

# 咸阳市 1999—2006 年生态足迹动态分析

韩申山<sup>1</sup>, 张仁慧<sup>2</sup>

(1. 咸阳师范学院 资源环境与城市科学系, 陕西 咸阳 712000; 2. 西北大学 城市资源与环境, 陕西 西安 710127)

**摘 要:** 基于生态足迹原理, 对咸阳市 1999—2006 年生态足迹与生态安全进行了定量研究。结果表明, 咸阳市人均生态足迹逐年增加, 人均生态承载力逐年下降, 人均生态赤字、生态压力不断增加, 表明该市的发展模式是不可持续的, 其生态环境具有不安全性, 社会经济发展与生态环境的协调性很差。万元 GDP 生态足迹虽呈逐年下降趋势, 但仍大于 1999 年的全国水平, 说明咸阳市的资源利用方式仍处于消耗型、粗放型阶段。并针对以上问题提出了咸阳市可持续发展的合理途径。

**关键词:** 生态足迹; 生态赤字; 生态压力指数; 咸阳市

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2009)04—0153—06

中图分类号: X22

## Dynamic Analysis of Ecological Footprint of Xianyang City from 1999 to 2006

HAN Shen-shan<sup>1</sup>, ZHANG Ren-hui<sup>2</sup>

(1. Department of Resources Environment and Urban Science, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China;

2. Department of Urban and Resource Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China)

**Abstract:** Based on the principle of ecological footprint, the ecological footprint and ecological safety of Xianyang City from 1999 to 2006 were quantitatively analyzed. Results showed that the ecological footprint per capita gradually increased year by year, the ecological capacity per capita gradually decreased, the ecological deficit per capita and ecological tension continuously increased, and the social economic development was not coordinated with ecological environment, which indicate that the development of the city is not sustainable and its ecological environment is not safe. Though the ecological footprint of 10 thousands Yuan GDP had a dropping tendency, it was still greater than the averaged national level in 1999, which shows that the resource use of the city was still an resource exhausting and extensive management pattern. Finally, by considering these facts, some available ways for the sustainable development of Xianyang City were brought up.

**Keywords:** ecological footprint; ecological deficit; ecological tension index; Xianyang City

生态足迹的概念是由加拿大 William Rees 教授于 1992 年首先提出的<sup>[1]</sup>, 随后他和学生 Wackernagel 博士<sup>[2]</sup>提出具体的计算方法, 并估算了 52 个国家和地区生态足迹。自此以后, 生态足迹受到学术界的广泛关注, 很多国外学者对其理论、方法作了大量研究。生态足迹概念于 2000 年引入国内<sup>[3-5]</sup>, 随后有关生态足迹的研究在国内迅速开展。从研究的空间尺度来看有国家级<sup>[6-8]</sup>、省级<sup>[9-10]</sup>和市级<sup>[11-13]</sup>; 从研究的时间尺度看有基于某一年的静态分析<sup>[10-13]</sup>, 有基于连续若干年的纵向时间序列分析<sup>[14-16]</sup>, 也有基于抽样年份的非连续时间序列的纵向时间序列分析<sup>[17]</sup>。总之, 在所有的研究文献之中, 静态分析某一区域的研究居多, 动态分析较少; 关于资源消耗与生态可持续发展的相互关系研究居多, 而关于经济发展与生态可

可持续发展的相互关系研究较少。

本研究主要有 3 个目的: 其一, 从连续的时间序列角度来分析咸阳市人均生态赤字和生态压力指数的变化过程, 以揭示咸阳市生态利用的安全性及变化趋势; 其二, 对咸阳市人均生态足迹、人均生态承载力和人均生态赤字的构成进行时间序列分析, 来揭示制约咸阳市生态可持续利用的主要因素, 以期政府的决策服务; 其三, 利用回归分析来揭示咸阳市生态可持续利用与经济发展之间的互动关系。

## 1 研究区概况

咸阳市是陕西省著名的工业城市和历史名城。位于关中平原中部, 东经 107°39'—109°11', 北纬 34°9'—35°34' 之间, 属暖温带大陆性季风气候, 四季分

明、雨热同季,年平均温度 9.0 ~ 13.2,全年无霜期 180 ~ 220 d,年降水量 637 ~ 650 mm。市域南北长 145 km,东西长 106 km。总面积 10 119 km<sup>2</sup>,其中市区面积 527 km<sup>2</sup>。2006 年末全市总人口为 497.44 万人。

## 2 研究方法

### 2.1 生态足迹(生态需求)的计算方法

任何已知人口(某个人、一个城市或一个国家)的生态足迹是指生产这些人口所消费的资源 and 吸纳其产生的废弃物所需要的生物生产性土地面积<sup>[18]</sup>。其计算公式如下:

$$E_F = N \cdot e_f = N \sum_i r_i A_i = N \sum_i r_i (c_i / p_i) \quad (1)$$

式中: $E_F$ ——总的生态足迹; $N$ ——区域总人口数; $e_f$ ——人均生态足迹; $i$ ——消费项目的类型; $r_i$ ——第  $i$  项消费项目的均衡因子; $A_i$ ——第  $i$  项消费项目人均占用的实际生态生产性土地面积; $c_i$ —— $i$  项的人均年消费量; $p_i$ ——第  $i$  项消费项目的全球单位面积年平均产量。

其计算步骤为:(1) 计算各主要消费项目的总量,然后根据人口总量计算人均年消费量( $c_i$ )。(2) 利用全球平均产量( $p_i$ )将各类消费量折算为有可比性的生物生产性土地面积( $A_i$ )。(3) 生物生产性土地分类及其均衡化处理。生态足迹理论将地球表面的生物生产性土地划分为耕地、林地、草地、建筑用地、化石燃料用地和水域 6 种类型。将上述计算得到的生物生产性土地面积按照这 6 种类型进行归并,对归并后的各类生物生产土地面积乘以“均衡因子( $r_i$ )”,将其转化为具有相同生态生产力的土地面积。本研究采用的均衡因子分别为:林地和化石能源用地为 1.14,建筑用地和耕地为 2.82,草地为 0.54,水域为 0.22<sup>[19]</sup>。(4) 计算人均生态足迹。对经过“均衡因子”转化后的生物生产性土地面积进行加总求和,即可得到人均生态足迹( $e_f$ )。(5) 计算区域总的生态足迹。人均生态足迹与区域总人口数的乘积。

### 2.2 生态承载力(生态供给)的计算方法

计算生态承载力的公式为:生态承载力 = 各类生物生产性土地面积 × 均衡因子 × 产出因子

由于单位面积耕地、化石燃料土地、牧草地、林地等的生物生产能力差异很大,为了使计算结果转化为一个可比较的标准,有必要对每种生物生产面积乘以均衡因子(权重),以转化为统一的、可比较的生物生产面积。在计算生态承载力时,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,因而各国各地区同类生态生产性土地的实际面积是不能直接进行对比的。产出因子就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,是一个国家或地区某类土地的平均生产力与世界同类平均生产力的比率。本研究采用的产出因子分别为:耕地和建筑用地 1.66,草地为 0.19,园地和林地 0.91,水域是 1.00<sup>[18]</sup>。在生态承载力的计算时,将现有的各种物理空间的面积乘以相应的均衡因子和当地的产量因子,就可以得到带有世界平均产量的世界平均生态承载力。同时,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。

### 2.3 生态赤字(盈余)的计算方法

判断一个区域是否处于可持续发展状态,对于该区域具有一定的指导意义。区域可持续发展状态主要依据生态赤字(盈余)来诊断,而生态赤字(盈余)的计算方法为生态足迹与生态承载力之差,其计算公式为:生态赤字 = 人均生态足迹 - 人均生态承载力

如果区域的人均生态足迹超过了区域所能提供的人均生态承载力,就会出现生态赤字,表明这一地区的人们对本地区的自然生态系统所提供的产品和服务的需求超过其供给,经济发展处于不可持续状态;如果区域的人均生态足迹等于区域所能提供的人均生态承载力,则生态系统与经济发展处于均衡状态,为弱可持续状态;如果区域的人均生态足迹小于区域所能提供的人均生态承载力会出现生态盈余,表明人类对自然生态系统的压力处于本地区所提供的生态承载力范围之内,生态系统是安全的,经济发展处于可持续状态。

### 2.4 生态压力指数的计算方法

为了更好地研究区域的生态安全问题及对策,在生态足迹的基础之上,采用了生态压力指数模型。生态压力指数( $I_{ET}$ )模型为: $I_{ET} = e_f / e_c$ ,其中  $e_f$  为人均生态足迹, $e_c$  为人均生态承载力。如果区域生态压力指数大于 1,则表明该区域经济发展处于不可持续状态;如果区域生态压力指数等于 1,则表明该区域经济发展处于弱可持续状态;如果区域生态压力指数小于 1,则表明该区域经济发展处于可持续状态。

### 2.5 万元 GDP 生态足迹的计算方法

万元 GDP 生态足迹是指万元 GDP 占用的生态空间,即总生态足迹与万元 GDP 的比值。万元 GDP 的生态足迹越大,单位面积的生物生产性土地的产出就越低,区域资源的利用效率就越低;反之,区域资源的利用效率就越高。

## 3 咸阳市生态足迹时间序列值的计算

### 3.1 人均生态足迹(生态需求)时间序列值的计算

依据生态足迹理论和计算方法,分别计算了

1999—2006年咸阳市的生态足迹(生态需求)时间序列值。生态足迹核算的主要内容为:(1)生物资源消费,包括农产品、动物产品、林产品和水产品等27项,该部分的数据来源于1999—2006年《咸阳市统计年鉴》(咸阳市统计局);(2)能源消费,包括原煤、洗精煤、其他洗煤、焦炭、天然气、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石

油气和电力等。该部分数据除2004年因统计年鉴缺失外,其余年份的数据均来自于相应年份的咸阳市统计年鉴,2004年的数据取2003年和2005年对应数据的平均值。由于咸阳市贸易数据无法得到,故本研究在计算中忽略了贸易调整,具体的计算方法参阅参考文献[13],计算结果如表1所示。

表1 咸阳市1999—2006年人均生态足迹

年份	耕地	草地	林地	水域	建筑用地	化石能源	总计
1999	0.499 8	0.248 9	0.130 4	0.008 8	0.008 5	0.411 8	1.308 2
2000	0.461 9	0.252 2	0.140 5	0.008 4	0.004 4	0.401 4	1.268 8
2001	0.441 5	0.253 6	0.141 5	0.010 1	0.004 4	0.404 8	1.255 9
2002	0.450 7	0.299 7	0.139 8	0.010 7	0.005 0	0.422 6	1.328 5
2003	0.460 4	0.341 2	0.150 7	0.011 8	0.005 7	0.462 6	1.432 4
2004	0.505 0	0.376 1	0.176 4	0.009 4	0.006 1	0.475 5	1.548 5
2005	0.507 4	0.398 9	0.174 9	0.012 4	0.006 6	0.490 8	1.591 0
2006	0.524 6	0.431 7	0.203 9	0.012 8	0.006 9	0.482 2	1.662 1

### 3.2 人均生态承载力(生态供给)时间序列值的计算

依据生态足迹理论和计算方法,将咸阳市1999—2006年实际提供的生物生产性土地面积与均衡因子、产量因子相乘,转化为以全球平均生物生产性土地面积表示的咸阳市生态承载力。其中1999—2001年的各年的生物生产性土地面积的数值来源于

2000—2002年《咸阳年鉴年》(咸阳年鉴编纂委员会),2002—2006年的各年的生物生产性土地面积的数值来源于2002—2006年《陕西省土地利用现状数据集》(陕西省国土资源厅)。

具体的计算方法参阅参考文献[13],计算结果如表2所示。

表2 咸阳市1999—2006年人均生态承载力

年份	耕地	草地	林地	园地	水域	建筑用地	总计
1999	0.364 7	0.000 433	0.033 6	0.022 5	0.001 091	0.106 6	0.528 9
2000	0.354 1	0.000 441	0.034 4	0.022 8	0.001 069	0.104 8	0.517 6
2001	0.351 3	0.000 439	0.034 4	0.022 7	0.001 063	0.104 2	0.514 1
2002	0.345 2	0.000 429	0.034 8	0.022 4	0.000 458	0.086 1	0.489 4
2003	0.330 5	0.000 435	0.038 1	0.022 8	0.000 456	0.085 7	0.478 0
2004	0.324 9	0.000 430	0.037 7	0.022 9	0.000 451	0.090 1	0.476 6
2005	0.321 3	0.000 426	0.038 2	0.022 7	0.000 439	0.089 3	0.472 4
2006	0.306 7	0.000 421	0.037 9	0.024 9	0.000 411	0.088 8	0.459 1

注:表中的所有数据是实际可利用的生态承载力,即扣除12%的生物多样性保护面积后的生态承载力。

### 3.3 生态赤字、生态压力指数和万元GDP生态足迹时间序列值的计算

依据咸阳市1999—2006年国内生产总值的数据和表1—2的数据即可计算出咸阳市生态赤字、生态压力指数和万元GDP生态足迹的时间序列值,结果如表3所示。

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 咸阳市人均生态足迹(生态需求)构成时间序列分析

从绝对数值看,按照从1999年到2006年的顺序,耕地由(0.499 8)到(0.524 6);草地由(0.248 9)

到(0.431 7);林地由(0.130 4)到(0.203 9);水域由(0.008 8)到(0.012 8);化石能源用地由(0.411 8)到(0.482 2)呈现出不断变大的态势。建筑用地由1999年(0.008 5)到2001年(0.004 4)再到2006年(0.006 9)呈现出先降后升的态势。

表3 咸阳市1999—2006年人均生态赤字、生态压力指数和万元GDP生态足迹

年份	人均生态赤字 ( $\text{hm}^2/\text{人}$ )	生态压力指数 $I_{ET}$	万元GDP生态足迹 ( $\text{hm}^2/\text{万元}$ )
1999	0.779 3	2.473 4	2.935 1
2000	0.751 2	2.451 3	2.638 2
2001	0.741 8	2.442 9	2.584 9
2002	0.839 1	2.714 5	2.559 1
2003	0.954 4	2.996 7	2.409 8
2004	1.071 9	3.249 1	2.240 0
2005	1.118 6	3.367 9	1.818 1
2006	1.203 0	3.620 3	1.716 1

从相对数值看,在咸阳市人均生态足迹构成要素中,耕地占到31%以上,化石能源占到29%以上,草地占到19%以上,林地占到9.9%以上,而水域和建筑用地所占比重极少。耕地所占比重由1999年38.2%下降到2006年的31.6%;化石能源用地比例变化较小;草地所占比重由1999年19.0%上升到2006年的26.0%;林地则在波动中呈上升趋势,由1999年9.97%变化到2006年的12.27%。耕地、草地和林地比例的相对变化,反映了居民消费水平的提高和消费结构的多元化,人类对肉类产品和奶产品需求稳定上升,降低了对粮食作物的依赖。化石能源用地所占比例较高,说明了咸阳市工农业生产对能源的依赖度比较高,而且基本维持在30%左右。

生态足迹构成的变化反映了区域消费结构和产业结构的变化。首先,生态足迹构成的变化反映了咸阳市居民消费结构的变化。居民对资源的需求不仅仅局限于耕地生态功能的供给,同时增加了对动物性食品、化石燃料等生态产品和生态服务的需求;其次,生态足迹构成的变化反映了咸阳市产业结构的组成和变化,以机械、石化、能源为主导的资源密集型产业在咸阳市产业结构中所占比例较大(仅次于耕地达到了29%以上)。因此,咸阳市应大力发展循环经济,以提高能源利用率。

#### 4.2 咸阳市人均生态承载力(生态供给)构成时间序列分析

从绝对数值看,按照从1999年到2006年的顺序,

耕地由(0.364 7)到(0.306 7);草地由(0.000 433)到(0.000 421);水域由(0.001 091)到(0.000 411);建筑用地由(0.106 6)到(0.088 8)都呈现出不断缩小的态势。林地由(0.033 6)到(0.037 9);园地由(0.022 5)到(0.024 9)呈现出不断扩大的态势。

从相对数值看,在咸阳市人均生态承载力构成要素中,耕地占到66.78%以上,建筑用地17.60%以上,林地占到6.35%以上,园地4.25%以上,水域和草地之和不到5%。耕地所占比重在波动变化中呈下降趋势,由1999年68.95%下降到2006年66.80%;建筑用地所占比重也在波动变化中呈下降趋势,由1999年20.15%下降到2006年的19.33%;林地所占比重由1999年6.35%上升到2006年8.26%;园地所占比重由1999年的4.25%上升到2006年5.43%。耕地、林地和园地比例的相对变化,反映出了咸阳市农业产业结构的调整日趋优化,退耕还林还牧取得了重要进展。但同时也说明了耕地比率的下降是导致咸阳市人均生态承载力下降的主要原因,要提高咸阳市人均生态承载力就必须增加农业的科技投入,提高耕地的利用率和严格实行耕地保护制度。

#### 4.3 咸阳市人均生态赤字(盈余)构成时间序列分析

由表1—2的数据,经过计算可以得到耕地赤字、草地赤字、林地赤字、水域赤字和建筑用地盈余的相关数据,根据这些数据绘图得到咸阳市1999—2006年人均生态赤字(盈余)时间序列图,如图1所示。

从绝对数值看,按照从1999年到2006年的顺序,草地赤字由(0.248 5)到(0.431 3);林地赤字由(0.096 8)到(0.166 0);水域赤字由(0.007 7)到(0.012 4)呈现出不断扩大的态势。耕地赤字由1999年(0.135 1)到2001年(0.090 2)再到2006年(0.217 9)呈现出总体不断增加态势。建筑用地的生态盈余的绝对值由1999年(0.098 1)到2006年(0.081 9)呈下降的态势。

从相对数值看,耕地赤字占到12.15%以上,草地赤字占到31.88%以上,林地赤字占到11.80%以上。草地赤字所占比重由1999年31.88%上升到2006年35.85%;耕地赤字所占比重在波动变化中呈上升趋势,由1999年17.33%上升到2006年18.12%;林地赤字所占比重也在波动变化中呈上升趋势,由1999年12.42%上升到2006年13.80%。耕地、林地和草地人均生态赤字的不断增大,说明要解决咸阳市人均生态赤字不断增大的问题,就必须大力发展种植业、林业和畜牧业,特别是应大力发展畜牧业,以解决人们对肉、奶、蛋的需求。

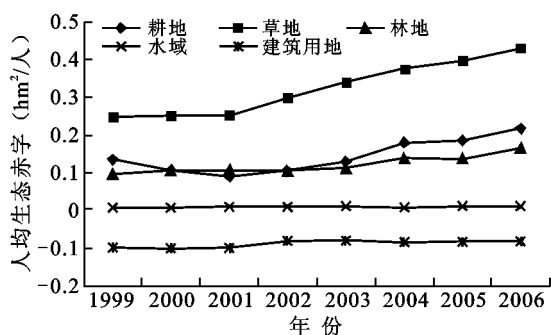


图1 咸阳市 1999—2006 年人均生态赤字

#### 4.4 咸阳市生态安全与经济发展的相关性分析

4.4.1 咸阳市生态安全分析 由表3可以看出,咸阳市人均生态赤字先由1999年(0.7793 hm<sup>2</sup>/人)到2002年(0.8391 hm<sup>2</sup>/人)再到2006年(1.2030 hm<sup>2</sup>/人),8 a 人均生态赤字增长了54.37%,表明咸阳市对自然资源和能源的利用逐年增大已经超出了生态系统的容量,生态环境已处于不可持续发展状态。以人均生态足迹作为自变量( $x$ ),以人均生态赤字作为因变量( $y$ ),做线形回归分析,得到回归方程为: $y = 1.1420x - 0.6943$ ,  $R^2 = 0.9961$ ,  $F = 1552.12$ ,通过  $F$  检验,表明人均生态足迹的不断增大是导致人均生态赤字不断增大的根本原因,它们之间具有高度的正相关性。因此,必须严格控制人口增长,从而减少生态需求,方能缓解人均生态赤字不断增大的态势。

由表3可以看出,咸阳市生态压力指数先由1999年(2.4734)到2001年(2.4429)再到2006年(3.6203),呈现出不断增加的态势,8 a 间生态压力指数始终在2.44以上,表明咸阳市的生态经济发展处于严重的不可持续状态。

4.4.2 咸阳市人均生态赤字与经济效益的相关性分析 万元GDP的生态足迹越大,则单位面积的土地的产出就越低,区域资源的利用效率就越低;反之,区域资源的利用效率就越高。由表3可以看出,咸阳市万元GDP生态足迹由1999年(2.9351 hm<sup>2</sup>/万元)到2006年(1.7161 hm<sup>2</sup>/万元)一直呈现下降的趋势,说明1999—2006年咸阳市的资源利用效率持续提高。其中1999—2004年万元GDP的生态足迹始终在2.24 hm<sup>2</sup>/万元以上,该值大于1999年全国水平(2.04 hm<sup>2</sup>/万元)<sup>[18]</sup>,显然咸阳市的资源利用效率一直在提高,但仍然低于同期的全国平均水平,说明咸阳市的资源利用方式仍处于一种消耗型、粗放型阶段。

以人均万元GDP作为自变量( $x$ ),以人均生态赤字作为因变量( $y$ ),做线形回归分析,得到回归方程为: $y = 0.8852x + 0.3724$ ,  $R^2 = 0.9197$ ,  $F =$

68.73,通过  $F$  检验,表明人均生态赤字与人均万元GDP之间具有高度的正相关性( $r = 0.9590$ )。说明随着经济的不断发展,人们对各种资源的需求会不断增大,从而引起人均生态赤字的增大。

## 5 结论与建议

在咸阳市人均生态足迹构成要素中,耕地占到31%以上,化石能源占到29%以上,草地占到19%以上,林地占到9.9%以上,而水域和建筑用地所占比重极少。可见咸阳市的发展模式主要是通过消耗自然资源存量来弥补生态承载力的不足,其中生物资源的消费主要以农产品为主,能源的消费主要以煤为主。这种对自然资源的过度依赖,应是咸阳市出现生态赤字的主要原因。化石能源足迹占总生态足迹的29%,若能减少煤和石油类的消费,如汽车和取暖改用天然气,则可大幅度降低咸阳市的生态足迹需求。

在咸阳市人均生态承载力构成要素中,耕地占到66.78%以上,建筑用地17.60%以上,林地占到6.35%以上,园地4.25%以上,水域和草地之和不到5%。耕地、建筑用地所占比重小幅下降;林地、园地所占比重小幅上升。耕地、林地和园地比例的相对变化,反映出了咸阳市农业产业结构的调整日趋优化,退耕还林还牧取得了重要进展。但同时也说明了耕地比率的下降是导致咸阳市人均生态承载力下降的主要原因,要提高咸阳市人均生态承载力就必须增加农业的科技投入,提高耕地的利用率和严格实行耕地保护制度。

咸阳市人均生态赤字呈现出先下降然后再上升的态势,8 a 人均生态赤字增长了54.37%,人均生态压力指数呈现出先下降然后再上升的态势,8 a 人均生态压力指数始终在2.44以上,表明咸阳市的生态经济发展一直处于严重的不可持续状态,并且具有不断加剧的趋势。

为了实现咸阳市生态经济的可持续发展,可采取如下措施:(1) 实行严格的人口控制政策,以控制人口的总量增长,从而减少消费,降低人均生态足迹需求,从根本上缓解生态供给矛盾。(2) 通过提高化石能源利用率和改善能源消费结构,积极开发生物能源和地热资源,降低化石能源消费绝对量。(3) 积极开展土地整理和复垦,力争做到耕地资源数量不减少甚至有所增加。强化节约用地意识,加强耕地保护和基本农田建设,加强建设用地管理,提高土地资源利用效率。(4) 调整农业生产结构,积极发展畜牧业和林果业,以满足人们对肉类、水果、奶产品和林产品的需求。(5) 改变人们的生产和生活消费方式,建立资源

节约型的社会生产和消费体系,争取资源消耗和废物排放减少,这是从人口、消费的角度促进整个社会发展模式转变的重要环节。只有在这些方面采取有效措施,减轻人类对自然的压力,才能实现可持续发展。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Wackernagel M, Rees W. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [2] Odum E P. Ecology: The link between the natural and social sciences [M]. New York: Holt Saunders, 1975.
- [3] 徐中民. 可持续发展定量研究的几种新方法评介[J]. 中国人口·资源与环境, 2000, 10(2): 60-64.
- [4] 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, 16(10): 8-10.
- [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.
- [6] 徐中民, 陈东景, 张志强, 等. 中国 1999 年的生态足迹分析[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 441-445.
- [7] 刘宇辉, 彭希哲. 中国历年生态足迹计算与发展可持续性评估[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2257-2262.
- [8] 陈六君, 毛谭, 刘为, 等. 生态足迹的实证分析: 中国经济增长中的生态制约[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(5): 53-57.
- [9] 杨世琦, 孙兆敏, 冯永忠, 等. 陕西省 2001 年生态足迹分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(9): 14-18.
- [10] 王景华, 赵善伦. 山东省 2003 年生态足迹计算与分析[J]. 山东师范大学学报: 自然科学版, 2006, 21(2): 96-98.
- [11] 薛国珍, 潘俊刚, 王尚义, 等. 太原市 2003 年生态足迹的计算与分析[J]. 地域研究与开发, 2006, 25(2): 115-119.
- [12] 王盈, 章锦河, 贾铁飞. 芜湖市 2003 年生态足迹计算与分析[J]. 上海师范大学学报: 自然科学版, 2006, 35(5): 106-110.
- [13] 赵先贵, 王书转, 马彩虹, 等. 西安市 2002 年生态足迹分析[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(6): 33-37.
- [14] 张红霞, 苏勤, 章锦河, 等. 1990—1999 年安徽省生态足迹的动态测度与分析[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 39-44.
- [15] 吴介军, 蔡琳, 张秋花, 等. 1993—2004 年陕西省生态足迹分析与评价[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 104-108.
- [16] 唐金利, 匡耀求, 黄宁生, 等. 广东省东莞市 1998—2003 年生态足迹计算与分析[J]. 热带地理, 2006, 26(2): 102-109.
- [17] 卢远, 华瑾. 广西 1990—2002 年生态足迹动态分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2004, 14(3): 49-53.
- [18] 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.
- [19] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. Ecological footprints of Nations [C]// Toronto: International Council for Local Environmental initiatives, 1997: 10-21.

(上接第 124 页)

然而,目前对于黄土蠕变特性的地区性差异和蠕变过程中土体内部微观结构的变化规律仍然缺乏相关的研究,需要岩土工作者做出进一步的努力。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Munson D E, Dawson P R. Salt constitutive modeling using mechanism maps [C]// The Mechanical Behavior of Salt of the First Conference. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984: 717-737.
- [2] Cater N L, Russell J E. Modified mechanical equation of state for rock salt [C]// The Mechanical Behavior of Salt Proceedings of the Second Conference. Germany: Trans. Tech. Publications, 1984: 409-430.
- [3] 吴紫汪, 马巍, 蒲毅彬, 等. 冻土蠕变变形形态特征的细观分析[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(3): 1-6.
- [4] 蒋甫, 应荣华. 黄土粘弹性性质的室内外试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(2): 269-273, 319.
- [5] 汪斌, 朱杰兵, 唐辉明, 等. 黄土坡滑带土的蠕变特性研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1): 49-52.
- [6] 严绍军, 项伟, 唐辉明, 等. 大岩淌滑带土蠕变性质研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 58-62, 68.
- [7] 孙学先, 张慧, 田明. 考虑多年冻土蠕变特性的抗拔桩非线性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3101-3106.
- [8] 黄小华, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 蠕变试验中黏弹组合模型参数确定方法的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1226-1231.
- [9] 于小军. 电阻率模型理论应用于海相软土蠕变研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(8): 1720-1727.
- [10] 骆亚生. 非饱和黄土在动静复杂应力条件下的结构变化特性及结构本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.