

基于三角模型的甘肃省资源环境承载力动态评价

黄鑫 程文仕*

(甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070)

摘要 [目的]运用三角模型对甘肃省资源环境承载力进行动态评价。[方法]从资源禀赋和环境容量、经济发展协调度及社会安全稳定度3个方面构建甘肃省资源环境承载力评价指标体系,借助三角模型,对2004~2013年甘肃省资源环境承载力进行动态评价。[结果]2004~2013年甘肃省资源环境承载力经历了弱、较弱、中等和较强承载4个状态阶段,承载水平呈良性发展态势。承载水平具有向强承载力方向变动的可能。资源禀赋和环境容量指数和非经济发展协调度指数趋向于优质水平,非社会安全稳定度指数对资源环境承载力的负面载荷仍然存在。[结论]三角模型是开展资源环境承载力评价较为理想的方法。

关键词 资源环境承载力;三角模型;甘肃省

中图分类号 S181 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2016)18-068-04

DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2016.18.022

Dynamic Evaluation of Resources and Environment Carrying Capacity in Gansu Based on the Triangle Model

HUANG Xin, CHENG Wen-shi (College of Resources and Environmental Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract [Objective] The aim was to evaluate resources and environment carrying capacity in Gansu Province based on the triangle model. [Method] The evaluation index system of Gansu resources and environment carrying capacity was conceived from the aspects of resources contain and environmental capacity, coordinate extent of economical development and stable degree of social security, this study put forward evaluation for resources and environment carrying capacity by taking 10 observe years during 2004 to 2013 of Gansu based on the triangle model. [Result] The results showed that: during 10 years, Gansu resources and environment carrying capacity experienced four phases, as weak capacity, inferior capacity, moderate capacity and strong capacity, it also showed an appropriate tendency. In general, it presented increase trend, resources contain and environment carrying capacity and the non economic development coordination index tended to be of high quality, negative loading of non social security stability index still exist. [Conclusion] Triangle model is proper method for evaluating resources and environment carrying capacity.

Key words Resources and environment carrying capacity; Triangle model; Gansu Province

资源环境承载力是指在自然生态环境不受危害并维系良好生态系统的前提下,一个区域的资源禀赋和环境容量所能承载的经济社会活动的规模^[1]。它是衡量人类活动特别是社会经济活动与资源环境协调性的重要指标之一。开展资源环境承载力定量研究,对探寻社会、经济、生态文明和谐发展路径,实现可持续具有重要的现实意义。目前,国内外学者针对资源环境承载力研究已取得一定成果。Saveriades研究^[2]认为,区域综合环境承载力由设施承载力、资源环境承载力、经济社会承载力及社会心理承载力综合反映。唐凯等^[3]采用集对分析法对长株潭城市群资源环境承载力进行评价。熊建新等^[4]从生态弹性力、资源环境承载力及社会经济协调力出发,采用状态空间法,对洞庭湖区生态承载力进行评价。李悦等^[5]从资源环境支撑系统、保育系统、经济系统和耗散系统4个维度,采用GRA-TOPSIS对武汉市资源环境承载力进行测度和分析。卢小兰^[6]采用纵横向拉开档次法及莫兰指数对我国省域资源环境承载力及空间自相关进行统计分析。孙茜等^[7]通过资源、环境、经济和社会4级指标,采用突变级数和障碍因素模型对河南省资源环境承载力进行定量研究。郭轲等^[8]从压力指标和承压指标2个维度,研究京津冀地区资源环境承载力,并结合时间序列Tobit模型分析京津冀地区资源环境承载力的驱动因素。从指标体系的构建来看,基于“压力-承载”的二维指标及包含“弹性-承载-协调”的复合系统都有应用,但普适性指标系统尚未形成定论。从研究内容和方法来看,资源环境承载力在

城市群^[9]、水资源^[10]、产业调整^[11]、交通运输^[12]等领域得到广泛应用。研究方法包括多因素综合评价^[1]、TOPSIS^[5]、状态空间^[8]、动态因子^[13]、模糊物元^[14]、GIS综合^[15]等。就研究区域和尺度而言,主要包括省域、市域的横向比照和纵向分析,以长株潭^[3]、京津冀^[16]、长三角^[17]等为代表的城市群探讨,以及以山区^[18]、矿区^[19]、灾害区^[20]等生态敏感区为对象的研究分析。

甘肃省地处我国西部内陆,经济发展相对落后。西部大开发战略实施以来,甘肃省社会经济得到了长足进步,但生态基础薄弱、发展方式粗放的先天不足,使得原本脆弱的环境保护能力和有限的资源供给水平更显紧张。笔者采用三角模型,定量评估了2004~2013年甘肃省资源环境综合承载力,客观反映区域内资源环境承载力动态变化情况,以期甘肃省土地利用总体规划及国民经济和社会发展规划提供科学依据与理论参考。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况 甘肃省位于我国西部,地处黄河中上游,地理坐标为 $92^{\circ}13' \sim 108^{\circ}46' E$, $32^{\circ}31' \sim 42^{\circ}57' N$, 总面积42.58万 km^2 ,属大陆性温带季风气候,境内大部分地区气候干燥,差异明显,生态环境复杂多变。辖区内地貌类型多样,地势自西南向东北倾斜。全省辖12个市2个自治州86个县(市、区)。2013年末全省常住人口2582.2万人,生产总值6268.01亿元。2013年发生各类地质灾害3860次,是2004年的近200倍。2013年工业废水排放量20171.00万 t , SO_2 排放量56.20万 t ,烟粉尘排放量22.66万 t ,一般工业固体废物产生量5907.00万 t ,分别是2004年的1.10、1.16、1.

作者简介 黄鑫(1986-)男,河南洛阳人,助教,硕士,从事土地评价研究。*通讯作者,副教授,博士,从事土地整治研究。

收稿日期 2016-05-23

43 和 2.76 倍。社会经济快速发展的同时,对资源需求和环
境安全带来了巨大耗损和压力。

1.2 数据来源 研究数据主要来源于《甘肃省统计(发展)
年鉴》(2005~2014 年)和《中国环境统计年鉴》(2005~2014
年)等相关数据源。

1.3 研究方法

1.3.1 模型概述。三角模型是美国农业部根据土壤粒径的
比例构成存在此长彼消的关系构建的一种用来分析土壤中
砂-粉砂-黏土的各自含量,并以此确定土壤类型的分析方
法^[21]。该方法计算过程简单、分析方式灵活,可对 3 个相互
联系的方面进行可视化描述,很好地图解综合状况和变动趋
势^[22]。因此,在诸多领域得到广泛应用^[23-25]。

构建资源环境承载力的三角模型的步骤:①根据三角模
型的性质,将资源环境承载力巨系统分解为 3 个既相互联系
又存在此消彼长关系的评价指标体系;②收集并处理研究区
研究时段的相关数据,在原始数据标准化的基础上,确定权
重,计算指数;③借助 Grapher 等软件构建模型图;④对资源
环境承载力状态及趋势进行评价和分析。

1.3.2 模型合理性判别。从资源禀赋和环境容量、经济发
展协调度、社会安全稳定度 3 个维度,构建三角模型。资源
禀赋和环境容量能够反映区域所能承载的经济、社会活动的
规模;经济发展协调度反映在利益刺激的推动下,资源环境
的耗损程度;社会安全稳定度能够反映满足社会人基本生存
需求的情况下,资源环境的承载负荷。资源禀赋和环境容量
提高,表明对社会经济活动的容纳能力提升;经济协调发展,
表明对资源的需求量和对环境的破坏力在可接受的范围内
浮动;社会安全稳定,表明社会发展水平适宜,人口膨胀系数
小,资源环境能够提供基本的物质需求。为了满足构建三角
模型此消彼长关系的要求,需要对 3 方指标进行适度转化^[21]。
资源禀赋和环境容量是评价资源环境承载力的核心

构件,效能越大,表示承载力越强,因此将其作为三角模型的
顶点。资源禀赋和环境容量与社会经济发展的矛盾客观存
在,因此将经济发展协调度及社会安全稳定度转化为非经济
发展协调度和非社会安全稳定度。3 项中任意 1 项增加,其余 2
项指数中至少有 1 项指数变小,符合三角模型构建原理^[21]。

将 3 类指数进行可视化表达,构建等边三角形(图 1)。资源禀赋和环境容量指数(REI)位于最高顶点,非经济发展协调度指数(NECI)及非社会安全稳定度指数(NCSI)分别位于左下和右下顶点,X、Y、Z 轴分别表示 NCSI、REI、NECI。坐标轴按逆时针方向在 [0, 1] 分布,并按照等分值法将各指数划入 5 个不同范围,即非常低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)、非常高(0.8~1.0)。将三角形细分为 5 个区域:I~V 分别表示不同资源环境承载能力,再根据 3 类指数相对比例变化,识别出 T₁~T₇ 7 种承载力运动趋势(表 1、2)。

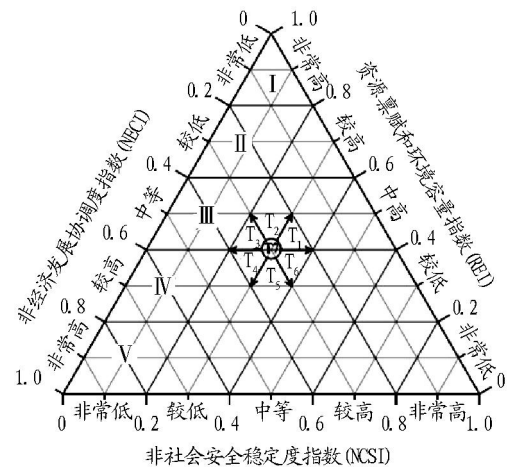


图 1 资源环境承载力状态及趋势

Fig. 1 Status and trends of resources and environment carrying capacity

表 1 资源环境承载力状态评价

Table 1 Relative status evaluation of resources and environment carrying capacity

区域 Region	指标数值范围 Index numerical range			相对指标值 Relative index			资源环境承载力 Resources and environment carrying capacity
	REI	NCSI	NECI	REI	NCSI	NECI	
I	>0.8~1.0	0~0.2	0~0.2	非常高	非常低	非常低	强
II	>0.6~0.8	0~0.4	0~0.4	较高	非常低~较低	非常低~较低	较强
III	>0.4~0.6	0~0.6	0~0.6	中等	非常低~中等	非常低~中等	中等
IV	>0.2~0.4	0~0.8	0~0.8	较低	非常低~较高	非常低~较高	较弱
V	0~0.2	0~1.0	0~1.0	非常低	非常低~非常高	非常低~非常高	弱

1.3.3 资源环境承载力三角模型的构建。

1.3.3.1 指标体系构建。合理的指标体系是保证评价结果
准确有效的关键。根据三角模型的基本要求,在借鉴前人研
究成果的基础上,考虑甘肃省实际情况,从资源禀赋和环境
容量、经济发展协调度及社会安全稳定度 3 个方面,选择了
人均土地面积、人均水资源等 20 个指标作为资源环境承载
力评价的指标体系(表 3)。

1.3.3.2 数据处理与权重确定。为保证数据的可比性,需
消除数据量纲、极性不一等问题,采用极差法对数据进行标
准化处理。正、负向指标分别使用式(1)和式(2)进行计算:

$$X'_{ij} = (X_{ij} - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \tag{1}$$

$$X'_{ij} = (X_{max} - X_{ij}) / (X_{max} - X_{min}) \tag{2}$$

式中 X_{ij} 为原始数据; X_{max} 和 X_{min} 为原始指标的最大值和最小
值; i 表示研究年份; j 表示指标个数(j=1, 2, …, 20)。

采用熵权法确定各指标对资源环境承载力的贡献程度，
计算公式如下：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}$$

(3) 式中 e_j 指标信息熵 w_j 指标权重。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (4)$$

表 2 资源环境承载力相对趋势评价

Table 2 Relative trends evaluation of resources and environment carrying capacity

趋势 Trends	指数变化范围 Variation range of index//°	指数变化的相对方向 Relative direction of index change			相对承载力趋势 Relative carrying capacity trend
		REI	NCSI	NECI	
T ₁	0 ~ 60	↑	↑	↓	中等
T ₂	60 ~ 120	↑	↓	↓	较强
T ₃	120 ~ 180	↑	↓	↑	中等
T ₄	180 ~ 240	↓	↓	↑	较弱
T ₅	240 ~ 300	↓	↑	↑	弱
T ₆	300 ~ 360	↓	↑	↓	较弱
T ₇	—	—	—	—	较弱

表 3 资源环境承载力评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of resources and environment carrying capacity

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	单位 Unit	指标说明 Index description	性质 Property
资源禀赋和环境容量 Resource endowment and environmental capacity	人均土地面积	hm ² / 人	耕地面积 / 总人口	+
	人均水资源	m ³ / 人	水资源量 / 总人口	+
	人均能源占有量	t 标准煤 / 人	可供消费的能源总量 / 总人口	+
	垦殖指数	%	耕地面积 / 土地总面积	+
	森林覆盖率	%	森林面积 / 土地总面积	+
	建成区绿化率	%	城市建成区的绿化覆盖面积 / 建成区面积	+
	生活垃圾无害化处理率	%	无害化处理量 / 生活垃圾清运量	+
	工业废水排放达标率	%	工业废水排放达标量 / 工业废水排放总量	+
	固体废物综合利用率	%	工业固废综合利用量 / (工业固废产生量 + 往年贮存量)	+
	城镇生活污水处理率	%	生活污水排放达标量 / 污水排放总量	+
经济发展协调度 Coordination degree of economic development	人均 GDP	元 / 人	GDP 总量 / 总人口	+
	地均固定资产投资	万元 / hm ²	固定资产投资总额 / 土地总面积	+
	第二、三产业占 GDP 比重	%	二三产业 GDP 总和 / GDP 总量	+
社会安全稳定度 Social security and stability	人均可支配收入	元	总收入 - 交纳所得税 - 个人交纳社会保障支出 - 记帐补贴	+
	环境污染治理投资总额	亿元	环境污染投资之和	+
	恩格尔系数	%	粮食支出金额 / 生活消费总支出	-
	城镇化水平	%	城镇人口 / 总人口	+
	人口密度	人 / km ²	总人口 / 土地总面积	-
	粮食安全系数	—	人均粮食平均占用量 / 386 kg 的均值	+
	人口自然增长率	‰	人口出生率 - 人口死亡率	-

注 “+”表示正向指标，“-”表示负向指标。
Note “+” stands for positive index, “-” stands for negative index.

1.3.3.3 综合指数计算。采用加权平均法分别计算 REI、ECI 及 CSI。根据三角模型构建关系,存在非经济发展协调度指数 $NECI = 1 - ECI$,非社会安全稳定度指数 $NCSI = 1 - CSI$ 采用式(5)~(7)计算3项指数:

$$REI = \sum_{j=1}^{10} X'_{ij} \times w_{REI} \quad (5)$$

$$NECI = 1 - \sum_{j=11}^{15} X'_{ij} \times w_{ECI} \quad (6)$$

$$NCSI = 1 - \sum_{j=16}^{20} X'_{ij} \times w_{CSI} \quad (7)$$

式中 W_{REI} 、 W_{ECI} 、 W_{CSI} 分别表示资源禀赋和环境容量、经济发展协调度、社会安全稳定度对应的权重。

2 结果与分析

2.1 承载力指标变化 对 2004~2013 年甘肃省资源环境承载力进行计算 结果表明(图 2),自 2004 年以来,NECI 呈现出逐年下降的趋势,到 2013 年降至最低。这说明在有限的资源禀赋和环境容量约束下,经济发展协调度不断提高,从侧面反映出经济结构自 2004 年以来更加合理。2004~2013 年 NCSI 呈现出波动式下降趋势。对影响该指数的指标进行分析,发现城市化水平和粮食安全系数稳中有升,恩格尔系数和人口自然增长率是造成 NCSI 波动的主要因素。REI 逐年增加,从 2004 年的 0.157 1 上升到 2013 年的 0.859 2。这

表明污染物处理能力及处理强度增强 环境保育能力不断提高;资源利用水平相对集约,支撑能力得到提升。这也从侧面反映出甘肃省绿色生态文明建设取得一定成效。

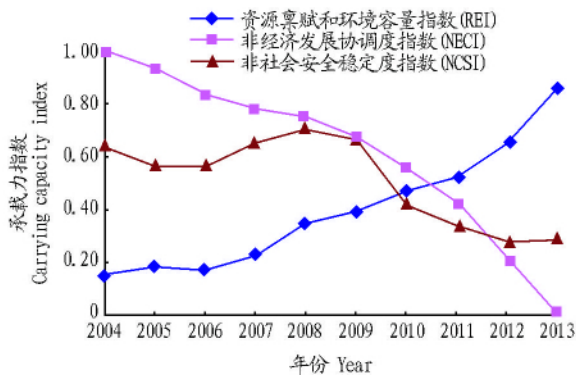


图2 2004~2013年甘肃省资源环境承载力指数变化情况

Fig.2 Index changes of resources and environment carrying capacity from 2004 to 2013 in Gansu

2.2 承载力状态 借助 Grapher 10 软件,绘制 2004~2013 年甘肃省资源环境承载力状态及趋势图(图3)。总体而言,10年间甘肃省资源环境综合承载力变化明显,呈现出“S”型变化趋势,并划分出以下4个变动区间:

第1阶段:2004~2008年处于弱承载力时期,位于三角形的V级区域内。REI、NECI、NCSI 3项指数平均值分别为0.2151、0.8671、0.6278。该时期是西部大开发的起步阶段,经济发展占主导地位,环境投入度不足,资源利用方式粗放。资源环境承载力弱,能够承载的社会经济规模有限。

第2阶段:2009、2010年处于较弱承载力时期,分布在三角形的IV级区域内。REI、NECI、NCSI 3项指数平均值分别为0.4334、0.6147、0.5455。城市化进程加快、人口增长对资源环境的需求力度并未减少,使得该时期内资源环境承载力处于较弱状态。

第3阶段:2011和2012年处于中等承载力水平,分布在三角形的III级区域内。REI达到中等水平,社会经济的承载能力显著提高。

第4阶段:2013年进入较强承载力时期。REI达到较高水平,NECI降至临界水平,NCSI浮动不大。说明承载力水平逐渐提高,经济增长与生态环境更加耦合。

2.3 承载力趋势 总体来说,2004~2013年甘肃省资源环境承载力呈现出良性发展态势,由弱承载力向较强承载力转变。REI由0.1571上升到0.8592,表明资源利用日趋合理,环境状况日益改善,资源禀赋和环境容量向着优化方向调节;NECI由1.0000下降到临界值,说明经济增长正在进入可持续发展模式,与资源环境承载能力日趋协调;NCSI由0.6434下降到0.2830,说明城市化的快速发展和人民生活质量的提高与资源环境承载力关系日渐和谐。

具体来看,2004~2013年连续观测期内,相对承载力主要表现出T₁、T₂两类基本趋势,其中2004~2006年总体呈现出T₂相对(较强)变动趋势,REI、NCSI、NECI分别呈上升、下降、下降趋势。2006~2008年呈现出T₁(中等)趋势,REI、NCSI、NECI分别呈上升、上升、下降趋势。2008~2013年呈

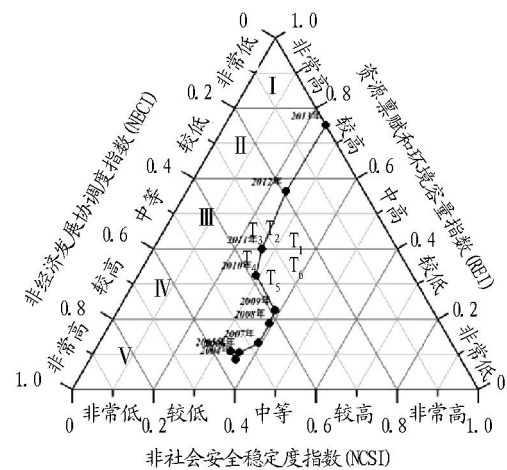


图3 2004~2013年甘肃省资源环境承载力状态及趋势

Fig.3 Relative status and trends of resources and environment carrying capacity from 2004 to 2013 in Gansu

现出T₂(较强)趋势。相对承载力在中等和较强间反复,说明甘肃省资源环境承载力呈向强承载变动的趋势。究其原因,主要在于社会经济发展的同时,产业结构也在逐年调整,非生态产出得到逐步控制,环境投入能力和养护力度日益提高,资源集约节约利用水平有所改进,是阶段性量变引起的质变。

3 结论与讨论

(1) 2004~2013年甘肃省资源环境承载力经历了弱承载、较弱承载、中等承载和较强承载4个阶段。总体而言,承载水平呈现出良性发展态势,具有向强承载力方向变动的可能。REI和NECI趋向于优质水平,NCSI对资源环境承载力的负面载荷仍然存在。

(2) 三角模型逻辑关系严谨、计算方法简单、分析方式灵活,能可视化地图解资源环境承载力状态及变动趋势,是一种较好的评价方法。

(3) 资源环境承载力评价是实现可持续的重要组件。基于面板数据的评价,对自然条件和资源分布的反映能力较弱。另外,受制于数据的可获取性和庞大指标体系的数据构建要求,研究时序往往相对滞后,空间分异状态仍有待进一步讨论。在今后研究中,首先,可以借助3S等技术手段,扩展数据获取平台,提高评价精准度,减少数据误差对评价结果的传导和放大作用,进一步提高研究成果的现势性;其次,权重合理与否,对评价结果的精确性起到至关重要的作用;最后,空间变化方面的分析研究,除了要反映地域内资源环境承载力分化的状态及趋势外,还应从是否存在空间自相关、影响程度及影响机理等角度进行深入探讨。

参考文献

[1] 邱鹏. 西部地区资源环境承载力评价研究[J]. 软科学 2009 23(6):66-69.

[2] SAVERIADES A. Establishing the social tourism carrying capacity for the tourist resorts of the east coast of the republic of cyprus[J]. Tourism management 2000 21(2):147-156.

[3] 唐凯,唐承丽,赵婷婷,等. 基于集对分析法的长株潭城市群资源环境承载力评价[J]. 国土资源科技管理 2012 29(1):46-53.

(下转第110页)

- two typical temperatures [J]. *Bioresource technology* 2013, 137: 270–277.
- [16] MAYRHOFER S, MIKOVINY T, WALDHUBER S et al. Microbial community related to volatile organic compound (VOC) emission in household biowaste [J]. *Environmental microbiology* 2006, 8(11): 1960–1974.
- [17] SCHLOSS P D, CHAVES B, WALKER L P. The use of the analysis of variance to assess the influence of mixing during composting [J]. *Process biochemistry* 2000, 35(7): 675–684.
- [18] LIANG C, DAS K C, MCLENDON R W. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a bio-solids composting blend [J]. *Bioresource technology*, 2003, 86(2): 131–137.
- [19] MAKAN A, ASSOBHEI O, MOUNTADAR M et al. Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco [J]. *Iranian journal of environmental health science & engineering* 2013, 10: 3.
- [20] JIMENEZ E I, GARCIA V P. Composting of domestic refuse and sewage sludge: evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity [J]. *Resources, conservation and recycling* 1991, 6(1): 45–60.
- [21] 许民, 杨建国, 李宇庆 等. 污泥堆肥影响因素及辅料的探讨 [J]. *环境保护科学* 2004, 30(5): 37–40.
- [22] 单爱丽, 王帆, 严红. 城市生活垃圾好氧堆肥中氨气变化及其影响 [J]. *环境工程* 2010, 28(3): 91–94.
- [23] GIGLIOTTI G, PROIETTI P, SAID-PULLICINO D et al. Co-composting of olive husks with high moisture contents: Organic matter dynamics and compost quality [J]. *International biodeterioration & biodegradation* 2012, 67: 8–14.
- [24] 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册 [M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2003: 31–32.
- [25] 魏源送, 李承强, 樊耀波 等. 不同通风方式对污泥堆肥的影响 [J]. *环境科学* 2001, 22(3): 54–59.
- [26] 李承强, 魏源送, 樊耀波 等. 不同填充料污泥好氧堆肥的性质变化及腐熟度 [J]. *环境科学* 2001, 22(3): 60–65.
- [27] MKHABELA M S, WARMAN P R. The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia [J]. *Agriculture, ecosystems & environment* 2005, 106(1): 57–67.
- [28] KUITERS A T, MUILDER W. Water-soluble fractions of heavy metals during composting of municipal solid waste [J]. *Plant and soil*, 1993, 152(2): 225–235.
- [29] ZHANG L, SUN X, TIAN Y et al. Effects of brown sugar and calcium superphosphate on the secondary fermentation of green waste [J]. *Bioresource technology* 2013, 131: 68–75.
- [30] JURADO M M, SUÁREZ-ESTRELLA F, VARGAS-GARCÍA M C et al. Increasing native microbiota in lignocellulosic waste composting: Effects on process efficiency and final product maturity [J]. *Process biochemistry* 2014, 49(11): 1958–1969.
- [31] FANG M, WONG M H, WONG J W C. Digestion activity of thermophilic bacterial isolated from ash-amended sewage sludge compost [J]. *Water, air and soil pollution* 2001, 126: 1–12.
- [32] 潘顺秋, 孙先锋, 钟海峰 等. 复合生物菌剂对城市污泥堆肥发酵的效果 [J]. *热带作物学报* 2010, 31(1): 93–97.
- [33] SARKAR S, BANERJEE R, CHANDA S. Effectiveness of inoculation with isolated *Geobacillus* strains in the thermophilic stage of vegetable waste composting [J]. *Bioresource technology* 2010, 101(8): 2892–2895.
- [34] 欧阳建新, 施周, 崔凯龙 等. 微生物复合菌剂对污泥好氧堆肥过程的影响 [J]. *中国环境科学* 2011, 31(2): 253–258.
- [35] WANG H Y, FAN B Q, HU Q X. Effect of inoculation with *Penicillium expansum* on the microbial community and maturity of compost [J]. *Bioresource technology* 2011, 102(24): 11189–11193.
- [36] 马雪梅, 刘淑英, 王平. 微生物菌剂对兰州城市生活污水堆肥效果的影响 [J]. *西北农业学报* 2012, 21(12): 168–172.
- [37] HACHICHA R, REKIK O, HACHICHA S. Co-composting of spent coffee ground with olive mill wastewater sludge and poultry manure and effect of *Trametes versicolor* inoculation on the compost maturity [J]. *Chemosphere*, 2012, 88(6): 677–682.
- [38] 何云晓, 何丹. 微生物在污泥堆肥处理中的优化改良 [J]. *安全与环境工程* 2013, 20(4): 51–54.
- [39] ZHANG J, ZENG G, CHEN Y. Impact of *Phanerochaete chrysosporium* inoculation on indigenous bacterial communities during agricultural waste composting [J]. *Appl Microbiol Biotechnol* 2013, 97(7): 3159–3169.
- [40] 徐晨, 檀笑, 解启来 等. 复合微生物菌剂对城市污泥好氧堆肥的影响 [J]. *广东农业科技* 2015(7): 133–138.
- [41] JIANG J S, LIU X L, HUANG Y M. Inoculation with nitrogen turnover bacterial agent appropriately increasing nitrogen and promoting maturity in pig manure composting [J]. *Waste management* 2015, 39: 78–85.
- [42] 许晓英, 李季. 复合微生物菌剂在污泥高温好氧堆肥中的应用 [J]. *中国生态学报* 2006, 14(3): 64–66.
- [43] 韩晓云, 安玉玺, 何丽蓉. 低温菌及其在环境工程中的应用 [J]. *东北林业大学学报* 2003, 31(2): 33–35.
- [44] 高云航, 勾长龙, 王雨琼 等. 低温复合菌剂对牛粪堆肥发酵影响的研究 [J]. *环境科学学报* 2014, 34(12): 3166–3170.
- [45] 陈大勇, 王里奥, 林登发 等. 复合微生物菌剂对污泥堆肥营养学指标的影响 [J]. *中国给水排水* 2010, 26(1): 20–23.
- [46] 顾文杰, 张发宝, 徐培智 等. 接种微生物对堆肥微生物数量和酶活性的影响 [J]. *农业环境科学学报* 2009, 28(8): 1718–1722.
- [47] DAI F, ZENG G M, NIU C G et al. Advance in the studies on bioenzyme activity during the composting [J]. *Progress in biotechnology* 2005, 25(B04): 148–151.
- [48] 徐智, 张陵利, 张发宝 等. 接种内源微生物菌剂对堆肥效果的影响 [J]. *中国环境科学* 2009, 29(8): 856–860.

(上接第71页)

- [4] 熊建新, 陈瑞吕, 谢雪梅. 基于状态空间法的洞庭湖区生态承载力综合评价研究 [J]. *经济地理* 2012, 32(11): 138–142.
- [5] 李悦, 成金华, 席焱. 基于 GRA-TOPSIS 的武汉市资源环境承载力评价分析 [J]. *统计与决策* 2014, 413(17): 102–105.
- [6] 卢小兰. 中国省域资源环境承载力评价及空间统计分析 [J]. *统计与决策* 2014(7): 116–120.
- [7] 孙茜, 张捍卫, 张小虎. 河南省资源环境承载力测度及障碍因素诊断 [J]. *干旱区资源与环境* 2015, 29(7): 33–38.
- [8] 郭轲, 王立群. 京津冀地区资源环境承载力动态变化及其驱动因子 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3818–3826.
- [9] 刘晓丽, 方创琳. 城市群资源环境承载力研究进展及展望 [J]. *地理科学进展*, 2008, 27(5): 35–42.
- [10] 龙腾锐, 姜文超. 水资源(环境)承载力的研究进展 [J]. *水科学进展*, 2003, 14(2): 249–253.
- [11] 毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙. 基于资源环境承载力的渤海滨海城市产业结构综合评价 [J]. *城市环境与城市生态* 2011, 24(2): 19–22.
- [12] 蒋惠园, 黄永黎. 交通资源环境承载力预警研究 [J]. *交通运输系统工程与信息* 2015, 15(2): 10–16.
- [13] 曾浩, 邱焯, 李小帆. 基于动态因子法和 ESDA 的资源环境承载力时空差异研究: 以武汉城市圈为例 [J]. *宁夏大学学报(人文社会科学版)*, 2015, 37(1): 153–161.
- [14] 刘明, 廖和平, 李涛 等. 基于模糊物元的重庆市资源环境承载力动态评价研究 [J]. *中国农学通报* 2015, 31(20): 113–118.
- [15] 王雪军, 付晓, 孙玉军 等. 基于 GIS 赣州市资源环境承载力评价 [J]. *江西农业大学学报* 2013, 35(6): 1325–1332.
- [16] 毕明. 京津冀城市群资源环境承载力评价研究 [D]. 北京: 中国地质大学 2011.
- [17] 赵鑫露. 长三角城市群核心区域资源环境承载力研究 [D]. 北京: 中国地质大学 2011.
- [18] 李旭东. 贵州乌蒙山区资源相对承载力的时空动态变化 [J]. *地理研究* 2013, 32(2): 233–244.
- [19] 孙顺利, 周科平, 胡小龙. 基于投影评价方法的矿区资源环境承载力分析 [J]. *中国安全科学学报* 2007(5): 139–143.
- [20] 彭立, 刘邵权, 刘淑珍 等. 汶川地震重灾区 10 县资源环境承载力研究 [J]. *四川大学学报(工程科学版)* 2009, 41(3): 294–300.
- [21] 姚岚, 吴次芳, 吕添贵 等. 基于三角模型的喀斯特地区土地利用系统健康评价 [J]. *农业工程学报* 2015, 31(14): 246–254.
- [22] 张小虎, 张合兵, 赵素霞 等. 基于三角模型河南省耕地集约利用趋势及时空分异 [J]. *土壤通报* 2013, 44(2): 277–283.
- [23] 苏飞, 张平宇. 大庆市城市经济系统可持续性研究 [J]. *中国人口·资源与环境* 2009, 19(6): 154–159.
- [24] 赵艳, 濮励杰, 张健 等. 基于三角模型的城市土地可持续利用评价: 以江苏省无锡市为例 [J]. *经济地理* 2011, 31(5): 810–815.
- [25] 张小虎, 牛海鹏, 郭增长. 基于三角模型的城市土地生态安全区域差异分析: 以河南省为例 [J]. *自然灾害学报* 2014, 23(2): 21–30.