

基于知识模型和 GIS 的作物生产潜力评价

周治国, 孟亚利, 曹卫星

(南京农业大学/江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095)

摘要: 引入知识模型概念, 通过光、温、水、土、施肥、灌溉、社会等因子的逐步衰减, 建立作物生产潜力估算的知识模型。将知识模型与数据库有机结合, 以 Mapinfo5.5 为系统开发平台, 利用 MapBasic 和 VB 程序设计语言, 建立基于知识模型的作物生产潜力分析系统, 实现作物生产潜力评价的计算机辅助决策。以江苏省作物生产系统为案例, 应用本系统对江苏地区作物生产潜力区域优势进行实例评价, 并与实际单产相比较, 进行单产潜力、潜力系数和总产潜力的对比分析, 确定作物生产地域优势。

关键词: 知识模型; GIS; 作物; 生产潜力; 评价

Knowledge Model and GIS-Based Crop Potential Productivity Evaluation

ZHOU Zhi-guo, MENG Ya-li, CAO Wei-xing

(Nanjing Agricultural University/Hi-Tech Key Laboratory of Information Agriculture, Jiangsu Province, Nanjing 210095)

Abstract: The concept of knowledge model was introduced, and the knowledge model of crop potential productivity estimation has been set up by the factor attenuation of solar radiation, temperature, water, soil, fertilization, irrigation and the social factor. Based on the support of MapInfo 5.5 systemic development platform and knowledge model, with MapInfo development language including MapBasic and VB6.0, an analysis system on crop potential productivity was developed by integrating the knowledge engineering and database. The computer aid decision of crop potential productivity has been realized. An application example in Jiangsu province was provided, by comparing to the practical yield per unit area, the potential yield per unit area, potential coefficient, potential productivity were analyzed qualitatively, the regional superiority of crop production was decided.

Key words: Knowledge model; GIS; Crop; Potential productivity; Evaluation

作物生产系统受自然环境和社会生产等多因素影响, 自然环境和社会生产要素的区域差异性导致作物生产明显的地域分异。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, 研究作物生产潜力的空间变化, 可以掌握作物生产的区域差异及其变化规律, 对作物生产规划与合理开发利用农业自然资源、正确指导作物生产系统的发展具有重要意义。

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], 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^[2]。随着研究的深入, 大量算法问世, 计算参数也逐渐精确^[2-8]。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。

本研究基于国内外生产管理决策支持系统 (DSS), 尤其是基于知识库系统以及基于模型和 GIS 或 RS 的农业决策支持系统的迅速发展^[9-14], 利用数据库技术和知识库技术研究分析作物生产潜力, 建立估算作物生产潜力的知识模型, 并进行作物生产区域优势评价, 为作物生产的管理规划提供理论依据。

1 系统结构

本系统运行于 PC 机, 中文 Windows 2000 以上操作系统, 由数据库、知识模型、GIS、人机交互界面

收稿日期: 2004-06-05

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (2001AA245041)

作者简介: 周治国 (1965-), 男, 山东枣庄人, 教授, 博士, 主要从事作物生理生态、作物信息技术等方面的研究工作。Tel/Fax: 025-84396813; E-mail: giscott@njau.edu.cn

等部分组成(图1), 其中 GIS 是系统的管理核心。

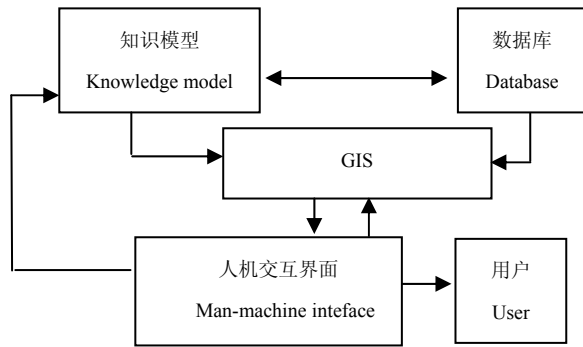


图1 作物生产潜力分析系统结构

Fig.1 Structural framework of crop potential productivity analysis system

2 数据库

数据库是该系统的中心,管理3类数据,第1类是地图数据,属空间数据,为 MapInfo 表(后辍为.tab),通过 MapInfo 可处理数据的显示、浏览、查询和分析。第2类包括各单位与作物生产有关的历史数据,这些数据与单位的地理实体有关,都有索引字段记录所在的实体或实体特性,以进行地图实体和属性数据的匹配。第3类数据包括各生产单位作物生产数和气候、土壤资料,属属性数据。气象资料主要包括温度、降水和日照,它们作为一个表形式以 ACCESS 文件存储在计算机存储器中,数据的操作主要通过 Visual Basic 完成,包括数据抽取。气象数据为各旬数据,在系统运行过程中,需要提取旬数据并按一定的算法将其转换成每日数据,系统将产生的每日数据自动保存在临时表中,供推理过程使用。每日平均气温采用曲线模拟法,而降水、日照用平均法求取。另外数据库系统运行过程中产生的中间变量,可被系统在任何时刻重新调用,而部分临时数据在系统运行结束后或系统推理前自动清除。而有些数据则可以在系统下次作同一分析时直接调用。空间数据与属性数据可用各单位分区域单元代码作为连接两者的关联项,进行匹配、叠加、转换等一系列处理,生成需要的分单位空间、属性一体化数据。

3 作物生产潜力知识模型

3.1 光合生产潜力

作物光合生产潜力 (Y_Q) 选用下式计算:

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

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 $1.78 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$); Q : 到达地面的太阳总辐射强度 ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

某地 Q 值可用日照时数来计算^[15]。公式如下:

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

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:

$$Q = 348.75 + 627.75 \times n/N$$

其中 N 可用 Goudriaan 和 Van Laar 提出的公式计算^[16]。公式如下:

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

$$a = \sin \lambda \times \sin \delta; \quad b = \cos \lambda \times \cos \delta$$

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

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

3.2 光温生产潜力

光温生产潜力 (Y_T) 是在 Y_Q 的基础上,经温度有效系数 ($f(T)$) 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^[2,7]。

3.2.1 喜凉作物

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

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 ($^\circ\text{C}$); a : 与温度有关的参数为: 当 $T < T_0$, $a = -1$; 当 $T \geq T_0$, $a = -2$ 。

3.2.2 喜温作物

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

3.3 气候生产潜力

气候生产潜力 (Y_w) 由 Y_T 经水分有效系数 ($f(W)$) 校正后得到。 $f(W)$ 可用农田蒸散量和供水量(降水)来确定。公式如下:

$$f(W) = \begin{cases} 0.8R/E_0 & 0 < R < 1.25E_0 \\ 1.0 & 1.25E_0 \leq R \end{cases}$$

式中, R : 降水量 (mm); E_0 : 土壤水分供应充足时的最大蒸发量 (mm)。

3.4 土地生产潜力

土地生产潜力 (Y_s) 由 Y_w 经土壤有效系数 ($f(S)$) 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。研究表明^[17], 中国 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。

3.5 灌溉生产潜力和化肥生产潜力

3.5.1 灌溉生产潜力 灌溉生产潜力 (Y_w) 是在完全雨养条件下获得的, 没有考虑灌溉对作物生产的影响, 本研究引入灌溉有效系数 ($f(I)$) 即单位灌溉水量所能增加的产量, 来估算灌溉生产潜力 (Y_1)。公式如下:

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

$$I_0 = 549 \times S_1/s_t$$

$$Y_1 = f(I) \times Y_s$$

式中, P_y : 年降水量 (mm); I_0 : 年灌溉量 (mm); E_0 : 年蒸发量 (mm); S_1 : 有效灌溉面积 (ha); S_t : 作物播种面积 (ha)。

3.5.2 化肥生产潜力 Y_s 是在土壤肥力状况下获得的, 没有考虑施用化肥对作物生产的影响, 本研究引入肥增产效力 (ΔY_F) 即投入施肥量所增加的产量来估算化肥生产潜力 (Y_F)。利用陈锡廉提出的公式计算化肥增产效力^[17], 再估算 Y_F 。公式如下:

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

$$Y_F = Y_1 + \Delta Y_F$$

式中, ΔY_F : 化肥增产效力 ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); X : 化肥折纯量 ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)。

3.6 社会生产潜力

上述作物生产潜力主要是以自然生产潜力为主的, 在社会生产条件、经济状况、生产水平等因素相同的条件下各种作物实际单产与其自然生产潜力具有同等的可比性。但在现实社会中, 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, 导致各种作物实际单产与其自然生产潜力没有同等的可比性。因此基于作物自然生产潜力的估算, 通过建立各种作物生产中社会因子等级估算和评价体系, 才是准确、定量估算作物单产潜力并进行评价的关键。在此引入社会有效系数 ($f(M)$), 对社会因子等级进行估算。

在众多社会因子中, 有的可量化, 有的只能定性描述, 因此要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 (AHP) 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, 计算社会有效系数 ($f(M)$) 及社会生产潜力 (Y_M)。

$f(M)$ 与 Y_M 的计算公式如下:

$$f(M) = \sum_{i=1}^{10} W_i \times A_i$$

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

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。

在本研究中选择社会生产条件 (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。

4 作物生产潜力区域优势评价模型

作物的社会生产潜力就是自然生产潜力经过社会生产条件、经济状况、生产水平等因素修正后的作物生产潜力, 也可以认为是作物单产潜力 (PP)。虽然反映了作物单产水平的差异, 但并没有与实际单产 (PP₀) 比较, 利用实际单产与单产潜力之间的差距 (RPP) 则可弥补这一不足。

RPP 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 (PPC) 可以反映作物生产的区域优势。

上述分析都是对单产而言, 而我们的最终目的是通过作物单产和播种面积来获取总产, 因而应该以基准年的播种面积 (S_0) 为基础计算总产潜力 (TPP)。

基于 PP、RPP、PPC、TPP 等, 可以计算作物生产潜力区域优势评价价值 P_i 。

RPP、PPC、TPP、 P_i 的计算公式如下:

$$RPP = PP - PP_0$$

$$PPC = RPP/PP$$

$$TPP = PP \times S_0$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n C_j \times W_j$$

式中, P_i : 第 i 个县作物生产潜力区域优势评价价值; C_j : 第 j 个潜力因素等级值; W_j : 第 j 个潜力因素优势权重。

5 模型与 GIS 系统的耦合

在作物生产潜力及潜力开发优势模型与 GIS 系统的耦合中, 数据库是中心。GIS 数据库管理三类数据, 第一类是地图数据, 属空间数据, 为 MapInfo 表 (后缀为 .tab), 通过 MapInfo 可处理数据的显示、浏览、查询和分析, 地图图层有省、县市边界图层和县市中心地图层。第二类包括各县市与作物生产有关的历史数据, 这些数据与县市的地理实体有关, 都有索引字段记录所在的实体或实体特性, 以进行地图实体和属性数据的匹配。第三类数据包括构建作物生产潜力模型所需要气候、土壤、社会等资料和模型运算的结果数据, 属属性数据。可用县市分区域单元代码作为连接两者的关联项, 将空间数据与属性数据进行匹配、叠加、转换等一系列处理, 生成需要的分县市空间、属性一体化数据。

应用 MapBasic 编制的用户主界面对系统进行控制、操作, 模型调用系统利用 VB6.0、MapBasic 进行开发。通过应用 VB6.0 编程, 实现对 MapInfo 进行控制、操作, 以达到以 VB6.0 应用程序为前台, 发送命令到后台 MapInfo, 执行完命令后, 将执行结果发送回前台。

以 VB6.0 为应用程序设计的窗口叫 FrmMainWin, 在该窗口上方放一个取名为 Mappicture 图片框, 用于信息的显示。MapInfo 启动和链接程序的主要语句有:

①Public MapInfo As Object //定义 MapInfo 对象
②Set MapInfo=Createobject (“MapInfo . Application”)
//生成 MapInfo 对象

③msg= “Open Table “ “D:\江苏省市.tab” ”
Interactive”

MapInfo .Do msg //程序通过操作对象 MapInfo, 向后台的 MapInfo 发送命令

④ MapInfo .Do “Set Next Document Parent ”&MapPicture . hwnd MapInfo //显示在当前窗口名为 MapPicture 的图片框上。

MapInfo 对象利用 Callback 函数自动地向前台客户端发送消息, 相反客户端 (应用程序) 也可以通过它的接口操纵 MapInfo。在 MapInfo 调用作物生产潜力模型后, 应用 API 函数 WinExec 链接作用, 把运行结果数据读入 MapInfo, 以专题地图形式显示。

6 系统运行与结果输出 (以江苏省为案例)

用户打开所选择表, 可采用单选或多选方式选择基本单位, 例如本文以江苏省为地区案例, 以县市为基本单位, 以 1999 年为基准年, 选取所有单位, 并针对每一选择点, 读入当年社会生产条件 (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) 3 类 12 项社会因子的数值, 然后运行系统, 并重复该过程至系统运行结束。可以输出各单位的社会因子分级及评分标准 (表 1), 粮食、棉花、油料作物单产潜力、潜力系数、总产潜力的分级标准 (表 2) 及潜力区域优势分级标准, 并以专题图的方式输出粮食、棉花、油料的单产潜力及其区域优势评价价值。

以棉花为例, 图 2 表示江苏省棉花单产潜力及其区域优势评价价值的差异, 从图中可以看出, 作物生产由于受区域社会和经济条件的限制, 导致棉花单产潜力与区域优势评价价值在有些地区 (如东部沿海) 是一致的, 而在有些地区 (如苏南地区) 是不一致的。

7 讨论与结论

数学模型一般采用数学方程形式, 利用各个因素 (变量) 关系来揭示其实质。而知识模型则是描述系统的知识和推理过程, 将描述方法用数学方法和知识表示方法相结合, 共同完成对系统的领域知识、推理知识和任务知识的描述。目前一些农业专家系统基本上是基于知识库系统, 系统中不含模型, 即便是有模型系统, 也是模型和知识不相关, 这样的系统只能处理定性知识, 遇到定量知识就要定性化。本文在分层次评价区域作物生产潜力时, 把定性知识和模型知识归一化, 从而将知识模型概念引入知识表达系统中。

对作物生产潜力进行分析和评价是确定作物区域优势的基础, 需要明确的评价指标体系、正确的模型方法和适度的宏观性。在气候生产潜力的计算过程中, 由于算法指标的确定不同, 不同模型的计算结果差距较大, 需要对模型参数进行科学的选择和修正。如在计算光温生产力时, 喜温 (凉) 作物的生长临界温度不同, 且在大尺度区域范围内南北纬度差异较大, 作物类型明显不同, 如果以同一临界温度计算, 必然加大误差。再如在引入社会因子计算社会生产潜力时, 社会要素实际上就是农业系统中与自然资源相对应的农业社会资源, 为了便于分析和评价, 我们在本研究中仅选择了包括社会生产条件、社会经济状况和社会

表 1 社会因子分级及评分体系

Table 1 Degree and grade system of social factors

分级 Degree	生产条件 Production conditions				经济状况 Economic state			生产水平 Production level				评分 Grade
	单位面积农 机动力 Agro-machine per unit acreage	农村人均用电量 Average country electro-quantity per people	综合机械化程度 Integrational mechanization degree	农村劳动力 比例 Ratio of the country labour force	人均农业总产值 Total agricultural production value per people	人均社会总产值 Total social production value per people	劳均耕地面积 Agrarian acreage per labour force	劳均粮食总产量 Total Foodstuff per labour force	劳均农业总产值 Total agricultural production value per labour force	复种指数 Multiple crop index		
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	

表中数据系社会因子当量值

Data in table were the equivalent values for social factors

表 2 作物单产潜力、潜力系数和总产潜力的分级

Table 2 Degree of potential crop productivity per unit area, potential productivity coefficient and potential yield

潜力分级 Degree		7	6	5	4	3	2	1
PP 10 ⁴ kg·ha ⁻¹	粮食 Grain	≥2.0	2.0~1.8	1.8~1.6	1.6~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	<1.0
	棉花 Cotton	≥0.9	0.9~0.83	0.83~0.76	0.76~0.69	0.69~0.62	0.62~0.55	<0.55
	油料 Oil plant	≥2.0	2.0~1.8	1.8~1.6	1.6~1.4	1.4~1.2	1.2~1.0	<1.0
RPP 10 ⁴ kg·ha ⁻¹	粮食 Grain	≥1.2	1.20~1.05	1.05~0.9	0.90~0.75	0.75~0.6	0.60~0.45	<0.45
	棉花 Cotton	≥0.7	0.70~0.60	0.60~0.5	0.50~0.40	0.40~0.3	0.30~0.20	<0.20
	油料 Oil plant	≥1.5	1.5~1.35	1.35~1.2	1.20~1.05	1.05~0.9	0.90~0.75	<0.75
PPC	粮食 Grain	≥0.7	0.70~0.64	0.64~0.58	0.58~0.52	0.52~0.46	0.46~0.40	<0.40
	棉花 Cotton	≥0.9	0.90~0.88	0.88~0.86	0.86~0.84	0.84~0.82	0.82~0.80	<0.80
	油料 Oil plant	≥0.9	0.90~0.88	0.88~0.86	0.86~0.84	0.84~0.82	0.82~0.80	<0.80
TPP	粮食 Grain	≥20	20~18	18~16	16~14	14~12	12~10	<10
10 ⁵ T	棉花 Cotton	≥2.5	2.5~2.0	2.0~1.5	1.5~1.0	1.0~0.75	0.75~0.50	<0.50
	油料 Oil plant	≥30	30~25	25~20	20~15	15~10	10~5	<5

图 2 江苏省棉花单产潜力（左）及其单产潜力区域优势评价价值（右）的差异

Fig.2 Difference of potential cotton productivity per unit area (left) and its evaluation value (right) in Jiangsu Province

生产水平共 3 类 12 项可以量化的社会因子, 象劳动力素质等一些可以决定社会资源效率的定性指标在模型中没有体现, 同样加大了评价的误差。还有如资源配置中包括作物品种、资金、施肥、灌溉等多种因素, 而在模型中仅考虑灌溉和施肥, 也加大了模型评价的误差。

尽管如此, 应用本系统对作物生产潜力区域优势进行评价时, 仍然呈明显的、与实际一致的趋势分布。如江苏省棉花的单产潜力由南向北逐渐降低, 棉花生产的优势区域位于沿海一带, 这与江苏省棉花实际单产的区域分布一致, 也与江苏省棉花生产的实际区域优势一致。

References

- [1] 程 鸿, 何希吾. 中国自然资源手册. 北京: 科学出版社, 1990.
Cheng H, He X W. *Chinese Natural Resource Manual*. Beijing: Science Press, 1990. (in Chinese)
- [2] 田国良. 呼伦贝尔草原的太阳光辐射能和光合潜力. 地理学报, 1980, 35(1): 76-82.
Tian G L. Radiotechnology from sun and potential photosynthesis on HuLunBeiEr grassland. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 35(1): 76-82. (in Chinese)
- [3] 陈明荣, 龙斯玉. 我国气候生产潜力区划的探讨. 自然资源, 1984, 3: 72-79.
Chen M R, Long S Y. Research on the chinese subarea of climate potential production. *Natural Resource*, 1984, 3: 72-79. (in Chinese)
- [4] 石玉林, 陈百明. 中国土地资源生产能力及人口承载量研究. 北京: 中国人民大学出版社, 1991.
Shi Y L, Chen B M. *Research on Potential Production and Latent Capacity for Population by Chinese Soil Resource*. Beijing: Renmin University of China Press, 1991. (in Chinese)
- [5] 李继由. 农业气候资源理论及其充分利用. 资源科学, 1995, 1: 1-9.
Li J Y. Theory of agroclimatic resources and its fully utilization. *Resources Science*, 1995, 1: 1-9. (in Chinese)
- [6] 聂庆华. 陕西省洛川县土地生产潜力及其人口容量研究. 自然资源, 1992, 3: 31-37.
Nie Q H. Research on potential soil production and latent capacity for population in Luochuan county of Shaanxi Province. *Natural Resource*, 1992, 3: 31-37. (in Chinese)
- [7] 于沪宁, 赵丰收. 光热资源和农作物的光热生产潜力. 气象学报, 1982, 40(3): 327-323.
Yu H N, Zhao F S. On the light and thermal resources and the crop potential productivity. *Acta Meteorological Sinica*, 1982, 40(3): 327-323. (in Chinese)
- [8] 赵名茶. 生产潜力与土地承载力网络试验研究. 北京: 北京工业大学出版社, 1991.
Zhao M C. *Research on Potential Production and Soil Capacity for Population by Meshwork Trial*. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1991. (in Chinese)
- [9] 曹卫星, 罗卫红. 作物系统模拟及智能管理. 北京: 高等教育出版社, 2003.
Cao W X, Luo W H. *Crop System Simulation and Intelligent Management*. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
- [10] 党安荣, 阎守邕, 肖春生. 地理信息系统在中国粮食生产研究中的应用. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
Dang A R, Yan S Y, Xiao C S. *GIS Application Research on China's Grain Production*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 赵春江, 诸德辉, 李鸿祥, 杨宝祝, 康书江, 郭晓维. 小麦栽培管理计算机专家系统研究与应用. 中国农业科学, 1997, 30(5): 42-49.
Zhao C J, Zhu D H, Li H X, Yang B Z, Kang S J, Guo X W. Study on intelligent expert system of wheat cultivation management and its application. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(5): 42-49. (in Chinese)
- [12] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 黄 丽, 张光远. GIS 支持下三峡库区典型流域土壤养分流失量预测. 水土保持学报, 2001, 15(1): 9-12.
Cai C F, Ding S W, Shi Z H, Huang L, Zhang G H. Prediction on soil nutrients losses at typical small watershed of three gorges area with GIS. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(1): 9-12. (in Chinese)
- [13] 张晓萍, 李 锐, 赵永安. 基于 GIS 的水土保持林草措施“专家”系统研究. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(4): 77-95.
Zhang X P, Li R, Zhao Y A. Study on GIS-based expert system of biological practice for soil and water conservation. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(4): 77-95. (in Chinese)
- [14] 史明昌, 孙保平, 孙立达, 岳德鹏, 李清河. 地理信息系统支持下土地评价专家模型的研究. 北京林业大学学报, 1996, 18(4): 50-63.
Shi M C, Sun B P, Sun L D, Yue D P, Li Q H. Study on the land evaluation expert model based on geographic information system. *Journal of Beijing Forestry University*, 1996, 18(4): 50-63. (in Chinese)
- [15] 韩湘玲. 作物生态学. 北京: 气象出版社, 1991.
Han X L. *Crop Ecology*. Beijing: Meteorology Press, 1991. (in Chinese)
- [16] Goudriaan J, Van Laar H H. *Modelling Potential Crop Growth Processes*, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [17] 陈锡康, 郭菊娥. 中国粮食生产发展预测及其保证程度分析. 自然资源学报, 1996, 11(3): 197-202.
Chen X K, Guo J E. Forecast of China's grain production development and its guarantee degree analysis. *Journal of Natural Resources*, 1996, 11(3): 197-202. (in Chinese)