

基于 GIS 的区域作物生产系统潜力分析

周治国, 曹卫星, 王绍华, 王其猛, 孟亚利

(南京农业大学农业信息工程技术中心)

摘要: 在区域气候数据库和作物生产数据库支持下, 通过光、温、水、土、施肥、灌溉、社会等因子的逐步衰减, 建立基于 GIS 的作物生产潜力的估算方法, 并定量分析江苏地区作物单产潜力、潜力系数和总产潜力及区域作物生产的开发优势。结果表明: 江苏省作物开发优势由北向南逐渐增大。就作物而论, 棉花开发优势最大, 油菜最小, 粮食居中。就经济区而论, 粮油棉开发优势不同, 粮食: 太湖区 > 沿江区 > 沿海区 > 宁镇扬区 > 两淮区 > 徐连区, 棉花: 太湖区 > 沿海区 > 沿江区 > 宁镇扬区 > 徐连区 > 两淮区, 油料: 太湖区 > 宁镇扬区 > 沿江区 > 沿海区 > 两淮区 > 徐连区。就同一经济区而论, 粮油棉的开发优势也不同, 徐连区: 棉花 > 粮食 > 油料; 两淮区: 棉花最大, 粮食和油料相当; 宁镇扬区: 油料最大, 粮食和棉花相当; 沿江区: 粮油棉的开发优势相当; 太湖区: 棉花最大, 粮食、油料相当; 沿海区: 棉花 > 粮食 > 油料。

关键词: 地理信息系统(GIS); 区域; 作物生产系统; 潜力

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)01-0124-05

1 引言

作物生产潜力是指在理想生产条件下所能达到的最高理论产量, 研究作物生产潜力对作物生产规划与合理开发利用农业自然资源等具有重要意义。

早期的作物生产潜力研究多集中在光温水三要素上, 即气候生产潜力^[1~3], 20 世纪 60 年代后的研究较为深入, 利用量子效率提出了生物产量与太阳总辐射间的估算模式^[3], 随着研究的深入, 大量算法问世, 计算参数也逐渐精确^[4~10]。20 世纪 80 年代以后, 农业生产潜力、土地生产潜力、耕地生产潜力等概念的出现, 将作物生产潜力研究推向了一个新阶段。本研究以江苏省为区域案例, 以县市为单元, 研究分析不同层次的作物生产潜力, 进行作物生产开发优势分级, 为区域作物生产的管理规划提供理论依据。

2 研究方法

根据作物生产潜力形成机理和产量形成过程, 利用因子逐步衰减方法建立作物生产潜力的估算方法。

$$\begin{aligned} Y_G &= Q \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(W) \cdot f(S) \cdot f(M) \\ &= Y_Q \cdot f(T) \cdot f(W) \cdot f(S) \cdot F(M) \\ &= Y_T \cdot f(W) \cdot f(S) \cdot f(M) \\ &= Y_W \cdot f(S) \cdot f(M) = Y_S \cdot f(M) = Y_M \end{aligned}$$

式中 Y_G ——作物生产潜力; Y_Q ——作物光合生产潜力; Y_T ——作物光温生产潜力; Y_W ——作物气候生产潜力; Y_S ——作物光温水土生产潜力, 即土地生产潜力; Y_M ——作物社会生产潜力, 即作物单产潜力; Q ——单位时间、单位面积上的太阳总辐射; $f(Q)$ 、 $f(T)$ 、 $f(W)$ 、 $f(S)$ 、 $f(M)$ ——光合、温度、水分、土壤、社会有效系数。

2.1 光合生产潜力(Y_Q)

Y_Q 的计算方法很多^[6,9,11], 本文选用下列公式计算:

$$Y_Q = Q \cdot \epsilon \cdot \alpha \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - \gamma) \cdot (1 - \omega) \cdot \Phi \cdot (1 - X)^{-1} \cdot H^{-1}$$

式中 ϵ ——生理辐射系数(取 0.49); α ——辐射吸收率(取 0.10); β ——辐射漏射率(取 0.07); γ ——光饱和和限制率(取 0); ω ——呼吸消耗率(取 0.3); Φ ——量子转化效率(取 0.224); X ——植株含水率(取 0.14); H ——质能转化系数(取 $1.78 \times 10^7 \text{ J/kg}$); Q ——到达地面的太阳总辐射强度, J/cm^2 。

某地 Q 值可用日照时数来计算^[12]。公式如下:

$$Q = (0.25 + 0.45 n/N) R_a$$

式中 R_a ——大气上界辐射量(取 $1395 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$); n ——实际日照时数, h; N ——可能日照时数, h。

经计算, 上述公式可转化为: $Q = 348.75 + 627.75 n/N$

其中, N 可使用 Goudriaan 和 Van Laar 提出的下列公式计算^[13]:

$$N = 12[1 + (2/\pi) \cdot a \cdot \sin(a/b)]$$

$$a = \sin\lambda \cdot \sin\delta \quad b = \cos\lambda \cdot \cos\delta$$

$$\sin\delta = -\sin(\pi \times 23.45/180) \cdot \cos[2\pi \times (t_d + 10)/365]$$

式中 t_d ——日序, d; λ ——纬度; δ ——太阳相对于赤道的倾角。

2.2 光温生产潜力(Y_T)

Y_T 是 Y_Q 经 $f(T)$ 校正后得到, 与 Y_Q 计算公式相对应的 $f(T)$ 计算分为喜凉作物和喜温作物^[4,9]。对于喜凉作物:

$$f(T) = e^{\alpha_r \left(\frac{T-T_0}{10}\right)^2}$$

式中 T_0 ——作物生长的最适温度(取 20°C); T ——作物生长实际温度, $^\circ\text{C}$; α_r ——与温度有关的参数, 当 $T < T_0$, $\alpha_r = -1$; 当 $T > T_0$, $\alpha_r = -2$ 。

对于喜温作物:

收稿日期: 2002-04-17

基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA 245041)

作者简介: 周治国(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事自然资源利用与区划、作物信息技术等方面的研究工作。南京农业大学信息农业工程技术中心, 210095



$$f(T) = \begin{cases} 0.027T - 0.162 & 6 & T < 21 \\ 0.086T - 1.14 & 21 & T < 28 \\ 1.0 & 28 & T < 32 \\ -0.083T + 3.67 & 32 & T < 44 \end{cases}$$

$$\Delta Y_F = 2.2875X \cdot (6.58e^{-0.047991X} + 1.08)$$

$$Y_F = Y_I + \Delta Y_F$$

式中 ΔY_F ——化肥增产效力, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; X ——化肥折纯量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.3 气候生产潜力 (Y_W)

Y_W 由 Y_T 经 $f(W)$ 校正后得到, $f(W)$ 可用农田蒸散量和供水量(降水)来确定。

$$f(W) = P_m/E$$

式中 P_m ——月降水量, mm ; E_0 ——月蒸发量, mm 。

2.4 土地生产潜力 (Y_S)

Y_S 由 Y_W 经 $f(S)$ 校正后得到, $f(S)$ 与土壤性状、土壤养分、土地条件等密切相关。我国 80% 以上县市的 $f(S)$ 在 0.6~0.8 之间, 江苏地区的 $f(S)$ 为 0.7343^[14]。

2.5 灌溉生产潜力 (Y_I) 和化肥生产潜力 (Y_F)

Y_W 、 Y_S 是分别在完全雨养、土壤肥力状况下获得的, 没有考虑灌溉和施用化肥对作物生产的影响, 引入 $f(I)$ 和化肥增产效力来估算 Y_I 和 Y_F 。 Y_I 是在 Y_S 基础上, 经 $f(I)$ 校正后获得。

$$f(I) = \begin{cases} 1/f(W) & E_0 \leq I_0 + P_y \\ 1 + I_0/[E_0 \cdot f(W)] & E_0 > I_0 + P_y \end{cases}$$

$$I_0 = 549S_I/S_t \quad Y_I = f(I) \cdot Y_S$$

式中 P_y ——年降水量, mm ; I_0 ——年灌溉量, mm ; E_0 ——年蒸发量, mm ; S_t ——有效灌溉面积, hm^2 ; S_I ——作物播种面积, hm^2 。

Y_F 可利用下列公式计算化肥增产效力^[15], 再估算 Y_F 。

2.6 社会生产潜力

作物生产潜力的实现受社会生产条件、经济状况、生产水平等因素制约, 选择既能综合表示社会效应, 又可定量表达的因子, 建立因子层次结构, 利用层次分析法来确定各项因子对作物生产有效性贡献的权重, 建立社会因子分级评分体系, 计算 $f(M)$ 及 Y_M 。

$$f(M) = \prod_{i=1}^{10} W_i \cdot A_i$$

$$Y_M = f(M) \cdot Y_F$$

式中 W_i ——第 i 个社会因子的权重系数; A_i ——第 i 个社会因子的评分值。

3 作物生产潜力比较分析

3.1 作物单产潜力

以江苏省为案例, 选择社会生产条件(单位面积农机总动力、人均用电量、机械化程度、农村劳动力)、社会经济状况(人均社会总产值、人均农业总产值)、社会生产水平(劳均耕地、劳均粮食总产量、劳均农业总产值、复种指数)共 3 类 12 项社会因子, 以 1999 年江苏省分县市作物生产数据库为基础, 建立社会因子层次结构(图略), 确定因子有效性贡献的权重(表略), 评估各县市社会因子的优劣, 建立社会因子分级评分体系(表 1), 计算社会有效系数及社会生产潜力。

表 1 社会因子分级及评分体系

Table 1 Classes and grade system of society factors

分 级	生产条件				经济状况		生产水平				评分
	单位面积 农机动力	农村人均 用电量	综合机械 化程度	农村劳动 力比例	人均农业 总产值	人均社会 总产值	劳均耕地 面积	劳均粮食 总产量	劳均农业 总产值	复种指数	
1	1.50	3.50	1.50	1.30	1.10	1.50	1.50	1.50	1.50	1.20	1.0
2	1.25~1.50	1.50~3.50	1.25~1.50	1.15~1.30	0.95~1.10	1.25~1.50	1.25~1.50	1.25~1.50	1.25~1.50	1.10~1.20	0.9
3	1.00~1.25	0.65~1.50	1.00~1.25	1.00~1.15	0.80~0.95	1.00~1.25	1.00~1.25	1.00~1.25	1.00~1.25	1.00~1.10	0.8
4	0.75~1.00	0.35~0.65	0.75~1.00	0.85~1.00	0.65~0.80	0.75~1.00	0.75~1.00	0.75~1.00	0.75~1.00	0.90~1.00	0.7
5	0.50~0.75	0.20~0.35	0.50~0.75	0.70~0.85	0.50~0.65	0.50~0.75	0.50~0.75	0.50~0.75	0.50~0.75	0.80~0.90	0.6
6	<0.50	<0.20	<0.50	<0.70	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.50	<0.80	0.5

注: 表中数据系社会因子当量值。

依据江苏省农村经济区划方案, 全省分徐连、两淮、宁镇扬、沿江、太湖和沿海 6 个经济区^[16], 对全省分区 $f(M)$ 和 Y_M 进行统计(图 1、2)的结果表明, $f(M)$ 和 Y_M 分布总体上呈现南高北低的局势, 占全省 23.44% 县市的 $f(M)$ 在 0.8 以上, 54.69% 县市在 0.7~0.8 之间, 21.88% 县市在 0.6~0.7 之间, 昆山市的 $f(M)$ 最高(为 0.9005), 睢宁县的最低(0.6363)。

作物社会生产潜力也简称作物单产潜力, 作物单产潜力的地域差异较大, 占全省 84.00% 县市的棉花单产潜力在 5500~8300 kg/hm^2 之间, 79.68% 县市的粮

食、油料单产潜力在 10 000~18 000 kg/hm^2 之间。

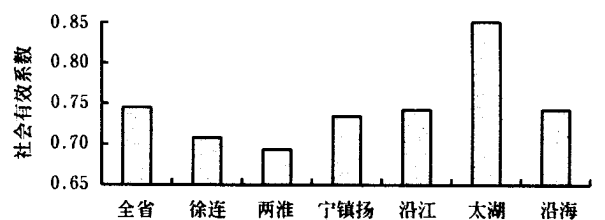


图 1 不同农村经济区社会有效系数
Fig 1 Society effective coefficients of different rural economic regions

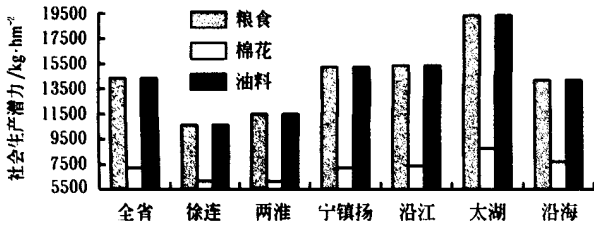


图 2 不同农村经济区社会生产潜力
Fig 2 Society potential productivity in different rural economic regions

3.3 作物相对单产潜力

作物单产潜力仅反映了单产水平的地域差异,并没有与实际单产比较,不能定量地反映实际单产与单产潜力之间的差距,相对单产潜力(相对单产潜力=单产潜力—实际单产)可定量地反映实际单产与单产潜力之间的差距。将分县市作物单产潜力与 1999 年的实际单产比较,可以获得作物相对单产潜力。对作物相对单产潜力统计的结果表明(图 3),相对单产潜力的地域差异较大,太湖区的相对单产潜力最高,徐连、两淮区最低,其他经济区居中。

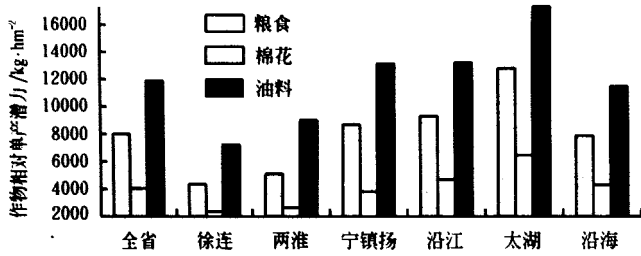


图 3 不同农村经济区作物相对单产潜力
Fig 3 Crop relative potential productivity per unit area in different rural economic regions

3.4 潜力系数

作物相对单产潜力仅反映了各地实际单产与单产潜力之间的差距,由于各地实际单产与单产潜力水平不同,同量的相对单产潜力并不具有同等的可开发性,潜力系数(潜力系数=相对单产潜力/单产潜力)可以反映区域的可开发性。对潜力系数分布统计的结果表明(图 4),区域可开发性由北向南逐渐增大,且棉花的可开发性最大,油料居中,粮食最小。

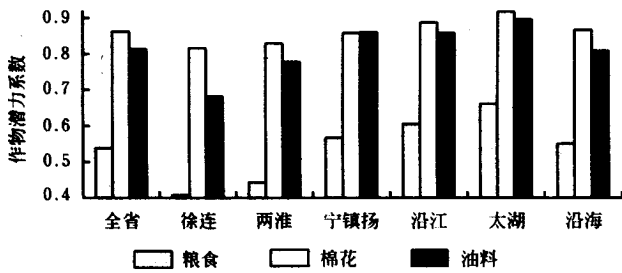


图 4 不同农村经济区作物潜力系数
Fig 4 Crop potential productivity coefficient in different rural economic regions

3.5 总产潜力

以 1999 年全省分县作物播种面积、复种指数等数据库内容为基准,计算作物总产潜力和相对总产潜力,并按农村经济区计算作物总产潜力(图 5~ 7),以反映作物总产潜力的地域分异。

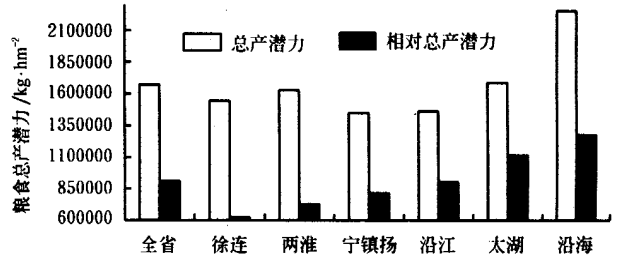


图 5 不同农村经济区粮食总产潜力
Fig 5 Potential grain yield in different rural economic regions

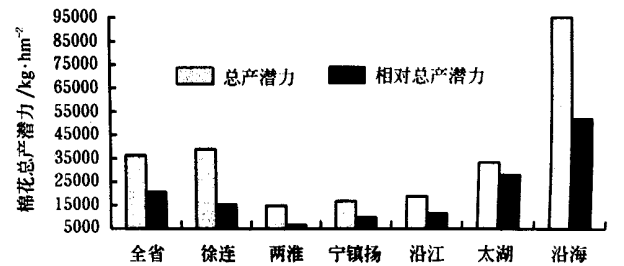


图 6 不同农村经济区棉花总产潜力
Fig 6 Potential cotton yield in different rural economic regions

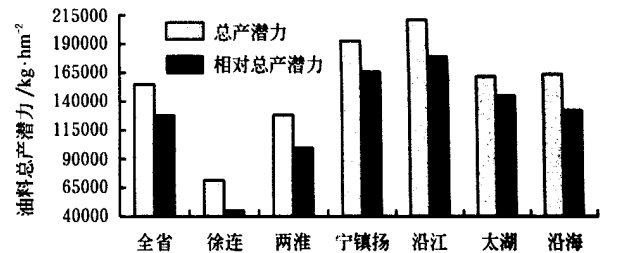


图 7 不同农村经济区油料总产潜力
Fig 7 Potential oil-bearing yield in different rural economic regions

从空间分布来看,除沿海区粮食总产潜力在 $20 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$ 以上外,其他经济区均在 $14 \times 10^5 \sim 16 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$ 之间,但相对总产潜力的地域分异较大,沿海区 > 太湖区 > 沿江区 > 宁镇扬区 > 两淮区 > 徐连区,分别是全省平均 ($9.10 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$) 的 1.40, 1.22, 0.99, 0.90, 0.80, 0.69 倍。棉花的总产潜力:沿海区 > 徐连区 > 太湖区 > 沿江区 > 宁镇扬区 > 两淮区,分别是全省平均 ($3.64 \times 10^4 \text{ t/hm}^2$) 的 2.62, 1.07, 0.93, 0.52, 0.46, 0.41 倍;相对总产潜力:沿海区 > 太湖区 > 徐连区 > 沿江区 > 宁镇扬区 > 两淮区,分别是全省平均 ($2.06 \times 10^4 \text{ t/hm}^2$) 的 2.52, 1.37, 0.74, 0.57, 0.48, 0.32 倍。油料的总产潜力:沿江区 > 宁镇扬区 > 沿海区 > 太湖区 > 两淮区 > 徐连区,分别是全省平均 ($1.55 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$) 的 1.36, 1.24, 1.06, 1.04, 0.83, 0.46 倍;相对总产潜力:沿江区 > 宁镇扬区

> 太湖区> 沿海区> 两淮区> 徐连区, 分别是全省平均 ($1.28 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$) 的 1.40、1.30、1.14、1.04、0.78、0.35 倍。

4 潜力开发优势分析

综合作物单产潜力、潜力系数和总产潜力, 利用下列公式计算区域作物生产潜力开发优势值 P_i , 并按农村经济区统计平均值(图 8), 再分级制图(图 9)。

$$P_i = \prod_{j=1}^7 C_j \times w_j$$

式中 P_i ——第 i 个县的开发优势值; C_j ——第 j 个潜力因素等级值(取 1~7); w_j ——第 j 个潜力因素优势权重(取 0.15~0.30)。

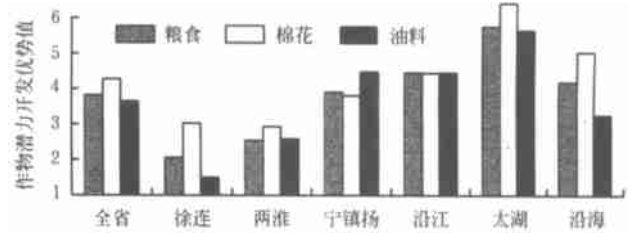


图 8 不同农村经济区作物潜力开发优势值

Fig 8 Superiority value for exploiting crop potential productivity of different rural economic regions

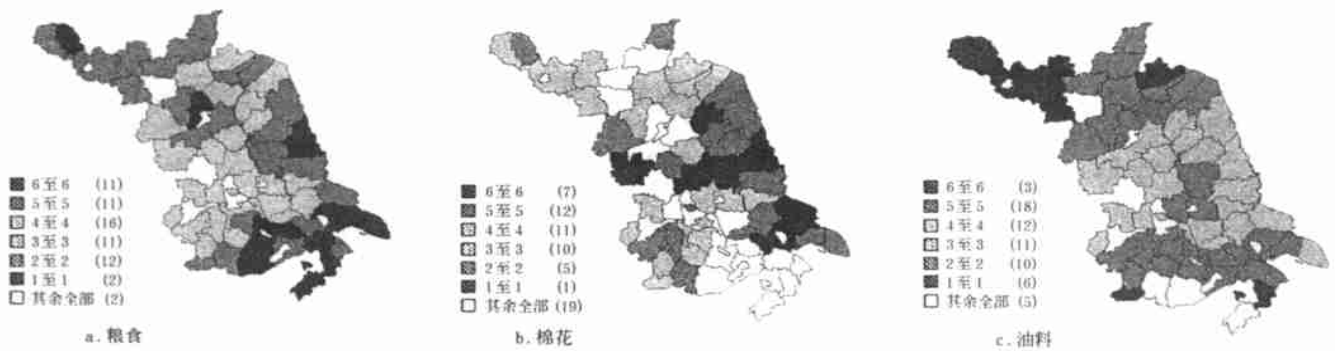


图 9 江苏省分县开发优势值

Fig 9 County developing advantage values of different crops in Jiangsu Province

从图 8 和图 9 可以看出, 由北向南 P_i 逐渐增大。就作物而论, 棉花的 P_i 最大, 油菜最小, 粮食居中。就不同经济区而论, 粮食: 太湖> 沿江> 沿海> 宁镇扬> 两淮> 徐连, 棉花: 太湖> 沿海> 沿江> 宁镇扬> 徐连> 两淮, 油料: 太湖> 宁镇扬> 沿江> 沿海> 两淮> 徐连。就同一经济区而论, 徐连区: 棉花> 粮食> 油料; 两淮区: 棉花最大, 粮食与油料相当; 宁镇扬区: 油菜最大, 粮食与棉花相当; 沿江区: 3 类作物的 P_i 相当; 太湖区: 棉花最大, 粮食与棉花相当; 沿海区: 棉花> 粮食> 油菜。

5 结 语

在 GIS 平台及农业气候数据库和作物生产数据库支持下, 依据光、温、水、土、施肥、灌溉、社会等因子的逐步衰减, 建立了区域作物生产潜力的估算方法, 并以江苏省为案例, 分析区域作物生产潜力及其开发优势。

作物单产潜力总体上呈现南高北低的分布, 占全省 79.68% 县市的粮食、油料单产潜力在 $10\ 000\sim 18\ 000 \text{ kg/hm}^2$ 之间, 84.00% 县市棉花单产潜力在 $5\ 500\sim 8\ 300 \text{ kg/hm}^2$ 之间。与 1999 年作物实际单产比较, 作物相对单产潜力的地域分异较大, 太湖区最高, 徐连和两淮区最低, 其他经济区居中。

作物总产潜力和相对总产潜力的空间分布差异较大, 粮食总产潜力除沿海区在 $20 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$ 以上外, 其

他经济区均在 $14 \times 10^5\sim 16 \times 10^5 \text{ t/hm}^2$ 之间, 徐连、两淮、宁镇扬、沿江、太湖、沿海经济区的相对总产潜力分别是全省平均的 0.69、0.80、0.90、0.99、1.22、1.40 倍。

不同农村经济区、不同作物的可开发性差异较大, 区域可开发性由北向南逐渐增大, 棉花的可开发性最大, 油料居中, 粮食最小。就作物而论, 棉花开发优势最大, 油菜最小, 粮食居中。就经济区而论, 粮油棉开发优势不同, 粮食: 太湖> 沿江> 沿海> 宁镇扬> 两淮> 徐连, 棉花: 太湖> 沿海> 沿江> 宁镇扬> 徐连> 两淮, 油料: 太湖> 宁镇扬> 沿江> 沿海> 两淮> 徐连。就同一经济区而论, 粮油棉的开发优势也不同, 徐连区: 棉花> 粮食> 油料; 两淮区: 棉花最大, 粮食和油料相当; 宁镇扬区: 油料最大, 粮食和棉花相当; 沿江区: 粮油棉的开发优势相当; 太湖区: 棉花最大, 粮食、油料相当; 沿海区: 棉花> 粮食> 油菜。

作物单产潜力的实现受社会生产条件、经济状况、生产水平等多因素制约, 本研究在充分考虑作物气候生产潜力的基础上, 仅仅选择既能综合表示社会效应, 又可定量表达的因子来计算社会有效系数及作物单产潜力, 没有考虑政策、市场、价格等不可量化因子对作物单产潜力实现的影响。随着政策、科技、经济等的变化, 应对本研究提出的作物单产潜力和总产潜力赋予适宜的校正系数, 以提高潜力估算的现实性与可信度。

[参 考 文 献]

- [1] Black J K, Watson D J. Photosynthesis and the theory of obtaining high crop yields[J]. *Field Crop Abstrs*, 1960, 13: 169~ 175.
- [2] Bonner J. The upper limit of crop yields[J]. *Science*, 1962, 137: 11~ 15.
- [3] 程 鸿, 何希吾. 中国自然资源手册[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [4] 陈明荣, 龙斯玉. 我国气候生产潜力区划的探讨[J]. *自然资源*, 1984, 3: 72~ 79.
- [5] 田国良. 呼伦贝尔草原的太阳光辐射能和光合潜力[J]. *地理学报*, 1980, 35(1): 76~ 82.
- [6] 石玉林, 陈百明. 中国土地资源生产能力及人口承载力研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1991.
- [7] 李继由. 农业气候资源理论及其充分利用[J]. *自然资源*, 1995, 1: 1~ 9.
- [8] 聂庆华. 陕西省洛川县土地生产潜力及其人口容量研究[J]. *自然资源*, 1992, 3: 31~ 37.
- [9] 于沪宁, 赵丰收. 光热资源和农作物的光热生产潜力[J]. *气象学报*, 1982, 40(3): 327~ 323.
- [10] 赵名茶. 生产潜力与土地承载力网络试验研究[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 1991.
- [11] Loomis R S, Williams W A. Maximum crop productivity: an estimate[J]. *Crop Science*, 1963, 3: 67~ 72.
- [12] 韩湘玲. 作物生态学[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [13] Goudriaan J, Van Laar H H. Modelling potential crop growth processes[M]. Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [14] 党安荣. 地理信息系统在中国粮食生产研究中的应用[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
- [15] 高如嵩, 张嵩午. 稻米品质气候生态基础研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1994.

GIS-Based potential productivity analysis of regional crop production system

Zhou Zhiguo, Cao Weixing, Wang Shaohua, Wang Qimeng, Meng Yali

(Agricultural Information Engineering and Technology Center, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Based on the support of GIS, the regional agricultural climate database and crop production database, the method for calculating the region-based crop potential productivity was established, by means of the factor attenuation of solar radiation, temperature, water, soil, fertilization, irrigation and the social factor. The crop potential yield per unit area, potential efficiency, total potential productivity, and the developing advantage of crop production were analyzed qualitatively in Jiangsu Province. The results show that from north to south, the developing advantage of crop potential productivity increases gradually. Taken crop into account, cotton has the biggest developing potential, rape has the smallest and grain is in the middle. In terms of economic zones, the developing advantage of grain, oil-bearing products and cotton is different. For grain, the Tai Lake Region > the region along the Yangze River > the coastal region > the Nanjing-Zhenjiang-Yangzhou Region > the Lianghuai Region > the Xuzhou-Lianyungang Region; for cotton, the Tai Lake Region > the coastal region > the region along the Yangze River > the Nanjing-Zhenjiang-Yangzhou Region > the Xuzhou-Lianyungang Region > the Lianghuai Region; for oil-bearing products, the Tai Lake Region > the Nanjing-Zhenjiang-Yangzhou Region > the region along the Yangze River > the coastal region > the Lianghuai Region > the Xuzhou-Lianyungang Region. In the same economic region, the developing advantage of grain, oil-bearing products and cotton is also different. In the Xuzhou-Lianyungang region, cotton > grain > oil-bearing products; in the Lianghuai Region, cotton is the most advantageous, grain and oil-bearing products are relatively similar; in the Nanjing-Zhenjiang-Yangzhou Region, oil-bearing products are the most advantaged, grain and cotton are similar. In the region along the Yangze River, grain, oil-bearing products and cotton have similar development advantage. In the Tai Lake Region, cotton is the most advantageous, grain and oil-bearing products have similar developing advantage; in the coastal region, cotton > grain > oil-bearing products.

Key words: GIS; region; crop production system; potential productivity