

土地资源人口承载力动力学模拟和应用

刘钦普^{1,2}, 林振山¹, 冯年华²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 210097, 江苏 南京)

(2. 南京晓庄学院地理科学学院, 210017, 江苏 南京)

[摘要] 人口和土地资源的关系是一种复杂的非线性关系. 本文通过建立土地资源人口承载力动力学模型, 运用非线性科学理论, 讨论了人口—土地资源系统的演化方向和平衡态稳定性问题. 稳定的平衡态是系统发展可能达到的最终状态. 在人口与土地资源自治系统中, 土地资源的数量和质量、人口数量和生活消费水平之间相互联系、相互制约. 研究表明 (1) 稳定平衡态时人口数量与土地资源生产潜力总量成正比 (2) 人口数量和土地资源生产潜力总量与人类消费水平成反比 (3) 人口数量和土地资源生产力与耕地面积和土地单产潜力成正比. 文章对我国的土地人口承载力进行了实证分析. 结果显示, 我国完全有能力养活自己.

[关键词] 土地资源生产潜力, 土地资源人口承载力, 非线性科学

[中图分类号] JTP79, [文献标识码] A, [文章编号] 1001-4616(2005)04-0114-05

The Dynamic Simulation and Application of Land Population Carrying Capacity

Liu Qinpu^{1,2}, Lin Zhenshan¹, Feng Nianhua²

(1. School of Geographical Science, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, China)

(2. School of Geographical Science, Nanjing Xiaozhuang College, 210017, Nanjing, China)

Abstract The relationship between population and land resource has nonlinear characteristics. A dynamic model of it is set up in this paper, and the evolutions and stabilities of the model are discussed according to the theory of nonlinear science. In the self-organized system of population and land resource, such factors as quality and quantity of land resource, population and consumption of the human act each other. The results of study show: (1) The population is proportional to gross potential land resource productivity in equilibrium state; (2) The population and the gross potential land resource productivity are inversely proportional to the human consumption levels; (3) The population and the gross potential land resource are proportional to the arable land area and its unit productivity. In the end of the paper, China's land population carrying capacity is taken as a case to be discussed based on the results of simulation of dynamics. The discussion shows that China is fully capable to support its people for better life.

Key words the potential land resource potentiality, land population carrying capacity, nonlinear science

近 50 年以来, 人口、资源、环境三者之间的矛盾随着人口的骤增变得日益突出, 由此引起的资源破坏和短缺、环境恶化等问题越发受到注目. 全球的土地资源生产能力能否满足未来人口的食物需求? 这个问题理所当然地为有关国际组织、各国政府和科学工作者所瞩目, 土地资源承载力研究便应运而生, 并且得到迅速发展, 并已从土地扩展到整个资源领域^[1]. 这些研究主要体现在两个方面 (1) 土地潜在人口支持能力研究 (2) 基于 ECCO 模型的资源承载力研究^[2], 其中最有影响的研究是联合国粮农组织 (FAO) 在发展中国家进行的土地资源人口承载力项目. 该研究于 1978 年—1981 年成功地评定了全球 117 个发展中国家 (未包括中国) 的人口承载力^[3]. 我国的土地资源承载力的正式研究开始于上世纪 80 年代后期. 1989

收稿日期: 2005-05-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40371044).

作者简介: 刘钦普, 1957—, 副教授, 博士研究生, 主要从事资源环境与生态方面的学习与研究. E-mail: liuqinpu@163.com

年,原国家土地资源管理局与联合国粮农组织及开发计划署(UNDP)开始合作研究中国的土地资源人口承载力,历时几年,取得了重要成果.提出了在不同时期,不同的投入水平和不同的生活水平下我国的土地资源可承载的人数.其它不同尺度的区域土地资源承载力研究也在国内全面展开.其中具代表性的有:张玖明等完成的黄淮海平原土地资源承载力研究(1988)、杨晓鹏等完成的青海省土地资源的人口承载力研究(1993)^[4],邓永新等完成的新疆塔里木盆地的土地资源人口承载力研究(1994)^[5]等.近几年来,不少学者又把遥感和GIS技术运用于土地承载力研究,综合全面地考虑影响土地生产力的各种自然资源因素,并快速有效地进行分析和计算^[2,5-9].但是,这些研究中大多数注重于影响区域土地资源生产力因素的资料分析、数据统计和计算,对人口数量与土地资源生产力和人们生活消费水平之间的动力学关系分析较少,对人口—土地资源系统的动态预测研究不够.本文应用非线性科学的理论,试图研究探讨土地资源人口承载力的动力学模型及其演化机制,这对弄清人口数量—土地资源生产潜力—生活消费水平三者之间的关系、预测不同情况下土地资源的承载力、科学合理地利用土地资源和制定人口政策以及保持土地资源可持续发展都有着十分重要的意义.

1 模型的建立

所谓土地资源承载力就是指一个国家或地区的土地资源在一定生产力水平及与此相适应的物质生活水平上,以土地利用不引起土地退化为前提,土地的生产能力所能养活的人口数量.土地承载力的研究涉及到三个方面,即土地资源的数量、土地资源生产潜力及人均消费水平.在建立土地资源承载力模型时,我们主要围绕这三个方面设立参数和变量.

首先假设某区域人口数量 x 的变化不仅与人口的基数有关,还与土地资源生产潜力总量 y 有关.

作者参考逻辑斯蒂模型,提出以下非线性人口方程:

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{cy} \right) = f(x, y). \quad (1)$$

这里 r 为该区域人口数量的净增长率; 1 为该地区土地资源在一定时期内所允许的能承载人口相对数量的极限(即100%); c 为单位粮食数量所能供养的人口(人/kg); cy 为土地资源的最大承载力, $\left(1 - \frac{x}{cy} \right)$ 则表示该地区土地资源的剩余承载力.

由上式可见,随着时间的发展,人口数量越大,剩余人口容量就越小,土地资源对人口约束就越强.这就是环境对人类的负反馈,从而保证人—地系统的平衡和稳定.

再假设人类对土地资源生产潜力总量(粮食产量) y (kg)的影响主要由人口数量 x (人)、人类生活消费水平 R (kg/人)、在一定投入水平下土地的单产潜力 k (kg/hm²)和土地资源(耕地)数量 a (hm²)构成.土地资源生产潜力总量与土地资源数量和土地单产潜力成正相关,与人口数量和生活消费水平成反相关.土地资源数量越大,土地单产潜力越高,土地资源生产潜力总量越大;人口数量越大,消费水平越高,对土地资源的消耗(如占用耕地)就越大.因此,我们提出以下土地资源受人类影响的动力学方程:

$$\frac{dy}{dt} = aeI - bRx = g(x, y). \quad (2)$$

方程(1)和(2)组成的方程组即为土地资源人口承载力非线性动力学模型.方程(2)中的 a 为土地资源潜力增长率, b 为人口增加和消费水平的提高对土地资源的消耗系数.

下面我们将对上述动力学方程组求解其平衡态,并对平衡态的生态特性、演化行为和稳定性进行分析.

2 平衡态和稳定性分析

平衡态的物理意义是系统演化(发展)的最终状态.所以,知道了平衡态及其性质就知道了系统的演化方向、特点和稳定情况.

由上述动力学方程组 $\begin{cases} f(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases}$,可以求得,土地资源人口承载力动力学系统存在1个平衡态:

$$A\left(\frac{aeI}{bR}, \frac{aeI}{bcR}\right), \tag{3}$$

平衡态时非线性动力方程组的 Jacobi 矩阵元为：

$$\begin{aligned} a_{11} &= \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_0 = r - \frac{2r}{cy_0}x_0, & a_{12} &= \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_0 = \frac{rx_0^2}{cy_0^2}, \\ a_{21} &= \left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)_0 = -bR, & a_{22} &= \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)_0 = 0. \end{aligned} \tag{4}$$

以下讨论它的稳定性.

因为：

$$\begin{aligned} T &= a_{11} + a_{22} = -r < 0, \\ \Delta &= a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = rbRc, \\ T^2 - 4\Delta &= r(r - 4bRc). \end{aligned} \tag{5}$$

所以,当 $r < 4bRc$ 时,平衡态 $A\left(\frac{aeI}{bR}, \frac{aeI}{bcR}\right)$ 为稳定的焦点. 焦点的动力学行为是震荡形的,即做不等幅

的周期运动. 稳定的焦点表明,土地资源 - 人口系统以不等幅周期运动的形式趋于平衡态. 缓慢的不等幅的周期运动符合自然界基本的运动形式. 也就是说,人类只有使人口数量的增长率低于 $4bRc$ 时,才能使土地资源 - 人口系统保持这种运动状态.

当 $r > 4bRc$ 时,平衡态 $A\left(\frac{aeI}{bR}, \frac{aeI}{bcR}\right)$ 为稳定的结点. 结点的动力学行为是非周期的曲线或直线式的逼近运动.

显然这种非周期的曲线或直线式的逼近运动要比周期运动来的快. 也就是说,当人口数量的净增长率超过 $4bRc$ 或者说人口增长过快,土地资源 - 人口系统的运动变化速度将加快,以非周期的曲线或直线式的运动形式快速地向终态演化. 人类已习惯于大自然的缓慢的周期运动. 快速的变化,意味着灾难^[11].

因此 $r = 4bRc$ 是系统动力学行为变化的临界点. 由于 R 为人均消费粮食数量, c 是单位粮食数量所能养活的人口,两者互为倒数的关系,乘积为 1, 所以为保持人口 - 土地资源系统的不等幅的周期运动,人口的增长率应小于 $4b$. b 为土地资源消耗系数. 据孙娴等人的研究^[12],我国未来几十年耕地的减少率为 0.002,即土地资源消耗系数 b 为 0.002. 那么,人口自然增长率应低于 8(‰). 据 2000 年《国际统计年鉴》,1995 年—1998 年我国人口自然增长率为 10(‰). 因此,控制人口增长,降低人口自然增长率仍是我们当前的重要任务. 一些发达国家的人口自然增长率大多都小于 8(‰),例如 1995 年—1998 年,美国的人口自然增长率为 6(‰),加拿大约为 5(‰),法国和荷兰的平均人口自然增长率皆为 3.4(‰),日本为 2.2(‰),由于较低的人口自然增长率,这些国家不仅生活富裕,而且生态系统得到了较好的保持. 然而,一些发展中国家的人口自然增长率居高不下,例如 1997 年—1998 年尼日利亚、委内瑞拉、埃及的人口自然增长率分别为 28(‰)、21(‰)、17(‰),生态环境面临严重挑战.

3 结论

显然,平衡态 $A\left(\frac{aeI}{bR}, \frac{aeI}{bcR}\right)$ 对我们来说是有实际意义并且是十分重要的. 为此,有必要对平衡态 A 进行

深入的分析和讨论. 现在用 x_e 和 y_e 分别表示平衡态 A ,即：

$$y_e = \frac{aeI}{cbR} = \frac{1}{c}x_e. \tag{6}$$

根据(6)式,我们得出以下结论：

(1) 平衡态时稳定的人口数量 x_e 与稳定的土地资源生产力总量成正比(如图 1,在作图时,我们对有关变量做归一化处理,其取值在 0 - 1 之间,下同.). 在平衡态时,设 a 、 b 和 R 为常数,人口数量 x_e 与 eI 的乘积成正比, e 是土地资源的面积, I 是耕地单产潜力, eI 则为土地资源生产潜力总量. 图 1 揭示了土地资源生产潜力越大,所承载的人口数就越多. 由此可见,土地资源生产潜力总量是土地资源数量和质量的综合. 这里的土地资源数量是指耕地资源所占有的面积,土地资源质量是指耕地的生产能力或者说是耕地对某

种用途的适宜性和限制性的程度,最终表现为土地单产.土地资源质量高,产量高,获取的农产品多,土地资源面积数量大,则所获取的总产高,可养活的人口就多.因此,土地资源的质量和数量是直接反映土地资源潜力总量的基本指标^[13].增加耕地面积或增加对土地的物质投入,提高单产,都可以提高土地资源潜力总量和对人口的承载量.

(2) 生活越富裕,人口数量趋于降低.这是因为,在一定时期内,土地资源的生产潜力总量有限,人类生活越富裕,消费水平越高,消耗的资源越多,资源总量出现下降的趋势,同时,也必须减少人口数量,才可能减缓资源总量的下降,从而维持生态平衡.根据我们的研究,人口数量和土地资源生产潜力总量与人类消费水平成反比.将有关参数代入,模拟结果如图2.图2除表示人口数量和土地资源生产潜力总量与生活消费水平的关系外,还说明,在人类消费水平提高的初期,平衡态人口数量和土地资源总量随着人类富裕程度的提高而减小的速率很大.当人类富裕程度发展到一定阶段后,平衡态人口数量和土地资源总量最后保持在一个较稳定的水平.这和事实是符合的.

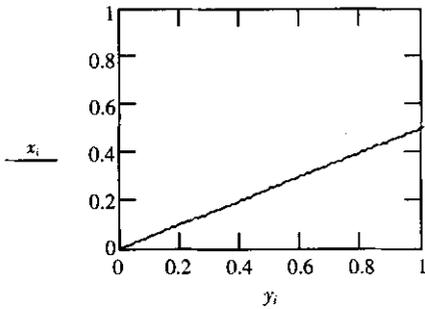


图1 平衡态人口数量(x_i)与平衡态土地资源生产潜力总量(y_i)的关系

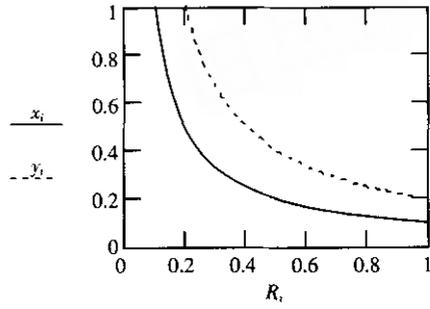


图2 平衡态人口数量(x_i)和土地资源生产潜力总量(y_i)与人类消费水平(R_i)的关系

(3) 土地资源所承载的人口数量和土地资源生产潜力总量与土地资源单产潜力成正比(见图3).由于耕地的面积有限,随着经济的发展,城市化和工业用地的增加,耕地数量有减少的趋势.因此,只有提高耕地单产的潜力,才能保证土地资源生产潜力总量的提高,从而增加平衡态人口数量.

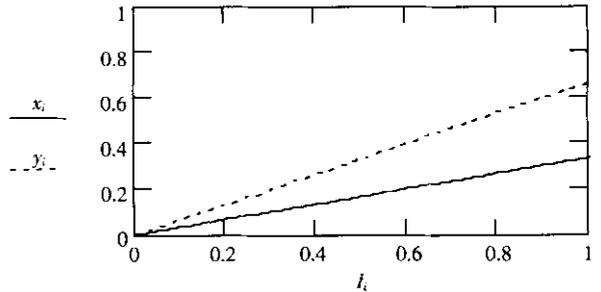


图3 平衡态人口数量(x_i)和土地资源生产潜力总量(y_i)与土地单产潜力(I_i)的关系

4 应用

基于以上人口和土地资源潜力动态模型,我们结合中国的实际情况,计算中国未来25年人口和土地资源潜力的供求关系,从而预测中国的社会经济可持续发展情况.

首先,根据公式1和2来估计未来中国人口和土地生产潜力.根据《中国的粮食问题》白皮书,我国人口在2030年达到16亿的最高峰,我们将中国土地最大人口承载力定为16.5亿.假设今后中国的人口净增长率保持0.72%^[14],在2030年前,我国粮食总产量的年均递增率为1%(其中已扣除由于耕地年减少率为0.2%而引起的粮食总产量的减少);公式(1)、(2)可写为:

$$\frac{dx}{dt} = rx \left(1 - \frac{x}{cy} \right) = 0.0072x \left(1 - \frac{x}{16.5} \right) \quad (c = 1/R) \quad (7)$$

$$\frac{dy}{dt} = aeI - bRx = (0.012 - 0.002)y \quad (y = eI = Rx) \quad (8)$$

根据公式(7)、(8)计算出未来25年中国人口和土地生产潜力(粮食产量)的变化情况如表1.

由表1可见,以目前我国人口、耕地和粮食产量为基数,用公式(7)、(8)推测到2030年我国人口达到近16亿,粮食总产量可达到6.2亿t,人均粮食消费达到391kg.预测结果基本符合《中国的粮食问题》白皮书中所估计的中国人口和粮食发展趋势.说明此模型具有一定的可用性.

表1 中国人口和粮食发展预测

年份	白皮书预测			本模型预测		
	总人口(亿)	人均需求量(kg)	总需求量(亿t)	总人口(亿)	人均需求量(kg)	粮食总产(亿t)
2000	13	385	5.0	12.67	365	4.6
2010	14	390	5.5	14.38	355	5.1
2030	16	400	6.4	15.94	391	6.2

然而,随着社会的发展,人民生活水平的提高,我国人均消费粮食会不断地提高.假设到2030年以后,人均消费粮食达到500 kg,粮食总产量应达到8亿t.根据原农业部土地管理总局1984年详查资料推算,全国耕地约为1.33~1.4亿 hm^2 ,根据刘纪远1996年的《中国资源环境遥感宏观调查和动态研究》^[15],我国耕地为1.37亿 hm^2 .按照1.37亿 hm^2 耕地面积,考虑我国的气候、土壤和作物类型,经计算中国土地资源绝对潜力总量为8.798亿 $\text{t}^{[8]}$.因此,即使不考虑2030年以后我国人口下降的趋势,也完全可以达到人均消费粮食500 kg的要求.以上计算,还没有考虑耕地的复种指数、农业高产栽培技术及新型肥料增产效应所导致的土地生产潜力的提高所能承载的人口数量.这充分说明,以我国自己的国土,养活中国众多的人口是有物质条件的.

以上分析是在我国耕地面积基本不变,产量不断提高的情况下作出的.然而,由于目前我国经济发展迅速,城市化步伐加快,这样势必对现有耕地造成威胁.因此,对我国的粮食生产不能掉以轻心.为了保护土地资源,保障粮食安全,我们应努力作好以下几个方面:一是严格控制耕地的占用,切实做到耕地总量和质量的动态平衡,保证新增耕地的肥力;二是在农村地区大力推广科学种田,不断培肥地力,实施精准农业,提高效益,提高粮食的单产和复种指数,发挥土地资源的最佳效益;三是调整和引导我国人民的饮食结构,降低肉类特别是猪肉的消费.一般地,我国人均粮食消费中大约有30%以上是用来饲养猪、牛、鸡、鸭等家畜家禽的.而家畜家禽消耗粮食的热量产出率只有人类直接消费粮食的1/20~1/15,按我国城镇居民消费肉类总量的80%,那么城镇居民每减少10%的肉类消费,则可使全国人均粮食消费减少近1%.因此,保护耕地,提高单产,号召城市居民减少肉类消费,是减缓我国土地资源的压力,保障粮食安全,保证经济和社会可持续发展的重要措施.

[参考文献]

- [1] 郭秀锐,毛显强.中国土地承载力计算方法研究综述[J].地球科学进展,2000,15(6):705—711.
- [2] 熊利亚等.基于RS和GIS的土地生产力与人口承载力[J].地理研究,2004,23(1):10—18.
- [3] 郑振源.中国土地的人口承载力研究[J].中国土地科学,1996,10(4):33—38.
- [4] 杨晓鹏,张志良.青海省土地资源人口承载力系统动力学研究[J].地理科学,1993,13(1):69—77.
- [5] 邓永新.人口承载力系统及其研究——以塔里木盆地为例[J].干旱区研究,1994,11(2):28—34.
- [6] 党安荣等.地理信息系统支持下的中国粮食生产力研究[J].遥感学报,1999,3(3):225—229.
- [7] 党安荣等.基于GIS的中国土地生产力研究[J].生态学报,2000,20(6):910—915.
- [8] 高志强,孙希华.基于中国资源环境数据库的土地资源承载力研究[J].中国人口·资源与环境,2000,10(S2):1—3.
- [9] 高志强,刘纪远.基于遥感和GIS的中国土地资源的研究[J].遥感学报,2000,4(2):136—140.
- [10] 林振山.非线性科学及其在地理学中的应用[M].北京:气象出版社,2003:9—21.
- [11] 林振山.人类活动与可再生资源关系的动力学方法分析[J].中国人口·资源与环境,2003,13(1):18—21.
- [12] 孙娴,林振山,孙燕.我国耕地总量的动力预测及其建议[J].自然资源学报,2005,20(2):200—205.
- [13] 傅伯杰.土地资源评价的理论与实践[M].北京:中国科学技术出版社,1991:125—142.
- [14] 王铮,郑一萍.全球变化对中国粮食安全的影响分析[J].地理研究,2001,20(3):282—289.
- [15] 刘纪远.中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M].北京:科学出版社,1996.

[责任编辑 陆炳新]