

基于能值——生态足迹的安康市可持续发展评价

张宇钰¹, 刘建军^{1*}, 马长欣¹, 任军辉²

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西藏职业技术学院, 西藏 拉萨 850030)

摘要:以安康市城市生态系统为对象,利用能值理论和生态足迹模型,计算和分析了安康市2004—2008年区域发展模式下区域生态足迹的需求和区域生态承载力,并进行了可持续发展评价。结果表明:安康市2004—2008年人均能值生态足迹分别为11.90、11.83、11.59、11.57、11.40 hm²,人均能值生态承载力分别为4.28、4.69、4.00、4.44、4.89 hm²,可持续性评价指数分别为0.74、0.72、0.74、0.72、0.70,人均能值生态足迹大于人均能值生态承载力,出现生态赤字,生态安全性较差,社会发展中生态贡献巨大,可持续发展水平不高。

关键词:安康市; 能值; 生态足迹; 生态承载力; 可持续发展; 评价

中图分类号:S718.55 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2013)01-0067-06

Assessment of Sustainable Development Based on Energy Theory and Ecological Footprint ——A Case Study of Ankang

ZHANG Yu-yu¹, LIU Jian-jun^{1*}, MA Chang-xin¹, REN Jun-hui²

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Tibet Vocational and Technical College, Lasa, Tibet 850030, China)

Abstract: Taking the municipal ecosystem of Ankang as object, by combining the energy value theory and the ecological footprint models together, the amounts of ecological carrying capacity and the demands of ecological footprints between 2004 to 2008 were calculated, and an assessment was conducted in the view of regional sustainable development. In the years of 2004 to 2008, the energy-based ecological footprints were 11.90 hm², 11.83 hm², 11.59 hm², 11.57 hm², and 11.40 hm² per capita, respectively. The energy-based ecological carrying capacities were 4.28 hm², 4.69 hm², 4.00 hm², 4.44 hm², and 4.89 hm² per capita, respectively. The sustainability energy indices were 0.74, 0.72, 0.74, 0.72, and 0.70, respectively. The energy-based ecological footprint was beyond the carrying capacity, and turned out ecological deficit, resulting in poor ecological safety, which meant the consumption of resources was highly beyond the supply of the resources.

Key words: Ankang; energy; ecological footprint; ecological carrying capacity; sustainable development; assessment

近30 a来,中国社会经济飞速发展,城市化进程不断加快,人口和资本大量涌向城市,导致城市人口超载严重,生态环境压力增大,系统资源对经济发展支撑能力下降等问题。如何保障城市生态系统健康并维护城市可持续发展,已为社会各界所普遍关

注。生态城市规划理论利用生态学原理对城市生态系统进行整体规划,全面协调城市生态系统内各系统和谐发展,提高生态环境质量,解决土地、水资源、能源和各种资源(包括固体废弃物)的高效利用和综合利用等问题,以形成可持续发展的城市生态系

收稿日期:2012-05-10 修回日期:2012-06-25

基金项目:国家林业局公益性行业专项(200904004)。

作者简介:张宇钰,女,硕士研究生,研究方向:景观规划与生态城市规划。E-mail:zfbxr518@163.com

*通信作者:刘建军,男,博士,教授,主要研究方向:森林生态与环境植被恢复。E-mail:Ljj@nwsuaf.edu.cn

统^[1],也就是解决在生态环境基础脆弱和人口压力庞大的不利情形下的城市建设问题^[2],受到越来越多学者的青睐。

生态足迹研究法将人类消耗的各种资源、产品和服务量,转换成所需要的原始物质和能量的生态生产性土地面积—人类生态足迹,通过比较生态足迹和生态承载力之间的平衡关系,判断人类活动是否处于生态系统的承载力范围内,即是否可持续发展^[3]。2001年 H. Helmut^[4]等从3个不同的消费领域出发,应用生态足迹模型测算了奥地利1926—1995年的生态环境变化情况。2004年,WWF(世界自然基金会)利用生态足迹模型发布了世界149个国家的生态赤字和生态盈余情况^[5]。H. X. Nguyen^[6]等运用热力学修正的生态足迹模型对7个国家的生物资源和非生物资源进行了计算。孙东林^[7]等提出基于能值理论的生态承载力修改办法,并与传统生态足迹模型进行对比,验证了能值理论的优越性。赵志强^[8]等应用改进的能值生态足迹模型对深圳市2006年的生态经济发展状况进行了评价。安康市是陕西省南部重要的区域中心城市,近年来社会经济以及生态环境治理发展迅猛,为了推进安康市城市可持续发展,为政府科学、合理地制定中长期社会经济政策提供参考和依据,本研究从能值角度^[9-14]出发,利用生态足迹模型,分析了安康市消费足迹和承载力之间的关系,判断和评价了安康市城市可持续发展状况及存在问题,并依此提出了安康市社会经济可持续发展正确方向和主要保障措施。

1 研究地概况

安康市位于陕西省最南端,秦巴山区东段,面积23 391 km²,占陕西省面积的11.4%,其中耕地面积199 432 hm²,林地1 658 496 hm²,森林覆盖率55.4%,荒山荒地91 691 hm²,水域面积39 861 hm²,人口303万人。属亚热带大陆性季风气候区,气候冬季寒冷少雨雪,夏季多雨并有伏旱,春暖干燥,秋凉湿润并多连阴雨。主要灾害性天气是伏旱、暴雨和连阴雨。

安康市地处川、陕、鄂、渝4省市的结合地带,是西安、重庆、武汉3大经济区的几何中心,下辖1区9县,已经发展了较为完善的水运、铁路、公路和航空系统,并建立了较为发达的中心城市框架,并将清洁能源、新型材料、富硒食品、生物医药、丝绸、生态旅游等作为安康市经济发展的主要产业。在加强城市建设力度的同时,确立了“生态立市,产业强市”的规划理念,运用现代生态学理论和现代林业发展思维谋划城市发展,以打造新型的园林城市和生态城市。

2 材料与方法

2.1 数据与资料收集

研究所需的安康市2004—2008年各种资源、产品和服务量等数据,来源于《安康市统计年鉴》^[15]、《陕西省统计年鉴》^[16]、中国统计年鉴数据库,部分数据从安康市统计局、农业局、林业局等部门索取。

采用典型调查法,调查安康市农业、经济、国土资源等资料,以确定安康市区域消费项目;选择有代表性的林地、农地、荒草地各10个样地,按Z字形在每个样地各选择4~5个测定、采样点,挖土壤剖面,测定土层厚度,同时采集土壤,用于测定土壤有机质含量。

2.2 计算方法

1)能值—生态承载力(c_e ;hm²)。区域能值—生态承载力表征城市生态系统提供的自然资源和环境支持人类社会系统的能力,是一种多生态因素综合形成的自然潜能,包括区域可更新自然资源能值和表土能值两部分^[11]。安康处于中国内陆,受潮汐影响作用较小,因而可更新资源的计算只考虑太阳能、风能、雨水化学能、雨水势能和地球旋转能5类可更新资源项目。按蓝盛芳^[3]、H. T. Odum^[17]等提出的能值计算方法,获得上述5类可更新资源能量大小,再根据相应的能值转换率即可得到相应的能值数量。因太阳能、风能、雨水化学能和雨水势能为同一过程的复合产物,为避免重复,在计算中只取其中最大值,该值与地球旋转能之和即为区域可更新资源能值 e_1 。

能值—生态承载力计算公式为:

$$c_e = \frac{e_1 + 0.03e_2}{D} \quad (1)$$

式中, e_1 为区域可更新自然资源能值(J), e_2 为表土能值(J),且每年表土能值的3%可看作可再生的, D 为区域能值密度,即区域总能值与区域面积的比值(J·hm⁻²)。 e_2 =表土层土壤厚度(cm)×生物生产性土地面积(hm²)×10¹⁰×土壤容重(g·cm⁻³)×土壤表层有机质平均含量(%)×典型表土吉布斯自由能(J·g⁻¹)×表土能值转换率。

2)能值—生态足迹(f_e ;hm²)。能值—生态足迹是区域年消费项目能值和区域能值密度之比。消费项目主要包含生物资源项目和能源资源项目两部分。生物资源消费部分包括农产品、动物产品、水果等类别。能源资源部分包括液化石油气、电力等类别。各项资源消费量乘以相应能值转换率即可得到消费项目的能值,汇总后即区域年消费项目能值。计算公式为:

$$f_e = \frac{\sum_{i=1}^n [(Pd_i + Im_i) Tr_i]}{D} \quad (2)$$

式中, Pd_i 为区域消费项目的年能值产量(J), Im_i 为消费项目的年能值进口量(J), Pd_i 和 Im_i 均由消费项目的原始统计数据与能量折算系数计算而来, Tr_i 为太阳能值转换率, D 为区域能值密度。

3) 生态赤字或盈余(E_A ; hm^2)。生态赤字或盈余取决于生态足迹和生态承载力的差值,是衡量生态安全的指标。当一个地方的生态承载力小于生态足迹时,将出现生态赤字,表明该区域对自然资源的消耗超过了生态环境所能承载的能力,发展处于相对不可持续状态。当生态足迹小于生态承载力时,出现生态盈余,表明该区域自然资源可满足人类需求,区域处于相对安全的状态,并且发展具有可持续性。计算公式为:

$$E_A = f_e - c_e \quad (3)$$

4) 生态压力指数(PI)^[13]。生态压力指数是指单位承载面积上的生态足迹大小,用来反映生态环境所承受的压力强度。当 $PI=0$ 时,表明该区域生态足迹小于生态承载力,生态安全。当 $PI>0$ 时,此区域生态足迹大于生态承载力,区域处于不安全状态。计算公式为:

$$PI = \begin{cases} \frac{f_e - c_e}{c_e} & f_e > c_e \\ 0 & f_e \leq c_e \end{cases} \quad (4)$$

5) 可持续性指数(SEI)^[12]。计算公式为:

$$SEI = \frac{f_e}{f_e + c_e} \quad (5)$$

2.3 城市发展可持续性评价

用基于能值—生态足迹模型的可持续性指数进行评价,评价标准为: $SEI = 0.5$ 时,区域可持续性处于发展边缘状态; $SEI > 0.5$,区域环境承载加大,生态安全降低,可持续性较差; $SEI < 0.5$,区域人类消耗小于环境承载,有较大发展空间。

3 结果与分析

3.1 安康市能值—生态承载力

经计算,安康市区域内总能值为 $11.02 \times 10^{20} \text{ J} \cdot \text{a}^{-1}$ (表1),区域能值密度为 $4.71 \times 10^{14} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$; 2004—2008年可更新自然资源能(e_1)分别为 4.01×10^{21} 、 4.64×10^{21} 、 4.80×10^{21} 、 4.11×10^{21} 、 $4.80 \times 10^{21} \text{ J}$,平均为 $4.47 \times 10^{21} \text{ J}$ (表2),基本处于上升水平;表土能(e_2) $1.30 \times 10^{23} \text{ J}$ 。2004—2008年能值生态承载力(c_e)分别为 1.68×10^7 、 1.81×10^7 、 1.85×10^7 、 1.71×10^7 和 $1.85 \times 10^7 \text{ hm}^2$,扣除 12% 的保护生物多样性外,人均各年份生态承载力分别为 4.28、4.69、4.00、4.44 hm^2 和 4.89 hm^2 (表3)。

表1 安康市地球生物圈年能值储量

Table 1 Annual budget of solar energy for the earth geobiosphere in Ankang

能量类型	能量/J	能值转换率 ^[18]	太阳能值/($\text{J} \cdot \text{a}^{-1}$)
太阳辐射能	1.19×10^{20}	1.00	1.19×10^{20}
地热能	3.39×10^{16}	2.90×10^4	9.83×10^{20}
合计	—	—	11.02×10^{20}

表2 安康市区域可更新资源能值(2008)

Table 2 Calculation for annual renewable resources energy in Ankang(2008)

能量类型	能值转换率	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均
太阳辐射能	1.00	1.19×10^{11}					
风能	6.63×10^2	1.21×10^{14}					
雨水势能	1.05×10^4	3.03×10^{21}	3.66×10^{21}	3.82×10^{21}	3.13×10^{21}	3.82×10^{21}	3.49×10^{21}
雨水化学能	1.82×10^4	1.69×10^{21}	2.04×10^{21}	3.39×10^{16}	1.75×10^{21}	2.13×10^{21}	2.20×10^{21}
地球旋转能	2.90×10^4	9.83×10^{20}					
总计	—	4.01×10^{21}	4.64×10^{21}	4.80×10^{21}	4.11×10^{21}	4.80×10^{21}	4.47×10^{21}

表3 安康市能值生态承载力(2004—2008年)

Table 3 Energy-based ecological capacity in Ankang (2004—2008)

项目	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年	平均
可更新资源能值/J	4.01×10^{21}	4.64×10^{21}	4.80×10^{21}	4.11×10^{21}	4.80×10^{21}	4.47×10^{21}
表土能/J	1.30×10^{23}	1.3×10^{23}				
能值—生态承载力/ hm^2	1.68×10^7	1.81×10^7	1.85×10^7	1.71×10^7	1.85×10^7	1.78×10^7
人均生态承载力/ hm^2	4.28	4.69	4.00	4.44	4.89	4.46

3.2 安康市能值—生态足迹

从生物资源消费账户和能源资源消费账户计算

得出(表4),安康市2004—2008年区域能值—生态足迹分别为 4.06×10^7 、 3.49×10^7 、 3.74×10^7 、 3.47

$\times 10^7$ 、 3.43×10^7 hm^2 , 人均能源生态足迹分别为 11.90、11.83、11.59、11.57、11.40 hm^2 , 呈逐年下降的趋势, 表明安康市近年来逐渐减少了自然资源和能源资源的消耗。其中农产品生态足迹分别占总生态足迹的 44.87%、23.35%、20.57%、16.81% 和 17.59%, 动物产品(包括水产品)足迹占总生态足迹的 39.42%、52.87%、56.14%、49.45% 和 38.26%。

表 4 安康市能值生态足迹

Table 4 Energy-based ecological footprint in Ankang(2004—2008)

项目	折算系数 $/(J \cdot t^{-1})$	能值转换 率 ^[18]	能值—生态足迹/ hm^2					
			2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	
生物资源/J	稻谷	1.64×10^{10}	6.02×10^4	1.89×10^{20}	1.99×10^{20}	1.87×10^{20}	1.60×10^{20}	1.90×10^{20}
	小麦	1.57×10^{10}	1.14×10^5	2.41×10^{20}	2.69×10^{20}	3.06×10^{20}	2.39×10^{20}	1.76×10^{20}
	玉米	1.65×10^{10}	4.53×10^4	2.16×10^{20}	2.67×10^{20}	2.30×10^{20}	1.64×10^{20}	1.76×10^{20}
	豆类	2.07×10^{10}	4.53×10^3	4.31×10^{14}	5.16×10^{14}	5.84×10^{14}	5.90×10^{13}	6.85×10^{13}
	油菜籽	2.55×10^{10}	1.16×10^6	1.35×10^{21}	1.64×10^{21}	1.85×10^{21}	1.87×10^{21}	2.15×10^{21}
	水果类	3.30×10^9	8.89×10^5	2.02×10^{21}	2.43×10^{21}	2.88×10^{21}	3.42×10^{20}	5.63×10^{20}
	棉花	1.884×10^7	1.44×10^{11}	5.96×10^{19}	7.05×10^{19}	4.34×10^{19}	3.79×10^{19}	6.23×10^{19}
	猪肉	2.00×10^{10}	2.85×10^6	5.84×10^{21}	6.82×10^{21}	8.18×10^{21}	6.45×10^{21}	4.64×10^{21}
	牛肉	2.09×10^{10}	3.35×10^6	4.28×10^{20}	6.39×10^{20}	5.11×10^{20}	5.70×10^{20}	4.54×10^{20}
	羊肉	1.41×10^9	6.71×10^6	9.84×10^{20}	8.64×10^{20}	7.65×10^{20}	6.33×10^{20}	5.96×10^{20}
	蛋类	5.5×10^9	3.35×10^6	2.01×10^{20}	2.55×10^{20}	3.17×10^{20}	3.83×10^{20}	4.34×10^{20}
	水产品	5.5×10^9	3.36×10^6	7.85×10^{19}	9.20×10^{19}	1.06×10^{20}	3.40×10^{19}	3.70×10^{19}
	小计	—	—	1.61×10^{22}	1.25×10^{22}	1.35×10^{22}	1.08×10^{22}	9.04×10^{21}
	能源资源/J	液化石油气	3.89×10^7	1.11×10^5	1.38×10^{19}	1.38×10^{19}	1.55×10^{19}	1.89×10^{19}
电力		3.6×10^8	1.59×10^5	2.98×10^{21}	3.87×10^{21}	4.07×10^{21}	5.50×10^{21}	6.71×10^{21}
小计		—	—	2.99×10^{21}	3.88×10^{21}	4.09×10^{21}	5.52×10^{21}	6.73×10^{21}
总计/J	—	—	1.91×10^{22}	1.64×10^{22}	1.76×10^{22}	1.63×10^{22}	1.61×10^{22}	
区域生态足迹/ hm^2	—	—	4.06×10^7	3.49×10^7	3.74×10^7	3.47×10^7	3.43×10^7	
人均生态足迹/ hm^2	—	—	11.90	11.83	11.59	11.57	11.40	

3.3 可持续发展状况

3.3.1 生态盈余状况 由表 5 可以看出, 安康市 2004—2008 年人均能值生态足迹均大于人均能值生态承载力, 呈连续亏缺状态即生态赤字, 各年份赤

生物资源占据生态足迹的绝大多数比例体现了安康市产业结构是以第一产业为主, 农牧业为主体, 生活消耗动物产品逐年增加, 农产品消费逐年下降。2004—2008 年, 能源资源足迹分别占总生态足迹的 15.6%、23.66%、22.32%、33.86% 和 41.80%, 呈现较明显的增长趋势, 表明安康市以煤炭为主要能源结构的利用程度逐年上升。

表 5 安康市可持续发展指标

Table 5 Sustainable development index in Ankang

项目	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	平均
人均能值生态承载力/ hm^2	4.28	4.69	4.00	4.44	4.89	4.46
人均能值生态足迹/ hm^2	11.90	11.83	11.59	11.57	11.40	11.66
人均生态赤字/ hm^2	7.62	7.14	7.59	7.68	6.51	7.31
生态压力指数	1.78	1.52	1.90	1.73	1.33	1.65
可持续发展指数	0.74	0.72	0.74	0.72	0.70	0.72

3.3.2 生态压力状况 安康市 2004—2008 年生态压力指数分别为 1.78、1.52、1.90、1.73 和 1.33(表 5), 都 > 0 , 表明安康市区域生态足迹大于生态承载力, 区域处于不安全状态, 同时生态压力高于深圳^[8], 远低于徐州^[12] 和济南^[20]。这是由于和徐州市、济南市相比, 安康市产业结构以农业为主, 高耗能、易于造成大面积和高强度环境污染的第二产业比例较小, 而与深圳市相比, 安康市产业发展科技水平较低。

3.3.3 城市发展可持续性状况 1) 可持续性指数。可持续性指数不仅能很好的反映人类对环境资源的

字量分别为 7.62、7.14、7.59、7.68、6.51 hm^2 , 表明安康市区域发展所消耗的自然资源总量大于该区域能够提供的可更新资源总量, 不利于社会经济的可持续发展。

利用程度, 直观体现区域发展对自然环境的依赖和利用状况, 还能作为不同地区的可持续发展状况比较提供可靠依据。安康市 2004—2008 年可持续性指数分别为 0.74、0.72、0.74、0.72 和 0.70, 高于以高新技术为主导产业的深圳(0.64)^[8], 低于传统产业占很大比例的徐州(0.97)^[12] 和济南(0.92)^[20], 表明安康市作为同样传统产业比例很大的内陆山区城市, 区域发展对自然环境的依赖和利用程度高于沿海新兴发达城市, 而又低于内陆传统工业城市。2) 可持续发展评价。安康市 2004—2008 年可持续

性指数 SEI 值介于 0.70~0.74 之间, >0.5, 说明区域环境承载加大, 生态安全降低, 可持续性较差。在区域自然资源尤其是热能资源变化不大, 总能值基本恒定的情况下, 降低区域能值生态足迹和人均能值生态足迹, 才是提高安康市区域可持续发展水平的根本出路。

4 结论与讨论

安康市区域内总能值为 $11.02 \times 10^{20} \text{ J} \cdot \text{a}^{-1}$, 区域能值密度为 $4.71 \times 10^{14} \text{ J} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2004—2008 年可更新自然资源能平均为 $4.47 \times 10^{21} \text{ J}$, 年人均能值生态承载力 4.46 hm^2 , 年人均能值—生态足迹 11.66 hm^2 , 年人均生态赤字 7.20 hm^2 , 生态压力指数 $1.65 > 0.5$, 区域发展所消耗的自然资源总量大于能够提供的可更新资源总量, 生态足迹大于生态承载力, 处于不安全状态, 发展的可持续性较差。

基于能值—生态足迹的安康市可持续发展评价结果与现实情况吻合, 可为安康市制定以可持续发展为目标的社会经济发展思路提供参考。安康地处中国西部, 是以农林业发展推动经济发展的城市, 长期形成的粗放经济增长方式以及结构性矛盾, 已经导致安康市自然系统压力不断增大, 生态环境质量严重下降, 这与以建设协调、全面、持续的社会—经济—自然复合系统为目标的生态城市标准相矛盾。为将安康改造成更适宜人类生存发展的生态城市, 在城市的发展中, 如能发展观光农业、休闲农业等生态农业经营方式, 不仅可以提高环境生态承载力, 还可以扩大清洁型的生态化生产发展规模并获得经济发展^[21]。发展种植业的同时, 可以发展家禽、家畜和水产养殖农业生产链, 并配合一定的初级加工业, 可创造更高的经济效益。在环境日益恶化的情况下, 如能将现有的城市环境进行有计划的生态恢复和局部改造, 并通过森林再造、土壤改良以及保护湿地等措施, 建立节约性园林和低碳排放的工业、交通系统等措施, 也能降低安康市生态足迹需求, 促进可持续发展。

运用能值—生态足迹模型评价区域可持续发展状况, 是一种新的思路和方法, 与应用传统的生态足迹模型评价城市可持续发展状况相比, 具有诸多优点: 避免只计算区域生物生产性土地而忽略区域其他生态供给能力, 如调节气候、吸收 CO_2 、维护生物多样性等功能, 而导致降低生态系统的实际效益功能的问题; 避免不能动态预测城市发展趋势, 研究结果过于静态的问题; 避免重点考虑生态系统而忽略社会、经济、科学技术等问题; 避免对生态系统废弃物吸收消解能力和资源供给能力描述不完整等问

题^[8]。然而, 由于不同学者对能值—生态足迹的认识不同, 该模型还没有形成统一的计算标准和计算公式; 并且不同城市发展状况不同, 学者对模型中各项指标的选取与计算也存在分歧, 导致在模型的应用中出现误差, 也一定程度影响了对城市自然、社会、经济状况的真实反映, 这也是今后应用能值—生态足迹法, 对在自然生态环境、社会经济状况等方面不尽相同的城市, 进行可持续发展水平比较时, 需要不断探索和完善之处。

参考文献:

- [1] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态环境问题已成为国家安全的热门话题[J]. 环境保护, 2002(5): 3-5.
QU G P. The problems of ecological environmental have become a popular subject of country safety[J]. Environment Production, 2002(5): 3-5. (in Chinese)
- [2] 张洪军, 刘正恩, 曹福存. 生态规划—尺度、空间布局和可持续发展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [3] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹—可持续发展的重量及面积观念[M]. 北京: 经济科学出版社, 2003: 161-169.
- [4] HABERL H, ERB K H, FRIDOLIN K. How to calculate and interpret ecological footprints for long periods of time: the case of Austria 1926—1995[J]. Ecological Economics, 2001(38): 25-45.
- [5] WWF. Living planet report 2004[M]. Switzerland: WWF, 2004: 25-58.
- [6] NGUYEN H X, YAMAMOTO R. Modification of ecological footprint evaluation method to include non-renewable resource consumption using thermodynamic approach [J]. Resources Conservation and Recycling, 2007, 51(4): 870-884.
- [7] 孙东林, 刘圣, 姚成. 用能值分析理论修改生物承载力的计算方法—以苏北互花米草生态系统为例[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2007, 43(5): 501-508.
SUN D L, LIU S, YAO C. Improving the computation of bio-capacity by emery theory: a case study of *Spartina alterniflora* ecosystem in northern Jiangsu[J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences Edition, 2007, 43(5): 501-508. (in Chinese)
- [8] 赵志强, 李双成, 高阳. 基于能值改进的开放系统生态足迹模型及其应用—以深圳市为例[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2220-2231.
ZHAO Z Q, LI S C, GAO Y. Emery-based modification for ecological footprint accounting and application to open eco-economic system: A case study of Shenzhen city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 2220-2231. (in Chinese)
- [9] ODUM H T. Environmental accounting: emergency and environmental decision making[M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [10] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [11] 熊德国, 鲜学福. 生态足迹理论在区域可持续发展评价中的应用及改进[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 28-32.
- [12] 金丹, 卞正富. 基于能值的生态足迹模型及其在资源型城市的应用

- 应用[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1725-1733.
- JIN D, BIAN Z F. Emergy-based ecological footprint model and its application to a natural resource-dependent economy in Xuzhou city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1725-1733. (in Chinese)
- [13] 李中才, 刘林德, 孙玉峰, 等. 基于 PSR 方法的区域生态安全评价[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6495-6503.
- LI Z C, LIU L D, SUN Y F, *et al.* Assessment method of regional ecological security based on pressure-state-response model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6495-6503. (in Chinese)
- [14] 靳雪艳, 朱首军, 高美荣. 紫色土区陈家湾流域农业生态经济系统的能值分析[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 214-218.
- JIN X Y, ZHU S J, GAO M R. Energy analysis on agricultural eco-economic system in Chenjiawan Watershed at purple soil area [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 214-218. (in Chinese)
- [15] 安康市统计局. 安康统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [16] 陕西省统计局. 陕西统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2008.
- [17] ODUM H T, BROWN M, SHERRY B W. Handbook of emergy evaluation [M]//Gainesville. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences. University of Florida, 2000: 7-8.
- [18] 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.
- YAN M C, LI H T, CHENG H, *et al.* Emergy analysis and assessment of main products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(6): 66-69. (in Chinese)
- [19] 尚清芳. 干旱区绿洲农业生态经济系统能值分析—以武威市凉州区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 27-28.
- [20] 张延安, 郑昭佩, 张文岚. 基于能值改进的生态足迹模型在济南市的应用分析[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(2): 134-138.
- ZHANG Y A, ZHENG S P, ZHANG W L. Application and analysis of the energetic ecological footprint method to Jinan City[J]. Environmental Science And Management, 2010, 35(2): 134-138. (in Chinese)
- [21] 常风云, 肖斌. 十天高速公路区域生态景观规划设计研究—以安康至汉中段为例[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(6): 219-223.
- CHANG F Y, XIAO B. Research about regional ecological landscape planning and design of Shitian expressway—a case study of the section of Ankang-Hanzhong [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(6): 219-223. (in Chinese)
- (上接第 66 页)
- LU X M, ZHAO F, CHEN J J, *et al.* Comparison of physiological traits and nitrogen and phosphorus removals of *Nymphaea tetragona* and *Pontederia cordata*[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(23): 45-48. (in Chinese)
- [10] 陈建军, 卢晓明, 卢少勇, 等. 梭鱼草净化黑臭河水的日变化试验研究[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3585-3589.
- CHEN J J, LU X M, LU S Y, *et al.* Diurnal variations in purifying-tanks when use *Pontederia cordata* treating the malodorous river water[J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3585-3589. (in Chinese)
- [11] 王传海, 李宽意, 文明章, 等. 苦草对水中环境因子影响的日变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 798-800.
- WANG C H, LI K Y, WEN M Z, *et al.* Effects of *Vallisneria asiatica* on water environmental factors and its diurnal variation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(2): 798-800. (in Chinese)
- [12] 中国国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 上海市植物生理学会, 中国科学院植物生理所. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 中国科学出版社, 1999: 29-30.
- [14] CHAMBER J, SUN G, ZHAO Y Q, *et al.* Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. Journal of Biotechnology, 2005, 115(2): 189-197.
- [15] 吴月燕, 吴秋峰, 曾华军. 富营养化水体中水生植物的生态和生理生化效应[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2009, 35(3): 337-344.
- WU Y Y, WU Q F, ZENG H J. Ecological and physiochemical effect of aquatic plants in eutrophication water[J]. Journal of Zhejiang University: Agri & Life Sci, 2009, 35(3): 337-344. (in Chinese)
- [16] 沙翠芸, 孟庆瑞, 王静, 等. 两种彩叶植物对铅胁迫的生理响应[J]. 西北林学院学报, 2011, 26(4): 36-40.
- SHA C Y, MENG Q R, WANG J, *et al.* Physiological responses of two colored-leaf species to pb stress[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(4): 36-40. (in Chinese)