

基于灰色模型的长沙市生态足迹与生态承载力预测分析

郭荣中^{1,2}, 申海建³, 杨敏华¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 长沙环境保护职业技术学院, 长沙 410004; 3. 湖南省测绘科技研究所, 长沙 410004)

摘要:生态足迹方法是分析区域可持续发展状况的重要方法。基于生态足迹模型对长沙市 1996—2008 年的生态足迹进行计算, 并利用灰色模型对其发展趋势进行了预测分析。结果表明: 在 1996—2008 年, 长沙市人均生态足迹由 1.232 6 hm² 增加到 1.872 2 hm²; 同期人均可利用生态承载力由 0.391 8 hm² 逐年下降到 0.355 0 hm², 人均生态赤字由 1996 年的 0.840 8 hm² 增加到 2008 年的 1.517 2 hm², 呈增长趋势。同时根据预测出的研究区域 2011—2020 年的人均生态足迹和人均可利用生态承载力, 得到 2020 年研究区域人均生态赤字将增加到 2.736 3 hm², 表明当前长沙市处于一种不可持续的发展状态, 区域超负荷的生态状态呼吁当地政府部门积极采取有效措施, 发展生态经济, 建设生态文明, 以真正实现资源环境与区域经济的协调发展。

关键词:生态足迹; 生态承载力; 生态赤字; 灰色模型; 长沙市

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0195-06

Predictive Analysis on the Ecological Footprint and Carrying Capacity of Changsha City Based on Grey Model

GUO Rongzhong^{1,2}, SHEN Haijian³, YANG Minhua¹

(1. School of Info-Physics and Geomatics Engineering, Central South University,

Changsha 410083, China; 2. Changsha Environmental Protection Vocation Technical College,

Changsha 410004, China; 3. Institute of Mapping of Hu'nan Province, Changsha 410004, China)

Abstract: The ecological footprint is an important way to analyze the regional sustainable development. In the present study, the ecological footprint of Changsha City from 1996 to 2008 was calculated and analyzed by means of the ecological footprint model, while the trend of its development was predicted using the grey model. The results show that in 1996—2008, the ecological footprint of Changsha per capita increased from 1.232 6 hm² to 1.872 2 hm², the ecological carrying capacity per capita gradually decreased from 0.391 8 hm² to 0.355 0 hm², while the ecological deficit per capita increased from 0.840 8 hm² in 1996 to 1.517 2 hm² in 2008, indicating the growing trend. Likewise, according to the predicted ecological footprint and ecological carrying capacity per capita of the study area from 2011 to 2020, the ecological deficit of the study area in 2020 will increase up to 2.736 3 hm², suggesting that Changsha will be in the state of unsustainable development. The overload of regional ecological state required local governments to take effective measures to develop the ecological civilization of the ecological economy construction, to achieve the coordinated development of resource environment and regional economy.

Keywords: ecological footprint; ecological carrying capacity; ecological deficit; gray model; Changsha City

生态足迹(Ecological Footprint, EF)模型最早是在 1992 年由加拿大生态经济学家 Willian Rees 等提出, 并于 1996 年由其博士生 Wackemagel 完善的一种衡量可持续发展能力的方法^[1-2]。生态足迹模型在 1999 年引入我国后^[3], 国内学者相继进行了生态足迹法的理论研究和实证分析, 分别从国家^[4-5]、省

域^[6-11]、城市^[12-13]等不同尺度进行了积极探讨, 以及对某个行业的生态足迹进行分析, 主要集中在对水资源生态足迹的研究^[14-15]和对旅游生态足迹的分析^[16]。研究表明, 通过对生态足迹的计算与分析, 定量了解人类对自然的利用状况, 定量测量人类的需求是否处于自然的再生产能力之内, 计算出人们对资

源、能源的利用状况,从而确定城市资源与环境承载力现状水平,评价区域可持续发展状况。

本文应用生态足迹模型,在计算长沙市 1996—2008 年的人均生态足迹与人均可利用生态承载力的基础之上,分析评价长沙市近 13 a 的可持续发展状况,建立基于 GM(1,1)灰色预测的人均生态足迹与人均可利用生态承载力预测模型,进而预测 2011—2020 年长沙市人均生态足迹、人均可利用生态承载力以及生态赤字状况,定量判断长沙市目前可持续发展的状态,以期为长沙市未来人类生存和社会经济发展做出科学规划和建议,为政府或相关部门制定政策与规划提供科学、合理的依据,为“两型”社会核心区的长沙市各类土地利用结构调整和空间优化布局起到参考作用。研究结果既能够反映出长沙市的资源消耗强度,又能够反映出长沙市的资源供给能力和资源消耗总量,揭示了人类持续生存的生态阈值。本文从不同的空间尺度上加强对生态足迹方法的研究,强调自然生态环境在可持续发展中的基础地位,在研究方法也进行一些有益的探索,丰富了中国生态足迹的研究成果,同时倡导可持续的发展观与朴素、适度、注重环保的生态消费理念,以在全社会牢固树立生态文明观,提高公众生态保护意识。

1 生态足迹模型

生态足迹模型主要基于两个基本的事实:一是人类可以保留大部分消费的资源以及大部分产生的废弃物;二是这些资源和废弃物能转换成相应的生物生产性土地面积^[17-19]。它是在对土地面积量化的基础上,在社会发展的需求层面上计算出生态足迹的大小,在生态环境的供给层面上计算出生态承载力的大小,进而评价区域可持续发展状况。在该模型中,将各种资源和能源消费项目折算为耕地、林地、草地、建筑用地、化石燃料土地和水域 6 种类型的生态生产性土地面积之后,再进行均衡处理,将这些具有不同生态生产力的土地生产面积,转化为具有相同生态生产力的面积。

1.1 生态足迹的计算

首先是计算各类消费帐户的人均生态足迹(A_i),计算公式为:

$$A_i = C_i / Y_i = (P_i + I_i - E_i) / (Y_i \times N) \quad (1)$$

式中: i ——消费项目的类型; Y_i ——食物生产性土地第 i 种消费项目的世界平均产量; C_i ——第 i 种消费项目当地的人均消费量; P_i, I_i, E_i ——第 i 种消费项目的年生产量、年进口量、年出口量; N ——人口数。

在此基础上再进行生态足迹的计算,由于每一类

土地类型的生产力不同,将各种类型的生物生产性土地面积乘以一个相应的均衡因子^[3],以使不同生物生产性土地类型的空间汇总为区域的生物生产力和生态足迹。区域人均生态足迹(ef)的计算公式为:

$$ef = \sum r_i A_i = \sum r_i (P_i + I_i - E_i) / (Y_i \times N) \quad (2)$$

式中: r_i ——均衡因子。

区域总人口的生态足迹(EF)计算公式:

$$EF = N \times (ef) \quad (3)$$

式中: N ——人口数。

1.2 生态承载力的计算

在计算生态承载力时,由于同类生物生产性土地的生产力存在地区差异,将其面积乘以一个相应的产量因子^[3],以使不同区域同类生物生产性土地面积可进行对比。区域人均生态承载力(ec)的计算公式:

$$ec = \sum C_j = \sum a_j \times r_j \times y_j \quad (4)$$

式中: C_j ——第 j 种消费项目的人均生态承载力分量; a_j ——人均生物生产面积; r_j, y_j ——均衡因子和产量因子。

区域总生态承载力(EC)的计算公式:

$$EC = N \times (ec) \quad (5)$$

1.3 生态盈余与生态赤字的计算

生态赤字与生态盈余是用来反映区域人口对自然资源的利用状况。区域生态足迹如果超过了区域所能提供的生态承载力,就出现生态赤字;反之则表现为生态盈余。

2 长沙市 1996—2008 年生态足迹和生态承载力的计算及结果分析

2.1 长沙市 2008 年生态足迹计算

根据《长沙统计年鉴》(2009),应用上述生态足迹的计算方法,对长沙市 2008 年生态足迹进行计算和分析。该计算分为两个部分:生物资源消费和能源消费。

2.1.1 生物资源消费 本文将生物资源消费分为农作物产品、动物产品、林产品等消费项目,同时采用联合国粮农组织 1993 年计算的有关生物资源的世界平均产量数据,对生物资源生产面积进行折算。长沙市 2008 年生物资源生态足迹消费计算结果见表 1。

2.1.2 能源消费 长沙市能源消费主要包括:原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、其他燃料、汽油、煤油、柴油、燃料油、其他石油制品、液化石油气、天然气、其他煤气、电力、热力共 16 种,对于原煤、天然气等一次能源的消费,根据全球平均发热量和折算因子统一为化石燃料用地面积;对于二次能源电力和热力,本文将其生态足迹转化为吸收用煤发电过程中排放 CO_2 的化石燃料用地,是间接的煤炭消费生态足迹。对于

建筑用地,本文按居民点及工矿用地、交通用地之和 据,本文在计算生态足迹时未考虑贸易商品量,计算
计算。由于缺乏长沙市进出口及国内贸易的详细数 结果见表 2。

表 1 2008 年长沙市生物资源生态足迹消费

项目	全球平均生产量/(kg·hm ⁻²)	生产量/t	总的足迹/(hm ² /人)	人均足迹/(hm ² /人)	生产类型面积
稻谷	2744	2405060	876480	0.135859	耕地
小麦	2744	529	193	0.000030	耕地
玉米	2744	21267	7750	0.001201	耕地
高粱(及其他杂粮)	2744	595	217	0.000034	耕地
豆类	1856	9768	5263	0.000816	耕地
薯类	12607	42925	3405	0.000528	耕地
棉花	1000	941	941	0.000146	耕地
油料	1856	61421	33093	0.005130	耕地
麻类	1500	266	177	0.000027	耕地
甘蔗	18000	7729	429	0.000067	耕地
烟叶	1548	23596	15243	0.002363	耕地
蔬菜	18000	3845567	213643	0.033116	耕地
瓜果类	18000	154559	8587	0.001331	耕地
猪肉	74	576032	7784216	1.206593	草地
家禽肉	33	81062	2456424	0.380758	草地
禽蛋	400	50317	125793	0.019498	草地
牛肉	33	10461	317000	0.049137	草地
羊肉	33	12588	381455	0.059127	草地
其他肉类	33	1475	44697	0.006928	草地
牛奶	502	6371	12691	0.001967	草地
蜂蜜	50	713	14260	0.002210	草地
园林水果	3500	134376	38393	0.005951	林地
茶叶	566	24703	43645	0.006765	林地
木材	1.99	34.80	174874	0.027106	林地
水产品	29	96395	3323966	0.515232	水域

注:木材的全球平均产量的单位为 m³/hm²,其生物量的单位为 10⁴m³。

表 2 2008 年长沙市能源生态足迹消费

项目	全球平均能源足迹/ (GJ·hm ⁻²)	折算系数/ (GJ·t ⁻¹)	消费量/t	人均消费量/ (GJ/人)	人均生态足迹/ (hm ² /人)	生态生产性 土地类型
原煤	55	20.934	4134688	13.4166	0.24394	化石燃料土地
洗精煤	55	26.344	74159	0.3028	0.00551	化石燃料土地
其他洗煤	55	8.363	615	0.0008	0.00001	化石燃料土地
型煤	55	8.363	6550	0.0085	0.00015	化石燃料土地
焦炭	55	28.470	50340	0.2221	0.00404	化石燃料土地
其他燃料	55	8.363	23092	0.0299	0.00054	化石燃料土地
汽油	93	43.124	109590	0.7325	0.00788	化石燃料土地
煤油	93	43.124	6557	0.0438	0.00047	化石燃料土地
柴油	93	42.705	282383	1.8692	0.02010	化石燃料土地
燃料油	71	50.160	90311	0.7022	0.00989	化石燃料土地
其他石油制品	71	50.160	7045	0.0548	0.00077	化石燃料土地
液化石油气	71	50.160	960	0.0075	0.00011	化石燃料土地
天然气	93	38.979	99245	0.5996	0.00645	化石燃料土地
其他煤气	93	17.981	867	0.0024	0.00003	化石燃料土地
电力	1000	11.840	2133283	3.9151	0.00392	建筑用地
热力	1000	29.340	284301	1.2930	0.00129	建筑用地

注:电力、热力数据均转化为标准煤。

2.2 长沙市 2008 年生态承载力的计算

根据长沙市 2008 年实际能够提供的人均生物生

产面积,计算长沙市人均生态足迹,并和长沙市的生态足迹进行汇总和比较,具体见表 3。

表 3 2008 年长沙市生态足迹需求与供给对比

土地类型	生态足迹的需求			土地类型	生态足迹的供给(生态承载力)		
	人均面积/ (hm ² /人)	均衡因子	人均均衡面积/ (hm ² /人)		人均面积/ (hm ² /人)	均衡因子	人均均衡面积/ (hm ² /人)
耕地	0.1806	2.80	0.5058	耕地	0.0435	1.66	0.2020
草地	1.7262	0.50	0.8631	草地	0.0000	0.19	0.0000
林地	0.0398	1.10	0.0438	林地	0.0953	0.91	0.0954
建筑用地	0.0052	2.80	0.0146	建筑用地	0.0222	1.66	0.1032
水域	0.5152	0.20	0.1030	水域	0.0136	1.00	0.0027
化石能源用地	0.2999	1.14	0.3419	CO ₂ 吸收	0.0000	0.00	0.0000
合计			1.8722	生态承载力			0.4034

由表 3 可得出,2008 年长沙市的人均生态足迹为 1.872 2 hm²,而实际生态承载力为 0.403 4 hm²,扣除要预留 12% 的生物多样性保护用地(0.048 4 hm²)后,人均可利用生态承载力为 0.355 0 hm²,则人均生态赤字为 1.517 2 hm²。这表明长沙市的人类负荷已经超过了其生态容量。其中人均耕地、人均草地、人均水域、人均化石能源用地生态足迹为赤字,反映了长沙市对耕地、草地、水域、化石能源用地需求过高,本地对应的自然资源无法提供保障,需从外地通过贸易输入;人均林地、人均建筑用地生态足迹为盈余,分别为 0.051 6 hm² 和 0.088 6 hm²,反映了长沙市人均林地和建筑用地的需求在生态系统承载范围之内。

2.3 长沙市 1996—2008 年生态足迹动态变化趋势

采用上述生态足迹计算方法,以长沙统计年鉴(1997—2009)的数据为基础,分别计算长沙市 1996—2008 年生态足迹及生态赤字情况,以此来分析长沙市生态足迹变化趋势(表 4)。

表 4 的数据表明,长沙市人均生态足迹由 1996 年的 1.232 6 hm² 逐年增加到 2007 年 1.941 3 hm²,达到峰值,2008 年略微下降到 1.872 2 hm²;同期人均可利用生态承载力由 1996 年的 0.391 8 hm² 逐年持续下降到 2008 年 0.355 0 hm²。研究期间,长沙市人均生态足迹和人均可利用生态承载力呈反向发展,必然造成人均生态赤字呈增长趋势,由 1996 年的 0.840 8 hm² 逐年增加到 2007 年的峰值 1.582 7 hm²,2008 年略微下降到 1.517 2 hm²。1996—2008 年,长沙市人均生态足迹的需求 1996—2002 年缓慢增长,2003 年之后呈快速增长趋势,同期人均生态足迹的供给基本持平,导致人均生态赤字的变化趋势与人均生态足迹的需求变化趋势相同,说明长沙市的生态发展趋势不容乐观。造成这种趋势的原因,主要是由于长沙市对自然资源和能源的利用逐年增大已经

超出了市内生态系统的容量。因此,长沙市生态环境已接近不可持续发展状态。

表 4 1996—2008 年长沙市人均生态足迹供给与需求、生态赤字变化趋势

年份	人均生态足迹的需求	人均生态足迹的供给(生态承载力)	人均可利用生态承载力	人均生态赤字
	hm ² /人	hm ² /人	hm ² /人	hm ² /人
1996	1.2326	0.4453	0.3918	0.8408
1997	1.3237	0.4423	0.3893	0.9344
1998	1.3227	0.4381	0.3855	0.9372
1999	1.3474	0.4347	0.3825	0.9649
2000	1.3749	0.4328	0.3809	0.9940
2001	1.3947	0.4327	0.3808	1.0139
2002	1.3532	0.4277	0.3764	0.9768
2003	1.4418	0.4236	0.3728	1.0691
2004	1.6877	0.4199	0.3695	1.3183
2005	1.8440	0.4140	0.3643	1.4798
2006	1.9015	0.4116	0.3622	1.5393
2007	1.9413	0.4075	0.3586	1.5827
2008	1.8722	0.4034	0.3550	1.5172

注:人均可利用生态承载力是指生态承载力扣除了要预留的 12% 的生物多样性保护用地后的值。

3 长沙市 2011—2020 年生态足迹预测

3.1 预测方法

为了预测 2011—2020 年长沙市人均生态足迹、人均可利用生态承载力以及生态赤字状况,本文利用 GM(1,1)模型^[20],即:

$$\hat{x}^{(1)}(t+1) = (x_{(1)}^{(0)} - \frac{u}{a}e^{-at}) + \frac{u}{a}[x_{(1)}^{(1)} \supset x_{(1)}^{(0)}] \quad (6)$$

$$\hat{x}^{(0)}(t) = \hat{x}^{(1)}(t) - \hat{x}^{(1)}(t-1) \quad (7)$$

3.2 预测结果

以 1996—2008 年长沙市人均生态足迹、人均可利用生态承载力为基础,利用 GM(1,1)模型即式(6),(7),预测研究区域 2011—2020 年生态赤字状况,预测模型见表 5。

表 5 长沙市人均生态足迹和人均可利用生态承载力预测模型

	灰色预测模型	模型检验	相对误差值/%
人均生态足迹	$\hat{x}(t+1)=9.735424859e^{0.1239t}-8.502824859\ (t=1,2,\cdots,n)$	优	2.98
人均可利用生态承载力	$\hat{x}(t+1)=-15.12181868e^{-0.0257t}+15.51361868\ (t=1,2,\cdots,n)$	优	0.21

注:e 为常量,其值为 2.718 28;t 为预测时间。

通过计算相对误差来检验预测模型的精度,当相对误差绝对值小于 3%时,说明模型精度是非常高的^[20],相对误差越小,表示精度越高。由表 5 可知,人均生态足迹和人均生态承载力的预测模型相对误差均小于 3%,这表明预测模型可信度高。同时以长沙 2012 年统计年鉴的数据为基础,计算长沙市 2011 年生态足迹及生态赤字情况,以此进一步验证预测模型的准确性,计算结果表明 2011 年长沙市人均生态足迹为 2.052 3 hm²,人均可利用生态承载力为 0.343 4 hm²,人均生态赤字为 1.708 9 hm²,而根据表 6 的模型预测结果可知,2011 年长沙市人均生态足迹与人均可利用生态承载力将分别达到 2.107 9 hm² 和 0.346 2 hm²,其生态赤字达到 1.761 7 hm²,所以实际值与预测模型值的相对误差分别为 2.7%和 0.8%,表明预测模型精度较高。

根据表 5 的模型预测 2011—2020 年长沙市的人均生态足迹和人均生态承载力,预测结果见表 6,2020 年人均生态足迹和人均可利用生态承载力分别达到 3.056 8 hm² 和 0.320 5 hm²,生态赤字达到 2.736 3 hm²。可见,必须采取一系列有效的措施,提高土地生产力,减少能源消耗,发展清洁能源,控制人口增长,改变现有的经济发展模式、加大科技创新。否则,长沙市生态赤字将会不断加大,可持续发展状况进一步恶化。

表 6 2011—2020 年长沙市人均生态足迹供给与需求、生态赤字变化预测

年份	人均生态 足迹的需求	人均可利用 生态承载力	人均生态 赤字
2011	2.1079	0.3462	1.7617
2014	2.3859	0.3374	2.0485
2017	2.7006	0.3289	2.3717
2020	3.0568	0.3205	2.7363

4 结论与讨论

(1) 1996—2008 年,长沙市人均生态足迹由 1.232 6 hm² 增加到 1.872 2 hm²;同期人均可利用生态承载力由 0.391 8 hm² 逐年下降到 0.355 0 hm²,人均生态赤字呈增长趋势,由 1996 年的 0.840 8 hm² 增加到 2008 年的 1.517 2 hm²,研究期间生态足迹一直存在生态赤字,即不可持续发展状

态。反映了该研究区域生态系统为人类提供各种服务能力在持续下降,需要通过从外地不断地输入生态足迹,才能维持现有的生活水平和消费水平。

(2) 利用 GM(1,1)模型,预测研究区域 2011—2020 年人均生态足迹、人均生态承载力以及生态赤字状况。研究发现,该区域到 2020 年人均生态赤字达到 2.736 3 hm²。对于这种不容乐观的生态前景,当地政府必须引起高度重视并进行有效控制。

(3) 根据研究区域的具体情况,建议采取的措施主要有:① 以资源和能源的利用为核心,以推行清洁生产、废物综合利用、调整产业链、资源优化合理利用为手段,探索符合长沙实际的“两型”产业发展有效模式与途径,突出抓好重点行业、重点企业、重点地区的能耗管理和排污监控,坚决淘汰落后产能和“五小”企业,加快资源循环利用产业发展、强化污染物减排和治理,重点流域水污染防治,发展环保产业,促进企业的循环经济发展。② 积极推进能源结构调整,发展新能源和可再生能源,在生产 and 生活中大力推广清洁能源,同时进一步提高能源的使用效率,实施重点节能工程,探索节能减排的激励约束机制。③ 在经济建设与土地开发利用过程中,采取积极的生态保护措施,完善农地生态补偿机制,加强生态工程治理,完善土地管理制度,合理安排建设用地、生态用地和基本农田用地,进一步强化合理规划、立体开发,在城市建设、园区开发、农民安置、道路建设、农业开发等重点领域降低土地资源消耗,积极实施一批集约用地、节能改造等示范工程,积极探索资源节约利用的“长沙模式”。④ 加快水利基础设施的建设,城乡防洪防旱能力的增强;加快地质灾害易发区调查评价体系、监测预警体系、防治体系、应急体系的建立。加快完成湘江、浏阳河及奎塘河两岸水土修复、生态防护林建设、沿江风光带建设。重点加强湘江流域长沙段全程监控治理,推进湘江流域生态经济带建设。⑤ 以创建“全国生态市”和“国家环境保护模范城市”为重点,按照市域和都市区两个层次,建设结构性绿地,保护“一江、四水、五洲、十山”为骨架的自然生态系统,加快城市绿色空间体系的建设,长沙市中心城区范围内以景观性绿地为主,城区以外区域以生态绿地为主,以湘江生态廊道为生态环境绿化系统中的主轴,以浏阳河、洩水河、捞刀河、靳江河生态绿化带构建市域大

绿色空间的生态骨架;加强东、西、南、北四个农业生态区的建设。以促进研究区域重点生态功能区的保护和管理,增强涵养水源、保持水土能力,保护生物多样性。

参考文献:

- [1] Waker Nagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996:30-100.
- [2] Rees W E. Revisiting carrying capacity: area-based indicators of sustainability[J]. Population and Environment, 1996, 17(3):195-215.
- [3] 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:学术版, 2000(10):8-10.
- [4] 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.
- [5] 陈成忠,林振山.中国 1961—2005 年人均生态足迹变化[J].生态学报, 2008, 28(1):338-344.
- [6] 王建源,陈艳春,李曼华,等.基于能值分析的山东省生态足迹[J].生态学杂志, 2007, 26(9):1505-1510.
- [7] 张恒义,刘卫东,林育欣,等.基于改进生态足迹模型的浙江省域生态足迹分析[J].生态学报, 2009, 29(5):2738-2748.
- [8] 宫继萍,潘竟虎,石培基.基于生态足迹和灰色关联度的甘肃省可持续发展研究[J].水土保持研究, 2011, 18(2):198-201.
- [9] 高标,崔凤午.吉林省生态足迹与生态承载力动态变化分析
- 与预测研究[J].水土保持研究, 2012, 19(6):105-110.
- [10] 郑晖,石培基,何娟娟.甘肃省生态足迹与生态承载力动态分析[J].干旱区资源与环境, 2013, 27(10):13-18.
- [11] 安宝晟,程国栋.西藏生态足迹与承载力动态分析[J].生态学报, 2014, 34(4):1002-1009.
- [12] 王保利,李永宏.基于旅游生态足迹模型的西安市旅游可持续发展评估[J].生态学报, 2007, 27(11):4777-4784.
- [13] 何淑勤,郑子成,孟庆文,等.基于生态足迹的雅安市土地生态安全研究[J].水土保持研究, 2010, 17(6):118-122.
- [14] 王宁,栗晓玲.陕西关中地区水资源生态足迹与生态赤字研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(3):221-227.
- [15] 李健,张吉辉.水足迹视角下区域水资源灾变的灰色拓扑预测[J].天津大学学报:社会科学版, 2013, 15(1):1-4.
- [16] 章锦河,张捷.旅游生态足迹模型及黄山市实证分析[J].地理学报, 2004, 59(5):763-771.
- [17] Haberl H, Wackernagel M, Krausmann F, et al. Ecological footprints and human appropriation of net primary production: a comparison[J]. Land Use Policy, 2004, 21(3):279-288.
- [18] Kitzes J, Moran D, Galli A, et al. Interpretation and application of the Ecological Footprint: A reply to Fiala (2008)[J]. Ecological Economics, 2009, 68(4):929-930.
- [19] 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.
- [20] 程建权.城市系统工程[M].武汉:武汉大学出版社, 1999.

(上接第 194 页)

- [13] Xuebin Zhang, Feng Yang. RClimDex(1.0) User Manual[S]. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario Canada, 2004.
- [14] Keggenhoff I, Elizbarashvili M, Amiri-Farahani A, et al. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971—2010[J]. Weather and Climate Extremes, 2014(4):75-85.
- [15] Croitoru A, Chitoroiu B, Todorova V I, et al. Changes in precipitation extremes on the Black Sea Western Coast[J]. Global and Planetary Change, 2013, 102(3):10-19.
- [16] 杜军,路红亚,建军. 1961—2012 年西藏极端降水事件的变化[J].自然资源学报, 2014, 29(6):990-1002.
- [17] 宋敏红,马耀明,张宇,等.雅鲁藏布江流域气温变化特征及趋势分析[J].气候与环境研究, 2011, 16(6):760-766.
- [18] Huang N E, Wu Z H. A review on Hilbert-Huang Transform: Method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2), DOI: 10.1029/2007RG000228.
- [19] 孙银凤,陆宝宏.基于 EEMD 的南京市降水特征分析[J].中国农村水利水电, 2013(3):5-9.
- [20] 李慧群,付遵涛.基于 EEMD 的中国地区 1956—2005 年日照变化的趋势分析[J].北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(3):393-398.
- [21] 孙阳,陈元芳,程龙,等.基于 EEMD 的枯水季入库径流预报分析[J].中国农村水利水电, 2012(2):34-37.
- [22] 薛春芳,侯威,赵俊虎,等.集合经验模态分解在区域降水变化多尺度分析及气候变化响应研究中的应用[J].物理学报, 2013, 62(10):504-511.
- [23] 陈昌春,张余庆,王腊春,等.基于 RClimDex 模型的江西省极端降水时空变化研究[J].中国农村水利水电, 2013(11):41-45.