

中国农业生态系统的生产潜力 和人口承载力*

曹明奎

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

5181

摘要 中国农业生态系统的生产潜力和人口承载力是全球关注的问题。本研究将农业生态系统的生产潜力定义为由生物遗传特性和4大宏观生态条件(太阳辐射、温度、水资源和土地资源)共同决定的生产力上限;以无机环境-第一性生产-第二性生产之间的结构适应性和能量-物质流平衡为主线,发展了对农业生态系统生产潜力和人口承载力的综合评价模型,它包括第一性生产潜力子模型和第二性生产潜力与人口承载力优化子模型,并应用该模型把中国农业生态系统分为603个区域单元,进行第一性生产潜力、第二性生产潜力和人口承载力的评价。

关键词: 中国农业生态系统, 生产潜力, 人口承载力, 农业生态系统, 生产力

中国农业生态系统能否承载日益增长的人口是普遍关注的问题。生产潜力和人口承载力研究不仅可回答这一问题,而且能为农业生态系统的宏观调控和长远发展规划提供依据。

区域性农业生态系统生产潜力研究始于60年代初,其评价方法已从微观生理模型^[1,2]和统计相关模型^[3,4]发展为生态机理模型^[5,6]。区域生态机理模型以联合国粮农组织(FAO)的AEZ模型^[3]为代表,它由于在生境条件与作物类型之间建立了适应性关系,并综合表达了土地因素对生产力的影响,从而成为普遍应用的方法。但一方面,它所采用的光合反应函数、气候条件与作物生长的动态关系存在缺陷^[7,8],另一方面它仍限于对第一性生产潜力(作物最高产量)的估计。农业生态系统是无机环境,第一性生产和第二性生产相互作用的结构和功能整体,为更客观、综合地评价其生产潜力和人口承载力,应进一步发展新方法和模型。在现有方法的基础上,本研究以无机环境-第一性生产-第二性生产之间的生态适应性和能量-物质流平衡为主线,建立了农业生态系统生产潜力和人口承载力综合评价的机理模型,并应用该模型对中国农业生态系统的生产潜力和人口承载力进行了计算。

1 方法与模型

1.1 定义

农业生态系统的生产力决定于无机环境所能提供的能量和物质资源及生物对这些资源的利用和转化效率。其生产潜力被定义为:当作物-家畜结构与生态因子的时空分布实现最佳匹配时,由生物的遗传特性和宏观非可控生态因子所规定的生产力上限。

本研究所考虑的宏观非可控生态因子分4类:太阳辐射、温度、水资源和土地资源。人工措施虽可对水资源的分布和土地条件进行一定程度的调节,但在大范围内改变水文循环、土层厚度和土壤质地等,使之完全满足作物生长发育的需要是非常困难的,甚至是不可能的。

人口承载力是农业生态系统的食物产量(决定于生产潜力)所能支持的最大人口数量。

1.2 农业生态结构的适应性匹配

生物与环境之间有特定的适应关系。评价农业生态系统的生产潜力,首先应当确定与生境条件时空分布相适应的农业布局,组合结构和季节安排,如作物分布、种植制度和畜牧业类型等。此过程分生态清查

* 本研究是在马世骏教授和韩纯儒教授指导下完成的。

本文于1991年11月7日收到,修改稿于1992年5月13日收到。

(生态因子时空分布调查)、生态分区(生境条件相对一致区域的划分)和适应性匹配 3 个步骤。

适应性匹配的原则是某种生物能否在某一区域正常生长发育, 并完成经济产品的生产过程。据此所得到的适应性农业生态结构可能是多样化的, 但通过尔后各自生产潜力的计算, 可选择出一种最适宜的。

1.3 第一性生产力模型

在农业生态系统的生产过程中, 无机环境中的能量(太阳能)和物质资源首先被作物固定为生物有机产品, 形成第一性生产力。第一性生产潜力模型把作物分为 4 种光温生态型^[5], C₃温凉作物(I), C₃喜温作物(II), C₄低温作物(III)和 C₄高温作物(IV), 并根据它们各自对生态条件的适应性, 通过对作物干物质积累过程的动态模拟(以 10d 为时间增量), 计算作物的生产潜力。其运行过程表达如下:

第一性生产开始于叶片的光合作用。单叶的光合反应函数为:

$$A = A_{m,x}(1 - \exp(-H/HH)) \quad (1)$$

其中 A 为光合速率, A_{m,x} 饱和光合速率, H 叶片吸收的光合有效辐射, HH 饱和光强的半值。

A_{m,x} 因作物光温生态型而异, 并随温度而变化。4 种光温生态型作物的 A_{m,x} 值(kg CO₂/hm²·h)与温度的关系为^{*}:

$$\begin{cases} A_{m,x}(I) = -22.8 + 6.47dt - 0.36dt^2 + 8.69E - 3dt^3 - 1.0669e - 4dt^4 \\ A_{m,x}(II) = -52.5 + 6.618dt - 0.138dt^2 + 4.1139E - 4dt^3 \\ A_{m,x}(III) = -295.6 + 51.27dt - 0.869dt^2 - 7.697E - 3dt^3 \\ A_{m,x}(IV) = -252.7 + 41.44dt - 2.012dt^2 + 4.352E - 2dt^3 - 3.159e - 4dt^4 \end{cases} \quad (2)$$

其中, dt 为白天平均温度

太阳辐射在作物群体内呈不均匀分布, 从而导致不同部位叶片光合速率的不同。计算整个作物群体的光合速率的常规方法, 是先应用辐射平衡模型得出各部位叶片接受的光合有效辐射, 再乘以各部位的叶片面积。其计算过程是复杂、烦琐的, 尤其对于区域性作物生产潜力的评价。Goudriaan, J. 等人提出一种计算-区域全阴和全晴天作物群体光合速率的简便方法^[6]。

作物群体具有与单叶片相似的光反应特征, 其实际的光合速率是饱和速率的一部分。此比例关系可表示为:

$$P = X/(1 + X) \quad (3)$$

其中 P 为作物群体的实际光合速率与饱和速率的比值, X 为一个无量纲变量, 它被定义为:

$$X = RAD \times EFFE / (A_{m,x} \times LAI) \quad (4)$$

其中 RAD 为光合有效辐射, EFFE 为光能利用效率, C₄ 作物和 C₃ 作物分别取值为 14 × 10⁻³ kg/J 和 11 × 10⁻³ kg/J, LAI 为当时作物群体的叶面积指数。

全阴天作物光合速率(P₀)为: $P_0 = LAI \times A_{m,x} \times DL \times P$ (5)

其中 DL 为当地的实际天长, 它取决于所处的纬度及当时的太阳高度角。

在全晴天条件下, 日照叶和遮阴叶的光合速率应分别计算。日照叶面积(SLAI)所占总叶面积比率是太阳高度角的正弦函数。在总光合有效辐射中, 约有 45% 被分配给日照叶。另外在晴天条件下, 叶群的光合反应特征也有所改变, 无量纲变量 X 应以 ln(1 + X) 代替之。

日照叶的 X 值和光合速率(P₁)分别为:

$$X = 0.45RAD \times EFFE / (SLAI \times A_{m,x}) \quad (6)$$

$$P_1 = SLAI \times A_{m,x} \times DL \times \ln(1 + X) / (1 + \ln(1 + X)) \quad (7)$$

遮阴叶的 X 值和光合速率(P₂)为:

$$X = 0.55RAD \times EFFE / ((LAI - SLAI) \times A_{m,x}) \quad (8)$$

$$P_2 = (LAI - SLAI) \times A_{m,x} \times DL \times \ln(1 + X) / (1 + \ln(1 + X)) \quad (9)$$

全晴天作物群体的光合速率(P_c)可表示为: $P_c = P_1 + P_2$ (10)

*此组方程系由文献[5]中图3.1多项式回归而来。

在某一区域某一天作物群体光合速率(P_g)为^[9]： $P_g = F \times P_o + (1 - F)P_z$ (11)

其中 F 为一天中阴天所占比例，它被表示为： $F = (AC - 0.5RS)/0.8$ (12)

其中 AC 为一区域的晴天最大短波辐射， RS 为当时实际测定短波辐射。

作物光合产物并非全部积累为干物质，一部分要消耗于作物呼吸过程中，呼吸速率(RM)为：

$$RM = K \times P_g + C(0.044 + 0.00019t + 0.001t^2) \times BP \quad (13)$$

其中 K ， C 为常数， K 取值0.28， C 值豆科作物0.0283，非豆科作物0.018。 t 为每天24h平均温度。 BP 为当时作物群体已经积累的干物质质量。

因而干物质积累速率(R_a)为： $R_a = P_g - RM$ (14)

由于 R_a 是由光照和温度所决定的最高干物质积累速率，以此速率所得到的作物生物学产量(或经济产量)被定义为光温生产潜力(YM)： $YM = \int_{t_0}^{t_1} R_a dt$ (15)

其中， t_0 和 t_1 分别为作物播种和收获时间。

水资源常常不能充分满足作物生长发育的要求，由此造成的水胁迫(Water stress)将降低作物生产力。在水胁迫条件下，作物干物质积累速率(RW)与作物需水满足程度的关系可表示为^[10]：

$$RW = R_a(1 - K_r(1 - ETA/K_z \times ETO)) \quad (16)$$

其中 ETA 为实际蒸腾蒸发量， ETO 为参考蒸腾蒸发量(Reference Evapotranspiration)，其与作物系数 K_z (反映不同作物在不同生育期的需水特征)之积为最大蒸腾蒸发量。 K_r 为作物反应参数，表示不同作物在不同生育期对水胁迫的适应性。

因 RW 进一步考虑了水资源条件对作物生产潜力的限制，据此所计算的作物生物学产量被定义为水生产潜力(YW)： $YW = \int_{t_0}^{t_1} RW dt$ (17)

土地因素将会进一步制约作物的生产潜力。土地质量性状与作物生产力的定量关系的表达本研究采用综合分级、相对评判^[11]的方法。综合分级是根据一区域气候特征、土地坡度、成土母质、土层厚度、土壤质地、养分含量、盐碱度、侵蚀程度等，把土地分为4个质量等级：很适宜(Highly suitable)，中等适宜(Moderately suitable)，边际适宜(Marginally suitable)和不适宜(Not suitable)，相对评判是给每个质量等级的土地一个相对质量指数(SI)，表示在此等级土地上水生产潜力的实现率。在本研究中，4个质量等级的相对质量指数分别取值为0.95，0.75，0.50和0。因而作物的土地生产潜力(YS)：

$$YS = YW \times SI \quad (18)$$

因综合考虑了作物适应性和太阳辐射、水资源、土地因素对作物产量的影响，土地生产潜力代表技术上可实现的第一性生产潜力。

1.4 第二性生产潜力和人口承载力优化模型

第一性生产潜力在规模上为农业生态系统的第二性生产潜力和人口承载力规定了上限，但其中有复杂的相互关系。第一性生产的一部分将直接还田，或作为燃料和工业原料，剩余的进入食物生产过程，被人直接消费或由第二性生产转化为动物产品。第二性生产潜力决定于分配的第一性生物量，畜群结构和各畜群的生态效率。人口承载力受直接消费的第一性生物量、第二性生产潜力和消费水平的影响。根据能量-物质流在食物链上的传递机制，一个有关第一性生物量在人直接消费与第二性生产之间、各畜群之间分配的规划模型被建立起来，以计算第二性生产潜力和人口承载力。

设人口承载力为 Y_1 ，并为目标函数；第一性生产可为人和第二性生产提供的总能量和蛋白质分别为 TE 和 TP ，其中人直接消费所占比例为 Y_2 ；进入第二性生产的能量和蛋白质，向第 i 畜群的分配比例为 X_i ，畜群种类为 n 个；第 i 畜群的能量和蛋白质转化效率(产品中可食能量(蛋白质)/饲料能(蛋白质)，下同)分别为 EE_i 、 PE_i ；人对食物总能量总蛋白质和动物蛋白质的需求量分别为 EN 、 PN 和 APD 。

分配模型为:

$$\begin{aligned}
 & \text{MAX } Z = Y_1 \\
 & TE \times Y_2 + TE(1 - Y_2)(X_1 \times EE_1 + \dots + X_i \times EE_i + \dots + X_n \times EE_n) \geq Y_1 \times EN \\
 & TP \times Y_2 + TP(1 - Y_2)(X_1 \times PE_1 + \dots + X_i \times PE_i + \dots + X_n \times PE_n) \geq Y_1 \times PN \\
 & TP(1 - Y_2)(X_1 \times PE_1 + \dots + X_i \times PE_i + \dots + X_n \times PE_n) \geq Y_1 \times APN \\
 & X_1 + X_2 + \dots + X_n = 1 \\
 & Y_1, Y_2, X_1, \dots, X_i, \dots, X_n \geq 0
 \end{aligned} \quad (19)$$

此模型可得出最大人口承载力和第一性生物量在人直接消费与第二性生产及各畜群之间的最佳分配方案, 据后者可计算出第二性生产潜力。

2 中国农业生态系统第一性生产潜力, 第二性生产潜力和人口承载力



图1 中国农业生态系统生产潜力评价的基本区域单元

Fig.1 The regional units for assessing potential productivity of China's agro-ecosystem

注: 此图根据地图出版社1984年出版的1:800万中国地图绘制。在评价过程中香港、澳门和台湾的土地面积未计在内。

应用上述模型评价中国农业生态系统, 首先进行基本区域单元的划分。划分原则为气候类型、土地适宜类型和土地质量等级的相似性及行政县的完整性(即一个县不能划入不同区域单元中)。根据气象站的分布和1:100万中国土地资源潜力图¹⁾, 中国农业生态系统被分为603个区域单元(图1)它们是模型运行的最小区域单位。

在给每一区域单元选择适宜的作物种植制度时, 共考虑6大类, (1)喜凉作物一熟型(冬小麦、春小麦和杂粮); (2)喜温作物一熟型(玉米、大豆、水稻和棉花); (3)旱地²⁾二熟型(小麦-玉米, 小麦-棉花); (4)水田二熟型(小麦-水稻, 水稻-水稻); (5)水田三熟制(小麦(或绿肥)-水稻-水稻); (6)旱地三熟制(早玉米-秋玉米-秋甘薯, 小麦-甘薯-玉米)。它们代表了我国主要的种植制度。

模型运行所需要的数据来源: 气象数据取自国家气象局年地面气候资料和中国科学院地理研究所全国

1) 中国科学院自然资源综合考察委员会, 中国1:100万土地资源潜力图, 1990。

2) 这里的旱地是相对于水田而言的, 下同。

农业气候资料³⁾。土地适宜类型、质量等级、草原面积取自中国1:100万土地资源潜力图；耕地灌溉水源、面积取自水电部的中国水资源评价报告²⁾，耕地面积取自县级农业统计数据¹⁾¹⁾。

各区域单元的第一性生产潜力计算出来后，耕地按全国综合农业区划中30个二级农业区¹⁾³⁾，草地按6个一级区划区¹⁾⁴⁾进行汇总。第二性生产潜力只进行总量计算，不分区评价。

2.1 作物潜在产量和全国粮食总潜在产量

30个二级农业区各种作物的潜在产量见表1。

各种作物的全国平均潜在产量分别为：小麦5.4t/hm²，玉米9.9t/hm²，水稻8.1t/hm²，棉花1.6t/hm²和大豆3.8t/hm²。而这些作物在1984年的实际产量依次为2.7t/hm²，3.7t/hm²，5.1t/hm²，0.9t/hm²和1.8t/hm²¹⁾⁵⁾。目前除水稻和棉花外，其它作物潜在产量的实现率均在50%以下。

全国粮食总产量潜力为9.7亿t，其中小麦2.9亿t，玉米3.7亿t，水稻2.8亿t和其它0.3亿t，是目前实际总产量的2.4倍。这一方面来源于单产水平的提高，所计算的粮食作物平均潜在产量为6.9t/hm²，比实际产量(3.6t/hm²)高92%；另一方面来自复种指数的增长，所计算的全国平均复种指数可达到175%，比目前值(150%)提高17%。

2.2 第一性生产潜力

第一性生产潜力系单位面积全年生物学总产量潜力，在多熟制条件下，它是各作物生物学潜在产量之和。

一年内种植的全国农田第一性生产潜力的区域分布见表2。其全国平均值为27.4t/hm²。生产潜力大于40t/hm²的农田占其总面积的15%，在30—40t/hm²之间的占35%，在12—30t/hm²之间的占42%，小于12t/hm²的占8%。全国每年第一性生物量可达到26.7亿吨干物质。

全国草地第一性生产潜力的平均值为4.9t/hm²，其中，草甸草原5.8t/hm²，干旱草原2.6t/hm²，荒漠草原2.2t/hm²，高寒草原3.5t/hm²，北方农区草山草坡7.2t/hm²和南方农区草山草坡13.5t/hm²，草地总生物产量可达18.3亿吨。若草地利用率达到70%，它可为畜牧业提供5亿吨的饲草资源。

2.3 第二性生产潜力和人口承载力

第一性生产每年可为人和第二性生产提供粮食9.7亿吨、秸秆13.8亿吨和饼粕0.2亿吨。共折合能量和蛋白质为 3.02×10^{16} kJ和 1.51×10^6 t。

在第二性生产中，以食物生产为主要目的的畜群类型共分5类：猪、禽、肉牛羊，水产(鱼)和奶牛。它们的能量和蛋白质转化效率分别取值为：猪12%和15%，禽14%和20%，肉牛羊4%和4%，水产(鱼)16%和18%，奶牛12%和18%，此系集约型畜牧生产系统的较高水平¹⁾⁶⁾。人的食物消费标准分4个方案，在每个方案中，每天摄入的总热量，总蛋白质和动物蛋白质分别为：生存营养方案，9200kJ，65g和6g，健康标准方案，10500kJ，75g和15g。中等收入国家水平，11300kJ，80g和28g，发达国家水平，14000kJ，100g和40g。

由此所计算的中国农业生态系统的第二性生产潜力和人口承载力为：在生存营养方案下，第二性产品可食能和蛋白质产量为 1.12×10^{15} kJ和 6.5×10^6 t，可承载人口23.6亿，在健康标准方案下，第二性产品可食能和蛋白质产量为 1.45×10^{15} kJ和 9.5×10^6 t，可承载人口17.2亿；在中等收入国家水平下，第二性产品可食能和蛋白质产量为 1.57×10^{15} kJ和 1.0×10^7 t，可承载人口10.8亿；在发达国家水平下，第二性产品可食能和蛋白质产量为 1.77×10^{15} kJ和 1.2×10^7 t，可承载人口6.8亿。

第三方案和第四方案明显不可行，因为中国现有的人口数量已超过这2个方案下的人口承载力。第一方案有最大的人口支持能力。但此消费方案仅能维持人生存的基本需要，不能提供较好的膳食营养。它相

1) 引自国家气象局1951—1980年中国地面气候资料集(1—6册)，内部资料，1984。

2) 中国科学院地理所，全国农业气候资料(光能和热量部分)，内部资料，1984。

水利电力部水文局，中国水资源评价报告，内部资料，1985。

表 1 谷类作物的潜在经济产量(t/hm²)
Table 1 Potential economic yield of cereal crops

农业区 Agri-Zones	潜在经济产量 Potential economic Yield								
	YM	YW	YS	YM	YW	YS	YM*	YW*	YS*
	冬小麦或春小麦 Winter or spring Wheat			春玉米或夏玉米 spring or summer Maize			大豆 soybean		
大小兴安岭区(Greater and lesser xing'an mountains)	8.6	8.6	6.0						
三江平原区(Sanjiang Plain)	9.1	7.5	8.4	19.1	15.5	12.7	5.6	4.8	3.5
松嫩平原区(Songnen Plain)				18.7	15.8	12.1	5.6	4.7	3.5
长白山区(Changbaishan mountains)				18.4	16.1	12.2	5.6	5.2	4.3
辽宁平原区(Liaoning Plain mountains)				18.1	16.4	12.0	5.3	5.1	4.1
黑龙江西部区(West Heilongjiang and Jilin)				19.6	13.3	9.4	5.6	3.7	2.8
内蒙古东部区(Inner Mongolia Beibu)	8.2	5.2	4.0						
长城沿线区(Along Great wall)	7.6	6.4	4.8	19.5	14.5	10.5			
黄土高原区(Loess Plateau)	9.8	6.1	4.1	19.7	16.5	10.6			
燕山-太行山山麓平原区(Yan-Taihang Footplain)	8.4	7.6	5.3	12.8	12.2	8.6			
冀鲁豫低洼平原区(Jiluyu Lowland Plain)	8.4	6.6	4.6	13.0	11.2	7.7			
黄淮海平原区(Huanghuaihai Plain)	9.9	7.4	5.9	13.5	11.7	9.2			
山东丘陵区(Shandong Hills)	9.5	8.1	6.7	12.6	11.8	9.5			
汾渭谷地区(Fenwen Valley)	8.9	7.0	5.1	12.8	10.6	7.6			
蒙宁甘北疆区(Mengninggan-Beijing)	8.4	7.3	3.8	19.6	17.0	13.0			
南疆区(Nanjiang)	14.0	13.2	9.8	18.3	17.2	12.3			
黔东南川西区(Southeast Tibetwest sichuan)	10.6	8.8	6.6						
藏北青南区(North Tibet-South Qinghai)	10.2	7.9	5.1						
				早稻 (early rice)			晚稻 (late rice)		
长江下游平原区(Changjiang Low Rea Plain)	7.8	7.6	6.6	10.4	10.2	9.2	9.5	9.3	8.5
鄂豫皖丘陵山地区(Eyuwan Hills)	8.3	7.2	5.1	11.4	8.5	6.1			
长江中游平原区(Changjiang Middle-low Reaches Plain)	4.9	4.3	3.7	10.7	10.3	8.8	11.3	10.6	8.8
江南丘陵区(Jiangnan Hills)	5.7	5.2	4.5	9.8	9.1	7.6	11.3	8.6	7.2
南岭山地丘陵区(South Nanling Hills)	6.6	6.2	5.0	9.5	9.0	7.7	10.2	9.0	7.2
闽桂鄂南部区(South Minguie)				8.3	7.1	5.4	9.9	9.5	7.1
海南-贵州半岛区(Hainan-Leizhou Peninsula)				9.9	9.0	6.6	8.9	7.8	5.6
云南南部区(South Yunnan)				10.1	8.7	5.6	8.1	7.1	4.4
				玉米 (maize)					
秦岭大巴山区(Qinling-Daba Mountains)	8.6	5.9	5.0	10.3	9.0	6.5	12.5	9.9	7.5
四川盆地(Sichuan Basin)	7.8	6.6	5.1	10.8	10.1	7.7	12.7	10.3	7.9
湘西黔东南区(West Hunan-East Guizhou)	7.2	6.0	4.9	10.4	9.2	7.1	12.1	9.1	7.4
黔西云南中北区(South Guizhou-Middle Yunnan)	8.4	5.5	3.6	10.9	9.7	6.7	13.8	10.3	7.9

* YM, YW和YS分别对光温潜在产量, 水潜在产量和土地潜在产量。

当于80年代初期中国人的平均消费水平⁽¹⁷⁾。据预测中国人口的峰值可能在16—18亿之间⁽¹⁸⁾, 第二方案既可保障人健康发育的营养需求, 又能承载此最高人口数量, 因而理想可行。

若选择第二方案, 第二性生产要消耗32%的第一性生产总量和38%的粮食, 可生产肉、蛋、奶和水产(鱼)5270万t, 1454万t, 888万吨和924万t, 相当于目前实际生产力的2.7倍。

3 结论

3.1 农业生态系统的生产潜力是当作物家畜结构与生态因子的时空分布实现最佳匹配时, 由生物遗传特

表 2 中国农田第一性生产潜力($t/hm^2 \cdot a$)
Table 2 Potential Primary Productivity of China's Farmland

农业区 (Agri-zones)	生产潜力 (Potential productivity)		
	Ym*	Yw*	Ys*
大小兴安岭区(Greater and lesser Xing'an mountains)	22.1	18.2	12.3
三江平原区(Sanjiang Plain)	26.6	19.4	14.8
松嫩平原区(Songnen Plain)	28.9	20.8	15.4
长白山区(Changbaishan mountains)	30.3	24.3	18.1
辽宁平原区(Liaoning Plain)	35.0	28.4	20.4
黑吉西部区(West Heilongjiang and Jilin)	36.7	22.5	18.2
内蒙北部区(Northern Inner Mongolia)	20.4	10.8	8.1
长城沿线区(Along the Great wall)	27.2	18.2	12.9
黄土高原区(Loess Plateau)	30.7	19.2	11.8
湘西黔东南区(West Hunan-East Guiyhou)	43.8	37.2	28.8
黔西云南中北区(West Guizhou-middle Yunnan)	49.7	37.2	25.8
蒙宁甘北疆区(Mengninggan-Beijiang)	24.4	21.4	18.4
南疆区(Nanjiang)	35.5	33.3	24.4
康东南川西区(Southeast Tibet-West sichunm)	25.8	21.5	18.1
康北青南区(North Tibet-south Qinghai)	24.8	19.3	12.5
燕山-太行山山麓平原区(Yan-Taihang Footplain)	49.5	44.2	30.4
冀鲁豫低洼平原区(Jiluyu Lowland Plain)	47.6	37.9	25.8
黄淮海平原区(Huanghuaihai Plain)	48.9	39.8	31.3
山东丘陵区(Shandong Hills)	51.7	44.8	38.0
汾渭谷地区(Fenwen Valley)	48.2	37.7	26.5
长江下游平原区(Changjiang low Reaches Plain)	52.9	50.0	43.0
鄂豫皖丘陵山地区(Eyuwan Hills)	46.8	35.9	25.1
长江中游平原区(Changjiang middle-low Reaches Plain)	60.2	54.8	45.9
江南丘陵区(Jianguan Hills)	60.4	53.9	45.2
南岭山地丘陵区(Nanling Hills)	59.4	51.2	41.4
闽桂鄂南部区(South Minguie)	62.0	53.5	40.8
海南-曾州半岛区(Hainan-Leizhou Peninsula)	67.2	47.2	30.1
云南南部区(South Yunnan)	58.6	48.1	33.3
秦岭大巴山区(Qinling-Daba mountains)	48.8	36.8	26.0
四川盆地(Sichuan Basin)	46.1	38.8	29.8

* Ym, Yw和Ys分别为光温生产潜力, 水生产潜力和土地生产潜力

性、太阳辐射、温度、水资源和土地资源共同决定的生产力上限。人口承载力是食物产出量(取决于生产潜力)所能支持的最大人口数量。

3.2 农业生态系统生产潜力和人口承载力评价以无机环境—第一性生产—第二性生产之间生态相适性和能量—物质流平衡为主线, 分生态划区, 农业结构适应性匹配、生产潜力和人口承载力计算 3 个阶段。第一性生产潜力模型在AEZ模型确定的作物适应性体系基础上, 通过作物生产的动态模拟计算第一性生产潜力; 第二性生产潜力和人口承载力优化模型, 根据能量—物质流在食物链上传递机制, 通过对第一性生物量在人直接消费与第二性生产之间及各畜群之间的分配, 得出第二性生产潜力和人口承载力。

3.3 中国农业生态系统的生产潜力为目前实际产量2.5倍左右。其中第一性生产潜力为: 农田 $27.4t/hm^2 \cdot a$, 草地 $4.9t/hm^2 \cdot a$, 总生物量45亿t/a; 粮食总产量潜力为9.7亿t/a, 单位面积产量 $6.9t/hm^2$ 。若采用能满足人体健康发育的食物消费方案, 第二性生产可产生可食能与蛋白质 $1.45 \times 10^{15} kJ/a$ 和 $9.5 \times 10^6 t/a$, 其肉、蛋、奶和水产(鱼)的产量可分别达到 5270万t, 1454万t, 888万t和924万t, 人口承载力为17.2亿。

3.4 若中国的人口峰值能控制在16—18亿之间, 农业生态系统可满足其食物需求。但食物消费水平的提高却是十分有限的, 它不仅达不到发达国家的目前水平, 赶上中等收入国家的水平亦很困难。

参 考 文 献

- [1] De Wit C T. Potential photosynthesis of crop surface. *Neth, J. Agri. Sci.* 1959, 7:141—149
- [2] Yocum C S, Allen L H, Lemon, E R. Photosynthesis under field conditions VI: Solar radiation balance and photosynthesis efficiency. *Agronomy Journal* 1954, 56:249—253
- [3] Lieth H, Box E, Evapotranspiration and primary productivity, Thornthwaite C W. memorial model. in Mather J R.(ed), papers on selected topics in climatology, Vol.2 36—44 Elmer C, W. Thornthwaite's Association
- [4] Lieth H. Primary productivity of terrestrial ecosystem. *J. Human Ecology* 1973, 1:303—332
- [5] FAO, 1973—1981, Reports of the agro-ecological zone project, vol.1—4, world soil resources report 46, Rome, UN Food and Agricultural Organization
- [6] Terjung W H, Louie, S S F. Toward an energy budget model of photosynthesis predicting world productivity. *Vegetatio*, 1976, 32:31—54
- [7] English S D. Light interception, photosynthesis and development of sunflower. PH, D thesis. University of New England, Armidate N. S. W., Austrilia, 1976
- [8] Goudriaan J, Vanlaar, H H. Calculation of daily totals of the gross CO₂ assimilation of leaf canopies. *Neth J agric Sci.* 1973, 26:373—382
- [9] De. Wit, C. T., Photosynthesis of leaf canopies. *Agri Res Rep.* Pudoc, Wageningen, 1955, 663:57
- [10] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water. FAO irrigation and drainage paper 33. Rome UN Food and Agricultural Organization, 1979
- [11] FAO, A framework for land evaluation. Soil Bull.32, Rome UN Food and agricultural organization, 1975
- [12] 国家统计局. 中国分县农业经济统计概要, 中国统计出版社, 1987
- [13] 全国农业区划委员会. 中国综合农业区划, 农业出版社, 1981
- [14] 中国农业科学院区划所. 中国饲料区划. 农业出版社, 1989
- [15] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴(1984). 农业出版社, 1985, 83
- [16] Speeding C R W, An introduction to agricultural systems, second edition, Elsevier Applied Science Publishers LTD, London, 1988, 55—72
- [17] 葛可佑. 我国膳食营养状况简析. 光明日报, 1985年6月8日
- [18] 中国科学院国情分析小组. 生存与发展. 胡鞍钢, 王毅执笔. 北京: 科学出版社, 1980, 10—40

POTENTIAL PRODUCTIVITY AND POPULATION CARRYING CAPACITY OF CHINA'S AGRO-ECOSYSTEM

Cao Ming-Kui

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Academia Sinica Beijing, 100085)

Based on biological adaptability and material-energy flow balancing in ecosystem, an integrated approach was developed to assess the potential productivity and population carrying capacity of agro-ecosystem in China.

With a model, the China's agro-ecosystem was divided into three structural units (farmland, grassland and animal husbandry) and 601 regional units, and the potential primary productivity, secondary productivity and population carrying capacity were evaluated. The major results are presented as follows; the average primary productivities of farmland and grassland are 27.4t/hm²·a and 4.9t/hm²·a, respectively, total primary biomass could amount to 4.5×10⁹t/a, the average economic yield of cereal crops is

6.9t/hm², 92% higher than that at present, total output of cereals could come up to 9.7×10⁸t, 2.42 times the actual output now, the outputs of edible energy and protein of secondary production are 1.45×10⁵kJ/a and 9.5×10⁵t/a respectively, the yields of meat, egg, milk and fish are 5.27×10⁷t, 1.45×10⁷t, 8.88×10⁸t and 9.24×10⁸t respectively, the population carrying capacity of agro-ecosystem is 1.72×10⁹.

Key words: potential productivity, population carrying capacity, China's agro-ecosystem.

(上接封四)

1991年生态学学科获国家自然科学基金资助项目

(续)

项 目 名 称	姓 名	单 位
几种水生高等植物他感效应及其应用途径的研究	郑师章	复旦大学
北京阔叶林中大气—植物—土壤CO ₂ 交换规律的研究	黄银晓	中国科学院植物研究所
植物—环境系统动态模拟及其优化收获理论研究	高 斌	中国科学院植物研究所
甘南沼泽化草甸火烧演替定位研究	王 刚	兰州大学
引进耐盐经济植物的生态学和其利用的研究	仲崇信	南京大学昆明植物研究所
血竭树脂形成的化学生态学研究	王锦亮	中国科学院华南植物研究所
亚热带人工草场草的CO ₂ 交换季节变化和原初生产力	孙谷峰	中国科学
麦稻轮作玉米生他感作用的研究	马水清	中国科学院石家庄农业现代化研究所
棉田生态工程群落建理论的研究	孙敦立	河南农业大学
麦玉稻三熟种植制度高产稳产生态学原理及生产潜力研究	李祥祥	南京农业大学
作物不同品种对重金属吸收的差异和机理研究	吴启堂	华南农业大学
黄淮平原麦棉两熟农田生态仿真及专家决策支持系统研究	黄青殊	中国农业科学院棉花研究所
林农复合系统种群结构及其动态调控的研究	黄宝龙	南京林业大学
红树林次生演替调控及其机理的研究	郑德璋	中国林业科学研究院
长白松林生态系统结构、功能和生产力的研究	徐文辉	中国科学院沈阳应用生态研究所
兴安落叶松种群的年龄结构和空间格局的研究	徐化成	北京林业大学
岷江和嘉陵江森林水文效应机制研究与涵养林效益预测	陈祖明	成都科学技术大学
亚热带填闲混播一年生牧草群落结构和营养动态的研究	周寿荣	四川农业大学
紊乱高发区与非发区水域生态系统结构功能的比较研究	洪黎民	复旦大学
磷酸酶在东湖沉积物磷的释放过程中的作用	周易男	中国科学院武汉水生生物所
日本绒螯蟹混合捕亚种的生物生态学研究	戴爱云	中国科学院动物研究所
长江口鱼类食物网与营养结构的研究	罗秉征	中国科学院海洋研究所
海洋微表层生物、生态与有害物质关系研究	陈金斯	中国科学院南海海洋研究所
杭州西湖引水后的生态模型的研究	裴洪平	杭州大学
应用树木年轮元素分析重建城市环境污染史及预测的研究	黄会一	中国科学院沈阳应用生态研究所
氯苯类在池塘微生态系统中的行为、效应与净化机理研究	黄玉瑞	中国科学院动物研究所
同位素法研究海岛周围海域生态系统的营养层次	蔡德陵	国家海洋局第一海洋研究所
珠江口河海交汇区基础食物链结构及其与环境关系研究	黄良民	中国科学院南海海洋研究所
人为活动对辽河河口湿地生态系统影响的研究	董厚籍	辽宁大学
土壤中克生化学物质对小麦根系吸收营养的影响	孙恩恩	中国科学院生态环境研究中心
水体中苯系物对鱼肝微粒体超氧光子辐射的诱导作用	王英彦	北京市环境保护科学研究所
植物对重金属的耐性机理	杨居荣	北京师范大学
苯环裂解酶基因克隆及其表达研究	樊林翰	中国科学院武汉病毒研究所
诱导光合细菌高沉降性能净化有机废水及其调控因子研究	程树培	南京大学

(陆仲康、陈 领供稿)