

# 基于生态足迹模型的矿区可持续发展评估 ——以神木县为例

王 艳<sup>1,3</sup> 王 力<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 研究生院 北京 100039)

**摘 要:**运用生态足迹模型对陕西神木县 2007 年的生态足迹进行了计算和分析,分别以神木县总能源消费量(包括工业生产能源消费和非工业生产能源消费)和以非工业能源消费量计算了其生态足迹,前者生态赤字达 17.058 ha/cap,后者生态盈余为 0.209 ha/cap,说明神木县生态赤字主要来源于工业能源消费,即是通过高能耗产品将其他地区的生态足迹转移到了神木县。最后根据生态足迹分析结果,提出了关于神木县可持续发展的建议。

**关键词:**生态足迹;能源消费;生态赤字;生态盈余;煤矿

**中图分类号:**Q146 **文献标志码:**A

## Evaluation of the sustainable development in mining area based on ecological footprint model: a case study of Shenmu County

WANG Yan<sup>1,3</sup>, WANG Li<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 3. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Ecological footprint model was used to analyze the ecological capacity and deficit/surplus of Shenmu County. The results show that the ecological deficit is 17.058 ha per capita when the total energy consumption (energy consumption coming from industrial and non-industrial production) is used to calculate the ecological footprints, whereas the ecological surplus is 0.209 ha per capita when the non-industrial energy consumption is used. The ecological deficit is mainly derived from the industrial energy consumption, and that energy is provided by Shenmu County but consumed outside of it. This means the ecological footprints of Shenmu County are shifted from the outside. Based on the analysis of ecological footprints, some measures for the sustainable development of Shenmu County were suggested.

**Key words:** ecological footprint; energy consumption; ecological deficit; ecological surplus; coal mine

伴随着不可再生资源危机加剧,矿业发展区环境恶化,资源消耗型产业区的可持续发展引起了人们的高度重视。矿产资源开发对社会经济的发展起着重要的作用,但伴随着资源的大规模开发利用,一系列环境问题出现在人们面前,如空气污染、水土流失、地面塌陷等<sup>[1]</sup>,如何维持矿区的可持续发展成为各地

区面临的核心问题。神木县作为中国第一产煤大县,是矿业产业区的典型代表,以煤炭开发为支柱产业的国民经济稳定快速增长的同时,水土流失、植被退化、土地沙化以及地表塌陷裂缝等生态环境问题却日益凸显,严重影响了区域的可持续发展。因此,为了解决矿区的持续发展问题,定量评价其可持续性具有重

要的现实意义。

自 1992 年联合国第 2 次“世界环境与发展大会”通过的《21 世纪议程》呼吁各国政府、国际组织、非政府组织开发和应用可持续发展指标(体系)以来,度量可持续发展的指标(体系)及框架模型不断被提出<sup>[2]</sup>。生态足迹(Ecological Footprint)模型由加拿大生态经济学家 William 和 Wackernagel 在 20 世纪 90 年代中期提出,从生态供给与经济需求两个方面度量可持续发展的程度,以其形象、综合、简明和易于计算的特点,受到生态经济学界的广泛关注,并被国内外学者广泛应用<sup>[3-7]</sup>。尽管生态足迹模型得到了广泛的应用,但将之应用于矿区可持续发展分析的研究报导还相对较少。本文基于生态足迹理论,选取神木县为例,进行实证研究,力求客观评价矿区的生态与经济发展现状、协调日益尖锐的生态经济矛盾,为煤炭资源开发利用的健康持续发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

神木县位于陕西省北部,晋陕蒙 3 省(区)接壤地带,属半干旱大陆性季风气候。县境内地势西北高、东南低,海拔 738.7~1 448.7 m,为陕北黄土丘陵向内蒙古高原、暖温带森林草原向中温带草原的过渡地带。地貌类型以明长城为界,以北为风沙草滩地貌,约占全县总面积的 51%;以南为黄土丘陵沟壑地貌,约占全县总面积的 49%<sup>[8]</sup>。

神木县位于神府东胜侏罗纪煤田的聚煤中心,储煤面积 4 500 km<sup>2</sup>,占全县总土地面积的 60%。探明储量 500 亿 t,且煤质优良,属特低灰、特低磷、中高发热量的优质动力煤和气化用煤,也是理想的环保洁净煤。此外,神木还有石砂储量 436 万 t,二氧化硅含量在 97% 以上。改革开放特别是神府煤田开发以来,神木县经济飞速发展,社会事业全面进步,已发展成为以煤炭为支柱产业的能源重化工基地,主要工业产品有原煤、平板玻璃、发电、电石、焦炭和水泥。神木县 2007 年全县实现地区生产总值 197.32 亿元,其中一、二、三产业的比重为 2.7: 83.7: 13.6<sup>[8]</sup>。2009 年县域经济综合实力位居全国第 59 位,西部第 5 位。

## 2 研究方法

### 2.1 生态足迹的概念

William 将生态足迹描述为“一只负载着人类与人类所创造的城市、工厂等的巨脚踏在地球上留下的脚印”<sup>[9-11]</sup>。其定义是:任何已知人口(某个人、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

弃物所需要的生物生产土地总面积和水资源量<sup>[6,12-13]</sup>。生态足迹模型是基于以下两个基本事实<sup>[12,14-16]</sup>:① 人类可以确定自身消费的绝大多数资源及其所产生的废弃物的数量;② 这些资源和废弃物流能转换成相应的生物生产面积。

### 2.2 生态足迹模型

生态足迹模型主要包括 3 部分:生态足迹、生态承载力和生态赤字/盈余。

(1) 生态足迹的计算公式为

$$E = Ne = N \sum_{i=1}^n a_i r_i = N \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{p_i} r_i \quad (1)$$

式中  $E$  为总生态足迹;  $N$  为人口数;  $e$  为人均生态足迹;  $a_i$  为第  $i$  种消费物品折算的生物生产面积;  $r_i$  为均衡因子(某类生物生产面积的均衡因子等于全球该类生物生产面积的平均生态生产力除全球所有各类生物生产面积的平均生态生产力<sup>[17]</sup>);  $c_i$  为第  $i$  种物品的人均消费量;  $p_i$  为第  $i$  种物品的平均生产能力。

(2) 生态承载力的计算公式为

$$B = Nb = N \sum_{j=1}^6 a_j r_j y_j \quad (2)$$

式中  $B$  为总生态承载力;  $b$  为人均生态承载力;  $j$  为生物生产性土地类型(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<sup>[5,17]</sup>:化石能源地、可耕地、牧草地、森林、建筑用地和海洋);  $a_j$  为人均生物生产面积;  $r_j$  为均衡因子;  $y_j$  为产量因子(某个国家或地区某类土地的产量因子是其平均生产力与世界同类土地的平均生产力的比值<sup>[17]</sup>)。

(3) 生态赤字/盈余的计算公式为

$$\text{生态赤字/盈余} = B - E$$

若值为负则为生态赤字,表明资源的更新不够人类利用,可持续性的生态发展存在危机;若值为正则生态盈余,表明资源的更新足够人类利用,人类的可持续发展是可以实现的。

### 2.3 数据来源

数据来源于《神木县统计年鉴》<sup>[8]</sup>、《神木县县志》和《神木县土地资源调查报告》。式(1)中均衡因子的值采用 Wackernagel 等<sup>[4]</sup>和徐中民等<sup>[7]</sup>的计算结果,式(2)中产量因子的值取自文献中的中国平均值<sup>[7,17]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态足迹

#### 3.1.1 生态足迹的计算

生态占用主要由两部分组成,即生物资源和能源消费。由于神木县缺乏详细的农产品贸易资料,且当

地生产的农产品主要在本地出售和消费<sup>[8]</sup>, 外地农产品在神木县所占的市场份额亦有限, 所以本文在计算生物资源消费时未进行进出口贸易调整。能源消费足迹的计算采用世界上单位化石燃料生产土地面积的平均发热量为标准<sup>[18]</sup>, 将当地能源消费所消耗

的热量折算成一定的化石燃料土地面积<sup>[19]</sup>。表1列出了以总能源消费量为基础的神木县2007年人均生态足迹计算结果, 化石能源地人均生态足迹占到94%。表2为化石能源地生态足迹中各项目所占的比例。

表1 神木县2007年人均生态足迹

Table 1 Per capita ecological footprints of Shenmu County in 2007

土地类型	人均生产性面积/ha	均衡因子	人均生态足迹/(ha·cap <sup>-1</sup> )	所占比例/%
耕地	0.120	2.8	0.337	1.83
林地	0.062	1.1	0.068	0.37
牧草地	1.387	0.5	0.693	3.77
化石能源地	15.736	1.1	17.309	94.00
水域	0.030	0.2	0.006	0.03
建筑用地	0	2.8	0	0
人均生态足迹总需求			18.413	100

表2 化石能源地生态足迹

Table 2 Ecological footprints of the different types of energy

能源	消费量/t			人均生态足迹/(ha·cap <sup>-1</sup> )			所占比例/%
	工业生产消费量	非工业生产消费量	总消费量	工业生产消费	非工业生产消费	总消费	
煤炭	15 231 611.60	7 746.50	15 239 358.10	16.272	0.008	16.281	94.06
焦炭	655 865.25	22 780.00	678 645.25	0.953	0.033	0.986	5.7
汽油	994.86	74.14	1 069.00	0.001	0	0.001	0.01
柴油	31 649.41	283.80	31 933.21	0.041	0	0.041	0.24
焦炉煤气*	400.00		400.00	0	0	0	0
燃料油	86.00		86.00	0	0	0	0
合计				17.268	0.042	17.309	100
所占比例/%				99.76	0.24		

注: \* 焦炉煤气的消费量单位是万 m<sup>3</sup>。

### 3.1.2 生态足迹结构的分析

由表1、2可以看出, 神木县2007年人均生态足迹需求达到18.413 ha, 其中化石能源地需求占到全部需求的94%, 而在化石能源地中煤炭又占到94.06%。出现这种现象的主要原因是改革开放以来, 神木县经济发展以煤炭开发为基础, 工业化进程加快, 煤炭产量突破1亿t, 建立了煤炭、电力、化工、载能、建材为主的工业体系, 工业增加值占国内生产总值的比重达到87%<sup>[8]</sup>。高耗能工业的发展带来了大量的能源消耗, 但是这些能源中的大多数并未用于当地消费, 而是随工业产品(如煤、电)输出到县域之外, 因此以能源总消费量为依据计算出的神木县生态足迹中90%多是由高能耗产品从其他地区转移到神木县的, 这说明神木通过输出煤炭资源和高能耗产品为其他地区经济发展作出了贡献, 但将生态负担(如煤田开发造成的污染、地下水位下降等环境问题)留在了本区域。用非工业能源消费量代替总能源消费

量计算神木县2007年人均生态足迹, 由于未考虑神木县工业生产中满足当地需求的部分, 故计算结果偏小, 但比用总能源消费量的计算结果更能反映神木县的实际情况(表3)。在以非工业能源消费量计算结果中, 其中仅耕地和牧草地的需求空间占89.89%, 牧草地的需求空间最大占到60.48%, 主要是由于神木县地处暖温带草原向中温带草原过渡地带, 是优质牧草适生区和发展食草型畜牧业的理想地带; 同时, 近20a来神木县经济飞速发展, 人民的生活水平不断提高, 对肉类和禽蛋类的需求也随之增加<sup>[8]</sup>, 对畜牧业发展客观上起到了推动作用。

## 3.2 生态承载力

### 3.2.1 生态承载力的计算

计算神木县的生态承载力时, 产量因子根据当地某种土地类型的平均产量与世界平均产量的比值确定, 其中的耕地产量因子采用粮食为代表计算, 水域产量因子以1处理<sup>[7]</sup>, 牧草地和林地的产量因子采用

1999 年中国生态足迹计算中的值<sup>[7,17]</sup>。根据世界环境与发展委员会(WCED)的建议,扣除了 12% 的

生物多样性保护面积。表 4 列出了神木县 2007 年人均生态承载力的计算结果。

表 3 神木县 2007 年人均生态足迹(以非工业能源消费量代替总能源消费量)

Table 3 Per capita ecological footprints of Shenmu County in 2007 (Based on the non-industrial energy consumption)

土地类型	人均生产性面积/ha	均衡因子	人均生态足迹/(ha·cap <sup>-1</sup> )	所占比例/%
耕地	0.120	2.8	0.337	29.41
林地	0.062	1.1	0.068	5.93
牧草地	1.387	0.5	0.693	60.48
化石能源地	0.038	1.1	0.042	3.65
水域	0.030	0.2	0.006	0.52
建筑用地	0	2.8	0	0
人均生态足迹总需求			1.146	100

表 4 神木县 2007 年人均生态承载力

Table 4 Per capita biocapacity of Shenmu County in 2007

土地类型	人均生物生产性面积/ha	均衡因子	产量因子	人均生态承载力/(ha·cap <sup>-1</sup> )	所占比例/%
耕地	0.271	2.21	1.31	0.783	50.87
牧草地	0.983	0.49	0.19	0.092	5.95
林地	0.463	1.34	0.91	0.565	36.69
水域	0.001	0.36	1.00	0	0.01
化石能源地	0	1.34	0	0	0
建筑用地	0.034	2.21	1.31	0.100	6.47
总供给面积				1.539	100
生物多样性保护				0.185	12.00
人均生态承载力				1.355	88.00

### 3.2.2 生态承载力的结构分析

2007 年的神木县生态承载力结构中,以耕地为主,占总面积的 50.87%,这与我国传统土地利用结构有关;其次是林地,占 36.69%,这与我国近年来的退耕还林政策有关,1999 年这一政策实施后,神木县种植了大面积的油松、侧柏、沙柳等乔灌木,导致林地面积增加;牧草地的面积仅为 5.95%,与牧草地 60.48% 的生态足迹相差甚远,首先是因为牧草地的产量因子用我国平均值代替偏小,其次是受近年来禁牧政策的影响,人工牧草面积大幅度减少,尽管国家

和地方政府也大力提倡退耕还草还牧,但由于禁止户外放牧使得放牧成本增大,农民种植牧草的意愿显著降低。神木县的生态空间与中国的多数地区生态空间结构类似,以耕地为主,耕地的承载力是生态足迹的 2 倍多。但目前这种生态空间结构与神木县可持续发展需求完全不匹配,应有很大的改善空间。

### 3.3 生态赤字/盈余

分别用以总能源消费量和非工业能源消费计算的生态足迹与生态承载力对比计算神木县生态赤字/盈余,结果见表 5。

表 5 神木县 2007 年生态赤字/盈余

Table 5 Ecological deficit/surplus of Shenmu County

ha/cap

土地类型	以总能源消费量计算			以非工业能源消费量计算		
	人均生态足迹	人均生态承载力	人均生态赤字(-)/盈余	人均生态足迹	人均生态承载力	人均生态赤字(-)/盈余
耕地	0.337	0.783	0.446	0.337	0.783	0.446
林地	0.068	0.565	0.497	0.068	0.565	0.497
牧草地	0.693	0.092	-0.602	0.693	0.092	-0.602
化石能源地	17.309	0	-17.309	0.042	0	-0.042
水域	0.006	0	-0.006	0.006	0	-0.006
建筑用地	0	0.1	0.1	0	0.1	0.1
合计	18.413	1.355*	-17.058*	1.146	1.355*	0.209*

注: \* 该数据是扣除 12% 的生物多样性保护面积的生态承载力。

从表5中可以看出,如果按总能源消费量计算,生态赤字非常严重,达到17.058 ha/cap,而如果按非工业能源消费量计算,则生态盈余是0.209 ha/cap。由此可见,现在神木县的生态压力主要是由大量的工业能源消耗造成的。神木县是以工业经济发展为主的经济模式,加之工业经济发展主要依靠资源优势<sup>[8]</sup>,工业经济技术含量和附加值不高,是造成大量工业能耗的主要原因,这种不合理的资源利用结构必然导致未来某个时期区域内的资源耗竭。其次,牧草地和水域也表现为生态赤字,尤其是牧草地的赤字也较大,神木县应该调整土地利用结构,减少耕地和林地面积,有效实施退耕还草政策,发展可持续畜牧业。

## 4 结果与讨论

### 4.1 结 果

(1) 以总能源消费量计算,神木县2007年生态足迹远远超过生态承载力,生态赤字达17.058 ha/cap,是生态承载力的12.53倍。生态赤字主要来源于工业能耗,但是这些能耗中的绝大部分都随着产品销售输出到县域之外,这部分生态足迹不属于当地消费,而应该属于使用这些产品地区的生态足迹,即这部分生态足迹是通过高能耗产品将其他地区的生态足迹转移到了神木县。

(2) 以非工业能源消费量计算,神木县2007年生态足迹小于生态承载力,生态盈余0.209 ha/cap,占生态承载力的15.38%。

(3) 神木县生态足迹的主体为工业能源生态足迹,说明神木县的工业经济体系严重依赖自然资本储量,一旦自然资源开发完,经济发展将会受到严重影响。由于工业能源足迹中的煤炭足迹占到90%以上,因此煤炭资源的过度开发是造成神木县生态赤字的主要原因,也是制约神木县可持续发展的主要因素。

### 4.2 讨 论

矿产资源的不可再利用性,使得资源性县域的可持续发展引起了当地和国家的高度重视。生态足迹模型在一定尺度上反映了区域的可持续发展程度,可为区域发展战略对策的制定和实施提供数量化的依据。根据对神木县生态足迹的分析,结合当地的实际情况,立足于神木县的可持续发展,提出以下3点建议:

(1) 改善经济发展结构。神木县的经济生产总值中工业经济总产值占到80%以上<sup>[8]</sup>,而工业经济发展又主要依靠资源优势,因此,增加工业经济技术含量,提高工业技术的附加值,用工业带动农业和服

务业,降低工业能耗的生态足迹是今后神木经济发展面临的重要课题。

(2) 提高畜牧业发展水平。从生态赤字来看,神木县的牧草地赤字仅次于化石能源地,说明神木县牧草地的面积不能满足当地人民对畜牧产品的需求。从植被区划以及气候带来讲,神木县多年降雨量均在400 mm左右,是适合草原植物生存发展的区域,而不适宜大面积种植乔灌木<sup>[20]</sup>。因此在封山禁牧的基础上,应减少耕地和林地面积,大力推广退耕还草、标准化饲养,增加草地面积,发展可持续畜牧产业,提高畜产品竞争力和畜牧产业化水平。

(3) 建立生态补偿机制。生态补偿机制是指对在发展过程中对生态功能和环境质量造成损害的一种补助<sup>[21]</sup>。以神木县为例的矿业县域,绝大部分生态足迹都是通过高能耗产品将其他地区的生态足迹转移到了本区域,因此建立适当的生态补偿机制,如制定合适的能源产品生态补偿税收、建立生态环境修复基金等,对矿区因资源开发造成的环境污染进行及时有效治理,从而有利于矿业县域的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 王 力,卫三平,王全九.榆神府煤田开采对地下水和植被的影响[J].煤炭学报,2008,33(12):1408-1414.  
Wang Li, Wei Sanping, Wang Quanjiu. Effect of coal exploitation on groundwater and vegetation in the Yushenfu Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society 2008, 33(12): 1408-1414.
- [2] 顾晓薇,王 青.可持续发展的环境压力指标及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2005.
- [3] Kitzes J, Wackernagel M. Answers to common questions in ecological footprint accounting [J]. Ecological Indicators, 2009(9): 812-817.
- [4] Wackernagel M, Chad M, Niels S B, et al. Calculating national and global ecological footprint time series: resolving conceptual challenges [J]. Land Use Policy, 2004, 21: 271-278.
- [5] 杨开忠,杨 咏,陈 洁.生态足迹分析理论与方法[J].地球科学进展,2000,15(6):630-636.  
Yang Kaizhong, Yang Yong, Chen Jie. Ecological footprint analysis: concept, method and cases [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 630-636.
- [6] 张志强,徐中民,程国栋.生态足迹的概念及计算模型[J].生态经济,2000(10):8-10.  
Zhang Zhiqiang, Xu Zhongmin, Cheng Guodong. The concept of ecological footprints and computer models [J]. Ecological Economy, 2000(10): 8-10.
- [7] 徐中民,张志强,程国栋,等.中国1999年生态足迹计算与发展能力分析[J].应用生态学报,2003,14(2):280-285.  
Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong, et al. Ecological footprint calculation and development capacity analysis of China in 1999 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 280-285.

- [8] 神木县统计局. 神木县统计年鉴 [M]. 2007.
- [9] William E R. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability [J]. *Population and Environment*, 1996, 17(3): 195 - 215.
- [10] 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, 17(6): 776 - 781.  
Wang Shuhua, Mao Hanying, Wang Zhongjing. Progress in research of ecological footprint all over the world [J]. *Journal of Natural Resources* 2002, 17(6): 776 - 781.
- [11] 杨永奎, 王定勇. 重庆市直辖以来生态足迹的动态测度与分析 [J]. *生态学报* 2007, 27(6): 2 382 - 2 390.  
Yang Yongkui, Wang Dingyong. Dynamic calculation and analysis of ecological footprint of Chongqing after establishing municipality status [J]. *Acta Ecologica Sinica* 2007, 27(6): 2 382 - 2 390.
- [12] 徐中民, 张志强, 程国栋. 甘肃省 1998 年生态足迹计算与分析 [J]. *地理学报* 2000, 55(5): 607 - 616.  
Xu Zhongmin, Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong. The calculation and analysis of ecological footprints of Gansu Province [J]. *Acta Geographica Sinica* 2000, 55(5): 607 - 616.
- [13] 程水英. 矿区生态承载力研究进展 [J]. *矿业研究与开发*, 2009, 29(3): 89 - 92.  
Cheng Shuiying. Research progress in ecological carrying capacity for Mining Area [J]. *Mining Research and Development* 2009, 29(3): 89 - 92.
- [14] 黎瑞波, 蒋菊生. 生态足迹分析模型及其研究现状 [J]. *华南热带农业大学学报* 2004, 10(2): 12 - 15.  
Li Ruiibo, Jiang Jusheng. The analytic model of ecological footprint and its current research situation [J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture* 2004, 10(2): 12 - 15.
- [15] 翟 胜, 梁银丽, 王巨媛. 生态足迹模型研究进展 [J]. *西北植物学报* 2005, 25(1): 200 - 204.  
Zhai Sheng, Liang Yinli, Wang Juyuan. Latest research advance of ecological footprint model [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica* 2005, 25(1): 200 - 204.
- [16] 蒋依依, 王仰麟, 卜心国. 等. 国内外生态足迹模型应用的回顾与展望 [J]. *地理科学进展* 2005, 24(2): 13 - 23.  
Jiang Yiyi, Wang Yanglin, Pu Xinguo, et al. Review and prospect of the application of ecological footprint model [J]. *Progress in Geography* 2005, 24(2): 13 - 23.
- [17] 张志强, 徐中民, 程国栋. 等. 中国西部 12 省(区) 的生态足迹 [J]. *地理学报* 2001, 56(5): 599 - 610.  
Zhang Zhiqiang, Xu Zhongmin, Cheng Guodong, et al. The ecological footprints of the 12 provinces of West China in 1999 [J]. *Acta Geographica Sinica* 2001, 56(5): 599 - 610.
- [18] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics* 1999, 29: 375 - 390.
- [19] 邱大雄. 能源规划与系统分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [20] 王 力, 张青峰, 卫三平等. 黄土高原水蚀风蚀交错带煤田开发区小流域植被恢复模式 [J]. *北京林业大学学报* 2009, 31(2): 36 - 43.  
Wang Li, Zhang Qingfeng, Wei Sanping, et al. Vegetation restoration model in a watershed of a coal mining area in the water and wind erosion crossing zone of the Loess Plateau [J]. *Journal of Beijing Forestry University* 2009, 31(2): 36 - 43.
- [21] 张志斌, 唐素然, 赵拥华. 基于生态足迹分析的资源型城市可持续发展研究——以甘肃省白银市为例 [J]. *干旱区地理* 2008, 31(3): 464 - 469.  
Zhang Zhibin, Tang Suran, Zhao Yonghua. Ecological footprint analysis of resource-based city sustainable development: a case study of Baiyin City, Gansu Province [J]. *Arid Land Geography* 2008, 31(3): 464 - 469.