

基于过程模型的河北平原 冬小麦产量和蒸散量模拟

莫兴国, 林忠辉, 李宏轩, 项月琴

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:本文结合作物参数的遥感信息反演和气象要素的空间尺度扩展方法,建立以 GIS 背景数据库为支撑的冬小麦生长模型,研究河北平原农田生态系统生物量和蒸散量的区域分布特征。结果显示,河北平原 1990 年高产区主要集中在保定中南部、石家庄中部、邢台中部和邯郸东部的南北条带上,单产在 $6000 \sim 8400 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间,廊坊东部、沧州大部分、衡水中部、邢台东部和西部太行山区等是低产区,单产低于 3000 kg hm^{-2} 。总体而言,该地区实际产量与光温生产潜力对比仍有较大差距。在冬小麦生长期,蒸散量主要在 $300 \sim 500 \text{ mm}$ 之间,水分利用效率低于 $20 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$,其中小于 $8 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 的概率分布占 42 % 左右。农业水资源不足,水分利用效率低,是该地区冬小麦生产面临的严重问题。

关 键 词:作物生长模型;遥感植被指数;尺度扩展;区域模拟

中图分类号:S512.1+1;S161.4 **文章编号:**1000-0585(2004)05-0623-09

1 引言

监测大面积农作物长势,及早准确地估测农作物产量,对粮食宏观调控和贸易具有重要意义。农作物估产的研究大致可分为四个发展阶段:(1) 20 世纪 50 年代和 60 年代初,以光合生产潜力的简单估算为主;(2) 60 年代,主要发展农作物产量与气温、降水等气象因素关系的统计模型;(3) 70 年代中期到 80 年代初期,机理模型开始发展并逐步走向成熟。其中,1971 年荷兰瓦赫宁根农业大学德·威特(De Wit)建立的 ELCROS 模型(作物生长基本模型)为后来的动力学模型研究拉开了序幕;(4) 80 年代中期以来,遥感估产方法出现,将遥感信息与机理模型融合用于区域农作物产量的预测。这种方法具有非常好的应用前景。徐勇^[1]、林忠辉等^[2]对作物模型的发展从不同角度作了详细的综述。

机理模型是从土壤-植被-大气系统物质和能量传输转化理论出发,对作物环境以及作物生长、发育、产量形成过程中的光合、呼吸、蒸腾、营养等一系列生理生化过程进行数学描述,动态模拟作物的生长发育过程,并揭示其与环境、品种、管理等各种影响因子的相互关系。这类模型有很多,较著名的有 SUCROS, WOFOST, CERES 系列等。

遥感估产是指在收集分析农作物光谱特征的基础上,通过卫星传感器记录的地球表面信息辨别作物类型,监测作物长势,建立光谱反射率与产量的统计关系式,用于提前一到两个月预测作物总产量的一系列技术方法^[3~12]。NOAA-AVHRR 辐射计的遥感数据具有

收稿日期:2004-02-18;修订日期:2004-07-29

基金项目:973 项目(2002CB412503)和国家自然科学基金项目(902110077)资助

作者简介:莫兴国(1966-),博士,研究员。主要从事生态系统水热交换与物质生产模型研究,发表论文 30 余篇。E-mail: moxg@gsnrr.ac.cn

时频高、覆盖范围大、成本低、波段范围宽等特点,是很理想的信息源。遥感估产侧重植被绿度与后期产量的统计关系,对区域产量的早期预报非常实用。然而,作物与气候、土壤环境的相互作用会影响每一阶段的作物生长,遥感预报产量有相当的不确定性。作物生长机理模型能够描述农作物的生长发育状况,根据气候条件预测出最终产量和可能的产量波动。但由于模型结构和参数的尺度扩展问题,区域范围的应用受到很大限制,机理模型的优势也一直没有完全发挥出来。随着 GIS 和遥感技术的发展,机理模型的区域应用有了很多尝试^[13~15]。

本文主要探讨 GIS 数据、遥感数据和气象变量与作物生长模型相结合的方法,模拟分析河北平原 (113 E~118 E, 36 N~41 N, 面积约为 60 000 km²) 冬小麦生物量、蒸散量和水分利用效率的空间分异特征,并分析其成因。

2 材料和方法

2.1 光合作用

对冬小麦等 C₃植物而言,单位叶面积瞬时光合作用速率可用直角抛物线函数表示^[16]:

$$P_i = aiP_{\max}/(ai + P_{\max}) \quad (1)$$

其中, P_i 为光合作用速率(g CO₂m⁻²s⁻¹), a 为初始光利用效率(g J⁻¹), P_{\max} 为叶片最大 CO₂同化率。在温度适宜的情况下,冬小麦的 P_{\max} 可取 1.11 mg CO₂m⁻²s⁻¹。考虑到叶片的反射率和透射率,水平均匀冠层的光合有效辐射通量 i 可近似表示为^[16]:

$$i = K[(1+r)/(1-\tau)]I_t \exp(-KL_T) \quad (2)$$

其中, K 为冠层光合有效辐射的消光系数, r 为叶片的反射率, τ 为叶片的透射率, I_t 为冠层顶的光合有效辐射, L_T 为冠层叶面积指数。

对式(1)积分进行可得到光合作用日总量 (P_c):

$$P_c = 2 P_{\max} D / K \ln \left[\frac{P_{\max}(1-\tau) + (P_{\max}^2(1-\tau)^2 + aK I_t^M P_{\max}(1+r)(1-\tau))^{1/2}}{P_{\max}(1-\tau)(P_{\max}^2(1-\tau)^2 + aK I_t^M e^{KL_T} P_{\max}(1+r)(1-\tau))^{1/2}} \right] \quad (3)$$

其中, D 为日长, I_t^M 为 I_t 的最大值。当根层土壤水分小于田间土壤水分的 50~70 % 时,冠层光合作用速率受到土壤水分胁迫而减少,表示为:

$$P_{ac} = w P_c \quad (4)$$

其中, P_{ac} 为实际的光合作用速率, w 为实际蒸腾与潜在蒸腾之比。

2.2 作物生长

作物活生物量的增加可表示为总光合作用量、呼吸和枯黄凋落之间的平衡^[17],即:

$$\frac{dW}{dt} = P_{ac} - R - S \quad (5)$$

其中, W 为绿色生物量 (g (CH₂O) m⁻²), R 为包括结构呼吸 R_c 和维持呼吸 R_m 的总呼吸 (g (CH₂O) g⁻¹ (CH₂O) d⁻¹), S 为枯黄率 (g (CH₂O) g⁻¹ (CH₂O) d⁻¹)。 R_c 和 R_m 由下式计算^[18]:

$$R_c = (1 - Y_G)(P_{ac} - R_m) \quad (6)$$

$$R_m = mW \quad (7)$$

其中, Y_G 为生长转换系数, m 为维持呼吸系数。冬小麦的经济系数取为 0.45。

作物的生育期由物候期指数 DV 控制,当 DV 由 0 到 1,表示从出苗到开花期;当 DV 由 1 到 2,表示从开花到收获期。 DV 由下式计算:

$$DV = \begin{cases} t_1 (T_a - B) / A_1 & 0 < DV < 1 \\ 1 + t_2 (T_a - B) / A_2 & 1 < DV < 2 \end{cases} \quad (8)$$

其中, T_a 为气温, t_1 和 t_2 分别为出苗到开花期和开花期到收获的累计天数, A_1 和 A_2 分别为上述两个时期的活动积温, B 为最小有效温度, 对冬小麦可取 0。光周期和春化作用对生长发育的影响在区域模拟中暂不考虑。

冬小麦经济产量由收获期总生物量乘以经济系数(本文中系数取 0.45)得到。

2.3 冠层蒸腾和土壤蒸发

冠层蒸腾 E_c 和土壤蒸发 E_s 由 S-W 双层模型^[19, 20]计算:

$$E_c = \frac{R_{nc} + \frac{C_p D_o}{r_{ac}}}{\left(1 + \left(1 + \frac{r_c}{r_{ac}} \right) \right)} \quad (9)$$

$$E_s = \frac{(R_{ns} - G) + \frac{C_p D_o}{r_{as}}}{\left(1 + \left(1 + \frac{r_s}{r_{as}} \right) \right)} \quad (10)$$

其中, R_{nc} 和 R_{ns} 分别为冠层和土壤表面吸收的净余辐射, G 为土壤热通量, ρ_a 为空气密度, C_p 为空气的定压比热, D_o 为源汇高度处的饱和水汽压差, γ 为潜热系数, Δ 为饱和水汽压 - 温度曲线的斜率, λ 为干湿常数, r_{ac} 为叶片边界层空气动力学阻力, r_{as} 为从土壤表面到源汇高度的空气动力学阻力, r_c 为冠层阻力, r_s 为土壤阻力。参数化见文献[19]。

2.4 土壤水平衡

冬小麦根深一般小于 2m, 因此本文模型计算的土体深度定为 2.0 m。土壤水平衡采用两层方案计算, 不考虑地下水的补给。这两层的深度分别为 0.1 m 和 1.9 m, 第一层土壤水分主要消耗于地表蒸发, 根系吸水主要发生在第二层。因为在冬小麦生育期, 华北平原的降水量常常较小, 所以地表径流可忽略不计。这两层的土壤水平衡可表示为:

$$\frac{1}{D_1} \frac{d_1}{dt} = P - E_s - q_1 \quad (11)$$

$$\frac{1}{D_2} \frac{d_2}{dt} = -E_c + q_1 - q_2 \quad (12)$$

其中 D_1 和 D_2 分别为第一和第二层的厚度, d_1 和 d_2 分别为第一和第二层的含水量, P 为减去冠层截留后的净雨量, q_1 和 q_2 为土层之间的水通量^[21]。

2.5 区域叶面积指数

冠层叶面积指数是作物生长模型的重要变量, 也是遥感与作物生长模型相结合的纽带。本研究利用 1990 年 NOAA (美国国家海洋和大气局) - AVHRR (改进型甚高分辨率辐射仪) 1km × 1km 分辨率、月最大值合成的 NDVI (标准化植被指数) 数据进行反演, 得到冬小麦叶面积指数 LAI。LAI 通过下式^[22]计算:

$$LAI = LAI_{\max} \frac{\log(1 - FPAR)}{\log(1 - FPAR_{\max})} \quad (13)$$

$$FPAR = \frac{(SR - SR_{\min})(FPAR_{\max} - FPAR_{\min})}{(SR_{\max} - SR_{\min})} + FPAR_{\min} \quad (14)$$

$$SR = \frac{(1 + NDVI)}{(1 - NDVI)} \tag{15}$$

式中， SR 为简单植被指数， $FPAR_{min}$ ， $FPAR_{max}$ 为常数，分别指植被覆盖为零和完全覆盖时的光合有效辐射吸收比例，取值 0.001 和 0.950。 SR_{min} 和 SR_{max} 分别表示裸地和植被完全覆盖时的 SR 值，这里分别确定为 1.081 和 5.135。

2.6 气象要素的尺度扩展

本文对气象要素（包括气温、气压、水汽压、日照时数、降水和风速），采用梯度距离平方反比法^[23]进行空间尺度扩展。该法在距离权重的基础上，考虑了气象要素随高程和经、纬向的梯度变化，估值公式为：

$$Z = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i + (X - X_i) \times C_X + (Y - Y_i) \times C_Y + (E - E_i) \times C_e}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \right] \tag{16}$$

式中， Z 和 Z_i 分别为待估点与气象站点的气象要素， X 和 X_i 为待估点与气象站点的 X 轴坐标值， Y 和 Y_i 为待估点与气象站点的 Y 轴坐标值， E 和 E_i 为待估点与气象站点的高程， C_X 、 C_Y 和 C_e 为站点气象要素值与 X 、 Y 和海拔高程的回归系数， d_i 为待估点到第 i 站点的大圆距离， n 为用于插值的气象站点的数目。采用交叉验证（cross-validation）来检验插值的效果（表 1）。总体而言，该插值方法的误差比较低，精度是可以接受的。

表 1 插值方法的交叉验证结果（平均误差 ME、平均绝对误差 MAE，插值均方误差 RMSIE）

Tab. 1 Cross-validation errors for the two interpolation methods

	温度 ()	气压 (hPa)	水汽压 (hPa)	日照时数 (hr)	降水 (mm)	风速 (m/s)
ME	- 0.05	0.30	- 0.04	0.01	0.00	0.47
MAE	0.59	0.67	0.52	1.08	0.01	5.98
RMSIE	0.71	0.84	0.64	1.35	0.01	7.66

2.7 模型验证

首先利用田间试验资料对该生长模型进行了验证。试验地点为中国科学院禹城实验站，时间为 1991~1992 年。试验品种有五个，分别为鲁麦 8-优系、冀麦 84-5418、烟鲁 1604、晋麦 30 和泰山 10。试验地水分和养分供应充足，作物生长状况良好，产量较高。在作物生长期间，定期测定生物量和叶面积指数。根据站上气象资料和叶面积指数随生育期的变化过程，模拟了冬小麦生物量的动态变化。图 1 为冬小麦生物量模拟值与实测值的比较，总体而言，整个生育期模拟值与实测值较一致，平均绝对偏差为 13 %。因此，该模型能较为合理地模拟冬小麦干物质积累的动态变化过程。

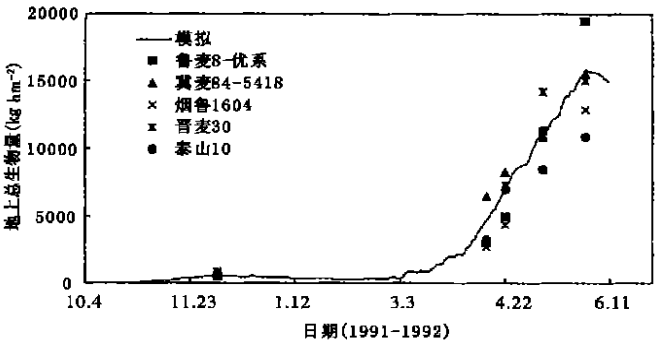


图 1 禹城冬小麦生物量模拟值和实测值比较

Fig. 1 Comparison of the simulated and observed biomass of winter wheat in the Yucheng Station

3 区域模拟

利用日平均气象变量和 NOAA-AVHRR NDVI 反演的叶面积指数驱动模型, 对河北平原冬小麦生长期进行数值模拟。模型自 1990 年 9 月 15 日开始运行, 当连续 5 天的温度均值在 $16 \sim 18$ 时, 确定中间一天为播种日, 从播种算起累积温度在 $100 \sim 110$ 之间时, 确定这一天出苗, 当从播种算起总积温达到 2200 时, 冬小麦成熟, 模型停止运行, 模拟结束。对于水浇地假定有 3 次灌水, 日期设为当年 12 月 5 日、次年 4 月 6 日、4 月 26 日, 每次灌水水量为 60mm。

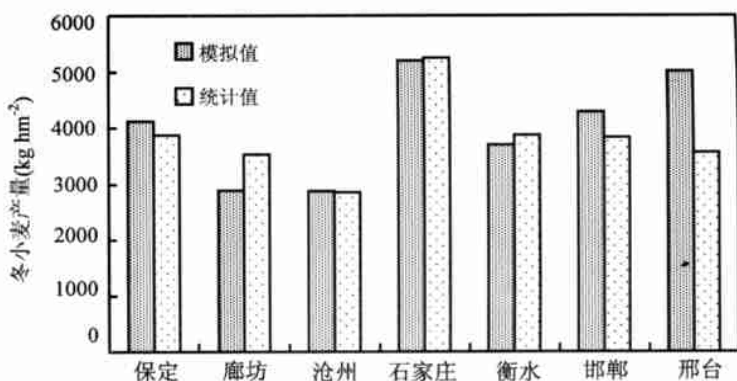


图 2 各地区单产的模拟值与统计值比较

Fig. 2 Comparison of the simulated and statistical yields in different districts

区域模拟产量的精度检验是个难题, 它依赖于大量的实测数据, 要精确调查单个栅格点的产量是比较困难的。统计年鉴记录的产量资料, 由于采样和统计口径的原因, 可能有明显的偏差, 但仍是验证模拟结果的重要数据。这里利用河北平原地区 (保定、廊坊、沧州、石家庄、衡水、邢台、邯郸) 的统计单产对模拟结果进行验证 (图 2)。除邯郸地区由于干热风影响, 实际单产较低, 模拟偏差较大外, 大部分地区偏差都较小, 保定、衡水、石家庄分别为 7.0%, 4.2% 和 2.4%, 沧州区仅为 0.4%, 整个河北省平原地区平均绝对偏差为 12.0%。

3.1 产量

如图 3 所示, 该地区冬小麦产量变幅在 $1100 \sim 8500 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间, 总趋势北低南高, 高产区主要集中在保定中部、石家庄中部、邢台中部、邯郸东部南北条带上, 单产在 $5000 \sim 8400 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间, 最高可达 8500 kg hm^{-2} 。这些地区光温条件好, 灌溉水量基本上可以满足作物生长需要, 是传统的高产区。该条带东部的邢台、衡水、沧州、霸州地区冬小麦产量普遍较低, 其中黄骅、霸州东部部分地区产量低于 2000 kg hm^{-2} 。这些地区多为旱地, 冬小麦生长期降水

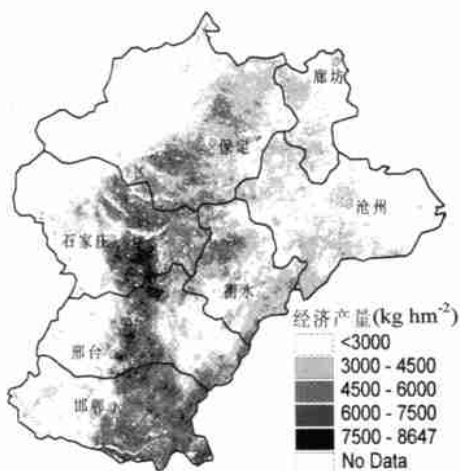


图 3 河北平原冬小麦经济产量的空间分布

Fig. 3 Spatial pattern of the winter wheat yield in the Hebei Plain

少，不能满足作物生长的需要，水分亏缺是造成低产的主要原因。西部的太行山区，产量随海拔升高而增加，变化在 $1500 \sim 4000 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间。这主要是由温度和水分两方面因素导致的，海拔越高，温度越低，生育期越长，产量应该较高，但这里多坡旱地，水分和灌溉设施的不足限制了产量的增加。

将产量水平分为五级^[24]：高产 ($> 6000 \text{ kg hm}^{-2}$)、次高产 ($5000 \sim 6000 \text{ kg hm}^{-2}$)、中产 ($3000 \sim 5000 \text{ kg hm}^{-2}$)、次低产 ($2000 \sim 3000 \text{ kg hm}^{-2}$)、低产 ($< 2000 \text{ kg hm}^{-2}$)，得到高产 次高产 中产 次低产 低产 比例为 13 12 43 29 3。就整个研究区而言，单产大于 5000 kg hm^{-2} 的高产田仅占总种植面积的 25%，单产小于 5000 kg hm^{-2} 的中低产田占 75% (图 4)。

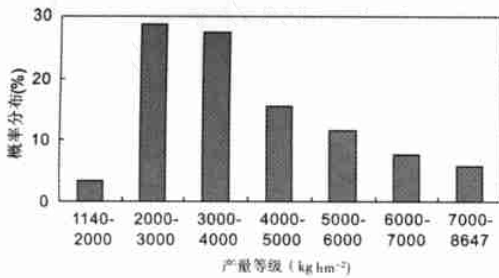


图 4 河北平原冬小麦产量等级分布的概率
Fig. 4 Probability distribution of the wheat yield classes in the Hebei Plain

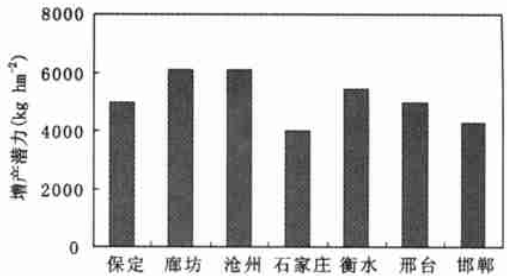


图 5 河北平原各地区冬小麦增产潜力
Fig. 5 Potential increase of winter wheat yield in the districts of the Hebei Plain

假定土壤水分一直处于最佳状态，模拟得到的河北平原冬小麦光温生产潜力，其范围在 $8500 \sim 10500 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间，与国内其他的研究结果一致^[25]。由实际产量和模拟产量对比可知，该地区增产潜力非常大。增产潜力大于 5000 kg hm^{-2} 的地区占 72%，小于 3000 kg hm^{-2} 的地区仅占 12%。从不同地区冬小麦增产潜力 (图 5) 可以看出，增产潜力在沧州、衡水和廊坊地区平均可达到 $5000 \sim 6000 \text{ kg hm}^{-2}$ ，少部分地区、部分山区增产潜力大于 7000 kg hm^{-2} ；邢台、邯郸、保定等部分地区的增产潜力平均在 $4000 \sim 5000 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间；石家庄增产潜力平均为 3890 kg hm^{-2} ，其东南部高产区增产潜力最小，低于 2000 kg hm^{-2} 。

3.2 蒸散

蒸散为生态系统中土壤蒸发和冠层蒸腾之和，是生态系统水分平衡的一个重要分量。冬小麦生育期内，该地区总蒸散在 $300 \sim 500 \text{ mm}$ 之间，总趋势北低南高，高产区石家庄、保定和邢台的蒸散量也较大，在 $370 \sim 390 \text{ mm}$ 之间，低产区沧州和廊坊的蒸散量较小，低于 360 mm (图 6)。水分利用效率 (经济产量/总蒸散) 的空间分布与产量的空间分布类似，高产区的南北条带也是水分利用效率相对较高的地区，低产区水分利用效率也很低 (图 6)。总体来看，整个河北平原水分利用效率偏低，最大值小于 $20 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ ，其中小于 $8 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 的低水分利用效率区约占总面积的 42% (图 7)。灌溉地的水分利用效率大部分在 $10 \sim 17 \text{ kg hm}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ 之间。旱地的产量很低，水分利用效率也较低。我

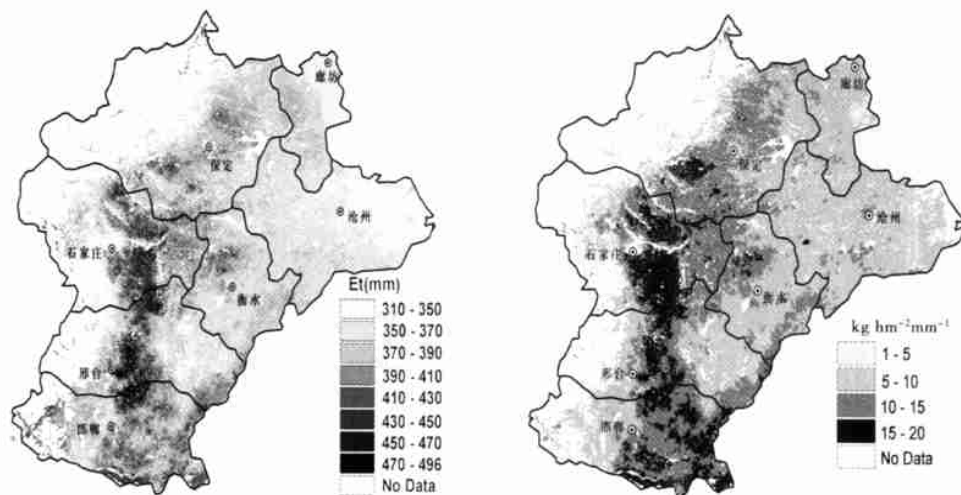


图 6 河北平原蒸散 (左) 和水分利用效率 (右) 空间分布图

Fig. 6 Spatial patterns of evapotranspiration (left) and water use efficiency (right)

们的模拟结果与田间实验结果是可比的, 如张喜英^[26]在该地区栾城的实验结果表明, 对于灌 1 到 5 次水的处理, 冬小麦的总耗水量在 320 ~ 554 mm, 水分利用效率在 11.6 ~ 15.9 kg hm⁻²mm⁻¹之间, 其中无灌水地的水分利用效率最低。总供水量不足且土壤蒸发消耗的水量大, 水分利用效率不高是该地区农业水分利用的主要问题。因此, 该地区需要采取节水措施抑制土壤蒸发, 提高水分利用效率, 实现既节水又增产的目标。

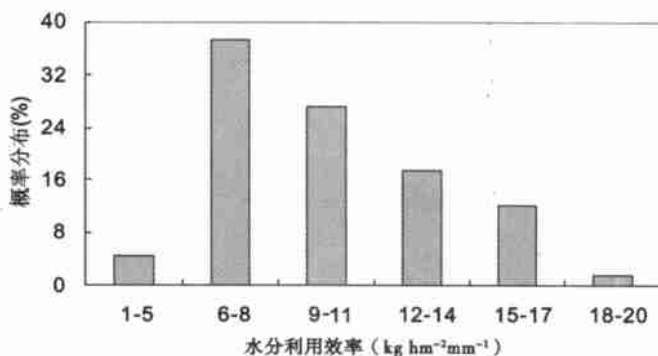


图 7 河北平原冬小麦水分利用效率概率分布

Fig. 7 Probability distribution of the water use efficiency

4 结论

本文通过建立基于遥感数据的冬小麦动力生长模拟模型, 用 1 km × 1 km 分辨率 NOAA-AVHRR NDVI 数据对河北省平原地区的冬小麦生长状况和产量进行了研究, 给出了冬小麦产量、蒸散量和水分利用效率的空间分布。通过计算, 得出冬小麦高产区主要集中在保定中部、石家庄中部、邢台中部、邯郸东部南北条带上, 最高产量可达 8500 kg hm⁻², 低产区集中在邢台地区东部、衡水地区、沧州、霸州等地, 其中黄骅、霸州东部部分地区产量低于 2000 kg hm⁻², 并分析了各地区的增产潜力分布。

本文将遥感 NOAA-AVHRR NDVI 资料、气象资料和作物生长模拟模型相结合, 实现区域尺度的作物生长动态模拟。将该方法用于更大的空间范围内, 只需要对大范围不同的地区给出极少量经验参数即可, 这较以前的先进行分区, 再针对不同地区建立不同模

型, 而最终仅能得出一个收获产量的遥感估产方法前进了一大步。但由于 AVHRR 分辨率较低, 我国耕地较破碎, 中等分辨率的 MODIS 影像将是理想的选择。

参考文献:

- [1] 徐勇. 农业生产力模型研究进展述评. 地理研究, 1999, 18(增刊): 157 ~ 163.
- [2] 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述. 作物学报, 2003, 29: 750 ~ 758.
- [3] Patel N K, Singh T P, Sahml B. Spectral response of rice crop and its relation to yield and yield attributes. Int. J. Remote Sens., 1985, 6: 657 ~ 664.
- [4] Bouman B A M. Linking physical remote sensing models with crop growth simulation models, applied for sugar beet. Int. J. Remote Sensing, 1992, 13(14): 2565 ~ 2581.
- [5] Rudorff B F T, Batista G T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological spectral models. Remote Sens. Environ., 1990, 33: 183 ~ 192.
- [6] Rasmussen M S. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability. Int. J. Remote Sens., 1997, 18(5): 1059 ~ 1077.
- [7] Tennakoon S B, Murty V A. An estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data. International J. Remote Sens., 1992, 13(3): 427 ~ 439.
- [8] Barnett T L, Thompson D R. The use of large-area spectral data in wheat yield estimation. Remote Sens. Environ., 1982, 12: 509 ~ 518.
- [9] 江晓波, 李爱农, 周万村. 3S 一体化技术支持下的西南地区冬小麦估产. 地理研究, 2002, 21(5): 585 ~ 592.
- [10] 王乃斌, 周迎春, 林耀明, 邓坤枚. 大面积小麦遥感估产模型的构建与调试方法的研究. 环境遥感, 1993, 8(4): 250 ~ 259.
- [11] 朱晓红, 谢昆青, 徐希孺, 承继成. 冬小麦产量构成分析与遥感估产. 环境遥感, 1989, 6(2): 116 ~ 127.
- [12] 吴炳方. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法. 地理学报, 2000, 55(9): 25 ~ 35.
- [13] Chipanshi A C, Ripley E A, Lawford R G. Large-scale simulation of wheat yields in a semi-arid environment using a crop-growth model. Agric. Systems, 1999, 59: 57 ~ 66.
- [14] Landau S, Mitchell R A C, Barnett V, et al. Testing winter wheat simulation models' predictions against observed UK grain yields. Agric. Forest Meteor., 1998, 89: 85 ~ 99.
- [15] Hanson J W, Jones J W. Scaling-up crop models for climate variability application. Agric. Systems, 2000, 65: 43 ~ 72.
- [16] Thornley J H M. Mathematical Models in Plant Physiology. London: Academic Press, 1976.
- [17] H. 范柯伦 J. 沃尔夫主编. 农业生产模型. 北京: 中国农业科技出版社, 1990. 22.
- [18] Amthor J S. Respiration and Crop Productivity. Springer-Verlag, 1989. 205.
- [19] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 基于 Penman-Monteith 公式的双源模型的改进. 水利学报, 2000, (5): 6 ~ 11.
- [20] Shuttleworth J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops: an energy combination theory. Quarterly Journal Royal Meteorology Society, 1985, 111: 839 ~ 855.
- [21] Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. Journal of Atmospheric Science, 1986, 43: 305 ~ 331.
- [22] Sellers P J, Los S O, Tucker C J, et al. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. Journal of Climate, 1996, 9: 706 ~ 737.
- [23] Nalder I A, Wein R W. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. Agriculture Forest Meteorology, 1998, 92: 211 ~ 225.
- [24] 侯光良, 李继由, 张谊光. 中国农业气候资源. 北京: 中国人民大学出版社, 1993. 239.
- [25] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 中国北方冬小麦的水分亏缺与气候生产潜力——近 40 年来的动态变化研究. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 121 ~ 130.
- [26] 张喜英, 裴冬, 胡春胜. 太行山山前平原冬小麦和夏玉米灌溉指标研究. 农业工程学报, 2002, 18(6): 36 ~ 41.

Simulation of winter wheat yield and evapotranspiration with process-based model and remote sensing data in the Hebei Plain

MO Xing-guo, LIN Zhong-hui, LI Hong-xuan, XIANG Yue-qin

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract : With the support of GIS information, a process-based crop growth model is designed to estimate the spatial pattern of dry matter accumulation, seed yield and evapotranspiration of winter wheat in the Hebei Plain, from October, 1989 to June, 1990. The crop leaf area index in the model is retrieved from NOAA-AVHRR monthly maximum composite NDVI and the daily meteorological variables are scaled up with gradient inverse distance square method. The simulated domain ranges from 113 °E to 118 °E and 36 °N to 41 °N with an area of about 60,000 km². The grid resolution is 1 km² and time step is daily in this paper. The model was tested with field sampled dry matter data of five varieties and the district statistical economic yields. The absolute bias between the simulated and the statistical yields is about 12 % in the domain. The simulated results show that the high yields are located in Baoding, Shijiazhuang, the central part of Xingtai and the eastern part of Handan districts from North to South with values of 6000 to 8400 kg hm⁻². The low yields are shown at the eastern part of Langfang, Cangzhou, Hengshui and the eastern part of Xingtai with values lower than 3000 kg hm⁻². Compared with the simulated potential yield, it is found that the differences between actual yields and potential yields are significant in this region, of which 72 % shows a yield gap as large as 5000 kg hm⁻². The simulated amounts of evapotranspiration over the growing season are from 310 to 500 mm, and the water use efficiency (WUE) in the irrigated fields is about 10 to 17 kg ha⁻² mm⁻¹. Low WUE area (< 8 kg hm⁻² mm⁻¹) occupies 42 % of the whole area. The spatial pattern of WUE is similar to that of yield. As suggestion, some water conservancy techniques should be taken to increase the water use efficiency in this area, such as stalk cover, new irrigation projects, etc.

Key words : crop growth model; remote sensing; vegetation index; scaling up; regional modeling