

基于 SD 的生态安全指标阈值的确定及应用 ——以上海崇明岛为例

李 华^{1,2}, 蔡永立^{1,*}

(1. 华东师范大学资源与环境学院, 上海 200062; 2. 上海海事大学经济管理学院, 上海 200135)

摘要: 结合区域复合生态系统的特点, 建立由经济、人口、资源、环境和生态 5 个子系统 71 个参数构成的上海崇明岛区域生态安全的系统动力学模型, 并以变量“净 GDP”为参考依据, 通过情景仿真进行生态安全趋势分析和方案比较, 确定生态安全的指标阈值; 通过系统模拟对阈值进行验证, 认为阈值在反映系统动态发展趋势上, 是—定发展模式下的生态安全的特征参照系。这一尝试克服了目前生态安全指标阈值的研究中以参照法为主的静态性缺憾。将确定的阈值应用于崇明岛生态安全的评价和因子分析中, 发现由于崇明岛生态岛的定位和生态保障措施的—实施, 近几年生态安全综合得分呈现逐步提高的特点, 但目前(2007 年)得分为 0.523, 仍处于中等水平; 并以阈值为标准的因子检验发现各主要安全因子差异较大, 主要的制约因子—主要体现在环境治污水平和能源利用等方面。

关键词: 系统动力学; 生态安全; 阈值; 崇明岛

The threshold of eco-security based on system dynamics and application: a case study of Chongming Island

LI Hua^{1,2}, CAI Yongli^{1,*}

1 School of Resource & Environment, East China Normal University, Shanghai, 200062, China

2 School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai, 200135, China

Abstract: According to the characteristics of the regional composite eco-system, the system dynamics model of Chongming's regional eco-security is constructed on the basis of the five subsystems of economy, population, resources, environment, ecology as well as 71 parameters. With net GDP as the reference we used situation simulation and a trend analysis of the eco-security was conducted to determine the eco-security threshold. The eco-security threshold value indicates the turning point in the change of ecological quality and can help determine ecosystem health and safety as well as function as a control threshold for all constructions in the process of regional construction and development. System simulation was used to verify this threshold value. We discovered that the threshold was the frame of reference of eco-security characteristics under certain a developmental mode and reflected the dynamic developmental trend of the system. The paper overcomes the static nature of current eco-security threshold research. Furthermore, the threshold was applied in eco-security assessment and factor analysis. We found that the comprehensive score of eco-security of Chongming increased in recent years due to the orientation of “ecological island” and the implementation of ecology guarantee measures. In 2007 the comprehensive score for the eco-security of Chongming was 0.523 and still remains at a medium level. A factor test using the threshold value as the standard showed a large difference between the major security factors. The major limiting factors include environmental pollution and energy use.

Key Words: system dynamics (SD); eco-security; threshold; Chongming Island

基金项目: 上海市科技攻关项目(08DZ1205600); 上海市教育委员会科研创新项目(09YS256); 上海市科技发展基金软科学研究博士学位论文资助项目(200706002)

收稿日期: 2009-05-15; **修订日期:** 2009-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ylcail@geo.ecnu.edu.cn

生态安全阈值是生态安全的临界值,反映生态质量转变的节点。对于生态系统健康和生态安全有重要指示意义的指标阈值是区域发展过程中各项建设控制的门槛。目前确定生态安全指标阈值运用较多的方法是参照国内外已有的相关标准值或直接依据现状值进行估算。这种方法简单易行,但主要反映了区域生态安全的现状,没有体现出动态安全特征及各指标间的相互作用性质与程度,因此,以其为依据的安全评价结果的精度将受到影响。而且在实际的研究工作中,各类的参照标准本身的制定目的和适用性有别,标准值存在较大的差异,以此为参考标准来确定指标阈值则存在较大的主观随意性。近年来有学者运用生态模型进行生态安全的研究,如生态足迹法及生态承载力法,并对于阈值确定的方法进行了探索^[1-2],但大多仍以静态研究为基础,反映动态发展趋势的较少。

区域生态安全研究是以区域为研究客体,以区域复合生态系统为对象。作为系统科学研究重要方法的系统动力学是以计算机仿真技术为手段的研究复杂社会经济系统的定量方法,系统动力学模型能够反映复杂系统结构功能与动态行为之间的相互作用关系,适用于处理精度要求不高的复杂的社会经济及生态环境问题,其代表性工作是发表于 20 世纪 70 年代初的《增长的极限》。目前国际上系统动力学已广泛应用于生态环境研究领域^[3-5],国内此领域的研究也发展较快^[6-9]。本研究将以上海崇明岛为例,运用系统动力学模型及仿真的系统科学方法,为生态安全指标阈值的确定提供一种新的思路和方法。

1 区域特征及其生态安全指标体系

1.1 研究区域特征

崇明岛(121°9'30"—121°54'00"E,31°27'00"—31°51'15"N),位于上海市西北长江入海口,属长江河口冲积岛,地势低平。岛屿面积 126700 hm²,主要生态系统为农田、滩涂、养殖池和居民点,城镇集中于岛屿南部。长期以来由于交通阻隔,崇明岛经济发展较慢。由于崇明岛位于长江流域和东部沿海地区“T”字形格局的交汇点,其生态安全体系、特征及影响因子具有独特性、多样性和复杂性。近年来随着长三角经济的迅速发展,特别是沪崇越江隧桥工程的建设,对崇明岛的生态系统将产生重要影响。2004 年国务院正式批复的《上海市城市发展总体规划》进一步明确了崇明岛“综合生态岛”的发展目标,这对崇明岛生态系统的安全水平和健康状况的改善提出的巨大挑战。

崇明岛的生态环境特征可归纳如下三点:第一,生态环境的脆弱性。位置上的孤立隔离了岛屿与大陆生态系统的联系,使其与外界的物质与能量的交换和物种的交流受到的影响。崇明岛处于世界最大的大洋和世界最大的大陆的交界地带,受到海洋和大陆的影响将更为强大和复杂,生态系统十分脆弱;同时在人类活动作用日益加强的趋势下,能源消耗和环境污染为生态环境带来影响更增加了岛屿生态系统的脆弱程度。第二,区域生态系统的不稳定性。崇明岛是由长江泥沙淤积而成,其较短的形成及发展历史和类型较为单一的地形地貌,决定了其相对较低生物多样性。同时受流域和人为作用的双重影响,淤涨和围垦使崇明岛仍处于动态变化中,长期以来,崇明岛呈南坍北涨之势,岛屿中心向北移动。演变不定的崇明岛不仅关系到岛屿的空间扩展,还会给当地的生态系统带来诸多生态风险^[10],服务功能和抵御风险能力低^[11]。第三,自然灾害多发性。由于特殊的地理位置,易受到来自于洋流、气候等交互作用形成的自然灾害的侵袭,这对于岛屿生态系统的演变和发展影响巨大。崇明岛风暴潮、咸水入侵、台风和洪涝等自然灾害发生频繁;而人为导致的过度围垦、生物入侵、工农业污染物和周边区域大型工程的建设也使区域生态风险更为复杂^[12]。

1.2 区域生态安全指标体系

生态安全评价是区域生态安全研究的主要内容之一,国内外许多学者都进行了先期的探索,制定了生态安全评价体系的概念框架,并建立了各自不同指标体系,但主要可以概括为以下两类:第一,复合生态系统框架。复合生态系统理论反映了以人为主体的社会、经济系统和自然生态系统在特定区域内通过协同作用而形成的复合系统^[13],因而有很多的学者从复合生态系统的组成的角度建立了区域生态安全评价指标体系^[14-18];第二,PSR 框架。以揭示过程机制的“压力-状态-响应(PSR)”及其变体为模型框架强调对问题发生的原因-结果-对策的逻辑关系的分析,能很好抓住复合生态系统中“社会-经济-环境”相互关系的特点,是评价人类活

动与资源环境可持续发展方面比较完善的、权威的体系,许多学者以此作为生态安全评价的框架体系,并完成了大量的实证研究^[19-25]。

因此,本研究以 PRS 模型为框架,作为顶层指标设计的理论基础来构建准则层;根据复合生态系统理论,从社会、经济和自然 3 个方面选择具体指标构建指标层。根据区域的生态环境特征,压力指数(P)的主要因素体现在崇明岛频发的自然灾害和由新一轮经济发展带来的环境和能源压力方面;状态指数(S)以体现经济可持续性的产业结构特征及体现崇明岛生态系统服务功能较高的森林、滩涂和陆域水面等生态系统的质和量等特征为主要内容;响应指数(R)以反映防范生态风险的基础设施及保护生态环境为特征的污染处理率和新能源比例为主。在遵循综合性和代表性、系统性和协调性、动态性和前瞻性、可操作性和导向性等原则的基础上,进行具体指标的选择,建立备选指标集,进行相关行分析及建立隶属矩阵,进行指标的筛选和体系的简化,完成综合评价指标体系的构建(表 1)。

指标权重的确定的方法有多种,如 Delphi 法、AHP 法、主成分分析法等^[26]。本研究运用定性与定量综合集成方法来确定权重,即采用 AHP 法、结合专家咨询,确定准则层的权重:B1(0.302),B2(0.397),B3(0.301);指标层各指标的权重:C1(0.30),C2(0.29),C3(0.23),C4(0.18),C5(0.19),C6(0.21),C7(0.22),C8(0.23),C9(0.15),C10(0.29),C11(0.25),C12(0.26),C13(0.20),最后计算得到的指标总权重(表 1)。

表 1 崇明岛生态安全评价指标体系

Table 1 Eco-security evaluation index system of Chongming Island

目标层 Target layer	准则层 Rule layer	指标层 Index layer	总权重 Weight
A 生态安全综合指数 Eco-security integrated index	B1 压力指数	C1: 自然灾害损失率/%	0.091
		C2: COD 排放强度/(kg/10 ⁸ 元)	0.086
		C3: 单位 GDP 能耗/(kwh/10 ⁸ 元)	0.069
		C4: 单位 GDP 水耗/(10 ⁴ t/10 ⁸ 元)	0.054
	B2 状态指数	C5: 有机/绿色农产品比/%	0.075
		C6: 第三产业占比/%	0.083
		C7: 森林覆盖率/%	0.087
		C8: 滩涂面积比/%	0.091
		C9: 陆域水面积比/%	0.059
	B3 响应指数	C10: 基础设施建设投资比/%	0.087
		C11: 工业污染处理率/%	0.075
		C12: 生活污染处理率/%	0.078
		C13: 可再生能源比/%	0.060

2 崇明岛生态安全的 SD 建模和模拟方案的确定

2.1 系统动力学模型的建立及检验

2.1.1 模型的建立

本研究依据复合生态系统理论和崇明岛区域生态环境特征,构建模型结构及反馈关系,系统由经济子系统、人口子系统、资源子系统、环境子系统和生态子系统组成;由于复合生态系统所涉及和包涵的问题和要素纷繁复杂,而本研究的区域又是河口型岛屿,更增加了问题的复杂性,因此,在建立系统流图时,以反映崇明岛生态安全的主要问题和内部因果关系,仅选择影响崇明岛生态安全的核心因子,最终确定 71 个参数;使用专业软件 Vensim_PLE 建模,模型运行时间为 2007—2020 年,仿真步长为 1a;主要数据来源于《崇明统计年鉴》、《上海市统计年鉴》,建立系统动力学模型的系统流图(图 1),其具体各子系统的量化模型方程式在系统分析的基础上确定。

2.1.2 模型主要方程式

经济子系统主要选择能够反应经济发展水平的产业结构第一、二、三产业产值为流位变量,体现经济增长

水环境是崇明岛环境质量的薄弱环节,因此选择指示因子 COD 排放强度作为参考变量,根据产生的源头又可分为生活污染、农业污染和工业污染。常量参数有生活污染和工业污染处理率、人均生活污染排放量、农业和工业单产污染物产量等。环境子系统的方程式共有 15 个,主要有:

净工业污染量 $A \quad NIP = IPE \times (1 - TPIP)$

净生活污染量 $A \quad NDP = DPE \times (1 - TRPD)$

净农业污染量 $A \quad AP = PPA \times GDP1$

长江口咸潮入侵使崇明岛淡水资源的季节性短缺水十分突出,同时,由于经济的快速发展,能源将成为资源子系统的短板因子。因而,资源子系统选择淡水和能源供给和利用等变量,可再生能源比、咸水入侵面积比例等常量参数。资源子系统的方程式共有 22 个,主要有:

资源对经济的影响 $A \quad IRE = CIWE \times FWG + CIEE \times EG$

可用水资源量 $A \quad AWR = WRT \times (1 - PSI)$

崇明岛的自然生态系统主要是林地和湿地,它们也是保障和维系崇明岛未来发展的重要生态功能区。本研究将森林面积、湿地面积、自然生态系统代谢量等作为变量,单位林地环境纳污量、岛屿面积、滩涂面积比、陆域水面积比例等作为常量参数。生态子系统的方程式共有 12 个,主要有:

自然生态系统代谢量 $A \quad MNE = PCPF \times FA + PCPW \times WA$

生态需水量 $A \quad EWD = FA \times CFWR + CWWR \times WA$

2.1.3 模型的检验

分别运用相对误差和线性回归拟和两种方法对所建立的 SD 模型的运行结果进行检验。以 GDP 和人口总量两个变量为例,检验结果(表 2)可以发现,2001—2007 年 GDP 和人口总量的仿真值和历史值的相对误差均不超过 0.1,相对误差检验结果较为理想;同时,运用数据分析软件 Origin Pro 7.5 进行线性回归拟和检验,可得到如下结果:

GDP $R = 0.99624, SD = 2.27797, P < 0.0001$

人口总量 $R = 0.71797, SD = 0.71169, P = 0.04489$

历史值和仿真值的拟和系数 R 值比较高,差异显著性系数 P 值较小;因此,综合两种方法认为,两个变量通过历史检验;其他变量的历史检验也与此相似,通过历史检验。

表 2 GDP 和人口总量的历史检验结果

Table 2 Historic checkout of GDP and population

年份 Year	GDP/10 ⁸ 元			人口总量 Population/10 ⁴ 人		
	历史值 Historical value	仿真值 Simulation value	相对误差 Relative error	历史值 Historical value	仿真值 Simulation value	相对误差 Relative error
2000	54	53.9937	-0.08572	65.37	65.37	-
2001	57.83	60.3977	-0.04440	64.72	65.7459	-0.01585
2002	62.48	67.7125	-0.08375	64.01	66.1247	-0.03303
2003	70.07	76.0767	-0.08572	63.54	66.5066	-0.04668
2004	85.31	85.6503	-0.00399	63.26	66.8922	-0.05741
2005	95.72	96.6188	-0.00939	70.12	67.2819	0.04047
2006	108.26	109.1966	-0.00865	69.98	67.6766	0.03291
2007	122.79	123.6321	-0.00686	69.71	68.0770	0.02342

2.2 系统模拟方案的参数设定

本研究中生态安全阈值的确定将在考虑区域未来发展趋势和特征的基础上,通过比较不同发展方案情景下 SD 模型的模拟结果,提出符合崇明岛当前发展模式下的生态安全阈值,并运用模型检验。因此,确定合适的系统模拟方案,并根据需要选择模拟参数是本研究的重要任务之一。

自提出崇明岛生态岛建设的基本方向以来,各有关部门已经完成了大量相关研究,如 2007 年 6 月完成的《崇明岛生态县建设规划》(简称方案一)、2008 年 9 月完成的《崇明生态岛建设指标体系研究》(简称方案二)、2006 年 1 月完成的《崇明“十一五”发展规划》(简称方案三)等,这些研究对崇明岛近年来的发展发挥了一定的积极意义。由于规划的目的不同,规划或研究完成部门或专家的倾向性的差异,其侧重点和主要解决的矛盾也不同,因此,为了方案模拟的结果具有可比性,选择模拟变量首先尽可能遵循共有性原则,即变量尽可能的在各项规划指标中可以找到,或可通过推算间接获得。最终得到各方案模拟变量数值如表 3。

表 3 崇明岛现有发展规划方案的主要参数值
Table 3 Main parametric value of existing development plans of Chongming

参数 Parameter	现状趋势 Status trend	方案一 Case 1	方案二 Case 2	方案三 Case 3
RG1 /%	1.88	8.32 *	10.79 *	10.86 *
RG2 /%	17.11	9.27 *	11.76 *	11.82 *
RG3 /%	13.46	10.03 *	16.11 *	12.61 *
WCPG/(10 ⁴ t/10 ⁸ 元)	145	100	100	125 *
ECPG/(kwh/10 ⁸ 元)	1074.25	447.60	550.89	859.40
PPI/(kg/10 ⁸ 元)	8.21	3.5	3.93 *	4.10
ROAP /%	27.70	50	60	35 *
TRDP /%	12	23.34 *	80	17.51 *
RRE /%	1	5	5	—
RICI /%	18	30 *	30 *	25 *
IRDEZ /%	60 *	90 *	90 *	75 *
WAR /%	17	17	19	17
FCR /%	18	25	30	24

注:带 * 的数值是根据统计资料推算得到,其他值均为已有指标值

3 基于 SD 的生态安全指标阈值的确定

3.1 基于系统模拟方案比较的生态安全趋势分析

本研究建立的系统动力学模型中,变量“净 GDP”综合了经济、人口、资源、环境和生态等各变量参数,可以用于作为评价方案优劣的主要参考依据。净 GDP 是 GDP 减去自然灾害损失、资源和环境对经济的影响值(即资源和环境的资本消耗),系统模拟出的 2008—2020 年的这 3 类损失的仿真值如表 4 所示。净 GDP 的损失是在既定的社会经济发展模式和生态环境本底的条件下生态风险水平的高低,其与生态安全成反比。因此,净 GDP 的损失可以作为描述生态安全状态的主要参考指标。

表 4 2008—2020 年灾害损失、资源和环境对经济影响值的仿真结果
Table 4 Impact of disaster loss, resources and environment on the economy from 2008—2020 /(10⁸元)

项目 Item	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
灾害 现状趋势 ^①	13.73	15.64	17.84	20.38	23.33	26.73	30.67	35.24	40.52	46.64	53.74	61.97	71.50
损失 ^⑤ 方案一 ^②	2.82	3.09	3.38	3.70	4.05	4.43	4.85	5.30	5.80	6.35	6.95	7.61	8.33
方案二 ^③	2.92	3.31	3.75	4.25	4.82	5.47	6.21	7.05	8.01	9.11	10.35	11.78	13.40
方案三 ^④	7.73	8.66	9.70	10.86	12.17	13.62	15.26	17.09	19.14	21.44	24.02	26.90	30.14
资源 现状趋势 ^①	-21.59	-7.08	9.68	29.05	51.44	77.33	107.29	141.97	182.12	228.63	282.53	345.00	417.43
影响 ^⑥ 方案一 ^②	-84.49	-80.09	-75.28	-70.02	-64.27	-57.98	-51.09	-43.57	-35.33	-26.32	-16.46	-5.66	6.15
方案二 ^③	-73.76	-66.25	-57.71	-48.01	-36.99	-24.46	-10.20	6.04	24.53	45.59	69.61	96.99	128.24
方案三 ^④	-42.95	32.99	-21.83	-9.34	4.64	20.29	37.82	57.45	79.44	104.06	131.64	162.53	197.13
环境 现状趋势 ^①	26.42	26.99	27.58	28.18	28.79	29.42	30.06	30.72	31.40	32.09	32.81	33.56	34.32
影响 ^⑦ 方案一 ^②	12.19	13.60	15.12	16.77	18.54	20.47	22.54	24.79	27.23	29.86	32.71	35.79	39.13
方案二 ^③	1.41	2.89	4.53	6.34	8.35	10.58	13.04	15.77	18.79	22.14	25.85	29.96	34.52
方案三 ^④	7.73	5.66	9.70	10.86	12.17	13.62	15.26	17.09	19.14	21.44	24.02	26.90	30.14

①Status trend;②Case 1;③Case 2;④Case 3;⑤Disaster loss;⑥Resource impact;⑦Environment impact

图2是各方案模拟的灾害及资源和环境的损失,即GDP减去净GDP的值在未来13a里发展趋势。从图中可以看出,净GDP的损失总的趋势是呈上升的,因此可以认为,崇明岛未来生态安全将面临越来越大的压力。各规划方案模拟的结果均低于现状趋势,既按规划方案发展,生态安全水平较高于现状趋势发展;但也存在一定的差异,以方案一和方案二安全水平较高。

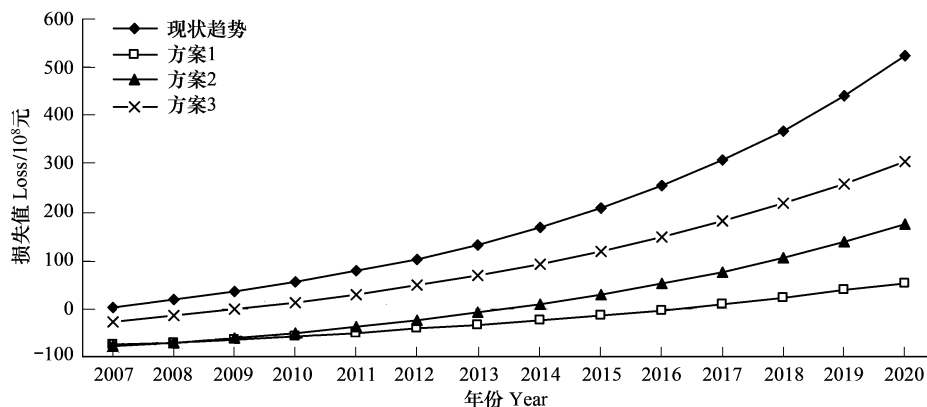


图2 各方案模拟的净GDP损失结果

Fig. 2 Simulation result of loss of net GDP loss of different projects/ (10^8 元)

从各方案模拟的净GDP损失结果中,可以看出,现状发展趋势所有年份(2007—2020)的值均为正值,且增长较快,因此,如果按照现有模式发展崇明岛生态安全水平未来的趋势非常令人担忧;而方案一和方案二在未来不同时段内(分别为8a和6a)的净GDP损失为负值,且总体损失值较小,生态安全水平较为稳定;方案三,在“十一五”结束年(2010年)前的净损失基本小于0,基本也保障了生态安全水平。因此,可以综合3个规划方案的参数值,作为生态安全评价和控制的参考标准;同时根据系统模拟的结果分析,得到最终的生态安全阈值。

3.2 生态安全指标阈值的确定

3.2.1 经济发展阈值

由于新的战略定位和陆海交通建设的机遇,近年来有不少学者借鉴我国深圳、上海浦东等开发区的经济增长模式,认为崇明岛在未来的十几年里经济增长将以20%的速度飞速发展(在近10a有望达到60%)^[27]。但本研究发现,由于崇明岛长期以来经济发展水平较低,生态安全保障基础薄弱,在产业结构、污染控制水平及资源利用效率等方面没有达到较为理想的状态时,经济的过快增长将消耗很高的自然资本和环境资本,即以生态环境为代价的经济增长。这明显不符合生态岛的定位和发展目标。因此,崇明岛未来经济发展的主要方向不应是追求经济增长的速度,应当是在生态保护和建设的同时,加大政策引导和强制措施,尽快进行产业结构的调整,在这一过程初始的几年中甚至可以牺牲一定的经济增长率。因此,本研究在系统模拟分析的基础上,认为10%左右应为未来13a GDP较为合理的平均增长率;以三产比10:30:60为目标,则可以得到三产经济增长率分别为7.35%, 5.93%和14.1%。

3.2.2 资源利用阈值

从资源角度分析,崇明岛的岛屿特征决定了其资源的有限性和依赖性,同时,处于长三角这个经济较为发达而资源相对紧张的地区;因而,提高资源的利用效率和自给能力,在社会经济发展的同时减少对整个区域的压力是生态岛建设的重要任务,同时也是决定崇明岛生态安全水平的重要因素。基于上述分析,根据系统方案模拟的结果,可以确定在10%经济增长率情景下,反映资源利用效率的单位GDP能耗和单位GDP水耗值分别为447.6—402.84kWh/ 10^8 元和100—90t/元,同时反映资源的自给能力和环境安全水平的可再生能源比5%—5.5%。

3.2.3 环境保护和生态建设阈值

降低污染排放量和提高污染处理率是减少环境污染的主要措施,参照模拟结果,COD 排放强度、工业污染处理率、生活污染处理率的较优值应为 3.5—3.18、100%、80%。由于农业面源污染是目前造成崇明岛水环境质量较差的主要来源,因此,为减少农业污染,并结合生态岛建设的目标,将有机/绿色农产品比重定位 65%—71.5%。同时,保护和恢复自然生态系统,提高其代谢和纳污能力,提高生态环境质量的又一重要措施,结合崇明岛实际,森林覆盖率为 35%—38.5%、陆域水面积比例为 11%—12.1%,滩涂面积比为 11.36%—12.5%、其中由于崇明岛每年得自冲淤而来的滩涂面积大约为 1234 hm²,据此,到 2020 年滩涂面积将有望达到 17000 hm²(岛屿面积约为 149600 hm²),如加以保护,面积比可达到 11.36%。

3.2.4 防灾和保障建设阈值

自然灾害频发且损失较大是威胁崇明岛生态系统稳定和安全的重大问题之一。一方面缘于其特殊的地理位置和气候条件,另一方面原因是崇明岛基础设施的严重不足和土地利用不合理。因此应大力加强基础设施投资,保证防洪、防风、防咸等基础设施的投入的增加,科学的规划和利用土地,恢复和保证湿地等防灾生态功能区的完整性,从而减少自然灾害的损失率。据系统模拟分析,近年基础设施建设投资比定为 30%—33%,防灾生态功能区的完整率为 90%—100%;由此可得自然灾害损失率为 6%—5.4%。

3.3 阈值的验证

将上述确定的各指标阈值的下限值(表 5)代入到 SD 模型中进行模拟,通过观察“GDP-净 GDP”的值,可以得到其验证结果如表 4 所示。从表 4 中可以看出 2007—2016 年中,“GDP-净 GDP”的值都是负值,即社会经济的发展没有造成资源和环境的赤字。2017—2020 年“GDP-净 GDP”的值开始出现正值,但其验证值(百分比)较低(基本小于 0.1),对生态安全的影响不大,可以通过小量系统的外界输入得到安全水平的保障。因此,总体验证结果比较适宜,可以认为,所定的阈值基本能够代表崇明岛 2020 年前生态安全的主要特征。

表 4 生态安全阈值的验证结果
Table 4 Validation result of threshold of eco-security

年 Year	GDP	净 GDP Net GDP	GDP-净 GDP GDP-Net GDP	验证值 Validate result
2007	122.7800	209.7333	-86.9533	-0.7082
2008	134.0402	215.9813	-81.9411	-0.6113
2009	146.5131	222.9397	-76.4266	-0.5216
2010	160.3462	230.6979	-70.3517	-0.4388
2011	175.7065	239.3574	-63.6509	-0.3623
2012	192.7827	249.033	-56.2501	-0.2918
2013	211.7888	259.8553	-48.0665	-0.2269
2014	232.9668	271.9724	-39.0056	-0.1674
2015	256.5913	285.5524	-28.9611	-0.1129
2016	282.9733	300.7864	-17.8130	-0.0629
2017	312.4658	317.8913	-5.4255	-0.0174
2018	345.4690	337.1137	8.3553	0.0242
2019	382.4373	358.7339	23.7034	0.0619
2020	423.8865	383.0706	40.8159	0.0963

4 生态安全指标阈值的应用

4.1 生态安全指标的标准化

由于各项评价指标数据性质不同,具有不同的纲量,算法各异,为了统一用于评价计算,有必要对参评因子无量纲化(即归一化)处理。本研究根据各因子的数据特征和评价任务,采用直线型法进行数据的标准化处理标准,把指标值转化为无纲量的相对数,同时数值大小规范在[0,1]。根据指标的评价目标,将指标分为

发展类指标和限制类指标,即越大越好和越小越好两类。发展类指标采用公式:

若 $x_{ij} < S_j, z_{ij} = \frac{x_{ij}}{S_j} (i = 1, 2, 3, \cdots, n; j = 1, 2, 3, \cdots, m)$; 若 $x_{ij} \geq S_j, z_{ij} = 1$

后者采用公式:

若 $x_{ij} < S_j, z_{ij} = \frac{S_j}{x_{ij}} (i = 1, 2, 3, \cdots, n; j = 1, 2, 3, \cdots, m)$; 若 $x_{ij} \geq S_j, z_{ij} = 1$

式中, x_{ij} 为各项指标的现状值; S_j 为各指标的阈值(取下限值); n 为评价区域数; m 为评价指标数。

运用确定的指标阈值对崇明岛生态安全评价指标的现状值(2007 年)进行标准化后,结果如表 5,从表中可以看出,所有的 13 个因子现有的情况参差不齐,且总体水平不高。其中得分较高的是陆域水面积比(C9)、工业污水处理率(C11)达到 0.8 以上;而生活污水处理率(C12)和清洁能源比(C13)得分较低低于(或等于)0.2,是目前生态安全的限制因子;其他大部分因子的得分值均处于 0.4—0.7 之间。

表 5 崇明岛生态安全的指标阈值及现状值的标准化结果

Table 5 Index threshold of eco-security of Chongming Island and standardization results of status value

指标 Index	阈值 Threshold		现状值(2007 年) Status value	标准化结果 Standardization results
	下限值 Lower limit	上限值 Upper limit		
C1	6	5.4	9.00	0.67
C2	3.5	3.18	8.21	0.43
C3	447.6	402.84	1074.25	0.42
C4	100	90	10.85	0.6
C5	65	71.5	27.70	0.43
C6	60	66	37.00	0.62
C7	35	38.5	18.00	0.51
C8	11.36	12.5	6.00	0.53
C9	11	12.1	10.00	0.91
C10	30	33	18.00	0.6
C11	100	110	83.00	0.83
C12	80	88	12.00	0.15
C13	5	5.5	1.00	0.2

注: C1—C4 为限制类指标,因此上限值小于下限值

4.2 生态安全的综合评价

根据综合指数法进行生态安全的综合评价。采用加权求和模型计算可以得到近年来崇明岛生态安全的综合评价结果(表 6),评价结论可以归纳为以下几点:第一,综合崇明岛的生态安全现状评价(2007 年)结果可以看出,崇明岛的生态安全综合得分为 0.523,正处于一个中间的敏感区,随着遂桥工程的竣工,经济和社会的压力对区域生态安全将是个极大的挑战;第二,比较 2001—2007 年的评价结果,可以看出生态安全的综合得分呈现逐渐提高的趋势,主要源于在政策导向和管理上对生态环境保护建设工作的日益加强,使得近几年的整体综合指数有所提高;第三,在二级综合指数评分结果中,状态指数相对较高,而压力和响应指数较低,是目前制约生态安全综合水平的主要因素。因此可以认为,在现有状态下,加强生态建设和完善管理和保障措施,降低生态风险对整个崇明岛生态系统的压力,应当是提高生态安全综合指数的主要方向。

表 6 2001—2007 年崇明岛生态安全评价结果

Table 6 Valuation result of eco-security of Chongming from 2001 to 2007

项目 Item	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001
压力指数 Pressure index	0.53	0.5	0.48	0.45	0.42	0.39	0.38
状态指数 State index	0.58	0.55	0.53	0.5	0.52	0.51	0.49
响应指数 Response Index	0.46	0.37	0.34	0.29	0.26	0.24	0.22
综合值 Integrated value	0.523	0.469	0.446	0.410	0.400	0.381	0.364

5 结论和讨论

对于生态系统健康和安全有重要指示意义的指标阈值是区域生态安全评价的重要标准和区域发展过程中各项建设控制的门槛。安全阈值应当是生态安全关键要素的整体水平的反映,同时是具有时空动态差异性的、反映相对安全的一套参数标准值。阈值在实际研究中较多地应用于生态安全的评价中,同时,对于实践管理和政策调控也有重要的指导价值。

崇明岛是典型的河口冲积型岛屿,区域的开放与开发给原本就较为脆弱的生态系统带来了巨大的压力和挑战,根据其特殊的地域生态特征,选取了自然灾害率、湿地覆盖率、森林覆盖率等指示性因子作为评价指标和系统建模的主要变量;充分考虑崇明岛区域复合生态系统未来发展变化的趋势特点,选择重要的影响因子,如三产比例的变化、人口的增加、资源的消耗效率及环境污染的产生和控制状况等,建立能够符合和反映系统的内在关系和机制的系统动力学模型;通过情景方案模拟揭示系统生态安全的动态趋势和特征,这为确定较为科学的、具有一定前瞻性的、能够反映区域特点的生态安全阈值提供了依据;尝试了以区域系统动态研究为基础确定阈值的方法和思路。

在本研究中所建立的系统模型中,由于变量“净 GDP”综合了经济、人口、资源、环境和生态等各变量参数,可以用于作为评价方案优劣的主要参考依据,同时综合 3 个规划方案的参数值,可以在遵循经济发展模式的健康有序、环境污染的压力和生态功能的平衡和自然灾害损失的最小化的原则下,确定生态安全评价的参考阈值。将本研究确定的阈值应用于崇明岛的生态安全综合评价中,得到了比较适宜的结果,验证了阈值的合理性。

References:

- [1] Wang K Y, Zou C J, Kong Z H. Ecological carrying capacity and Chongming Island's ecological construction. *Chinese Journal Apply Ecology*, 2005, 16(12): 2447-2453.
- [2] Zhang Y F, Ren Z Y. Regional ecological security on landscape scale. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2005, 35(6): 815-818.
- [3] Costanza R. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III. *Ecological Modeling*, 2001, (143): 17.
- [4] Gunnar K. Regional co-development and security: a comprehensive approach. *Ocean & Coastal Management*, 2002, (45): 761-776.
- [5] Xiao Q S, Zhao J Z, Yang Z Y. Assessment of eco-security in the knowledge grid e-science environment. *The Journal of Systems and Software*, 2006, 79: 246-252.
- [6] Shi H H, Gao M, Ding D W. Advance of systemic dynamic complexities and its application in marine ecology research. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(6): 594-600.
- [7] Yang J, She X Y, Lin N F. A study on system dynamics model in eco-environment planning for Da'an of Jilin Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5): 1178-1183.
- [8] Tuo X S, Chen X P, Xue B. System dynamic simulation model of water-land resources carr. ying capacity in Minqin county. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006, 20(6): 78-83.
- [9] He Y S. *Dynamic Simulation and Policy Control of Region Society and Economy System Development*. Hefei: Chinese Technology University Publishing Company, 2008. 3-4.
- [10] Zhao B, Kreuterh L, Li B. An ecosystem service value assessment of land use change on Chongming land. *China Land Use Policy*, 2004, 21: 139-148.
- [11] Yuan W, James P, Hodgson K. Development of sustain-ability indicators by communities in China: A case study of Chongming County. *Shanghai Environment*, 2003, 68: 253-261.
- [12] Yang J. *The theory and method of island ecological risk assessment: a case study in three islands of Chongming in China*. Shanghai: East China Normal University, 2007, 5: 42-43.
- [13] Wang R S, Zhou Q X. *The Ecology Control Method in City*. Beijing: Meteorology Press, 2000: 31-36.
- [14] Xie Y K, Chen G C, Fang Z D. Assessment of Municipal Environment Security. *Journal of Logistical Engineering University*, 2005, 1: 86-89.
- [15] Jia L Q, Ouyang Z Y, Zhao T Q. Ecological security assessment of urban ecosystem. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 592-596.
- [16] Ni Q L. *Research On building Shanghai Ecotypic City*. Shanghai Economic Research, 2005, 4: 67-71.

- [17] Wu G Q. Study on ecological safety and its evaluation of regional agricultural sustainable development. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2001, 22 (4):26-30.
- [18] Wang X R. On the outskirts of Shanghai environmental protection and ecological construction index system; a case study of Chongming Island. *Shanghai Environmental Science*, 1998, 13 (10):397-399.
- [19] Wang C, Wu W. GIS-based watershed eco-security spatial differentiation characteristics. *Environmental Science*, 2005, 26 (5): 28-33.
- [20] Barnthouse L W. The role of models in ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1992, 11:1751-1760.
- [21] Boughton D A, Smith E R, O'Neill R V. Regional vulnerability: a conceptual framework. *Ecosystem Health*, 1999, 5:312-322.
- [22] Wallace R L. From resource scarcity to eco-security: exploring new limits to growth. *Global Environmental Politics*, 2007, 7(2): 147-148.
- [23] Rapport D J, Co stanza R, M, Michael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13 (10):397.
- [24] Cui S J, Hong H S, Huang Y F. Eco-security research. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4):861-868.
- [25] Wang G X, Cheng G D, Qian J. Ecological safety evaluation studies in a number of issues. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (9): 1551-1556.
- [26] Xie H L, Li B. A study on indices system and assessment criterion of ecological for city. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2004, 40(5):705-710.
- [27] Zeng G. *Theory and Practice of Ecology Economy: Take Ecology Economical Planning of Shanghai Chongming for Example*. Beijing: Science Publishing Company, 2008. 173-176.

参考文献:

- [1] 王开运,邹春静,孔正红.生态承载力与崇明岛生态建设. *应用生态学报*,2005,16(12):2447-2453.
- [2] 张艳芳,任志远.景观尺度上的区域生态安全研究. *西北大学学报(自然科学版)*,2005,35(6):815-818.
- [6] 石洪华,高猛,丁德文.系统动力学复杂性及其在海洋生态学中的研究进展. *海洋环境科学*,2007,26(6):594-600.
- [7] 汤洁,余孝云,林年丰.吉林省大安市生态环境规划系统动力学仿真模型. *生态学报*, 2005, 25(5): 1178-1183.
- [8] 拓学森,陈兴鹏,薛冰.民勤县水土资源承载力系统动力学仿真模型研究. *干旱区资源与环境*,2006, 20(6):78-83.
- [9] 何有世.区域社会经济系统发展动态仿真与政策调控.合肥:中国科学技术大学出版社, 2008:3-4.
- [12] 杨娟.岛屿生态风险评价的理论与方法——崇明三岛实证研究.上海:华东师范大学, 2007, 5:42-43.
- [13] 王如松,周启星.城市生态调控方法.北京:气象出版社, 2000:31-36.
- [14] 谢有奎,陈灌春,方振东.城市环境安全评价初探. *后勤工程学院学报*,2005,1:86-89.
- [15] 贾良清,欧阳志云,赵同谦.城市生态安全评价研究. *生态环境*,2004,13(4):592-596.
- [16] 倪前龙.上海生态型城市建设研究. *上海经济研究*,2005, 4: 67-71.
- [17] 吴国庆.区域农业可持续发展的生态安全及其评价研究——以浙江省嘉兴市为例. *中国农业资源与区划*, 2001.22(4):26-30.
- [18] 王祥荣.论上海郊区环境保护与生态建设指标体系的构建——以崇明岛为例. *上海环境科学*,1998,13 (10):397-399.
- [19] 王耕,吴伟.基于 GIS 的西辽河流域生态安全空间分异特征. *环境科学*,2005,26(5):28-33.
- [24] 崔胜军,洪华生,黄云凤.生态安全研究进展. *生态学报*,2005,25(4):861-868.
- [25] 王根绪,程国栋,钱鞠.生态安全评价研究中的若干问题. *应用生态学报*,2003,14(9):1551-1556.
- [26] 谢花林,李波.城市生态安全评价指标体系与评价方法研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*,2004,40(5):705-710.
- [27] 曾刚.生态经济的理论与实践——以上海崇明生态经济规划为例.北京:科学出版社, 2008:173-176