

# 基于能值分析理论的新疆 2001-2010 年生态足迹动态分析

张晓伟<sup>1</sup>, 马勤学<sup>2\*</sup>, 李红旭<sup>2</sup>

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 新疆正天华能环境工程技术有限公司, 新疆乌鲁木齐 830011)

**摘要** 为衡量和评价新疆可持续发展的状况, 针对传统生态足迹模型以土地生产力为基础, 在不同类型生产性土地上进行统一换算时会造成偏差的缺点, 结合能值理论, 运用能值的生态足迹模型对新疆 2001-2010 年的发展状况进行动态分析。结果得出: ①新疆人均生态足迹由 2001 年的 7.21 hm<sup>2</sup> 增长到 2010 年的 14.58 hm<sup>2</sup>; ②人均生态承载力由 2001 年的 7.92 hm<sup>2</sup> 下降至 2010 年的 6.72 hm<sup>2</sup>; ③自 2003 年以后, 新疆开始出现生态赤字, 且赤字量逐年增大。通过计算区域生态足迹与承载力, 分析两者关系、构成及变化原因, 针对造成生态赤字的原因, 结合新疆特点提出了合理开发自然资源、调整产业结构等实现新疆可持续发展的建议。

**关键词** 能值分析; 生态足迹; 生态承载力; 可持续发展; 新疆

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)27-09487-04

## Dynamics Analysis of Ecological Footprint Based on Energy Analysis Theory in Xinjiang from 2001 to 2010

ZHANG Xiao-wei<sup>1</sup>, MA Qin-xue<sup>2\*</sup>, LI Hong-xu<sup>2</sup> (1. Sinopec Northwest Oilfield Branch, Urumqi, Xinjiang 830011; 2. Xinjiang Zhengtianhua Energy Environmental Engineering Technology Co. Ltd., Urumqi, Xinjiang 830011)

**Abstract** In order to measure and evaluate the status of sustainable development in Xinjiang, aiming at the limits of the traditional ecological footprint model, energy analysis based on ecological footprint models was used to access the sustainability of development of Xinjiang from 2001 to 2010. After calculating and analyzing the energy-based ecological footprint and energy-based ecological carrying capacity. Conclusions can be made below: During the period from 2000 to 2008, the capita ecological footprint of Xinjiang Province increased from 7.21 hm<sup>2</sup> to 14.58 hm<sup>2</sup>. The capita ecological carrying capacity of Xinjiang Province had declined from 7.92 hm<sup>2</sup> to 6.72 hm<sup>2</sup> from 2001 to 2010. The ecological deficit was appeared and rapidly increased after the year of 2003. Several strategies were offered based on analyzing relativity between energy-based ecological footprint and energy-based ecological carrying capacity and composition of the ecological deficit to achieve promoting sustainable development in Xinjiang.

**Key words** Energy analysis; Ecological footprint; Ecological carrying capacity; Sustainable development; Xinjiang

新疆地处我国西北部, 地域广阔, 是我国重要的能源与“粮、棉”生产基地。随着西部大开发、跨越式发展, 在经济、人民生活水平显著提高的同时, 也给环境带来了巨大压力, 加之新疆属生态脆弱区, 造成的生态破坏往往后果严重且难以恢复。因此如何在使新疆生态恶化的前提下实现可持续发展成为了学者研究的热点。

传统生态足迹理论 (Ecological Footprint)<sup>[1]</sup> 有着理论角度新颖全面、可操作性强等优点<sup>[2]</sup>, 在国家、区域可持续发展研究中得到了国内外学者的广泛应用<sup>[3-6]</sup>。已有学者运用传统生态足迹方法对新疆发展的可持续性进行了研究<sup>[7-11]</sup>, 但由于传统生态足迹模型只能进行静态分析, 且产量因子与均衡因子的确定都欠缺合理性, 对区域真实发展情况的反映存在一定偏差<sup>[12-13]</sup>。基于能值的生态足迹模型克服了传统生态足迹模型折算不同种类资源消耗时所引入的误差, 将社会发展过程中所需的任何资源、产品或劳务形式全部转化为太阳能统一比较<sup>[14]</sup>, 大大提高了模型的准确性。为此, 该研究运用基于能值的生态足迹模型, 对新疆 2001-2010 年的发展状况进行动态分析, 以期从能量角度为新疆可持续发展研究提供一定的对比与借鉴。

## 1 研究方法

### 1.1 传统生态足迹模型

生态足迹即是生产任何已知人口 (某个人、一个城市或一个国家) 所耗所有资源和吸纳这些

人口所产生的所有废弃物所需的陆地和水域总面积<sup>[15]</sup>。通过比较生态足迹和生态承载力之间是否平衡来判断人类活动是否处于生态系统的承载力范围内。计算模型包括生态足迹计算、生态承载力计算及二者的比较三部分。

#### 1.1.1 生态足迹计算。

通过引入均衡因子将人类对各种资源和能源的消费项目折算为化石燃料土地、可耕地、林地、牧草地、建筑用地和水域等 6 种具有相同生态生产力的生物生产性土地。

$$EF = N \cdot ef = N \cdot \sum_{i=1}^n (r_i \cdot aa_i) = N \sum_{i=1}^n [r_i (C_i / P_i)] \quad (1)$$

式中,  $EF$  为总生态足迹;  $N$  为指定区域人口;  $ef$  为人均生态足迹;  $i$  为消费项目类型;  $r_i$  表示对应生物生产土地类型的均衡因子;  $aa_i$  为人均第  $i$  种消费项目折算后生物生产面积;  $C_i$  为  $i$  种项目人均消费量;  $P_i$  为  $i$  种消费项目单位面积世界平均生产能力。

#### 1.1.2 生态承载力计算。

在生态承载力的计算中, 不同地区的各类生物生产土地产量通过均衡因子与产量因子换算为全球可比的当量生物生产土地面积, 计算公式如下:

$$EC = N \cdot ec = N \sum_{j=1}^6 a_j \cdot r_j \cdot y_j \quad (2)$$

式中,  $EC$  为总生态承载力;  $N$  为指定区域人口数;  $ec$  为人均生态承载力;  $j$  为生产土地类型;  $a_j$  为人均生物生产土地面积,  $r_j$  为均衡因子,  $y_j$  为  $j$  类生物生产用地的产量因子。计算所得  $EC$  中 12% 的生物生产土地需被保留以保护生物多样性<sup>[16]</sup>。

#### 1.1.3 生态足迹与承载力的比较。

计算所得足迹与承载力反映了当地的各类资源的供需能力, 通过比较二者的大小可

**作者简介** 张晓伟 (1979-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 中级工程师, 从事生态保护、环境工程、污染治理、环境影响评价等工作。\* 通讯作者。

**收稿日期** 2014-08-21

以反映社会发展对自然资源的利用状况,进而反映出当地的可持续发展状态。如果一个地区的生态足迹大于区域的生态承载力,称为生态赤字,表明区域发展处于不可持续状态。反之,则称为生态盈余。

**1.2 基于能值理论的生态足迹模型** 能值理论是由美国生态学家 H. T. Odum 于 20 世纪 80 年代创立的<sup>[14]</sup>。它以能值为基础,把生态系统或生态经济系统中不同种类、不同级别、不可比较的能量转换成同一标准,即“太阳能值(sej)”并以此衡量分析和评价不同能量在系统中的功能和作用<sup>[17]</sup>。由于地球上绝大多数的物质和能量均源自于太阳能,因此在实际应用中可用“太阳能值”衡量任何资源、产品或劳务形成过程中直接或间接消耗的有效能总量<sup>[14]</sup>,通过引入能值密度,将不同类型消费项目所耗太阳能换算成相对应类型的生物生产土地面积,进而计算出区域生态足迹和生态承载力,并由此评价区域可持续发展现状。此模型计算与传统生态足迹相同也分为生态足迹计算、生态承载力计算及二者的比较 3 个部分。

**1.2.1 基于能值分析的生态足迹计算。**能值-生态足迹即是区域年总消费项目能值在区域能值密度条件下所需的生物生产土地面积。消费项目的类型与传统生态足迹模型相仿,分为生物资源消费、能源资源消费、贸易消费。与传统生态足迹模型不同的是在贸易消费中能值-生态足迹只考虑进口量,可以更真实地反映区域发展所耗费的资源总量。计算公式如下:

$$E_f = N \cdot e_f = N \sum_{i=1}^n (Pd_i + Im_i) Tr_i / P \quad (3)$$

其中, $E_f$  表示区域年能值-生态足迹; $Pd_i$  为区域第  $i$  项消费项目的年人均产量; $Im_i$  为第  $i$  项消费项目的年进口量; $Tr_i$  为第  $i$  项消费项目所对应的能值转换率; $P$  表示区域能值密度。

**1.2.2 基于能值分析的生态承载力计算。**能值-生态承载力为区域可更新总能值与区域能值密度的比值,表征了区域在可持续发展状态下年可用能值的最大值。由于对不可更

新资源的消耗,其利用速率远超其更新速率,从本质上造成了不可更新资源的枯竭。所以只有科学利用可更新资源,发展才具有可持续性。因此,生态承载力的计算主要考虑区域可更新自然资源,区域的可更新资源包括太阳辐射能、风能、雨水势能、雨水化学能、河水势能、河水化学能及地球旋转能。计算公式如下:

$$E_c = e / P \quad (4)$$

式中, $E_c$  为能值-生态承载力, $e$  为区域总能值; $P$  为区域能值密度,即区域总能值与区域面积的比值。根据能值理论,推动生物圈过程的主要能量输入有 3 种:太阳能、地热能与潮汐能。为了避免重复计算,同一来源不同形式的能量只取其中的最大值。如风能、雨水化学能和雨水势能均为太阳能的不同转化形式<sup>[18]</sup>,计算中就只取三者中的最大值计算;而地球转动能为太阳与月球引力所转化,与风能、雨水化学能和雨水势能能量来源不同也应计入区域总能值。

**1.2.3 基于生态足迹与承载力的比较。**此部分与传统生态足迹模型相同,即通过计算生态盈余或者赤字来评价区域发展是否可持续。

**2 数据来源与计算**

在计算生态足迹时,将主要消费项目分为 3 类:生物资源消费、能源资源消费、贸易修正。其中,生物资源消费包括农产品、林产品、畜产品和水产品等项目;能源资源消费主要包括煤炭、原油和电力等项目。数据均源于《新疆统计年鉴》(2001~2012 年)。生物资源各项目能量折算方法参考文献 [19] 中所得系数。各项目太阳能值转换率、区域总能值及可更新能源计算均参考 Odum 的能值计算表<sup>[19]</sup>。鉴于篇幅有限,具体计算过程仅以 2001 年为例。生态足迹计算依照公式(3)计算,具体项目见表 1。产量数据来源于《新疆统计年鉴》(2001 年),将各项目折算所得太阳能值与区域能值密度相比,得出 2001 年新疆能值-生态足迹为  $1.33 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,人均  $7.21 \text{ hm}^2$ 。

表 1 2001 年新疆能值-生态足迹计算账户

资源	项目	基础数据//J	能值转化率//sej/J	太阳能值//sej	能值生态足迹//t/hm <sup>2</sup>	来源
粮食	水稻	7.13E+15	6.02E+04	4.29E+20	1.45E+05	耕地
	小麦	5.33E+16	1.14E+05	6.08E+21	2.06E+06	耕地
	玉米	4.66E+16	4.53E+04	2.11E+21	7.14E+05	耕地
	大麦	1.64E+15	1.34E+05	2.19E+20	7.41E+04	耕地
	豆类	5.24E+15	1.16E+06	6.08E+21	2.06E+06	耕地
	薯类	1.38E+15	4.53E+03	6.26E+18	2.12E+03	耕地
其他作物	棉花	2.96E+16	1.44E+06	4.26E+22	1.44E+07	耕地
	油料	1.09E+16	1.16E+06	1.26E+22	4.27E+06	耕地
	甜菜	1.27E+16	4.53E+04	5.75E+20	1.95E+05	耕地
	蔬菜	1.17E+16	4.53E+04	5.29E+20	1.79E+05	耕地
	果用瓜	5.57E+15	6.71E+04	3.74E+20	1.27E+05	耕地
	苜蓿	2.47E+15	4.53E+04	1.12E+20	3.79E+04	牧草地
	水果	5.32E+15	8.89E+05	4.73E+21	1.60E+06	林地
	农副产品	2.21E+15	6.71E+06	1.48E+22	5.01E+06	牧草地
	马肉	3.27E+14	3.35E+06	1.10E+21	3.72E+05	牧草地
	骆驼	6.63E+13	3.35E+06	2.22E+20	7.52E+04	牧草地
	猪肉	1.69E+15	2.85E+06	4.82E+21	1.63E+06	牧草地

续表 1

资源	项目	基础数据//J	能值转化率//sej/J	太阳能值//sej	能值生态足迹//t/hm <sup>2</sup>	来源
能源产品	羊肉	3.73E+15	3.35E+06	1.25E+22	4.23E+06	牧草地
	兔肉	7.98E+14	2.85E+06	2.27E+21	7.69E+05	牧草地
	牛奶	4.45E+15	2.85E+06	1.27E+22	4.29E+06	牧草地
	禽蛋	1.03E+15	3.35E+06	3.46E+21	1.17E+06	牧草地
	水产品	2.47E+13	3.36E+06	8.28E+19	2.80E+04	水域
	毛料	3.44E+15	6.44E+06	2.21E+22	7.48E+06	牧草地
	煤炭	5.72E+17	4.00E+04	2.29E+22	7.75E+06	化石燃料用地
	焦炭	2.32E+16	1.06E+04	2.46E+20	8.33E+04	化石燃料用地
	原油	4.50E+17	5.40E+04	2.43E+22	8.23E+06	化石燃料用地
	汽油	5.07E+16	6.60E+04	3.35E+21	1.13E+06	化石燃料用地
	柴油	7.25E+16	6.60E+04	4.78E+21	1.62E+06	化石燃料用地
	燃料油	2.49E+16	5.40E+04	1.34E+21	4.54E+05	化石燃料用地
	天然气	1.22E+18	4.80E+04	8.03E+22	2.72E+07	化石燃料用地
	电力	6.65E+17	1.60E+05	1.06E+23	3.59E+07	建筑用地
总计				1.33E+08		

能值-承载力的计算根据公式(4),即用区域可更新能值总量除以区域能值密度,其中区域可更新能值总量计算见表2。在计算区域可更新能值总量时为避免重复计算,只取太阳能、风能、雨水化学能与势能中的最大值与地球转动能

相加,即得区域年可更新能值总量  $4.92 \times 10^{23}$  sej, 取其与区域面积相比,可得区域能值密度为  $2.95 \times 10^{11}$  sej/m<sup>2</sup>。然后用区域总能值与区域能值密度相比,再扣除 12% 的生物多样性保护用地,得出新疆 2001 年能值-承载力为  $7.92 \text{ hm}^2$ 。

表 2 2001~2010 年新疆可再生资源能值

sej

年份	太阳光能	风能	雨水化学能	雨水势能	地球转动
2001	9.99E+21	4.434 73E+23	1.345 65E+22	4.632 19E+22	4.828 21E+22
2002	9.99E+21	4.434 73E+23	1.345 65E+22	4.632 19E+22	4.828 21E+22
:	:	:	:	:	:
2010	9.99E+21	4.434 73E+23	1.345 65E+22	4.632 19E+22	4.828 21E+22

### 3 结果与分析

用上述方法对其余年份的生态足迹与承载力进行计算,比较历年生态盈余与赤字情况,以反映历年社会发展所耗资源与自然可供资源的定量关系,其结果见表 3,变化趋势见图 1。由表 3 可知,新疆年人均能值-生态足迹由 2001 年的  $7.21 \text{ hm}^2$  增长到 2010 年的  $14.58 \text{ hm}^2$ ,且增长速度逐年递增。能值-生态承载力变化不大,但总体呈下降趋势:由 2001 年的人均  $7.92 \text{ hm}^2$  下降至 2010 年的  $6.72 \text{ hm}^2$ 。2001 年至 2002 年均生态盈余,自 2003 年以后变为生态赤字,表明区域发展在 2003 年以前处于可持续状态,但发展的可持续性逐年下降,2003 年后发展变为不可持续,且不可持续性不断增大。

表 3 历年人均生态足迹与生态承载力变化  $\text{hm}^2/\text{人}$ 

年份	人均生态足迹	人均生态承载力
2001	7.21	7.92
2002	7.43	7.69
2003	8.07	7.58
2004	9.21	7.46
2005	9.94	7.29
2006	11.21	7.15
2007	12.04	6.99
2008	12.28	6.88
2009	12.89	6.79
2010	14.58	6.72

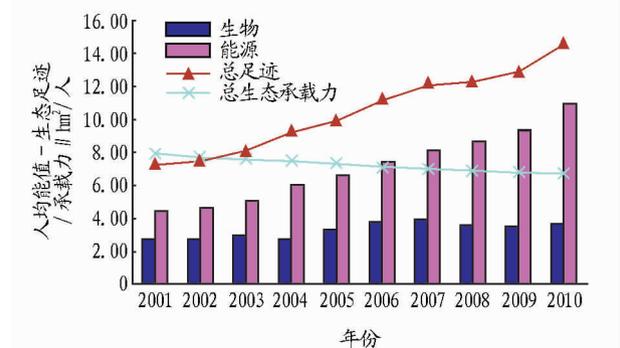


图 1 人均生态足迹生态承载力及其构成变化

**3.1 能值-生态足迹变化分析** 能值-生态足迹在研究时段内翻了一倍,且增长速度逐年增加,年均增长率达 10.2%,说明人类对自然资源的利用量不断增大,分析其构成可以看出:①历年来能源足迹所占比重均为最大,且有逐年增加的趋势,由 2001 年的 61.8% 增长到 2010 年的 75.0%。矿产与能源资源单位能值含量高,且属不可更新资源,大量矿产、能源资源的开发与加工势必消耗大量能值,而新疆是资源大省,以资源型经济为支柱的经济发展模式决定了能源足迹在总足迹中所占的巨大份额。②在生物资源足迹中,棉花所占比重与其他作物相比有绝对优势,所占比重在 25.8% 至 36.0% 间波动。这是由于新疆是国家优质棉生产基地,也是国家唯一长绒棉生产基地,在传统的“一黑,一白”经济结构

下,棉花种植业具有重要地位,种植面积年均 133.8 万  $\text{hm}^2$ ,加之棉花单位能值含量较高,使其在生态足迹中所占比重远高于其他生物资源。

**3.2 能值-生态承载力变化分析** 对新疆 2001~2010 年的生态承载力进行分析,可以看出:①新疆人均承载力由 2001 年的 7.92  $\text{hm}^2$  下降至 2010 年的 6.72  $\text{hm}^2$ ,年均下降 1.5%。表明近 10 年随着环境的污染与破坏,环境对人类活动的抗扰动能力逐渐下降。②从承载力构成看,风能对承载力贡献最大,达到 79%。这是由新疆多风的气候条件与广阔的面积决定的,也说明新疆可更新资源有良好的发展前景与潜力。

**3.3 生态盈余与赤字分析** 近 10 年,新疆经济有了长足的进步,GDP 由 2001 年的 1 491.6 亿元增长到 2010 年的 5 437.5 亿元,但同时也对环境承载力产生了巨大的压力,特别是对经济增长贡献最大的能源资源产业(生物资源消耗次之),对赤字贡献率平均可达 65%,导致 2003 年以后新疆生态足迹超过生态承载力,且生态赤字逐年增大,年均增长率达到 14.9%。逐年增加的生态赤字说明新疆的资源过度开发,且由于企业产业结构低下,技术水平有限,导致资源消费结构不合理循环利用能力差,资源浪费严重。除了能源资源消耗,对生物资源生态足迹贡献最大的棉花种植业也对生态承载力造成了巨大压力。

#### 4 结论与建议

对 2001~2010 年新疆能值-生态足迹与承载力计算与分析,得出以下结论:①2001~2010 年新疆生态足迹总体呈单调递增趋势,由 2001 年的 7.21  $\text{hm}^2$  增长到 2010 年的 14.58  $\text{hm}^2$ ,平均增长率为 10.2%,表明新疆社会经济有了长足发展。从足迹总体构成来看,能源资源所占比重最大,平均贡献率可达 68%,与日俱增的能源需求是造成生态足迹不断增加的主要原因;对生物资源生态足迹进行分析,棉花种植所占比重最大,且比重逐年增加,平均可达 30.9%。说明以棉花为代表的部分种植业在历史种植面积基数大、种植技术有限的条件下,对各项资源的消耗量逐年增大。②新疆生态承载力逐年减小,由 2001 年的 7.92  $\text{hm}^2$  下降至 2010 年的 6.72  $\text{hm}^2$ ,年均下降率 1.5%,说明新疆近 10 年生态环境有恶化趋势,环境对人类生产活动的抗扰力越来越小,加之新疆属生态环境脆弱区,环境承载力的下降对区域生态系统的稳定影响严重;③对比分析生态足迹与承载力可知,自 2003 年以后,新疆开始出现生态赤字,且赤字量逐年增大。不断增加的能源需求是造成赤字的主要原因,此外,部分产业盲目扩大产业规模、经营方式粗犷而未能建立合理的产业结构与产业能源消费结构,无疑也加剧了能源账户下足迹与承载力的收支不平衡。

综上所述,新疆发展自 2003 年以后一直处于不可持续状态,且有逐年恶化的趋势。为保证新疆的可持续发展,笔者建议如下:①对自然资源开发“限质限量”,一方面要合理开发自然资源,根据资源禀赋合理有序开发,不可过度开发;

另一方面需提高资源的利用质量,通过技术政策等手段提高现有自然资源利用率,建设资源集约型社会。②合理调整产业结构,从总体上看,要改变现在以资源开发为主体的产业结构,大力发展旅游业等低能耗产业。从各个产业高度来看,需合理控制产业规模,对于高能耗、物耗产业在合理控制规模以外,还要加大技术革新投入,降低单位产品的能值消耗。以棉花种植业为例,可研发、引进先进节水技术,降低单位产品虚拟水消耗,在水资源本就严重缺乏的新疆,类似的技术引进与革新对减轻环境压力与维持可持续发展有深刻意义<sup>[16]</sup>。③合理调整贸易结构,新疆生态承载力压力逐年增加,解决新疆生态赤字问题不能仅仅局限于本地资源的高效利用,还可通过贸易从周边地区购买高能值消耗但为本地发展所需的消费品,实现新疆可持续发展<sup>[20]</sup>。

#### 参考文献

- [1] REE W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leave out [J]. *Environment and Urbanization*, 1992, 4 (2): 121 - 130.
- [2] 王书华,毛汉英,王忠静.生态足迹研究的国内外近期进展[J]. *自然资源学报*, 2002 (6): 776 - 782.
- [3] 杨艳,牛建明,张庆,等.基于生态足迹的半干旱草原区生态承载力与可持续发展研究——以内蒙古锡林郭勒盟为例[J]. *生态学报*, 2011, 31 (17): 5096 - 5104.
- [4] 施开放,刁承泰,孙秀锋,等.基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究[J]. *生态学报*, 2013, 33 (6): 1872 - 1880.
- [5] 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[J]. *生态学报*, 2001 (9): 1484 - 1493.
- [6] 周静,管卫华.基于生态足迹方法的南京可持续发展研究[J]. *生态学报*, 2012 (20): 6471 - 6480.
- [7] 徐长春,熊黑钢,秦珊,等.新疆近 10 年生态足迹及其分析[J]. *新疆大学学报:自然科学版*, 2004 (2): 181 - 185.
- [8] 王国刚,杨德刚,乔旭宁,等.基于生态足迹模型的新疆区域生态经济可持续发展能力变化分析[J]. *冰川冻土*, 2009 (5): 969 - 975.
- [9] 陈东景,徐中民.生态足迹理论在我国干旱区的应用与探讨——以新疆为例[J]. *干旱区地理*, 2001 (4): 305 - 309.
- [10] 谢霞,贡璐,吕光辉.基于生态足迹理论的干旱区绿洲生态承载力分析——以乌鲁木齐市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2007 (5): 59 - 62.
- [11] 李红丽,智颖,张荷亮,等.新疆生态足迹与环境压力的时空分异[J]. *生态学报*, 2010 (17): 4676 - 4684.
- [12] 高成康,王少平,陆雍森,等.生态足迹的修正及其在城市生态规划中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2006, 29 (4): 58 - 60.
- [13] 张芳怡,濮励杰,张健.基于能值分析理论的生态足迹模型及应用[J]. *自然资源学报*, 2006, 21 (4): 653 - 660.
- [14] ODUM H T. *Environment Accounting: Energy and Environmental Decision Making* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996: 163 - 168.
- [15] WACKERNAGEL M, REES W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth* [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996: 9 - 12.
- [16] 韩舒,师庆东,于洋,等.新疆 1999 - 2009 年水足迹计算与分析[J]. *干旱区地理*, 2013 (2): 364 - 370.
- [17] HUBACEK K, GILJUM S. Applying physical input - output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities [J]. *Ecological Economics*, 2003, 44 (1): 137 - 151.
- [18] 汤萃文,苏研科,杨国靖,等.基于能值分析的甘肃天祝县生态足迹研究[J]. *冰川冻土*, 2011 (1): 220 - 226.
- [19] 严茂超,李海涛,程鸿,等.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*, 2001, 23 (6): 66 - 69.
- [20] ODUM H T, BROWN M T, WILLIAMS S B. *Handbook of Emergy Evaluation. Folio #1: Introduction and Global Budget* [M]. Gainesville: Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences. University of Florida, 2000: 7 - 8.