

引用格式:陈慧,付光辉,刘友兆,等.南京市土地资源安全SD法评价研究[J].资源科学,2017,39(5):846-859. [Chen H, Fu G H, Liu Y Z, et al. Regional land resource security evaluation based on system dynamics in Nanjing City[J]. *Resources Science*, 2017, 39(5): 846-859.] DOI: 10.18402/resci.2017.05.05

# 南京市土地资源安全SD法评价研究

陈 慧<sup>1</sup>,付光辉<sup>2</sup>,刘友兆<sup>1</sup>,邵鹏宇<sup>2</sup>

(1. 南京农业大学公共管理学院,南京 210095; 2. 南京工业大学经济与管理学院,南京 211816)

**摘 要:**土地资源安全是国家安全和区域安全的重要内容,保障土地资源安全是社会的迫切需求。本文以南京市为研究对象,从“压力-状态-响应”(PSR)思路出发制定区域土地资源安全评价系统框图,将土地资源安全系统分为粮食安全保障、土地经济安全、土地生态安全3个子系统。基于系统动力学,分析其与区域社会、经济和自然环境之间的相互影响关系,并进行定量化仿真模拟研究,全面揭示土地资源系统的稳定性、安全性和连续性。通过建立区域土地资源安全评价系统流图,开展SD动态仿真模拟,进而采取层次分析法进行指标权重的确定,综合评价区域土地资源安全等级。通过对设计的15种方案SD仿真模拟,得出了南京市土地资源安全战略发展最优方案,最终选择方案3、6、2、9作为南京市土地资源安全的优化模式,又以方案3为最优。本文采用Vensim PLE软件对所建立的模型进行了适合性和一致性检验。本文构建的SD仿真模型是集社会、经济、自然环境外部系统和内部结构为一体的综合性动态分析模型,能够清晰地表达出土地资源安全系统的整个关系网,可为区域土地资源安全评价特别是其在时间维度上的对比研究提供参考。

**关键词:**系统动力学;土地资源安全评价;指标体系;系统流图;南京市

DOI: 10.18402/resci.2017.05.05

## 1 引言

土地作为人类不可或缺的物质基础,是人类活动的栖息地和衣食的基本来源。健康的土地功能是维系经济安全和社会稳定的决定性因素,关系到国家的政治安全、经济安全、国防安全和人民的生存安全。当前社会经济的快速发展对土地资源系统产生了一些负面的影响,导致了一系列问题的出现,如化肥、农药和地膜的大量使用,造成土地污染,影响了农业生产可持续发展;工矿企业产生大量废水、废物排放,造成土地和水资源污染;建设用地扩张影响了粮食安全。土地资源安全已经成为国家安全和区域安全的重要内容,与经济安全、生态安全、国防安全等拥有同等重要的战略地位,是国家其他安全的载体和基础,是整个社会经济系统可持续发展的前提,保障土地资源安全是社会的迫切需求。如何才能有效解决土地资源安全与人类

社会发展友好共存、实现可持续发展成为重要的课题之一。

目前国内外土地资源安全领域研究内容概括来说,主要包括土地资源安全性研究<sup>[1]</sup>、土地生态服务价值研究<sup>[2]</sup>、土地资源安全评价研究<sup>[3,4]</sup>以及引起土地资源安全变化的相关因素研究<sup>[5]</sup>,研究重点集中在评价指标体系的建立和评价方法的确定上。如王楠君等建立的评价指标体系包含土地资源经济安全、耕地安全、土地生态安全<sup>[6]</sup>;李四林等从城市扩张、社会发展、质量价值、环境价值构建指标体系<sup>[7]</sup>;黄辉玲则认为应涵盖人均耕地面积、土地人口容量、生态足迹等<sup>[8]</sup>;丰雷等建立的体系较为全面,包括土地资源数量安全、质量安全、结构安全、效率安全、价格安全<sup>[9]</sup>。目前主要的评价方法有综合指数评价法、物元分析法、系统聚类分析法、BP神经网络评价方法等<sup>[10-14]</sup>,评价方法原理呈现多样化趋

收稿日期:2016-06-02;修订日期:2017-03-19

基金项目:国家社科基金资助项目(10BJY040);“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0701601-02)。

作者简介:陈慧,女,江苏盐城人,博士生,主要研究方向为土地资源可持续利用。E-mail:chenhui728@126.com

通讯作者:刘友兆,E-mail:yzliu@njau.edu.cn

2017年5月

势。从一定程度上讲,对区域土地资源安全状况的分析和评价,其重点是这一区域土地资源系统的稳定性、安全性和连续性<sup>[15,16]</sup>。很多研究都是在对已发生年份相关指标数据的总结上直接进行的评价。这种评价的缺点是没有量化刻画土地资源系统内子系统之间、系统内与系统外相关因素之间的关系,也就无法表明这些关系的相互作用、影响、制约的机制机理,缺乏时间上的连续性、动态性分析,无疑会存在一定的局限性。本文利用系统动力学的基础理论与方法,把系统内部的各子系统之间、系统内与系统外的相互关系进行量化分析,全面揭示土地资源系统的稳定性、安全性和连续性,并据此设计土地资源安全评价等级指数,对南京市土地资源安全进行分析。

## 2 研究区概况与数据来源

### 2.1 研究区概况

南京市面积为6587km<sup>2</sup>,长江穿城而过,具有优越的水资源优势,是重要的交通枢纽中转站。地貌特征属宁镇扬丘陵地区,以低山缓岗为主,低山占土地总面积的3.5%,丘陵占4.3%,岗地占53%,平原、洼地及河流湖泊占39.2%。气候为北亚热带湿润气候,平均降雨量1106.50mm,相对湿度较高,具有规律性的梅雨季节。2014年总人口为821.61万,地区总产值8820.75亿元,实现财政收入900亿元,城镇居民年可支配收入达42568元。

### 2.2 数据来源

本文研究数据来源于相关年份的统计年鉴、相关普查资料等,包括2006–2015年《南京市统计年鉴》<sup>[17]</sup>、南京市国土资源局政府信息公开统计数据<sup>[18]</sup>、南京市国土资源综合统计报告<sup>[19]</sup>以及南京市国民经济和社会发展规划第十三个五年规划纲要<sup>[20]</sup>等相关资料。

## 3 研究区土地资源安全SD法评价

### 3.1 系统框图与边界

诱发区域土地资源安全问题的因素分为社会因素、经济因素和自然因素。从自然因素来讲,土地资源的有限性和不可替代性导致了土地资源不能随着人类社会的发展、经济的增长而增多,即土地资源供给量不足以满足其需求量,出现供需失调现象;从社会、经济因素来讲,土地资源的整体性决定

了土地资源安全涉及社会、经济等多个因素,这些因素之间存在复杂的关系,其中某一个因素发生变动,都有可能引起整个系统发生质的变化,这是因为土地资源的需求量会随着每一个因素的变化而发生变化,出现需求与供给的不平衡现象。

基于上述分析,解决区域土地资源安全问题的关键是系统、全面、动态、协调地对土地资源的开发、利用、管理进行分析,制定对应的措施,实现土地资源的供需平衡。因此,从本质来讲,就是要协调“压力(P)-状态(S)-响应(R)”三者之间的关系,即区域土地资源安全评价研究可以从PSR思路出发,制定区域土地资源安全评价系统模型(图1)。

压力指标反映产生土地资源安全问题的原因和潜在的影响,主要来自社会发展、经济增长和自然环境变化;状态指标用来反映人类活动所导致的土地资源状况的变化,主要有粮食安全保障、土地经济、土地生态等状况;响应指标用来反映克服土地资源安全问题的能力和所做的反应,包括土地整治等工程措施和规划、政策等非工程措施。

从系统框图中可以看出,区域土地资源安全系统受社会、经济、自然环境三大外部因素的影响,它是由粮食安全保障系统、土地经济安全系统和土地生态安全系统3个子系统组成,外部因素和子系统内部之间存在一定的影响关系,表现在:

(1)社会、经济、自然环境三大外部因素的发展,使得土地经济安全系统内的建设用地需求量和生态用地需求量发生变化,同时与耕地需求量的提高或降低存在一定的关联,使得内部子系统的变化不能与外部环境的变化相适应。

(2)粮食安全保障,能够为社会、经济的可持续发展提供不可或缺的物质基础,内部因素反作用于外部因素。

(3)根据内部子系统之间的相关关系,可以对土地资源安全问题采取相应的措施,保障系统内部结构的稳定性和完整性。

根据上述系统框图,可将粮食安全保障、土地经济安全、土地生态安全3个方面作为“区域土地资源安全系统”的系统边界。

### 3.2 系统因果关系及其反馈回路分析

依据上述系统框图和系统边界,区域土地资源

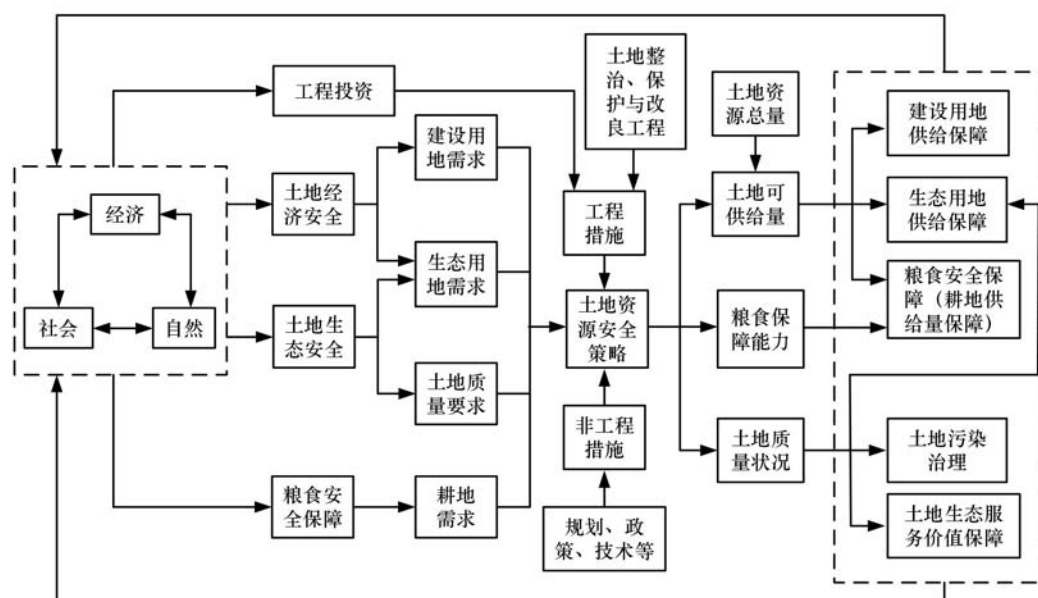


图1 区域土地资源安全系统

Figure 1 Frame chart of land resources security system

安全系统包括粮食安全保障子系统、土地经济安全子系统和土地生态安全子系统。为进一步明确系统中的变量因素及其相互影响的极性,分别绘制3个子系统因果关系图,分析其反馈回路。

### 3.2.1 粮食安全保障子系统

(1)社会经济(发展)-GDP(增长)-建设性投资(增加)-建设用地面积(增加)-建设占用耕地(增加)-耕地面积(减少)-粮食作物播种面积(减少)-人均粮食占用量(降低)-粮食自给能力(降低)-粮食安全保障能力(降低)-粮食安全保障标准(降低)-社会经济(阻碍发展)。

(2)社会经济(发展)-GDP(增长)-建设性投资(增加)-建设用地面积(增加)-建设占用耕地(增加)-土地整治专项投资(增加)-耕地面积及粮食单产(增加或提高)-粮食安全保障措施(增加)-粮食安全保障能力(提升)-粮食安全保障标准(提高)-社会经济(发展)(图2),图中箭头上方+号表示正反馈,即前一项指标增加(或减少)促进后一项指标增加(或减少),两者为同向变化;一号表示负反馈,即前一项指标增加(或减少)使后一项指标减少(或增加),两者为反向变化。

### 3.2.2 土地经济安全子系统

(1)社会经济(发展)-GDP(增长)-建设用地供给投资(增加)-建设用地供给措施(增加)-建设用地

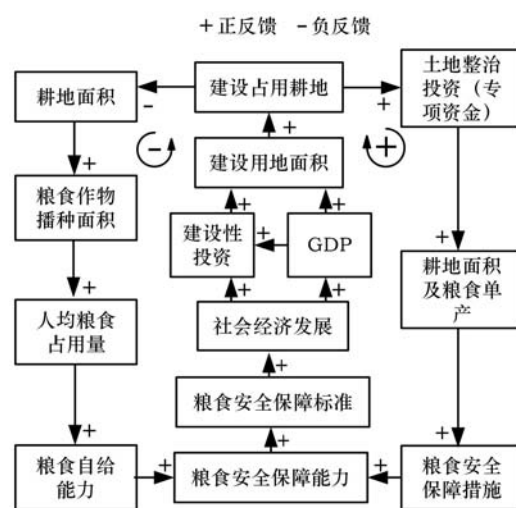


图2 区域粮食安全保障子系统因果关系

Figure 2 Causal loop of regional food safety guarantee system

供给能力(提高)-建设用地面积(增加)-建设用地供给保证率(增加)-人地矛盾(缓和)-社会经济(发展)。

(2)社会经济(发展)-GDP(增长)-建设用地供给投资(增加)-建设用地供给措施(增加)-建设用地供给能力(提高)-耕地及生态用地(减少,被建设占用)-耕地供给保证率和生态环境(降低)-人地矛盾(突出)-社会经济(阻碍发展)(图3)。

### 3.2.3 土地生态安全子系统

(1)社会经济(发展)-GDP(增长)-土地生态投



2017年5月

资(增加)-土地生态措施(增加)-土地生态改善(提高)-社会经济(发展)。

(2)社会经济(发展)-GDP(增长)-生产性投资(增加)-生态用地(减少,被建设占用)-土地生态服务价值(降低)-社会经济(阻碍发展)(图4)。

在各子系统因果关系分析基础之上,进而得出区域土地资源安全系统因果与相互关系图(图5)。

### 3.3 系统流图

因果关系图只能描述反馈结构的基本方面,不能表示不同性质变量的区别,可以引入流图法对系统进行描述<sup>[21]</sup>。本文根据上述区域土地资源安全系统反馈回路,针对南京市的具体情况,建立并形成了南京市土地资源安全总系统流图(图6)。

### 3.4 参数及方程

本文根据研究内容和变量的性质,所使用的方

程有:常量方程(C方程)、速率方程(R方程)、N方程和其他方程<sup>[21-24]</sup>。

(1)常量方程(C方程):主要是给常量赋值(数据均来源于区域相关统计资料,初始值为2014年数据),模型中主要常量详见表1。

(2)速率方程(R方程):用于给仿真变量时间T

表1 模型中主要常量

Table 1 Main constants in the model

初始值	增长率
GDP初始值	GDP增长率
总人口初始值	人口增长率
粮食作物播种面积初始值	粮食作物播种面积增长率
粮食单产初始值	粮食单产增长率
耕地面积初始值	耕地面积减少率(建设占用)
建设用地面积初始值	牧草地面积初始值
园地面积初始值	园地面积减少率
林地面积初始值	林地面积减少率
水域面积初始值	水域面积减少率
未利用土地面积初始值	未利用土地面积减少率
土地整治投资额初始值	土地整治投资增长率

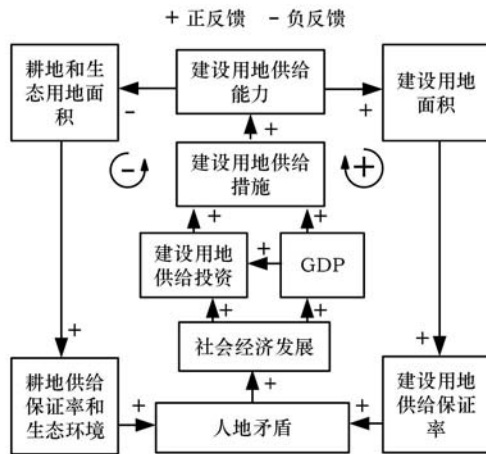


图3 区域土地经济安全子系统因果关系

Figure 3 Causal loop of regional land economic security system

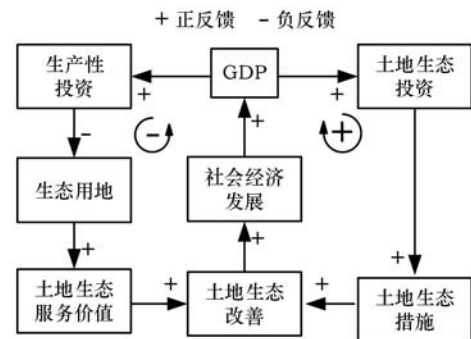


图4 区域土地生态安全系统因果关系

Figure 4 Causal loop of regional land ecological safety system

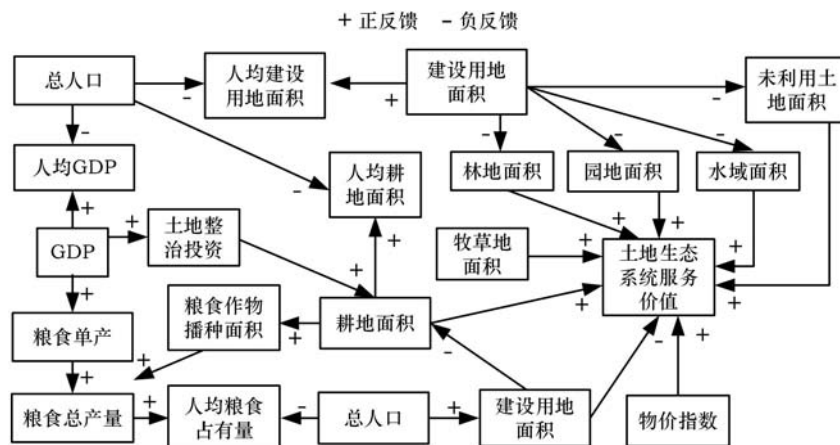


图5 区域土地资源安全系统因果关系

Figure 5 Causal loop of regional land resources security system

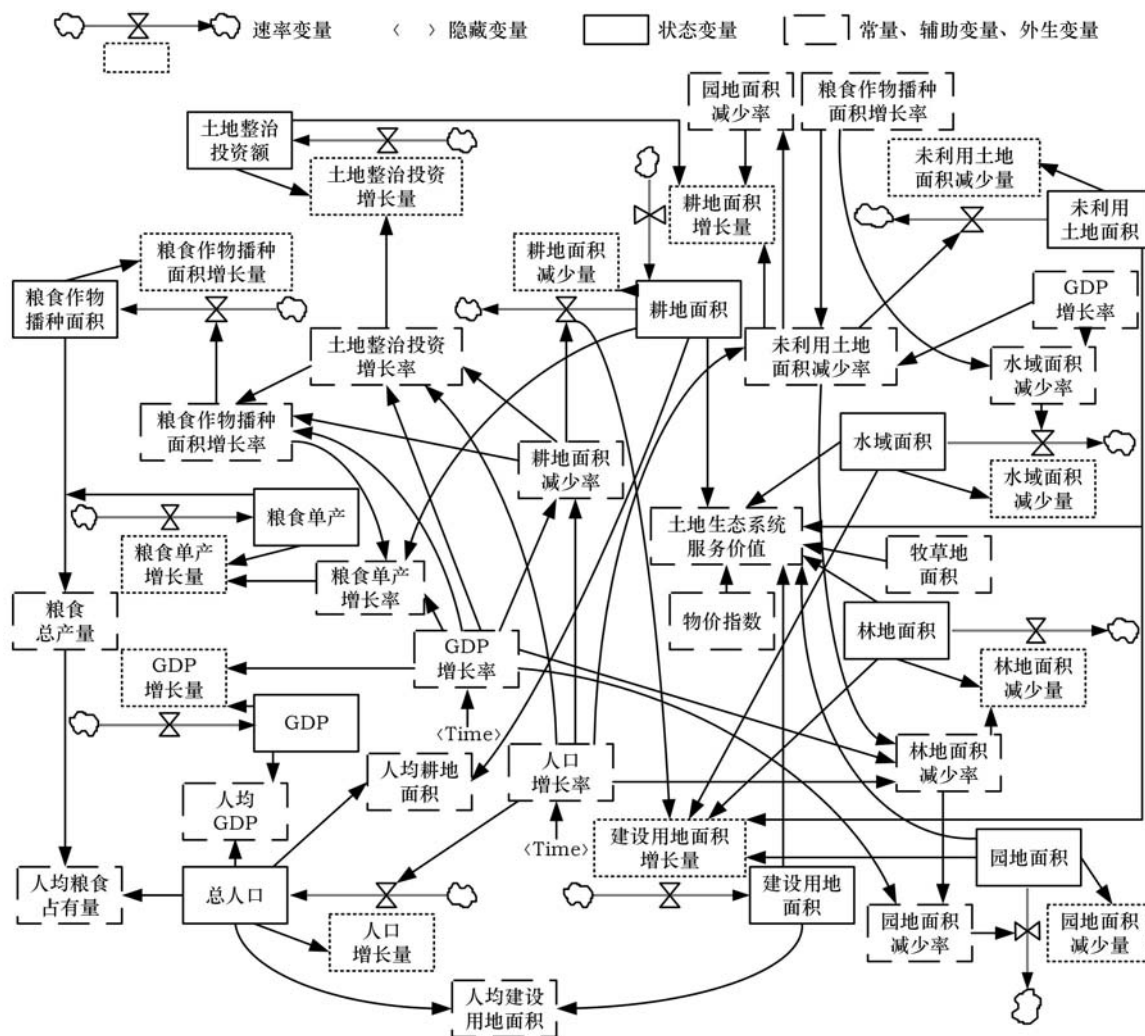


图6 南京市土地资源安全总系统流图

Figure 6 General system flow diagram of land resources security in Nanjing City

的增量赋值。

$$\text{GDP增长量} = \text{GDP} \times \text{GDP增长率} \quad (1)$$

$$\text{人口增长量} = \text{总人口} \times \text{人口增长率} \quad (2)$$

$$\text{粮食作物播种面积增长量} = \text{粮食作物播种面积} \times \text{粮食作物播种面积增长率} \quad (3)$$

$$\text{粮食单产增长量} = \text{粮食单产} \times \text{粮食单产增长率} \quad (4)$$

$$\text{耕地面积减少量(建设占用)} = \text{耕地面积} \times \text{耕地面积减少率(建设占用)} \quad (5)$$

$$\text{园地面积减少量} = \text{园地面积} \times \text{园地面积减少率} \quad (6)$$

$$\text{林地面积减少量} = \text{林地面积} \times \text{林地面积减少率} \quad (7)$$

$$\text{水域面积减少量} = \text{水域面积} \times \text{水域面积减少率} \quad (8)$$

$$\text{未利用土地面积减少量} = \text{未利用土地面积} \times \text{未利用土地面积减少率} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{建设用地面积增长量} = & \text{耕地面积减少量} \\ & (\text{建设占用}) + \text{园地面积减少量} \\ & + \text{林地面积减少量} + \text{水域面积减少量} \\ & + \text{未利用土地面积减少量} \end{aligned} \quad (10)$$

本文采用的土地面积数据是2010-2014年的土地变更调查核查数据。经咨询国土部门和测绘单位,这一数据是依据用地审批手续补测获得的,而用地审批绝大部分为建设用地,仅有极少部分为设施农用地(这对整体数据影响很小)。故本文采用的数据本身不涉及耕地、林地、水域、未利用地等之间的转换,因此,本文将建设用地变化与其他用地的变化关系简化为上述公式。

2017年5月

$$\text{土地整治投资增长量} = \text{土地整治投资额} \times \text{土地整治投资增长率} \quad (11)$$

(3) *N*方程:赋初值方程,给流位变量赋时间 *T* 的初值。

$$GDP = INTEG (GDP\text{增长量}, GDP\text{初始值}) \quad (12)$$

$$\text{总人口} = INTEG ( \text{人口增长量}, \text{总人口初始值} ) \quad (13)$$

$$\text{粮食作物播种面积} = INTEG ( \text{粮食作物播种面积增长量}, \text{粮食作物播种面积初始值} ) \quad (14)$$

$$\text{粮食单产} = INTEG ( \text{粮食单产增长量}, \text{粮食单产初始值} ) \quad (15)$$

$$\text{耕地面积} = INTEG ( \text{耕地面积增长量} - \text{耕地面积减少量} ( \text{建设占用} ) , \text{耕地面积初始值} ) \quad (16)$$

$$\text{园地面积} = INTEG ( - \text{园地面积减少量}, \text{园地面积初始值} ) \quad (17)$$

$$\text{林地面积} = INTEG ( - \text{林地面积减少量}, \text{林地面积初始值} ) \quad (18)$$

$$\text{水域面积} = INTEG ( - \text{水域面积减少量}, \text{水域面积初始值} ) \quad (19)$$

$$\text{未利用土地面积} = INTEG ( - \text{未利用土地面积减少量}, \text{未利用土地面积初始值} ) \quad (20)$$

$$\text{建设用地面积} = INTEG ( \text{建设用地面积增长量}, \text{建设用地面积初始值} ) \quad (21)$$

$$\text{土地整治投资额} = INTEG ( \text{土地整治投资增长量}, \text{土地整治投资额初始值} ) \quad (22)$$

(4) 其他方程和控制变量:主要是辅助方程和一些主要控制变量。本文应用SPSS建立各相关变量之间的线性回归关系,模拟得到线性回归方程,作为各相关变量的辅助方程。

$$\begin{aligned} \text{新增耕地面积} ( \text{土地整治} ) = & -0.028 \\ & +0.003 \times GDP\text{增长率} \times 100 + 0.81 \times 10 \\ & -4 \times \text{土地整治投资额} + 0.014 \times \text{园地} \\ & \text{面积减少率} \times 100 - 0.037 \times \text{未利用土地} \\ & \text{面积减少率} \times 100 \quad ( \text{相关系数} R = 1.000 ) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \text{粮食作物播种面积增长率} = & ( 10.282 \\ & +0.177 \times GDP\text{增长率} \times 100 - 5.334 \\ & \times \text{耕地面积减少率} ( \text{建设占用} ) \times 100 \\ & -308.884 \times \text{土地整治投资增长率} \times 100 ) \\ & /100 \quad ( R = 0.896 ) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{粮食单产增长率} = & ( 6.386 - 0.073 \times GDP \\ & \text{增长率} \times 100 + 1.442 \times \text{粮食作物播种} \\ & \text{面积增长率} \times 100 - 2.228 \times \text{新增耕地} \\ & \text{面积} ( \text{土地整治} ) ) /100 \quad ( R = 1.000 ) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \text{耕地面积减少率} ( \text{建设占用} ) = & ( 0.312 \\ & +0.013 \times GDP\text{增长率} \times 100 + 0.1 \times \\ & \text{人口增长率} \times 100 ) /100 \quad ( R = 1.000 ) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \text{园地面积减少率} = & ( 0.228 - 0.274 \times \\ & GDP\text{增长率} \times 100 - 4.171 \times \text{林地面积} \\ & \text{减少率} \times 100 + 4.95 \times \text{未利用土地面积} \\ & \text{减少率} \times 100 ) /100 \quad ( R = 0.965 ) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \text{林地面积减少率} = & ( -0.034 - 0.032 \times \\ & GDP\text{增长率} \times 100 + 0.115 \times \text{人口增长率} \\ & \times 100 + 0.605 \times \text{未利用土地面积减少} \\ & \text{率} \times 100 ) /100 \quad ( R = 0.999 ) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \text{水域面积减少率} = & ( 0.669 - 0.022 \\ & \times GDP\text{增长率} \times 100 + 0.069 \times \text{粮食作物} \\ & \text{播种面积增长率} \times 100 - 0.323 \times \text{林地} \\ & \text{面积减少率} \times 100 + 0.066 \times \text{未利用土地} \\ & \text{面积减少率} \times 100 ) /100 \quad ( R = 1.000 ) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{未利用土地面积减少率} = & ( 1.595 - 0.004 \\ & \times GDP\text{增长率} \times 100 + 0.695 \times \text{人口增长率} \\ & \times 100 + 0.278 \times \text{粮食作物播种面积} \\ & \text{增长率} \times 100 ) /100 \quad ( R = 0.1000 ) \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \text{土地整治投资增长率} = & ( 0.033 - 0.0005 \\ & \times GDP\text{增长率} \times 100 - 0.002 \times \text{人口增长率} \\ & \times 100 + 0.011 \times \text{耕地面积减少率} ( \text{建设} \\ & \text{占用} ) \times 100 ) /100 \quad ( R = 0.997 ) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\text{人均GDP} = GDP / \text{总人口} ( \text{单位: 万元/人} ) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{人均耕地面积} = & \text{耕地面积} / \text{总人口} \\ & ( \text{单位: } \text{hm}^2 / \text{人} ) \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \text{人均建设用地面积} = & \text{建设用地面积} / \text{总} \\ & \text{人口} \quad ( \text{单位: } \text{hm}^2 / \text{人} ) \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{粮食总产量} = & \text{粮食作物播种面积} \\ & \times \text{粮食单产} / 10\,000 \quad ( \text{单位: 万}t ) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{人均粮食占有量} = & \text{粮食总产量} / \text{总人口} \\ & ( \text{单位: } t / \text{人} ) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \text{土地资源总量} = & \text{耕地面积} + \text{园地面积} \\ & + \text{林地面积} + \text{牧草地面积} + \text{水域面积} \\ & + \text{其他农用地面积} + \text{建设用地面积} \\ & + \text{未利用地面积} ( \text{总量为常数} ) \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \text{粮食产量} \geq & 110 \text{万}t ( \text{根据《南京市“十三} \\ & \text{五”现代农业发展规划》}^{[25]} \text{确定的2020年} \\ & \text{粮食产量, 表征粮食安全标准} ) \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \text{耕地保有量} \geq & 228\,413 \text{hm}^2 ( \text{根据《南京市} \\ & \text{“十三五”国土资源保护和利用规划》}^{[26]} \\ & \text{确定的2020年耕地保有量, 表征耕地} \\ & \text{安全标准} ) \end{aligned} \quad (39)$$



目标年生态系统服务价值

$$= \sum_{i=1}^n (\text{目标年第}i\text{类土地面积} \times \text{目标年该类土地单位面积服务价值}) / 10\,000 = \text{目标年单位面积粮食产值} / \text{2014年单位面积粮食产值} \quad (40)$$

$$\times \sum_{i=1}^n (\text{目标年第}i\text{类土地面积} \times \text{2014年该类土地单位面积服务价值}) / 10\,000 + \text{目标年建设用地面积} \times \text{目标年建设用地单位面积服务价值} / 10\,000 \quad (\text{单位: 亿元})$$

式中*i*为耕地、园地、林地、草地、水域及未利用土地。

其中,单位面积粮食产值=粮食单产×粮食单价,为增加可比性,此处不考虑物价变化因素,粮食单价均取2014年价格。建设用地单位面积服务价值计算涉及废水废物,虽较为复杂,但变化不大,为简化计算,此处用2014年单位面积价值估算。各个地类的单位面积生态系统服务价值采用渠玉莲等的研究方案<sup>[27,28]</sup>(表2)。

目标年土地生态系统服务价值 (41)

≥ 目标年土地生态系统服务价值底线

其中,目标年土地生态系统服务价值底线

$$= \sum_{i=1}^n (\text{目标年第}i\text{类土地面积} \times \text{目标年该类土地单位面积服务价值底线}) / 10\,000$$

$$= \frac{112.12}{\text{目标年人均粮食占有量}} \times \sum_{i=1}^n (\text{目标年第}i\text{类土地面积} \times \text{目标年该类土地单位面积服务价值}) / 10\,000 \quad (42)$$

(单位: 亿元, 表征人地矛盾)

式中*i*为耕地、园地、林地、草地、建设用地、水域以及未利用土地。单位面积服务价值底线参照何玲等的计算方法求出<sup>[29]</sup>。需要说明的是,计算单位面积服务价值底线时,与何玲等采用100%的粮食自给率不同,本文结合南京市实际情况,其人均粮食产量采用“十三五规划”确定2020年的粮食产量(110万t)及与之对应的最高人口增幅下(年增长率3%)2020年人口数量(981万人)的比值,即人均粮食为112.12kg/人,此时粮食自给率(按温饱水平350kg/人计算)为32%。

### 3.5 土地资源安全评价SD模型和安全等级仿真评价

#### 3.5.1 指标选择

本文依据所获取的资料和数据,结合研究内容,选取了粮食作物播种面积等10项指标作为评价指标(表3),研究时间以2014年起,到2025年止。

#### 3.5.2 研究区土地资源安全评价方案设计

(1)粮食安全保障子系统。在粮食安全保障子系统中,粮食作物播种面积和粮食单产作为粮食总产量的决策变量,同时,粮食作物播种面积还会受到耕地面积的影响。因此,也选取人均粮食占有量和人均耕地面积作为反映粮食安全的重要指标。控制这些指标变化的变量有GDP增长率、人口增长率、粮食作物播种面积增长率、粮食单产增长率、耕地面积减少率(建设占用)、土地整治投资增长率。GDP、总人口、粮食作物播种面积、粮食单产、耕地面积数据来源于2010–2015年《南京市统计年鉴》<sup>[17]</sup>,土地整治投资额数据来源于国土部门。

表2 2014年南京市土地生态系统单位面积服务价值

服务功能	耕地	园地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	小计
气体调节	1 528.15	6 571.02	10 697.02	2 445.03	0.00	0.00	0.00	21 241.22
气候调节	2 720.10	5 501.32	8 251.98	2 750.66	1 405.89	0.00	0.00	20 629.96
水源涵养	1 833.77	6 112.58	9 780.13	2 445.03	62 287.19	-9 760.08	91.69	72 790.31
土壤形成与保护	4 462.18	8 954.93	11 919.53	5 959.77	30.56	0.00	61.13	31 388.10
废物处理	5 012.32	4 003.74	4 003.74	4 003.74	55 563.35	-1 633.08	30.56	70 984.37
生物多样性产生与维持	2 169.97	6 662.71	9 963.51	3 331.36	7 610.16	0.00	1 039.14	30 776.84
食物生产	3 056.29	611.26	305.63	916.89	305.63	0.00	30.56	5 226.26
原材料	305.63	4 064.87	7 946.35	152.81	30.56	0.00	0.00	12 500.23
娱乐文化	30.56	2 017.15	3 912.05	122.25	13 264.30	0.00	30.56	19 376.88
合计	21 118.96	44 499.58	66 779.94	22 127.54	140 497.65	-11 393.16	1 283.64	284 914.16

数据来自文献[28]。

2017年5月

表3 南京市土地资源安全评价指标体系

Table 3 The evaluation index system of land resources security of Nanjing

目标层(E)	准则层(R)	指标层(G)
区域土地资源安全	粮食安全保障( $R_1$ )	粮食作物播种面积( $G_{11}$ )
		粮食单产( $G_{12}$ )
		人均粮食占有量( $G_{13}$ )
		耕地面积( $G_{14}$ )
		人均耕地面积( $G_{15}$ )
	土地经济安全( $R_2$ )	GDP( $G_{21}$ )
		总人口( $G_{22}$ )
		建设用地面积( $G_{23}$ )
	土地生态安全( $R_3$ )	生态用地面积( $G_{31}$ )
		土地生态系统服务价值( $G_{32}$ )

(2)土地经济安全子系统。在土地经济安全子系统中,建设用地面积随GDP和总人口的增长发生变化。控制这些指标变化的变量有GDP增长率、人口增长率、耕地面积减少率(建设占用)、园地面积减少率、林地面积减少率、水域面积减少率、未利用土地面积减少率。园地、林地、未利用土地、建设用地面积数据来源于南京市国土资源局土地变更调查统计资料<sup>[18,19]</sup>。

(3)土地生态安全子系统。随着GDP和人口的不断增长,在保证耕地和建设用地满足粮食安全和经济安全的同时,保障生态用地,提高土地生态系统服务价值,加强绿化覆盖,是逐步改善和提高土地生态安全的重要途径。在土地生态安全子系统中,选取生态用地面积(包含园地、林地、牧草地、水域、未利用土地)、土地生态系统服务价值等作为影响土地生态安全的关键因素。控制这些指标变化的变量有GDP增长率、人口增长率、园地面积减少率、林地面积减少率、水域面积减少率、未利用土地面积减少率。土地生态系统服务价值根据各土地利用类型和相关价值系数综合计算得到<sup>[27,28]</sup>。

综上,本文研究中控制评价指标变化的变量有GDP增长率、人口增长率、粮食作物播种面积增长率、粮食单产增长率、耕地面积减少率(建设占用)、土地整治投资增长率、园地面积减少率、林地面积减少率、水域面积减少率、未利用土地面积减少率等10个,根据这些变量设计出南京市土地资源安全各项方案。

设计土地资源安全方案时,首先考虑这些变量之间的相互关系(参见3.4章节)。经过演算,粮食

作物播种面积增长率等8个可控变量均与GDP增长率和人口增长率2个变量存在相关性(或间接相关),因此,可以根据GDP增长率和人口增长率不同的变化趋势,进行组合设计。其中,GDP增长率按照南京市“十三五规划”中确定的年均增速8%作为中间方案,上下浮动1%和2%作为其他方案。人口增长率参照“十三五规划”中确定的人口自然增长率<3%的要求设定,并按照历史数值设定3种方案:最高值按3%来计算,最低值采用2009-2014年的最低值计算,中间值按照2009-2014年的平均值计算。由此,GDP增长率设定为10%(高增长)、9%(中高增长)、8%(中增长)、7%(中低增长)和6%(低增长)5种方案;人口增长率设定为3.00%(高增长)、1.26%(中增长)和0.33%(低增长)3种方案。其余指标由SD模型计算得出(见表4、表5)。

### 3.5.3 土地资源安全SD模型仿真评价

通过对GDP增长率和人口增长率进行调控,利用SD模型进行仿真模拟,可以得出15种方案的仿真结果(表5),其中方案7、10、13、14中粮食总产量未达到110万t的要求;方案1、4、7、10、13中生态服务价值未达到生态服务价值底线的要求,应给予舍弃。进而,对剩余的9种土地资源安全模型仿真方案进行安全等级评价,通过对比分析,从中选取适合南京市土地资源安全发展的战略方针。

(1)评价指标数据标准化。将各个方案得出的2025年仿真数据进行归一化处理(表6,见855页)。

(2)评价指标综合权重的确定。指标权重采用层次分析法确定,结果见表7,见855页。

(3)方案综合指数值的计算。在对本文所设计的9种方案2025年SD仿真结果进行归一化处理后,运用归一化处理后的每一项指标值乘以这一指标所对应的权重,然后累计求和,计算出该方案的综合指数值,并根据安全等级评价标准(表8,见855页),确定各个方案的土地资源安全等级及安全程度(表9,见856页)。

### 3.5.4 模型检验

本文采用Vensim PLE软件对所建立的模型进行适合性和一致性检验。

(1)模型结构适合性检验。主要有以下三个方面的内容:结构检验、量纲检验、参数检验。



表4 南京市土地资源安全评价方案控制变量设定与计算

Table 4 The control variable setting and calculation of land resources security evaluation scheme of Nanjing										(%)
设定值			计算值							
GDP 增长率	人口 增长率	粮食作物 播种面积 增长率	粮食单产 增长率	建设占用 耕地面积 减少率	土地整治 投资 增长率	生态用地				
						园地面积 减少率	林地面积 减少率	水域面积 减少率	未利用土地 面积减少率	
方案1	10	3.00	-1.22	1.52	0.74	0.030	5.53	1.99	-0.06	3.30
方案2	10	1.26	-0.78	2.12	0.57	0.032	3.73	1.13	0.18	2.21
方案3	10	0.33	-0.54	2.45	0.48	0.033	2.77	0.67	0.30	1.63
方案4	9	3.00	-1.44	1.28	0.73	0.031	5.54	1.99	-0.06	3.24
方案5	9	1.26	-1.00	1.88	0.56	0.032	3.74	1.13	0.18	2.16
方案6	9	0.33	-0.76	2.21	0.46	0.033	2.77	0.67	0.31	1.58
方案7	8	3.00	-1.66	1.04	0.72	0.031	5.54	1.98	-0.05	3.19
方案8	8	1.26	-1.21	1.64	0.54	0.032	3.74	1.13	0.18	2.10
方案9	8	0.33	-0.98	1.97	0.45	0.033	2.78	0.67	0.31	1.52
方案10	7	3.00	-1.88	0.80	0.70	0.031	5.54	1.98	0.05	3.13
方案11	7	1.26	-1.43	1.40	0.53	0.033	3.74	1.12	0.19	2.04
方案12	7	0.33	-1.19	1.73	0.44	0.034	2.78	0.67	0.31	1.46
方案13	6	3.00	-2.09	0.56	0.69	0.032	5.55	1.98	0.04	3.07
方案14	6	1.26	-1.65	1.17	0.52	0.033	3.75	1.12	0.19	1.99
方案15	6	0.33	-1.41	1.49	0.42	0.034	2.78	0.66	0.32	1.41

注:GDP增长率和人口增长率为设定值,其余指标为SD模型计算结果。生态用地面积指标由园地、林地、牧草地、水域和未利用土地面积组成,其中南京市牧草地较少,本文设定其不变。

表5 2025年仿真预测结果

Table 5 The results of the simulation data processing											
粮食作物 播种面积 /万hm <sup>2</sup>	粮食 单产 /(kg/hm <sup>2</sup> )	人均粮食 占有量 /(kg/人)	耕地面积 /(万hm <sup>2</sup> )	人均耕地 面积 /(hm <sup>2</sup> /人)	GDP /亿元	总人口 /万人	建设用地 面积 /万hm <sup>2</sup>	生态用地 面积 /万hm <sup>2</sup>	土地生态 系统服务 价值/亿元	土地生态系 统服务价值 底线/亿元	
方案1	13.72	8 621	104.00	22.98	0.020	25 167	1137.3	22.58	57.31	130.91	141.13
方案2	14.42	9 205	140.70	23.43	0.025	25 167	942.94	21.47	57.33	164.87	131.38
方案3	14.80	9 532	165.60	23.68	0.028	25 167	851.93	20.84	57.34	181.21	122.69
方案4	13.39	8 400	98.90	23.01	0.020	22 761	1137.3	22.55	57.31	178.86	202.76
方案5	14.07	8 971	133.90	23.47	0.025	22 761	942.94	21.43	57.33	160.12	134.07
方案6	14.45	9 290	157.60	23.71	0.028	22 761	851.93	20.80	57.34	176.10	125.28
方案7	13.07	8 184	94.10	23.05	0.020	20 567	1137.3	22.51	57.31	173.76	207.03
方案8	13.74	8 741	127.30	23.50	0.025	20 567	942.94	21.40	57.33	155.47	136.93
方案9	14.10	9 053	149.90	23.74	0.028	20 567	851.93	20.76	57.34	171.07	127.96
方案10	12.76	7 973	89.40	23.08	0.020	18 566	1137.3	22.48	57.31	168.78	211.67
方案11	13.41	8 518	121.10	23.53	0.025	18 566	942.94	21.36	57.33	150.93	139.74
方案12	13.77	8 822	142.60	23.77	0.028	18 566	851.93	20.72	57.33	166.21	130.68
方案13	12.45	7 767	85.00	23.11	0.020	16 744	1137.3	22.44	57.31	163.91	216.21
方案14	13.08	8 299	115.20	23.56	0.025	16 744	942.94	21.32	57.33	146.49	142.58
方案15	13.44	8 597	135.60	23.81	0.028	16 744	851.93	20.69	57.34	161.44	133.48

注:表中指标均为SD模型计算结果。

结构检验。本文在建立SD模型时,对粮食安全保障、土地经济安全、土地生态安全等相关系统做了深入的分析,参照实际系统的主要特征设置了本模型的结构和变量方程式,其中变量方程式的参

数均通过了参数检验,并对模型系统反复确认,符合实际系统的真实状况,所建立模型与南京市粮食安全保障、土地经济安全、土地生态安全等系统的结构相一致,符合模型的一致性。

2017年5月

表6 归一化处理后结果

Table 6 The results of normalization processing

	粮食作物 播种面积	粮食 单产	人均粮食 占有量	耕地 面积	人均耕地 面积	GDP	总人口	建设用地 面积	生态用地 面积	土地生态系统 服务价值
方案2	0.974	0.966	0.850	0.984	0.892	1.000	1.000	1.000	1.000	0.910
方案3	1.000	1.000	1.000	0.995	0.996	1.000	0.903	0.970	1.000	1.000
方案5	0.951	0.941	0.809	0.986	0.892	0.904	1.000	0.998	1.000	0.884
方案6	0.976	0.975	0.952	0.996	0.996	0.904	0.903	0.969	1.000	0.972
方案8	0.928	0.917	0.769	0.987	0.892	0.817	1.000	0.997	1.000	0.858
方案9	0.953	0.950	0.905	0.997	1.000	0.817	0.903	0.967	1.000	0.944
方案11	0.906	0.894	0.731	0.988	0.896	0.738	1.000	0.995	1.000	0.833
方案12	0.930	0.926	0.861	0.999	1.000	0.738	0.903	0.965	1.000	0.917
方案15	0.908	0.902	0.819	1.000	1.000	0.665	0.903	0.963	1.000	0.891

表7 各指标权重计算结果

Table 7 The calculation results of the weight of each index

目标层(E)	准则层(R)	指标层(G)	权重
区域土地资源安全	粮食安全保障( $R_1$ )	粮食作物播种面积( $G_{11}$ )	0.030
		粮食单产( $G_{12}$ )	0.054
		人均粮食占有量( $G_{13}$ )	0.078
		耕地面积( $G_{14}$ )	0.082
		人均耕地面积( $G_{15}$ )	0.089
	土地经济安全( $R_2$ )	GDP( $G_{21}$ )	0.070
		总人口( $G_{22}$ )	0.080
		建设用地面积( $G_{23}$ )	0.183
	土地生态安全( $R_3$ )	生态用地面积( $G_{31}$ )	0.084
		土地生态系统服务价值( $G_{32}$ )	0.250

表8 安全等级评价标准

Table 8 Safety grade evaluation standard

序号	安全等级	安全程度	安全区间
1	I	相当高	0.98~1.00
2	II	非常高	0.96~0.98
3	III	较高	0.94~0.96
4	IV	高	0.92~0.94
5	V	中	0.90~0.92
6	VI	低	0.60~0.90
7	VII	不安全	0.00~0.60

量纲检验。本文采取 Vensim 软件中 Check Model 和 Unit Check 两项检验功能进行量纲检验,模型中所设计的参数及其方程式均能通过检验。

参数检验。参数精度检验采用历史检验法<sup>[30]</sup>,即参阅和参考南京市有关参数的历史数据统计和相关资料,对合理性的范围进行模拟验证。经验证,均能通过参数检验。

(2)模型行为适合性检验。本文建立的模型中

一些参数在进行定义和值的确定过程中,部分数值参考以往数据估计得到。通过检验发现,该模型对参数的数值变化不敏感,即某一个参数数值变化不会对模型运行结果产生很大影响,不会带来根本性变化。本模型通过了行为适合性检验,具有较好的强壮性。

(3)模型行为一致性检验。针对本文建立的模型,其行为与实际系统的结构和行为相比,其一致性达到95%以上,说明模型的一致性程度较好,表明模型接近实际情况。

### 3.5.5 结果分析及土地资源安全方案选择

根据土地资源安全方案仿真的结果,各个方案各个指标得分和3个子系统得分均无显著过大或过小异常情况(表8)。从粮食安全保障子系统和土地生态安全子系统来看,均为方案3、6、9较好;而从土地经济安全子系统来看,方案2、5、3较优;从综合得分来看,方案3、6、2、9四种发展方案模式安全等级

表9 各方案安全等级评价结果

Table 9 The evaluation results of the security level of each scheme

	粮食安全保障 子系统得分	土地经济安全 子系统得分	土地生态安全 子系统得分	综合得分	排名	安全等级	安全程度
方案2	0.308	0.333	0.311	0.952	3	Ⅲ	较高
方案3	0.333	0.320	0.333	0.986	1	I	相当高
方案5	0.303	0.326	0.304	0.933	5	Ⅳ	高
方案6	0.327	0.313	0.326	0.966	2	Ⅱ	非常高
方案8	0.298	0.320	0.298	0.916	7	V	中
方案9	0.322	0.307	0.319	0.948	4	Ⅲ	较高
方案11	0.293	0.314	0.292	0.899	9	Ⅵ	低
方案12	0.316	0.301	0.313	0.930	6	Ⅳ	高
方案15	0.311	0.295	0.306	0.912	8	V	中

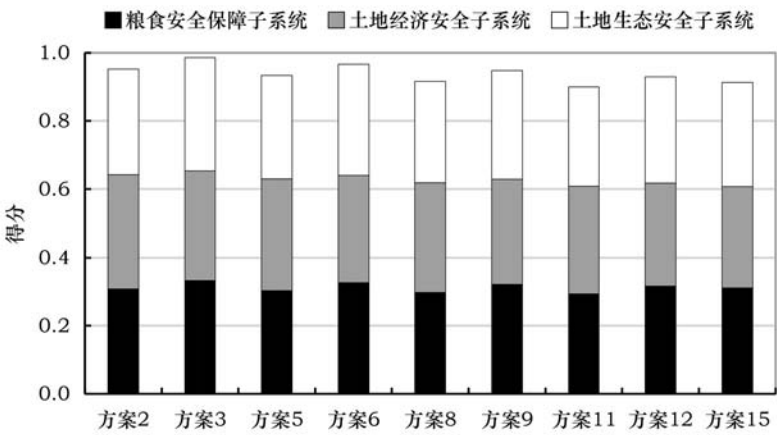


图7 不同方案得分对比

Figure 7 Comparison of scores of each scheme

优于其它方案(图7)。这些方案中,方案5仅能保障经济的快速发展,而其粮食安全和土地生态安全被弱化。由此,可以取其余3、6、2、9四种方案作为南京市土地资源安全的优化模式,这四种方案中又以方案3为最优。

具体来看:

方案3:节约集约利用土地的发展模式。这一方案的指标特征为:经济高速增长,人口低速增长,粮食作物播种面积缓慢减少,粮食单产快速提高,耕地面积缓慢减少,土地整治投资不断增加,粮食安全得到一定保障,建设用地面积缓慢增长,生态用地面积缓慢减少。这一方案的特点是:不追求人口的高速增长,而是控制人口增长,使社会经济保持中高速增长;通过经济投入、高效转化提高单位产出,粮食自给率得到一定提升,达到47.3%,高出2014年(39.7%)7.6个百分点;加大土地生态投资,

改善生态环境质量;合理控制建设用地增长,保护耕地数量稳定,提高耕地资源利用率;确保土地生态安全,实现土地经济与土地生态环境的均衡发展。

方案6:高生态、低人口、保护土地的发展模式。这一方案的指标特征为:高耕地面积,人口低增长,粮食总产量高,建设占用耕地少,经济中高增长,土地生态系统服务价值较高。这一方案的优点是:在社会经济不断发展的前提下,通过加大土地整治投资和土地生态投资,改善生态环境质量,控制建设用地增长,保护耕地数量稳定,从而保障粮食产量,将粮食自给率提高到45%。

方案9:经济中等发展、节约土地的发展模式。这一方案的指标特征:人口低速增长,粮食总产量中等增速,建设用地面积呈现低增长趋势,土地生态系统服务价值高。这一方案的优点是:在经济中等速率增长的基础下,适当增加建设用地,最大幅



2017年5月

度保护耕地,从而实现较高粮食产量满足人口的日益增长,粮食自给率有所提高,达到42.8%,同时,保持对土地整治和土地生态的投资和发展,保护土地资源安全。

方案2:高经济、中等人口、生态均衡的发展模式。这一方案的指标特征为:经济高增长,耕地保护有力,人口中等增长,粮食总产量中等增长,建设用地面积呈现中等增长趋势,土地生态系统服务价值高。这一方案的优点:该方案下经济高速增长,而人口中等增速,粮食高产量,粮食自给率略有提高,保持对生态环境保护的投资。

#### 4 结论

本文构建了区域土地资源安全评价的SD仿真模型,通过安全方案设计、安全等级评价,可以选出安全等级较高的区域土地资源安全战略方案。主要研究结论如下:

(1)根据土地资源安全的“压力-状态-响应”(PSR)分析,可以将区域土地资源安全系统分为粮食安全保障、土地经济安全和土地生态安全3个子系统,三者要素之间存在较为复杂的因果与相互关系,这些关系可以采用系统流图来表示(图7),该流图能够清晰地表达出土地资源安全系统的整个关系网。

(2)可以将GDP、人口、粮食作物播种面积、粮食单产、土地整治投资额及各类土地面积等变量运用SD仿真模型的常量方程、R方程、N方程和辅助方程等来描述,以便量化地刻画土地资源安全系统与社会、经济、自然环境外部系统及其内部结构的相互影响关系。

(3)本文以南京市为研究对象,用所建立的模型对15种方案通过SD仿真模拟,其中方案1、4、7、10、13、14未达到粮食产量或生态服务价值的相关约束条件,给予舍弃。经等级评价最终选取方案3、6、2、9四种发展模式作为南京市土地资源安全的优化模式,这些方案的总体特征是在发展经济的同时,不断提升生态服务价值。四个方案中以方案3为最优,该方案以节约和高效利用土地为重点,在社会经济保持中高速增长的同时,体现了耕地保护与用地保障并重的理念,这与《南京市“十三五”国土资源保护和利用规划》确定的指导思想和原则相

一致。

(4)限于南京市的实际,本文研究得到土地资源安全方案,特别是粮食安全保障子系统仍是将粮食自给率设定为较低时才能达到的安全水平,粮食自给率最高也仅为47.3%,因此,保障粮食安全仍是土地安全的重要内容。

#### 参考文献(References):

- [1] King P, Annandale D, Bailey J. Integrated economic and environment planning in Asia: A review of progress and proposals for policy reform[J]. *Progress in Planning*, 2003, 59(4): 233-315.
- [2] Robert N K, John K. Using land evaluation and site assessment (LESA) for farmland protection planning: A case study[J]. *Journal of Extension*, 2001, 39(4): 35-42.
- [3] Costanza R. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(15): 253-260.
- [4] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 2006.
- [5] Berkes F, Colding J, Folke C. Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management[J]. *Ecological Application*, 2000, 10(5): 1251-1261.
- [6] 王楠君, 吴群, 陈成. 城市化进程中土地资源安全评价指标体系研究[J]. 国土资源科技管理, 2006, 23(2): 30-33. [Wang N J, Wu Q, Chen C. A research into index system of land resource security evaluation in the process of urbanization[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2006, 23(2): 30-33.]
- [7] 李四林, 王海峰. 论土地资源价格安全评价指标体系及其构建[J]. 湖北行政学院学报, 2011, (3): 64-68. [Li S L, Wang H F. Study on index system and construction of land price security evaluation[J]. *Journal of Hubei Administration Institute*, 2011, (3): 64-68.]
- [8] 黄辉玲. 土地资源安全评价的指标体系及其利用[J]. 农机化研究, 2006, (1): 61-62. [Hang H L. Index system of land resources security evaluation and its utilization[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, (1): 61-62.]
- [9] 丰雷, 郭惠宁, 王静, 等. 土地资源经济安全评价研究-以上海市为例[J]. 中国软科学, 2011, (1): 87-96. [Feng L, Guo H N, Wang J, et al. Economic security evaluation of land resource in Shanghai[J]. *Scientific and Technological, China Soft Science*, 2011, (1): 87-96.]
- [10] 张清军, 尚国珩, 秦岭, 等. 区域土地资源经济安全评价-以河北省为例[J]. 南方农业学报, 2012, 43(7): 178-182. [Zhang Q J,

- Shang G B, Qin L, *et al.* Evaluation on economic security of regional land resources- a case study of Hebei Province[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(7): 178-182.]
- [11] 张升元, 于靖, 罗洋洋, 等. 基于物元分析法的武汉市土地资源安全评价[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2012, 34(4): 38-43. [Zhang S Y, Yu J, Luo Y Y, *et al.* A determinant representation for the minimal polynomial of invertible and diagonalizable matrices[J]. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 2012, 34(4): 38-43.]
- [12] 王强, 杨京平. 我国草地退化及其生态安全评价指标体系的探索[J]. 水土保持学报, 2007, 17(16): 27-31. [Wang Q, Yang J P. Degeneration and index system of ecological safety of Chinese Grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 17(16): 27-31.]
- [13] 罗贞礼. 土地利用生态安全评价指标体系的系统聚类分析[J]. 湖南地质, 2002, 21(4): 252-254. [Luo Z L. System cluster analysis of land use ecological security evaluation index system [J]. *Hunan Geology*, 2002, 21(4): 252-254.]
- [14] 田克明, 王国强. 我国农用地生态安全评价及其方法讨论[J]. 地域研究与开发, 2007, 24(4): 79-82. [Tian K M, Wang G Q. Study on ecological security of agricultural land evaluation[J]. *Areal Research and Development*, 2007, 24(4): 79-82.]
- [15] 王双. 不同评价方法下的土地生态安全评价的比较研究-以玛多县为例[J]. 湖北函授大学学报, 2015, 28(2): 77-78. [Wang S. Comparative study of land ecological security evaluation under different evaluation methods-taking Maduo County as an example[J]. *Journal of Hubei Correspondence University*, 2015, 28(2): 77-78.]
- [16] 张琪. 富裕县土地生态安全评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015. [Zhang Q. Land Ecological Security Evaluation in Fuyu Country[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015.]
- [17] 南京市统计局, 国家统计局南京调查队. 南京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006-2015. [Nanjing Bureau of Statistics, Nanjing Investigation Team of National Bureau of Statistics. Statistical Yearbook of Nanjing[M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2015.]
- [18] 南京市国土资源局. 南京市2014年年末面积[EB/OL]. (2015-11-13) [2017-03-19]. <http://www.njgt.gov.cn/default.php?mod=article&do=detail&tid=227103>. [Nanjing Land and Resources Bureau. Land Areas of Nanjing City in 2014. [EB/OL]. (2015-11-13) [2017-03-19]. <http://www.njgt.gov.cn/default.php?mod=article&do=detail&tid=227103>.]
- [19] 南京市国土资源局. 2014年国土资源综合统计报告[EB/OL]. (2015-01-07) [2017-03-19]. <http://www.njgt.gov.cn/default.php?mod=article&do=detail&tid=228598>. [Nanjing Land and Resources Bureau. Consolidated Statistical Report on Land and Resources in 2014 [EB/OL]. (2015-01-07) [2017-03-19]. <http://www.njgt.gov.cn/default.php?mod=article&do=detail&tid=228598>.]
- [20] 南京市发展和改革委员会. 南京市国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[EB/OL]. (2016-05-09) [2017-03-19]. [http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/bm/fgw/201605/t20160509\\_3934253.html](http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/bm/fgw/201605/t20160509_3934253.html). [Nanjing Municipal Development and Reform Commission. Outline of the Thirteenth Five- Year Plan for Nanjing's National Economic and Social Development[EB/OL]. (2016-05-09) [2017-03-19]. [http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/bm/fgw/201605/t20160509\\_3934253.html](http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/bm/fgw/201605/t20160509_3934253.html).]
- [21] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海财经大学出版社, 2009. [Wang Q F. System Dynamics[M]. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2009.]
- [22] Cheng J K, Tahar R M, Ang C L. Understanding the complexity of container terminal operation through the development of system dynamics model[J]. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2010, 2(4): 429-443.
- [23] 邱德华. 区域水安全战略的仿真评价研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. [Qiu D H. Research on the Simulation & Evaluation of Regional Water Security Strategy[D]. Nanjing: Hehai University, 2006]
- [24] Xu D, Song A, Tong H, *et al.* A spatial system dynamic model for regional desertification simulation-a case study of Ordos, China [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 83: 179-192.
- [25] 南京市人民政府. 南京市“十三五”现代农业发展规划. [EB/OL]. (2016-07-20) [2017-03-19]. [http://www.njaf.gov.cn/26500/27111/27113/201607/t20160726\\_4050126.html](http://www.njaf.gov.cn/26500/27111/27113/201607/t20160726_4050126.html). [Nanjing Municipal People's Government. the Thirteenth Five - Year Plan for Nanjing's Modern Agriculture Development. [EB/OL]. (2016-07-20) [2017-03-19]. [http://www.njaf.gov.cn/26500/27111/27113/201607/t20160726\\_4050126.html](http://www.njaf.gov.cn/26500/27111/27113/201607/t20160726_4050126.html).]
- [26] 南京市人民政府办公厅. 南京市“十三五”国土资源保护和利用规划. [EB/OL]. (2017-01-12) [2017-03-19]. [http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/szf/201701/t20170116\\_4339620.html](http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/szf/201701/t20170116_4339620.html). Office of Nanjing Municipal People's Government. the Thirteenth Five-Year Plan for Nanjing's Land Resources Protection and Utilization. [EB/OL]. (2017-01-12) [2017-03-19]. [http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/szf/201701/t20170116\\_4339620.html](http://www.nanjing.gov.cn/xxgk/szf/201701/t20170116_4339620.html).]
- [27] 付光辉, 陆守超. 基于生态系统服务价值的区域土地整治生态效益评价-以南京市为例[J]. 生态经济, 2010, (5): 142-145. [Fu G H, Lu S C. Study on economic valuation of regional land consolidation ecological benefits based on ecosystem service value: A case of Nanjing[J]. *Ecological Economy*, 2010, (5): 142-145.]
- [28] 渠玉莲. 城市化对土地生态系统服务价值的影响因素及耦合度评价研究-以南京市为例[D]. 南京: 南京工业大学, 2016. [Qu Y L. The Influence Factors of Urbanization on the Land

- Ecosystem Service Value and Coupling Degree Evaluation: A Case of Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2016.]
- [29] 何玲,贾启建,李超,等. 基于生态系统服务价值与粮食安全的生态安全底线核算[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 215-224.
- [He L, Jia Q J, Li C, *et al.* Calculation on ecological security baseline based on the ecosystem services value and the food security[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 215-224.]
- [30] 徐升华,吴丹. 基于系统动力学的鄱阳湖生态产业集群“产业-经济-资源”系统模拟分析[J]. 资源科学, 2016, 38(5): 871-887.
- [Xu S H, Wu D. Analysis on the “industry-economy-resources” simulated system of Poyang Lake Eco-industrial Clusters based on systematic dynamics[J]. *Resources Science*, 2016, 38(5): 871-887.]

## Regional land resource security evaluation based on system dynamics in Nanjing City

CHEN Hui<sup>1</sup>, FU Guanghui<sup>2</sup>, LIU Youzhao<sup>1</sup>, TAI Pengyu<sup>2</sup>

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

2. School of Economic & Management, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Land resource security is an important part of national and regional security. Taking Nanjing as our research focus, a regional land resource security evaluation model structure was designed in accordance with Pressure- State- Response (PSR). Based on system dynamics, land resource security points for three subsystems (food security, land economic security, land ecological security) and the relationship between regional social economy and the ecological environment were analyzed and simulated. The model can fully reveal the land resource system stability and security and continuity. Through the establishment of regional land resource security evaluation of the system flow chart, SD dynamic simulation analysis and evaluation were conducted. Fifteen kinds of schemes were designed, and the optimal scheme of land resource security strategy development was obtained through SD simulation. Vensim PLE was used for adaption and consistency checking for the established model. Option 3, 6, 2 and 9 were selected as the optimization mode in Nanjing, and Option 3 is optimal. The SD simulation model constructed here is a set of social, economic, environmental, external systems and internal structures as an integrated subsystem of dynamic analysis modeling, and the model is able to clearly express the entire network of land resource security system. This model will help regional land resource security evaluation, and in particular comparative study using a time dimension.

**Key words:** system dynamics; land resources security evaluation; index system; system flow diagram; Nanjing City