
基于压力—状态—响应模型的长株潭城市群生态承载力安全预警研究^{*1}

朱玉林^{1, 2} 李明杰^{1, 3} 顾荣华¹

(1. 中南林业科技大学经济学院, 湖南长沙 410004;

2. 湖南省绿色发展研究院, 湖南长沙 410004;

3. 广东财经大学华商学院, 广东广州 511300)

【摘要】在构建城市群生态承载力安全预警评价指标体系基础之上,通过数据的收集,利用灰色加权关联理论,计算了2006~2015年长株潭城市群生态承载力安全指数,并对各年份生态承载力安全警度进行了判定。计算结果显示:从总体来看,2006~2015年长株潭城市群生态承载力安全指数呈现出上升的趋势,安全警度由“高警”下降为“轻警”;从压力、状态、响应3个子系统来看,安全指数同样呈现出上升的趋势,安全警度则由“高警”或“中警”下降为“轻警”。分析表明:近些年长株潭城市群“两型社会”试验区相关资源与环境政策的实施效果是明显的。但我们也发现,试验区统计年份安全指数数值都在0.7000之下,与“无警”(0.8500)状态距之甚远,长株潭“两型社会”建设依然任重而道远。

【关键词】生态承载力;压力—状态—响应模型;安全预警;长株潭城市群

【中图分类号】:F293 **【文献标识码】**:A **【文章编号】**:1004-8227(2017)12-2057-09

DOI:10.11870/cjlyzyyhj201712014

党的十八届三中全会《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》指出:要“加快生态文明制度建设”,“划定生态保护红线”,“建立资源环境承载能力监测预警机制”(第52条),开展生态承载力预警与调控研究非常必要。长株潭城市群作为全国两型社会建设综合配套改革试验区,地处湖南省东北部,是湖南省城镇相对密集的地区。近几年来,在经济高速发展的同时,来自资源与环境方面的问题不断凸显,尤其是长株潭地区出现较严重的雾霾天气、湘江长株潭段污染严重等生态问题,

¹ 收稿日期:2017-10-17;修回日期:2017-10-21

基金项目:湖南省教育厅重点项目“长株潭城市群生态承载力预警及调控研究”(14A154) [Hunan Education Department Major Project(14A154)];湖南省哲学社会科学基金项目“湖南省自然系统生态赤字演变及绿色发展对策研究”(13YBA363) [Hunan Philosophy and Social Science Fund Project(13YBA363)];中南林业科技大学国家社科基金预研项目“基于生态承载力的湖南省农业绿色发展研究”(2016YY009) [National Social Science Fund Pre-research Project of Central South University of Forestry and Technology(2016YY009)]

作者简介:朱玉林(1968~),男,博士生导师,研究方向为生态经济。E-mail:Zh-y-lin@126.com

经济、人口、资源与环境协调发展的压力大，城市群生态承载力的评价和预警作为城市群生态管理的基础工作日益重要，开展城市群生态承载力安全预警研究迫在眉睫。因此，本文选取长株潭城市群为个案开展生态承载力安全预警研究，为构建一个集实时监测与数据搜集—定量评估—动态预测—分级预警—适时发布—综合调控于一体的长株潭城市群生态承载力评价、预警与调控的理论体系和操作系统作准备，为长株潭城市群的生态管理政策制定提供参考依据。

1 生态承载力安全预警研究进展

1921 年，美国学者帕克和伯吉斯在《人类生态学》杂志上明确提出了生态承载力的概念，即“在某一特定的环境条件下(主要指的是生存空间、营养物质、阳光等生态因子的组合)，某种个体存在数量的最高极限”^[1]。生态承载力应包括两层基本含义：第一层含义是指生态系统的自我维持与自我调节能力，以及系统的供容能力；第二层含义是指系统内社会子系统的发展能力^[2, 3]。区域生态承载力预警是对区域生态承载力现状及未来发展状态的评价、预测和警报，以明确系统生态资源开发利用的后果，系统生态承载力的变化趋势、速度及其与社会经济协调发展的状况，为生态系统的有效调控和协调、持续发展奠定基础^[4, 5]。因此，它既是生态承载力研究的主要手段，也是近年来生态承载力研究的主要内容和方向之一。国外学者 Vitousek^[6]、Catton(1986)^[7]、Folke(1997)等人从不同角度，用不同方法对生态承载力作过建设性研究。然而，在生态承载力预警与调控方面，尽管西方国家的预警理论有较为完善的概念体系和系统的操作方法，但由于城市复合生态系统理论在我国起步较晚，因此，国内关于城市生态承载力的研究成果不是很多。在区域生态承载力预警方面，可查到学者马书明^[8]、董成森等^[9]发表的相关论文。在长株潭城市群生态承载力预警与调控方面还没有直接研究成果，但尹勇平等^[10]、李灿等^[11]、林婧^[12]学者对长株潭资源承载力，环境承载力等进行过相关研究，向常胜^[13]、楚芳芳^[14]对长株潭生态承载力作过研究。通过文献综述发现：(1)有关生态承载力现状评价的成果不少，但基于演变趋势的预测预警及调控的研究不多；(2)城市群生态承载力评价及预警的指标和方法有待完善；(3)城市群生态承载力预警与调控研究的理论体系尚待构建；(4)尚未查到全面系统深入的城市群生态承载力预警与调控研究成果。因此，本研究无论在理论还是在实践应用层面均有一定的意义和价值。

2 基于压力—状态—响应模型的生态承载力安全预警评价指标体系构建

2.1 压力—状态—响应模型基本思想

压力(Pressure)—状态(State)—响应(Response)模型，可简称为 P-S-R 模型，是 20 世纪 80 年代，由联合国经济合作和发展组织与联合国环境规划署共同提出的。模型将表征生态系统生态承载力的指标归属为压力、状态、响应 3 个类别，认为人类的社会经济活动与自然环境之间存在相互作用的关系，即人类从自然环境中获得各种自然资源，又通过生产、消费向自然环境排放废弃物，从而改变资源的数量和环境的数量，资源环境的变化进而又影响人类的社会活动及其福利等，如此循环往复，形成了人类活动与自然环境之间的“压力—状态—响应”关系^[15, 16]。“压力”指标描述人类活动、自然灾害对某一区域生态环境施加的直接压力或负荷，主要反映人类活动对生态环境所造成的影响；“状态”指标指系统当前所处的状态；“响应”指标则表征了人类面对生态环境存在的问题而采取的减轻、阻止、恢复和预防人类活动的负面影响的对策和措施。模型从人类和自然生态系统相互影响出发，具有非常清晰的因果关系，其基本思路是：人类活动给环境和自然资源施加的影响，影响了环境与资源质量，而社会则通过人类意识和活动制定环境、经济、土地政策或措施对这些变化发生响应，减缓人类活动对环境的压力，维持良好的生态环境^[17]。

2.2 生态承载力安全预警评价指标体系构建

城市生态系统是以人为主体的生态系统，具有流量大、容量大、密度高、运转快和高度开放的特点，城市群生态承载力安全预警评价指标体系是一个融合资源、环境、经济、社会和人等各方面的复合系统。结合生态承载力的内涵，遵循指标体系构建的基本原则——全面性、代表性、层次性、可比性、可操作性，参考相关学者研究成果^[18, 19]，并基于压力—状态—响应模型，本文构建了长株潭城市群生态承载力安全预警评价指标体系，如表 1。

表 1 长株潭城市群生态承载力安全预警评价指标体系

百标层准则层		指标层	指标单位	指标性质
长株潭城市群生态承载力安全预警评价	压力	人口密度	人/km ²	逆
		人口自然增长率	%	逆
		城市化率	%	逆
		第一产业比重	%	逆
		单位耕地农药施用量	kg/hm ²	逆
		单位耕地化肥施用量	kg/hm ²	逆
		单位面积工业废水有暇量	t/km ²	逆
		单位面积工业二氧化硫排放量	t/km ²	逆
		单位面积工业粉尘排放量	t/km ²	逆
		水土流失率	%	逆
	状态	人均耕地面积	hm ² /人	正
		单位耕地粮食产量	t/hm ²	正
		城市人均住房建筑用地面积	m ² /人	正
		城市人均道路面积	m ² /人	正
		城市每万人公园绿地面积	hm ² /万人	正
		万元 GDP 能耗	吨标准/万元	逆
		万元 GDP 电耗	kW·h/万元	逆
		城镇居民恩格尔系数	%	逆
		农业机械总动力	kW/hm ²	正
		每万人拥有公共汽电车辆	辆/万人	正
响应	响应	工业固体废弃物综合利用率	%	正
		城市生活污水处理率	%	正
		城市生活垃圾无害化处理率	%	正
		第三产业比重	%	正
		人均 GDP	元	正
		教育支出占财政支出的比重	%	正
评价	评价	环境污染治理占 GDP 的比重	%	正

3 长株潭城市群生态承载力安全警度分析

3.1 数据及来源

作者搜集了长株潭城市群 2006~2015 年生态承载力安全预警评价指标的原始数据，数据来源于中国环境统计年鉴 (2007—2016) ^[20]、湖南省统计年鉴 (2007—2016) ^[21]、湖南农村统计年鉴 (2007—2016) ^[22]、长沙统计年鉴 (2007—2016) ^[23]、株洲统计年鉴 (2007—2016) ^[24]、湘潭统计年鉴 (2007—2016) ^[25]、长沙环境状况公告 (2007—2016)、株洲环境状况公告 (2007—2016)、湘潭环境状况公告 (2007—2016) 及湖南省、长沙市、株洲市、湘潭市统计信息网，由于篇幅有限此略。

3.2 安全标准值的确定

各评价指标安全标准值的确定是城市生态承载力安全预警评价、警情分析的前提和基础。参考国内外相关专家、学者的相关研究成果，本文主要根据以下方法确定指标体系中各明细指标的安全标准值 (表 2)。

表 2 长株潭城市群生态承载力安全预警指标安全标准值

指标	指标单位	安全标准值	确定依据
人口密度	人/km ²	128	国际公认值法
人口自然增长率	‰	5	国内公认值法
城市化率	%	60	相对值确定法
第一产业比重	%	3	相对值确定法
单位耕地农药施用量	kg/ hm ²	10	国际公认值法
单位耕地化肥施用量	kg/ hm ²	255	国际公认值法
单位面积工业废水排放量	t/km ²	5 000	相对值确定法
单位面积工业二氧化硫排放量	t/km ²	3	相对值确定法
单位面积工业粉尘排放量	t/km ²	1	相对值确定法
水土流失率	%	5	借鉴法
人均耕地面积	hm ² /人	0.09	国内公认值法
单位耕地粮食产量	t/ hm ²	7	借鉴法
城市人均住房建筑用地面积	m ² /人	35	借鉴法
城市人均道路面积	m ² /人	15.34	借鉴法

城市每万人公园绿地面积	hm ² /万人	50	借鉴法
万元 GDP 能耗	吨标准煤/万元	0.25	相对值确定法
万元 GDP 电耗	kW·h/万元	450	相对值确定法
城镇居民恩格尔系数	%	25	国内公认值法
农业机械化水平	kW/hm ²	20	借鉴法
每万人拥有公共汽电车辆	辆/万人	20	借鉴法
工业固体废弃物综合利用率	%	95	国内公认值法
城市生活污水处理率	%	95	国内公认值法
城市生活垃圾无公害处理率	%	100	国内公认值法
第三产业比重	%	70	相对值确定法
人均 GDP	元	100 000	相对值确定法
教育支出占财政支出的比重	%	20	国际公认值法
环境污染治理投资占 GDP 的比重	%	2	国内公认值法

(1) 国际、国内公认值法。对国际上、国内或相关行业已经制定或颁布具体标准的指标，按相关标准和公认值确定指标的安全标准值。比如人口密度、人口自然增长率、单位耕地农药施用量、单位耕地化肥施用量等指标的安全标准值参考相关的国际和国内标准来确定；而工业固体废弃物综合利用率、城市生活污水处理率、城市生活垃圾无公害处理率等指标的安全标准值则主要参考《湖南省生态强省建设规划》等相关公认值来确定^[26, 27]。

(2) 相对值确定法。这类指标的安全标准值主要根据长株潭城市群区域整体经济发展水平、区域未来发展目标、全国期望值等加以确定。比如城市化率、第一产业比重、万元 GDP 能耗、万元 GDP 电耗和人均 GDP 等指标^[28]。

(3) 借鉴值法。这类没有具体标准可参考的指标，一方面可以通过借鉴有关研究已经判定的城市生态承载力预警评价安全标准值来确定；另一方面也可以通过咨询有关环境科学、土地生态学、生态经济学等领域的专家学者来综合确定。本文中，如水土流失率、单位耕地粮食产量、农业机械化水平、每万人拥有公共汽电车辆等指标的安全标准值主要通过这种方法来确定^[29, 30]。

3.3 原始数据的预处理

由于各指标的量纲单位不同，比如人口密度和人均 GDP 指标，其中人口密度的单位是人/km²，而人均 GDP 的单位是元，这样的指标是不具有可比性的，如果直接进行计算和评价分析，分析结果就会出现较大的偏差。此外，所建立的预警指标体系中，从指标性质来看既有正指标又有逆指标。比如，万元 GDP 能耗和工业固体废弃物综合利用率指标，万元 GDP 能耗指标是一个逆指标，该指标的数值应该是越小越好；而与之相反，工业固体废弃物综合利用率指标则属于正指标，该指标的数值则是越大越好。因此，这些指标是不能直接进行计算汇总、评价分析的。所以，在对长株潭城市群生态承载力安全预警评价之前，必须首先要对这些指标的原始数据进行事先处理，使得指标数据趋于合理，从而保证评价的顺利进行以及评价结果的直观、准确性。

对指标原始数据的预处理包括对数据的无量纲化处理及逆指标的正向化处理，从而消除原始数据在数量级和量纲上的差别。本文对原始数据进行预处理过程中，所采用的公式如下：

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_{ij} \geq S_j \text{ 时} \\ \frac{x_{ij}}{S_j}, & \text{当 } x_{ij} < S_j \text{ 时} \end{cases}$$

对于正指标,

$$x'_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_{ij} \leq S_j \text{ 时} \\ \frac{S_j}{x_{ij}}, & \text{当 } x_{ij} > S_j \text{ 时} \end{cases}$$

对于逆指标,

式中: x_{ij} ($i=1, 2, 3, \dots, 10; j=1, 2, 3, \dots, 27$) 是第 i 年第 j 个评价指标的原始数据; x'_{ij} 则是第 i 年第 j 个评价指标进行预处理后的值; S 则是第 j 个评价指标的安全标准值。经过上述处理方法，所有指标的数值可以全部转化为 $[0, 1]$ 范围内的数值。

3.4 长株潭城市群生态承载力安全指数的计算和警度评判标准的确定

3.4.1 生态承载力安全指数的计算

计算生态承载力安全指数的方法主要有灰色加权关联度法、模糊综合评判法、因子分析法、主成分分析法等^[31]。其中，灰色加权关联度法具有操作简单、逻辑性强、结果直观等优点，有利于开展对警度的综合评判。因此本文运用该方法计算生态承载力安全指数，具体计算步骤如下：

(1) 确定各指标的经过预处理后的最优值 x^*_i ($i=1, 2, \dots, 10$)，通过上述正指标、逆指标预处理的公式可以得到，第 j 个评价指标经过预处理后其最优值应为 1。

(2) 确定各评价指标对应的权重。根据各指标的相对重要程度，确定各指标所对应的权重。在开展后面研究过程中，本文将对各评价指标进行平均赋权。

(3) 计算 x^*_j 与 x'_{ij} 的最小绝对差值与最大绝对差值，最小绝对差值和最大绝对差值的计算公式如下：若记 x^*_j 与 x'_{ij} 的最小绝对差值为 $v_{\min}$ ，则
$$v_{\min} = \min_i \min_i |x_j^* - x'_{ij}|$$
；若记 x^*_j 与 x_{ij} 的最大绝对差值为 $v_{\max}$ ，则
$$v_{\max} = \max_i \max_j |x_j^* - x'_{ij}|$$
。

(4) 求解评判矩阵 E 。计算关联系数 ξ_{ij} 的公式为：

式中： ξ_{ij} 是比较数据列 x_{ij} 与 x_j^* 的灰色关联系数。 ζ 为分辨系数，取值范围为 $\zeta \in [0, 1]$ ，在评价时需要对其赋值，它可

以降低极值对评价结果的影响，一般取 $\zeta=0.5$ 。

(5) 计算各评价对象各级指标的灰色加权关联度。计算灰色加权关联度的公式如下：

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n W_k \xi_{ij}$$

式中， r_i ($i=1, 2, \dots, 10$) 为第 i 个评价对象的灰色加权关联度^[32]。

据上可计算出 2006~2015 年长株潭城市群各年份生态承载力安全指数，如表 3。

表 3 长株潭城市群生态承载力安全指数(2006 ~ 2015)

年份	压力系统 安全指数	状态系统 安全指数	响应系统 安全指数	总体安全 指数
2006	0.552 4	0.485 9	0.525 6	0.521 3
2007	0.482 5	0.490 2	0.524 4	0.499 0
2008	0.548 6	0.553 9	0.554 6	0.552 3
2009	0.555 5	0.594 0	0.567 4	0.572 3
2010	0.554 5	0.589 3	0.611 7	0.585 2
2011	0.540 9	0.565 8	0.634 0	0.580 2
2012	0.569 9	0.602 7	0.631 0	0.601 2
2013	0.572 7	0.597 9	0.675 3	0.615 3
2014	0.572 3	0.590 6	0.647 4	0.603 4
2015	0.647 3	0.627 9	0.694 7	0.656 7

3.4.2 警度评判标准的确定

根据人类活动对资源、环境的影响程度、人与城市生态系统的协调关系以及生态系统所受到的破坏程度，参考相关专家学者的研究成果^[33~35]，本文确定的长株潭城市群生态承载力警度划分标准如表 4 所示。

表 4 长株潭城市群生态承载力安全警度划分标准

安全指数区间	警度	警度描述
[0.85, 1]	无警	生态系统功能完好,基本未受到破坏,系统处于相对安全状态,人与自然、生态关系协调,人类活动对资源、环境的影响非常小
[0.6, 0.85)	轻警	生态系统功能受到了较小破坏,但可以得到及时控制,人与自然、生态关系较为协调,人类活动对资源、环境的影响较小
[0.5, 0.6)	中警	生态系统受到一定破坏,系统功能发挥受一定影响但尚可维持基本运作,人与自然、生态关系面临一定的威胁,人类活动对资源、环境有一定的影响
[0.4, 0.5)	高警	生态系统受到较大破坏,系统功能发挥受到较大影响,重建或恢复面临一定困难,人与自然、生态系统关系面临较大威胁,人类活动对资源、环境带来较大影响
[0.15, 0.4)	重警	生态系统受到明显破坏,系统功能发挥受到较大威胁,重建或恢复面临较大困难,人与自然、生态系统关系在一定程度上已经失衡,人类活动对资源、环境带来明显影响
[0, 0.15)	巨警	生态系统受到严重破坏,系统功能发已经丧失,已难以恢复,人与自然、生态系统关系已经失衡,人类活动对资源、环境带来严重威胁

3.5 长株潭城市群生态承载力警情状况分析

3.5.1 安全状况总体分析

从表 3 可以看出,2006~2015 年长株潭城市群生态承载力总体安全指数呈现出上升的趋势,指数数值由 2006 年的 0.5213 上升到了 2015 年的 0.6567,上升幅度达到了 25.96%。与之相对应,在统计年度内,生态安全警度情况是:2007 年警度为“重警”;2006、2008、2009、2010 和 2011 年警度为“中警”;2012~2015 年 4 个年份为“轻警”,警度越来越轻,趋势良好。

3.5.2 压力系统警情分析

从压力系统来看(图 1),2006~2015 年安全指数呈现出波动上升的趋势,由 0.5524 上升到了 0.6473,上升幅度为 17.17%。与之相对应的压力系统安全警度由“中警”下降为“轻警”。警度下降过程中,2007 年出现了较大的波动,其压力系统安全警度为“高警”状况,同时也发现 2014~2015 年压力安全指数上升速度比以前年度都要高。“压力”指标表征的是人类活动、自然灾害对区域生态环境施加的直接压力或负荷,主要反映人类活动对生态环境所造成的影响,说明长株潭城市群的生态负荷在不断减轻,尤其是最近年份压力减轻的速度在加快。

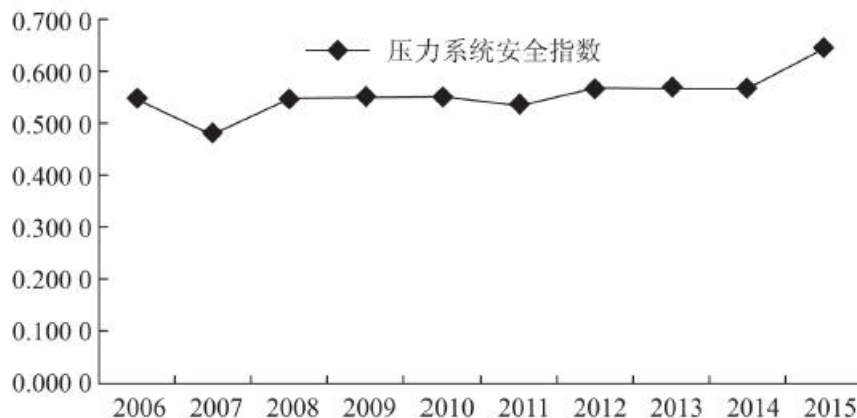


图1 长株潭城市群生态承载力压力系统
安全指数变化状况(2006~2015)

Fig. 1 Change Trend of the Pressure System Security
Index of Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Ecological
Carrying Capacity (2006-2015)

3.5.3 状态系统警情分析

从状态系统来看(图2), 2006~2015年系统安全指数也呈现出波动上升的趋势, 由0.4859上升到了0.6279, 上升幅度为29.23%。而与之对应的状态系统安全警度由“高警”下降为“轻警”。由于警度为“轻警”的年份只有2012年和2015年两年, 也就是说还处在轻警度的低临界区域徘徊, 还须预防返回“中警”区域。“状态”指标表征的是系统当前所处的状态, 从表3中的数据可以看出状态系统的安全指数相对其它指数较小, 全部在0.6500以下, 与“无警”(0.8500)的距离还相差很远, 并且2007、2008年这两年指数值小于0.5000, 说明长株潭城市群生态环境状况仍不容乐观。

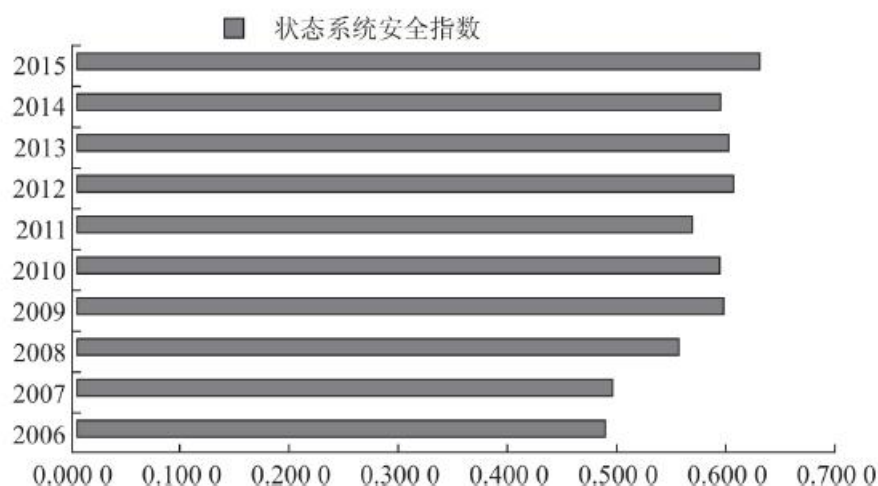


图2 长株潭城市群生态承载力状态系统
安全指数变化状况(2006~2015)

Fig. 2 Change Trend of the State System Security
Index of Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Ecological
Carrying Capacity (2006-2015)

3.5.4 响应系统警情分析

从响应系统来看(图3), 2006~2015年系统安全指数上升趋势明显, 由0.5256上升到了0.6947, 上升幅度为32.18%, 上升幅度大。与之对应, 响应系统生态安全警度由2006~2009年的“中警”状态转化为2010~2015年的“轻警”状态。需要指出的是:在统计年度内, 响应系统安全指数全都在0.5000以上, 并且有超过1/2的年份(具体为6a)超过了0.6000。由于“响应”指标表征的是人类面对生态环境存在的问题而采取的减轻、阻止、恢复和预防人类活动的负面影响的对策和措施。说明长株潭城市群作为全国“两型”社会试验区, 其生态文明建设的相关政策与措施取得了明显效果。

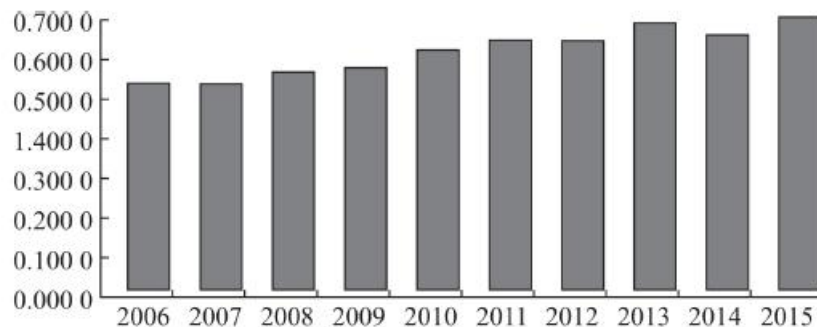


图3 长株潭城市群生态承载力响应系统
安全指数变化状况(2006~2015)

Fig. 3 Change Trend of the Response System Security
Index of Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Ecological
Carrying Capacity (2006–2015)

4 研究结论

长株潭城市群作为全国两型社会建设试验区,其生态承载力安全指数在不断提高,安全警度由“高警”下降为“轻警”;从压力、状态、响应3个子系统来看,安全指数同样呈现出上升的趋势,安全警度则由“高警”或“中警”下降为“轻警”。尤其是近两年来生态承载力安全指数提高较快,充分说明试验区加强生态环境监察与综合治理,提高节能减排力度,完善自然生态保护等相关政策与措施的实施效果是明显的。

研究期间,尽管长株潭城市群生态承载力安全指数在不断提高,其状态警度已由“重警”转向“轻警”,但其依然处于“轻警”的临界位置,并且所有年份安全指数数值均在0.7000之下,与“无警”(0.8500)状态还距之甚远,长株潭“两型社会”建设依然任重而道远。

参考文献:

- [1] 高吉喜. 可持续发展理论探讨——生态承载力理论、方法与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- 【GAO J X. The sustainable development theory——ecological carrying capacity theory, method and application [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001. 】
- [2] 王开运. 生态承载力复合模型系统与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- 【WANG K Y. Composite model system and application of ecological carrying capacity [M]. Beijing: Science press, 2007. 】
- [3] 顾康康. 生态承载力的概念及其研究方法 [J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 389–396.
- 【GU K K. The concept of ecological carrying capacity and its research methods [J]. Ecology and Environmental

Sciences, 2012, 21(2) : 389—396. 】

[4] 聂春霞, 刘晏良, 甘昶春. 新疆城市化进程中生态预警研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(03) : 379—385.

【NIE C X, LIU Y L, GAN C C. Ecology precaution research in the process of urbanization in xinjiang [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22 (03) : 379 —385. 】

[5] 张利, 陈影, 王树涛, 等. 滨海快速城市化地区土地生态安全评价与预警——以曹妃甸新区为例 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(08) : 2445—2454.

【ZHANG L, CHEN Y, WANG S T, et al. Assessment and early warning of land ecological security in rapidly urbanizing coastal area: a case study of Caoheidian new district, Hebei, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (08) :2445—2454. 】

[6] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth' s ecosystems [J]. Science, 1997, 277(5325) : 494—499.

[7] REES W, WACKERNAGEL M. Urban ecological footprints:why cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability [J]. Environmental Impact Assessment Review, 1996, 16(4—6) : 223—248.

[8] 马书明. 区域生态安全评价和预警研究 [D]. 大连理工大学, 2009.

【MA S M. Study on evaluation and pre-warning of regional ecological security[M]. Dalian university of technology, 2009. 】

[9] 董成森, 陈端吕, 董明辉, 等. 武陵源风景区生态承载力预警 [J]. 生态学报, 2007, (11) : 4766—4776.

【DONG C S, CHEN D L, DONG M H, et al. Forecasting system for ecological carrying capacity of Wulingyuan Scenic Spot based on ANN [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, (11) :4766—4776. 】

[10] 尹勇平, 涂利娟, 曾毅. 长株潭城市群土地生态承载力评价研究 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37 (06) : 2660—2661, 2693.

【YIN Y P, TU L J, ZENG Y. Evaluation of ecological carrying capacity in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Metropolis [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(06) : 2660—2661, 2693. 】

[11] 李灿, 徐映梅. 长株潭城市群水资源承载力的实证研究 [J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(05) : 86—91.

【LI C, XU Y H. Empirical analysis on the water resources carrying capacity in view of chang-zhu-tan urban agglomeration [J]. Statistics & Information Forum, 2011, 26 (05) : 86 —91. 】

[12] 林婧. 长株潭城市群环境承载力研究 [D]. 湖南农业大学, 2012.

【LIN J. Research on environmental carrying capacity of Changsha Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[D]. Hunan agricultural university, 2012. 】

[13] 向常胜. “长株潭 3+5”城市群生态承载力研究 [D]. 中南大学, 2009.

【XIANG C S. Study on the ecosystem carrying capacity of Chang-Zhu-Tan urban 3+5 cities [D]. Central south university, 2009. 】

[14] 楚芳芳. 基于可持续发展的长株潭城市群生态承载力研究 [D]. 中南大学, 2014.

【CHU F F. Study on the ecological carrying capacity of changzhutan urban agglomeration based on the sustainable development [D]. Central south university, 2014. 】

[15] 任远辉, 郭雯, 陈伟强, 等. 基于“压力—状态—响应”模型的河南省耕地资源可持续性研究 [J]. 中国农学通报, 2016, 32(16) : 117—122.

【REN Y H, GUO W, CHEN W Q, et al. Sustainability of cultivated land resources in henan province: based on pressurestate response model [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin2016, 32(16) : 117—122. 】

[16] 冉启英, 李宁. 基于压力—状态—响应模型的生态安全评价——以新疆为例 [J]. 生态经济, 2015, 31(07) : 114—117.

【RAN Q Y, LI N. Ecological security assessment based on psr model: A case study of Xinjiang uygur autonomous region [J]. Ecological Economy, 2015, 31(07) : 114—117. 】

[17] 海全胜, 宁小莉, 霍擎, 等. 基于压力状态响应模型的达茂旗生态安全现状评价 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(11) : 115—123.

【HAI Q S, NING X L, HUO Q, et al. The evaluation of the ecological security status of Damao Joint Banner based on the press-state-respond model [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40 (11) :115—123. 】

[18] 徐晓霞. 中原城市群城市生态系统评价研究 [J]. 地域研究与开发, 2006, 25(5) : 98—102.

【XU X X. City ecosystem evaluation of Zhongyuan city group region [J]. Areal Research and Development , 2006, 25(5) :98—102. 】

[19] 张小刚, 罗雅. 城市环境资源承载力评价体系研究——以长株潭城市群为例 [J]. 湘潭大学学报(哲学社会科学版), 2013, 34(4) : 25—27.

【ZHANG X G, LUO Y. Research on evaluation system of environmental and resources carrying capacity—taking chang-zhutan urban agglomeration as an example[J]. Journal of Xiangtan University(Philosophy and Social Sciences) , 2013, 34 (4) :25—27. 】

-
- [20] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴(2007 ~ 2016) [Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [21] 国家统计局. 湖南统计年鉴(2007 ~ 2016) [Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [22] 国家统计局. 湖南农村统计年鉴(2007 ~ 2016) [Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [23] 长沙市统计局, 国家统计局长沙调查队. 长沙统计年鉴(2007 ~ 2016) [Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [24] 株洲市统计局, 国家统计局株洲调查队. 株洲统计年鉴(2007 ~ 2016) [Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [25] 湘潭市统计局, 国家统计局湘潭调查队. 湘潭统计年鉴(2007 ~ 2016) [Z]. 北京: 中国统计出版社.
- [26] 欧朝敏, 刘仁阳. 长株潭城市群城市综合承载力评价 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2009, 32(3): 108—112.
- 【OU Z M LIU R Y. Evaluation of urban synthetic carrying capacity of the chang-zhu-tan urban agglomerations [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2009, 32 (3): 108—112. 】
- [27] 岳立, 于翠, 高新才. 基于区域的城市生态承载力评价与分析——以张掖市及张掖市甘州区为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(04): 28—32.
- 【YUE L, YU C, GAO X C. Regional ecological carrying capacity: illustrated by the example of Zhangye and Ganzhou City in Zhangye [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(04): 28—32. 】
- [28] 杨志峰, 胡廷兰, 苏美蓉, 等. 基于生态承载力的城市生态调控 [J]. 生态学报, 2007, (08): 3224—3231.
- 【YANG Z F, HU T L, SU M R, et al. Urban ecological regulation based on ecological carrying capacity [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, (08): 3224—3231. 】
- [29] 周文华, 王如松. 城市生态安全评价方法研究——以北京市为例 [J]. 生态学杂志, 2005, (07): 848—852.
- 【ZHOU W H, WANG R S. Study on evaluation method of urban ecological security—taking Beijing as an example [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, (07): 848—852. 】
- [30] 金悦, 陆兆华, 檀菲菲, 等. 典型资源型城市生态承载力评价——以唐山市为例 [J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4852—4859.
- 【JIN Y, LU Z H, TAN F F, et al. A typical resources city ecological carrying capacity evaluation——taking Tangshan as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4852—4859. 】
- [31] 向芸芸, 蒙吉军. 生态承载力研究和应用进展 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2958—2965.
- 【XIANG Y Y, MENG J J. Research and application of ecological carrying capacity [J]. Chinese Journal of Ecology,

2012, 31(11) : 2958—2965. 】

[32] 朱玉林, 李明杰, 刘旖. 基于灰色关联度的城市生态文明程度综合评价——以长株潭城市群为例 [J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2010, 4(05) : 77—80.

【ZHU Y L, LI M J, LIU Y. The comprehensive evaluation of city ecological civilization based on gray correlation degree——a case study of chang-zhu-tan city agglomeration [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology(Social Sciences), 2010, 4(05) : 77—80. 】

[33] 郑泽娜, 周伟. 基于主成分的河北省地级市城市生态安全预警评价 [J]. 中国农学通报, 2013, 29(14) : 118—123.

【ZHENG Z N, ZHOU W. Evaluation of urban ecological security warning in the prefecture-level city of hebei provincebased on principal component analysis [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(14) : 118—123. 】

[34] 陈军飞, 王慧敏. 城市生态系统诊断预警体系研究 [J]. 城市问题, 2005(06) : 7—12.

【CHEN J F, WANG H M. Study on the early warning system of urban ecological system [J]. Urban Problems, 2005(06) : 7—12. 】

[35] 徐美, 朱翔, 刘春腊. 基于 RBF 的湖南省土地生态安全动态预警 [J]. 地理学报, 2012, 67(10) : 1411—1422.

【XU M, ZHU X, LIU C L. Early-warning of land ecological security in Hunan province based on RBF [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10) : 1411—1422. 】