—156
- Gerbens-Leenes P W, Nonhebel S. 2002. Consumption patterns and their effects on land required for food [J]. *Ecological Economics* 42: 185—199
- Global Footprint Network. 2007. Global Footprint Network 2007 Annual Report [OL]. <http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/publications/Reports>
- Huang S L. 1998. Urban ecosystems, energetic hierarchies and ecological economics of Taipei metropolis [J]. *Journal of Environmental Management* 52: 39—51
- Hunter C. 2002. Sustainable tourism and the touristic ecological footprint [J]. *Environment Development and Sustainability* 4: 7—20
- 蓝盛芳. 1992. 生态经济系统能值分析, 见: 当代生态学博论 [M]. 北京: 中国科技出版社, 266—286
- Lan S F. 1992. Energy Analysis of Ecological Economics System, in: *Lectures in Modern Ecology* [M]. Beijing: China Science and Technology Publishing Press 266—286 (in Chinese)
- Lefroy E, Rydberg T. 2003. Energy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia [J]. *Ecological Modelling* 161: 195—211
- Lenzen M, Murray S A. 2001. A modified ecological footprint method and its application to Australia [J]. *Ecological Economics* 37: 229—255
- Levett R. 1998. Footprinting: a great step forward, but tread carefully — a response to Mathis Wackemagel [J]. *Local Environment* 3(1): 67—74
- 李金平, 陈飞鹏, 王志石. 2006. 城市环境经济能值综合和可持续性分析 [J]. *生态学报*, 26(2): 439—448
- Li J P, Chen F P, Wang Z S. 2006. The energy synthesis and sustainability analysis of city's environment and economy [J]. *Acta Ecologica Sinica* 26(2): 439—448 (in Chinese)
- 李双成, 傅小锋, 郑度. 2001. 中国经济持续发展水平的能值分析 [J]. *自然资源学报*, 16(4): 297—304
- Li S C, Fu X F, Zheng D. 2001. Energy analysis for evaluating sustainability of Chinese economy [J]. *Journal of Natural Resources* 16(4): 297—304 (in Chinese)
- Luck M, Jenerette G D, Wu J *et al*. 2001. The urban funnel model and the spatially heterogeneous ecological footprint [J]. *Ecosystems* 4: 782—796
- Moffatt I. 2000. Ecological footprints and sustainable development [J]. *Ecological Economics* 32: 359—362
- Monfreda C. 2004. Establishing national natural capital accounts based on detailed ecological footprint and ecological capacity assessments [J]. *Land Use Policy* 21: 231—246
- Odum E. 1989. *Ecology and our Endangered Life Support Systems* [M]. Sunderland USA: Sinauer Associates Inc 65—76
- Odum H T, Brown M T, Williams S B. 2000. *Handbook of Energy Evaluations* Folios 1 [M]. Florida: Gainesville USA: University of Florida 3—13
- Odum H T. 1988. Self-Organization, transformity, and information [J]. *Science* 242: 1132—1139
- Odum H T. 1996. *Environment Accounting: Energy and Environment Decision Making* [M]. New York USA: John Wiley 35—46
- Rees W E. 1990. Sustainable development and the biosphere [J]. *The Ecologist* 20(1): 18—23
- Rees W E. 1992. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out [J]. *Environment and Urbanization* 4(2): 121—130
- Rees W E. 1996. Revisiting carrying capacity: Area-based indicators of sustainability [J]. *Population and Environment* 17(3): 195—215
- Roth E, Harald R, Burbridge P. 2000. A discussion of the use of the sustainability index: ecological footprint for aquaculture production [J]. *Aquatic Living Resources* 13: 461—469
- Ulgati S, Brown M T. 1998. Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems [J]. *Ecological Modelling* 108: 23—36
- Van den Bergh J, Verbruggen H. 1999. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the ecological footprint [J]. *Ecological Economics* 29: 61—72
- Wackemagel M, Onisto L, Bello P, *et al*. 1999. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics* 29: 375—390
- Wackemagel M, Rees W E. 1996. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* [M]. Philadelphia USA: New Society Publishers 64—82
- Wackemagel M, Schulz N B, Deumling D, *et al*. 2002. Tracking the

- ecological overshoot of the human economy [J]. PNAS 14 9266—9271
- Wackernagel M, Yount J D. 1998. The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability [J]. Environmental Monitoring and Assessment 51: 511—529
- 万树文, 钦佩, 朱洪光, 等. 2000. 盐城自然保护区两种人工湿地模式评价 [J]. 生态学报, 20(5): 759—765
- Wan S W, Qin P, Zhu H G, *et al*. 2000. Evaluation of two artificial wetlands in Yancheng Natural Reserve, China [J]. Acta Ecologica Sinica 20(5): 759—765 (in Chinese)
- WCED. 1987. World Commission on Environment and Development: Our Common Future [M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 152—156
- World Wildlife Fund. 2000. Living Planet Report 2000 (2002, 2004) [OL]. [http://www.panda.org/downloads/general/LPR.2000.\(2002, 2004\).pdf](http://www.panda.org/downloads/general/LPR.2000.(2002%202004).pdf)
- 徐中名, 张志强, 程国栋. 2003. 生态经济学理论方法与应用 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 98—111
- Xu Z M, Zhang Z Q, Cheng G D. 2003. Ecological Economics: Theory and Applications [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 98—111 (in Chinese)
- 严茂超, 李海涛, 程鸿, 等. 2001. 中国农林牧渔业主要产品的能值分析与评估 [J]. 北京林业大学学报, 23(6): 66—69
- Yan M C, Li H T, Chen H, *et al*. 2001. Energy analysis and assessment of main products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 23(6): 66—69 (in Chinese)
- Yang H, Li Y, Shen J Z, *et al*. 2003. Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system: an application of the energy approach [J]. Ecological Modelling 160: 13—21
- Zhao S, Li Z Z, Li W L. 2005. A modified method of ecological footprint calculation and its application [J]. Ecological Modelling 185: 65—75