

基于模型和 GIS 的小麦空间生产力预测研究

石晓燕, 汤 亮, 刘小军, 曹卫星, 朱 艳

(南京农业大学农学院/江苏省信息农业高技术研究重点实验室, 南京 210095)

摘要: 【目的】准确预测区域小麦生产力, 可以为农业生产的定量评价、环境变化影响的评估等提供关键技术支持。【方法】基于课题组研制的小麦生长模拟模型, 探讨生长模型在区域化应用过程中升尺度连接的方法, 进一步将模型与 GIS 相耦合, 建立小麦区域生产力预测模拟模型; 并以江苏省 2000 年小麦产量的区域模拟为例, 借助 GIS 技术完成了气象、土壤特性、管理措施等模型基本输入数据的空间栅格化预处理, 通过将研究区域划分为许多均质栅格, 解决了研究区域内环境条件的空间变异, 实现了小麦生产力的区域模拟; 并将江苏省内的栅格模拟产量空间变异图和平均模拟结果同实际产量变异和统计产量进行了比较。【结果】模型模拟的产量空间分布图可以较好的反映江苏省区域内实际小麦产量的变化规律, 通过归并得到的江苏省县市平均产量与统计产量的均方根差为 496.48 kg·hm⁻²。【结论】表明基于模型和 GIS 对不同生态条件下的小麦生产力进行模拟, 具有较好的可行性。

关键词: 小麦; 模拟模型; 地理信息系统; 生产力

Predicting Spatial Productivity in Wheat Based on Model and GIS

SHI Xiao-yan, TANG Liang, LIU Xiao-jun, CAO Wei-xing, ZHU Yan

(College of Agronomy, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Key Laboratory for Information Agriculture, Nanjing 210095)

Abstract: 【Objective】 The objective of this study was to predict regional wheat productivity, which would lay a foundation for quantitative evaluating agricultural productivity and precision management. 【Method】 Considering the approaches related to scaling-up the crop model from plot to region level, a regional wheat model was developed by integrating the WheatGrow model with GIS. To address the spatial variability, grid-based data as model input were generated in advance by interpolation and overlaying with the aid of GIS. When all the necessary input data were available, the target region was partitioned into smaller and relatively homogeneous spatial grids, and crop yields were simulated with WheatGrow for each grid cell. The regional wheat productivity of Jiangsu Province in 2000 was simulated. 【Result】 The distribution of wheat yield that simulated by the regional wheat model based on grid input data, was coincident with statistic data. The mean RMSE of wheat yield between simulated result and statistics was 496.48 kg·hm⁻². 【Conclusion】 The results indicated that the GIS based regional wheat model has a good performance in predicting regional wheat productivity.

Key words: wheat; simulation model; GIS; productivity

0 引言

【研究意义】小麦是中国主要粮食作物之一, 准确预测区域小麦生产力, 不仅是农业生产定量评价的需要, 也为地区农业规划、粮食生产安全评价等提供关键技术支持。【前人研究进展】作物系统模拟模型

为农业生产的定量评价提供了重要的手段^[1], 能够量化作物的发育阶段、光合生产、器官建成、同化物积累与分配以及产量品质形成等生理过程及其这些生理过程与环境之间的关系, 已经被广泛运用于气候变化影响评价、精准农业等多个领域^[2-4]。如 Elke 等采用农业生态学模型 DayCent 模拟了全球的主要作物的产

收稿日期: 2008-11-13; 接受日期: 2009-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (30871448)、国家重点基础研究发展计划 (2009CB118608)、国家“863”计划 (2006AA10Z219, 2007AA10Z219)

作者简介: 石晓燕 (1979-), 女, 河北邯郸人, 博士, 研究方向为作物系统模拟。E-mail: eequal@163.com。通信作者朱 艳 (1976-), 女, 江苏南通人, 教授, 博士, 研究方向为数字农作技术。Tel: 025-84396565; E-mail: yanzhu@njau.edu.cn

量^[3]。曹云者等利用玉米模型模拟了河北省五个玉米气候区光温生产潜力^[4]。【本研究切入点】但作物生长模型本身的研制与运行均基于均质的环境条件。由于实际的农业生产往往是在具有明显空间变化特征的气候因子、土壤特性、管理措施等综合作用下的结果，因而更关注环境属性非均匀一致的大空间尺度上的区域作物生长信息。关于作物模型区域应用方面的研究已有一些尝试^[5-9]，但尚缺少统一的模型区域应用升尺度方法和较好的模拟体系。【拟解决的关键问题】本研究以课题组自主研制的小麦模拟模型 WheatGrow 为基础，采用先处理输入因子后模拟的方法，通过耦合 GIS，构建小麦区域生产力模拟预测平台，以期为进一步大区域小麦生产力模拟奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 小麦模拟模型简介

WheatGrow 主要包括 6 个子模型：物候期与阶段发育、形态发生与器官建成、光能吸收与光合生产、物质分配与产量品质形成、土壤水分平衡以及氮素平衡与利用。模型以日为步长模拟小麦的生长发育及产量形成，需要输入气象资料、土壤特性、品种参数、管理措施等四类参数。其中气象资料以日为单位，包括逐日最高最低气温、降水量和日照时数；土壤特性

包括土壤分层数、土壤质地、土层厚度、全氮和全磷含量、速效氮磷钾含量、有机质含量、容重、pH 值等；作物种植管理措施包括播种期、播种深度、施肥和灌溉管理方案等；品种参数主要包括生理春化时间（PVT）、温度敏感性（TS）、光周期敏感性（PS）、基本早熟性（IE）、灌浆因子（FDF）、比叶面积（SLA）、分蘖能力（Tv）、千粒重（TGWT）等 8 个参数。

1.2 区域生产力模型的构建

通过耦合 GIS 与生长模型，以栅格作为基本模拟单元，构建小麦区域生产力预测模型。该方法是在借鉴前人生长模型区域化应用升尺度研究中“完全归并”的理论基础^[7-8]上构建的，主要包括两个步骤：一是基础数据收集与输入数据的空间栅格化预处理；二是以栅格为基本模拟单元的区域模拟计算与展示过程。整个流程见图 1。

1.2.1 基础数据及其来源 案例研究区域江苏省南起 30°35'N，北抵 35°07'N，东西跨度 116°22'E 至 119°56'E。文中所收集的基础数据包括站点气象数据、数字化土壤图、数字化小麦区划图、田间试验实测数据以及农业统计资料等。气象资料来源于国家气象局提供的地面气象站点观测数据，其中江苏省包括 13 个气象站（南京、高邮、徐州、赣榆、淮阴、东台、南通、常州、射阳、吴县东山、溧阳、盱眙、吕泗）

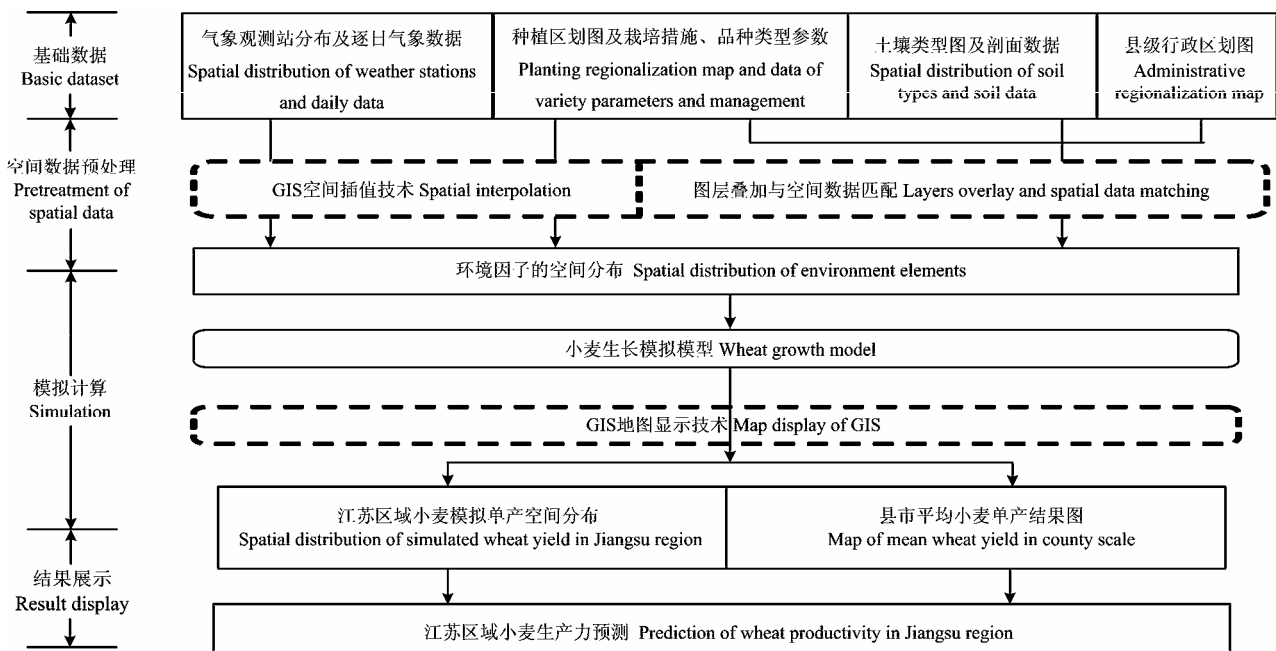


图 1 基于模型和 GIS 的小麦生产力预测技术流程

Fig. 1 Technical flow chart for predicting wheat productivity based on model and GIS technology for evaluation

的逐日最高气温、最低气温、降雨量、日照时数（1999—2000年）。模型所需的太阳辐射数据由日照时数换算得到^[10]。全国数字化土壤图与土壤类型数据库由南京农业大学资源与环境学院提供，土壤属性资料来自江苏土种志和江苏土壤^[11-12]，包括土壤容重、有机质含量、全氮、全磷、速效磷、速效钾等。根据中国小麦气候生态区划和江苏省农业区划，应用GIS软件进行数字化后获得数字小麦种植区划图。江苏省小麦栽培管理数据来自江苏省统计局出版的以县为单位的农村统计年鉴^[13]。不同生态点的小麦生长实测数据来源于江苏省信息农业高技术重点实验室已经积累的田间试验资料和文献报道^[14-15]等。

1.2.2 空间数据预处理 由于技术或财力等多种原因，收集到的基础空间数据并不完善，如气象数据以站点形式存在，矢量图层的多边形边界不一致等。而

文中区域模拟以栅格作为基本模拟单元，在模拟前需借助GIS与数据库技术对上述收集的气象资料、土壤特性、管理措施等模型基本输入数据进行空间栅格化预处理（图2）。首先依据研究区域的空间大小与环境变异程度，综合模拟效果及模拟计算的工作量，设置栅格分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。由于原始的气象数据以站点形式存在，因此借助GIS与数据库技术，对研究区域内站点气象资料（日最高气温、日最低气温、日降水量和日照时数）进行逐日逐项的距离反比权重法空间插值^[16]，完成了基本气象要素的栅格化处理。然后将插值形成的气象栅格图层与数字土壤图层进行叠加，各栅格以经纬度坐标为查询依据，查询得出每个栅格内所含有的土壤斑块种类，并与土壤属性数据库关联获取到每个土壤斑块的土壤理化属性，最终对土壤属性数据进行加权平均即为该栅格的土壤属性。

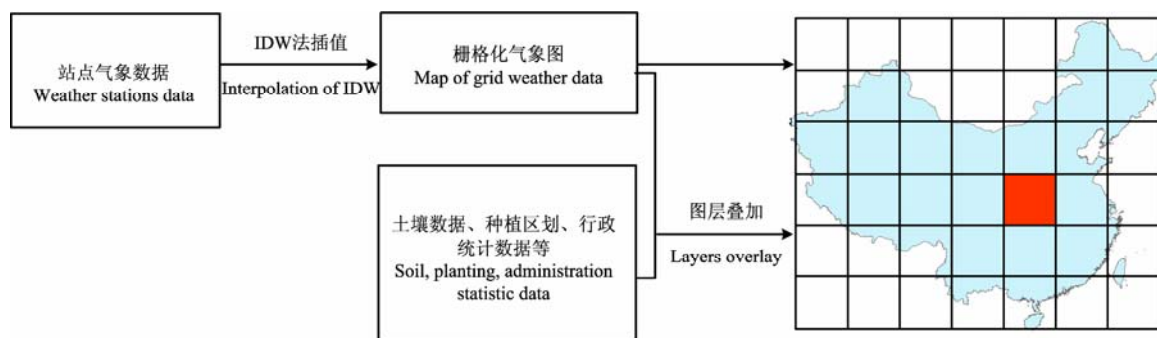


图 2 空间数据预处理

Fig. 2 Pretreatment of spatial data technology for evaluation

由于栽培管理与品种空间分布特征难以精确的收集和设定，研究中以数字小麦种植区划图中的分区为单元进行设置，根据《江苏农业资源与综合区划》^[17]将江苏省分为淮北麦区、里下河麦区、沿海旱地麦区、丘陵麦区、沿江及高砂土麦区、太湖麦区 6 个小麦生

态区，并对每个生态区分别确立常规的栽培管理措施，其中施肥量根据农村统计年鉴确定；小麦品种采用基于分区品种组合的代表性生态型，也就是说每个生态区分别通过试错法调试并确定一套品种参数（表），这套品种参数代表该生态区典型品种的综合表现。具

表 各生态区小麦品种的遗传参数

Table Genetic parameters of wheat in different eco-regions

| 品种生态型 Cultivar eco-type | 生理春化时间 PVT | 基本早熟性 IE | 光周期敏感性 PS ($\times 10^{-3}$) | 温度敏感性 TS | 灌浆因子 FDF | 千粒重 TGWT (g) | 比叶面积 SLA ($\times 10^{-3}$) | 分蘖能力 Tv |
|-------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------------|----------------------------------|------------|
| 淮北麦区 Huaibei region | 45 | 0.69 | 2.9 | 0.39 | 0.91 | 37 | 2.36 | 0.85 |
| 里下河麦区 Lixiahe region | 35 | 0.69 | 2.8 | 0.36 | 0.82 | 36 | 2.82 | 0.80 |
| 沿海旱地麦区 Yanhai dry land region | 40 | 0.72 | 2.9 | 0.38 | 0.89 | 36 | 2.58 | 0.81 |
| 丘陵麦区 Qiuling region | 40 | 0.76 | 3.8 | 0.42 | 0.95 | 37 | 2.49 | 0.83 |
| 沿江及高砂土麦区 Yanjiang region | 35 | 0.71 | 3.3 | 0.43 | 0.91 | 40 | 2.89 | 0.86 |
| 太湖麦区 Taihu region | 35 | 0.72 | 2.5 | 0.52 | 0.98 | 42 | 2.47 | 0.85 |

体做法是首先根据试验数据和统计数据确定各个分区的品种参数初始值，然后基于试验数据通过校错法以一定步长单位进行调试，至所有站点模拟值与实测值的根均方差（*RMSE*）最小时把各个分区的品种参数确定下来。栽培管理与品种参数空间分布特征的栅格化处理与土壤数据的栅格化过程类似。

1.2.3 区域模拟计算 空间数据栅格化预处理将研究区域划分为一个个均匀的栅格，并使每个栅格具有一套完整的 *WheatGrow* 运行所需输入的数据（气象、土壤、管理、品种等）。区域模拟以日为时间步长，读取同一栅格的所有输入因子数据，通过批量运行 *WheatGrow*（以栅格为单位），得到江苏省区域内各个栅格的小麦单产。并将栅格产量结果与统计产量网格化结果进行比较分析，同时将栅格产量结果连接到县市行政区划空间数据，通过归并得到各个县市的小麦模拟平均产量，进行比对和差异分析。

1.3 验证与分析方法

采用根均方差（*RMSE*）、标准根均方误差（*NRMSE*）、符合度指数 *D-index* 以及配对样本的差异性 *T* 检验，对模拟值与统计值的符合度进行统计分析，并绘制 1:1 关系图。*RMSE*、*NRMSE* 的计算方法如下公式（1）、（2）。*NRMSE* 可以很好的反映模拟值的预测性，*NRMSE* 值小于 10% 表示模拟值与实际观测值一致性非常好，10%~20% 表示较好，20%~30% 表明模拟效果一般，*NRMSE* 值大于 30% 表明模拟值与实际值偏差大，模拟效果差^[18]。*D-index*（见公式（2））表示模拟值与实测值分布的符合程度，具体描

述参见文献[19]。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} / \bar{O} \quad (2)$$

$$D-index = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[\left| P_i' \right| + \left| O_i' \right| \right]^2} \right] \quad (3)$$

式中， O_i 、 P_i 分别为统计值和模拟值， n 为样本容量， \bar{O} 为统计平均值， $P_i' = P_i - \bar{O}$ ， $O_i' = O_i - \bar{O}$ 。

2 结果与分析

2.1 基于站点的小麦产量模拟

在区域模拟之前，首先利用不同生态站点的田间观测数据，对小麦叶面积指数（*LAI*）、地上部干重以及产量模拟值与实际观测值进行了对比分析，来检验模型在不同生态条件下的预测性。本研究选择了江苏省南京、高邮、昆山 3 个站点不同品种不同生育期（拔节、开花、成熟）的田间试验数据进行了站点水平的小麦产量模拟检验（图 3）。结果显示 *LAI*、地上部干重以及产量模拟值与观测值之间的 *RMSE* 分别为 0.29、759 和 401 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，*NRMSE* 分别为 6.32%、8.06% 和 6.89%，均小于 10%，表明基于站点的小麦产量预测模型具有较高的预测精度与较强的适用性。

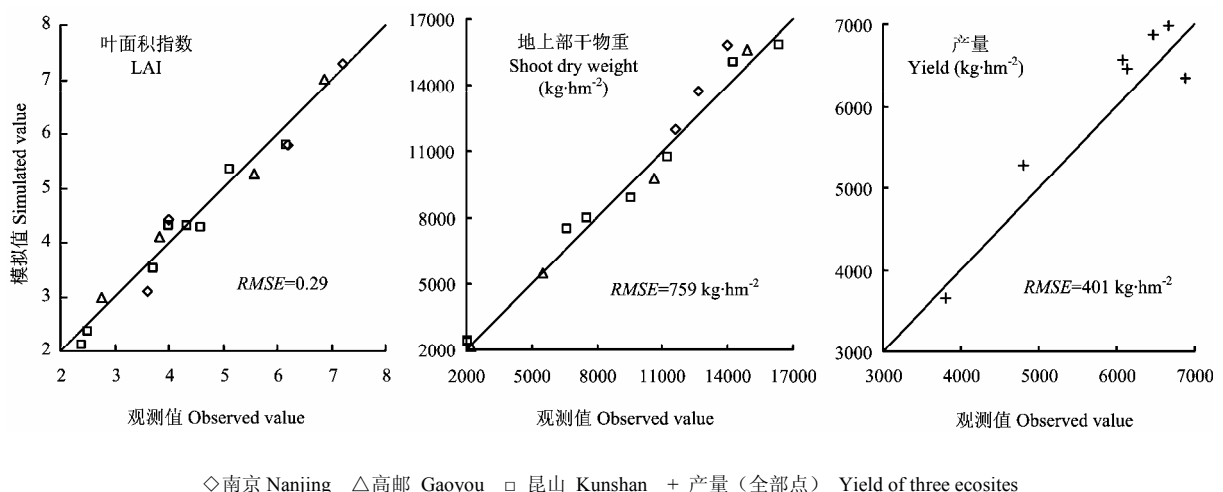


图 3 小麦 *LAI*、地上部干重、产量模拟值与观测值的比较（站点水平）

Fig. 3 Comparison between simulated and observed values of *LAI*, shoot dry weight and yield in wheat (in three ecotypes)

2.2 基于区域的小麦产量模拟

以江苏省 2000 年为例,对区域尺度的小麦产量进行了模拟,并利用 2000 年江苏省县级小麦生产统计数据对区域模拟结果进行了检验。验证主要包括两个方面,一是江苏县级区域单产的模拟值与统计值比较;二是区域内模拟单产与统计单产的空间分布规律的比较。

2.2.1 小麦生产力的升尺度模拟 图 4 是将栅格模拟结果同江苏省县市区划图进行叠加归并后,得到的小麦产量的县级平均结果 (kg·hm⁻²)。模型模拟的全省小麦产量范围为 3 485~5 731 kg·hm⁻²,平均为 4 418 kg·hm⁻²,而江苏省小麦统计产量范围为 3 095~5 520 kg·hm⁻²,平均为 4 140 kg·hm⁻²,模拟结果稍微偏高。图 5 为江苏省县市产量模拟与统计结果比较图。可以看到,模拟的产量除部分地区过高或过低,大多数地区的模拟结果可以反映实际的产量分布。将模拟得到的县市平均结果同统计产量进行了比较分析,显示模型对小麦产量预测的 *RMSE* 为 496.48 kg·hm⁻²,*NRMSE* 为 11.99%,尽管大于站点水平的偏差,可是仍显示模拟值与统计值之间具有较好的符合度;但模拟值与统计值 *t* 检验差异显著,说明区域模拟结果的精确性有待进一步的完善和提高。

2.2.2 江苏区域内小麦生产力的空间变异 为了比较模拟产量与统计产量在空间分布上的相似性,把江苏省各县级市的统计产量进行了栅格化处理,并以栅格为单元对模拟产量与统计产量进行了比较。图 6 给

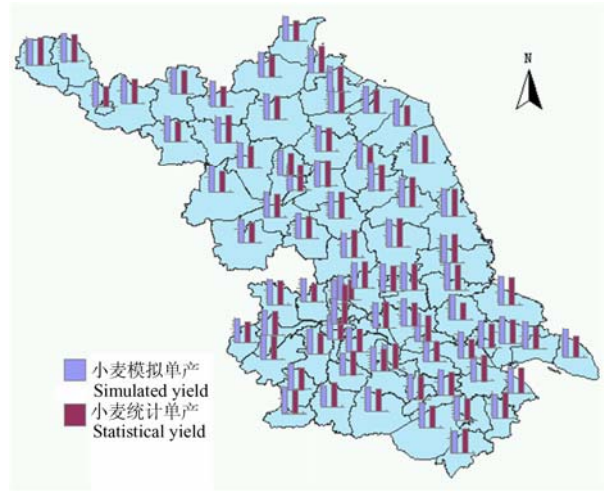


图 5 江苏省县级小麦产量模拟和统计平均值的比较

Fig. 5 Comparison between simulated and statistical wheat yields on an average average of different counties of Jiangsu province

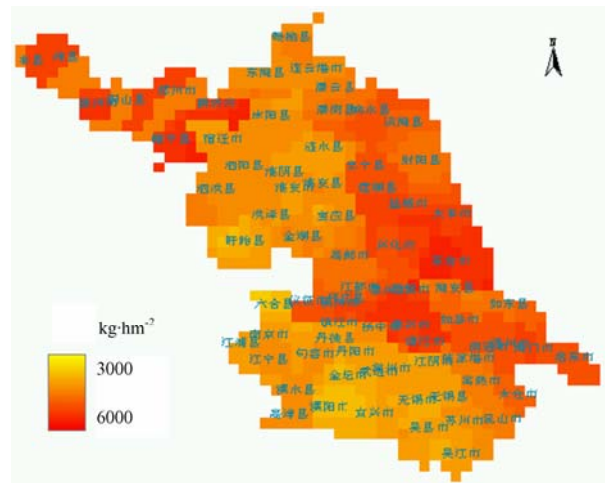


图 6 江苏省小麦产量模拟结果的空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of simulated wheat yields in Jiangsu province

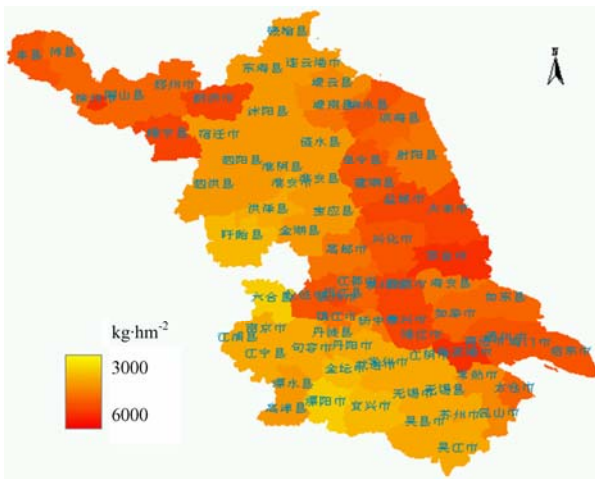


图 4 江苏省县级小麦产量模拟平均值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of simulated wheat yields on an average of different counties of Jiangsu province

出了 2000 年江苏省小麦单产模拟结果区域分布情况。大多数地区的模拟结果可以反映实际产量的分布情况。其中,兴化盐城地区为海洋性气候区,小麦生长季较长,产量相对较高;太湖地区多为稻麦轮作,苗期容易遇湿害,产量则相对较低。统计分析表明,江苏省内 970 个栅格点的模拟值与统计值具有极显著的相关性,*RMSE* 为 444.15 kg·hm⁻²,*NRMSE* 为 10.51%,符合度指数为 0.76,在可接受范围内,模型能够较好

的反映实际产量的时空变化规律，但是模拟结果和统计数据 t 检验差异显著。图 7 显示了江苏省模拟值与统计值相对差异的空间分布。相对差异范围为 $-28.14\% \sim 34.72\%$ ，平均为 5.99% ，其中 72.37% 分布在 $-10\% \sim 10\%$ 之间，除淮北麦区外其他生态分区符合度指数均大于 0.5 。淮北麦区模拟结果最差，部分地区明显高估了实际产量，可能与区域本身的跨度有关，这说明在区域模拟中，生态区域的划分对模拟结果有重要影响。

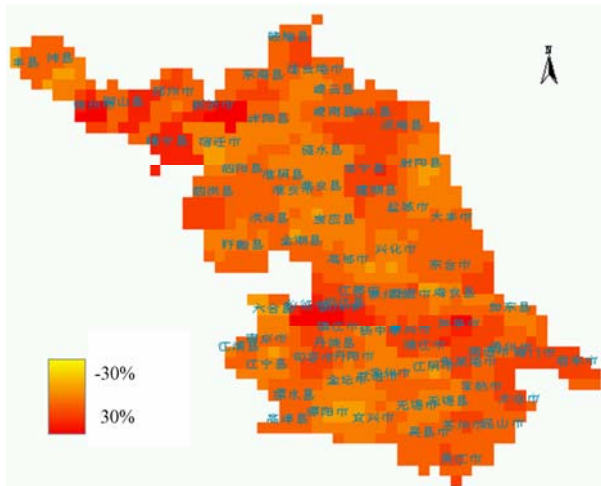


图 7 江苏省小麦产量模拟值与统计值相对差异的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the percentage of difference of wheat yield between simulated value and statistic value in Jiangsu province

3 讨论

3.1 区域模拟中误差产生的主要来源

对模型区域应用效果的检验表明，虽然模型的区域模拟值基本上可以反映出产量的空间变化特征，但还存在一定的误差，其主要误差来源有：（1）模型本身的缺陷。如模型不能反映病虫害的影响，对冰雹、大风、干热风等现象还无法模拟，导致整体的产量模拟误差增大。（2）模型输入数据存在一定的误差。因为空间气象数据由站点气象资料插值获得，对管理措施也进行了简化处理，部分生态区域划分较大（如淮北麦区），采用了较早年份的土壤属性数据（来自 1996 年的江苏土种志）来模拟较晚年份的产量（2000 年），这些模型输入参数与实际参数之间有一定的偏差。（3）

由栅格模拟结果进行区域归并得到的平均产量与实际产量之间也可能存在一定的误差。这些均有待在今后的研究中得到进一步的改进和完善。

3.2 区域模拟中输入数据误差分析

目前作物模拟模型的区域应用多利用 GIS 栅格数据进行模拟^[20-22]。首先将研究区域划分为大小相同的栅格矩阵，同一栅格不同图层的叠加代表不同输入数据的输入，通过运行模型最后得到以栅格为单位的模拟结果。理论上栅格越小，模拟的不均匀性误差越小；反之，计算机程序运行量越小，速度也将越高。相关研究发现，并不是栅格越小，预测精度越高。Easterling 等^[23]将栅格点从 $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ 分辨率提高到 $1^\circ \times 1^\circ$ ，玉米和小麦产量（1984—1992 年）预报的 EPIC 误差减小；但当栅格点分辨率提高到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 时，预报结果无进一步的改善。本研究首先采用 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 和 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 两种分辨率对研究区域进行了模拟，计算 *NRMSE* 分别为 11.99% 和 11.58% 。综合考虑模拟精度和计算工作量后，采用了 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的分辨率。从图 6 效果可以看到分布图呈现斑块，但从结果和模拟速度需要来看，该分辨率已经可以满足模拟的需要。

作物模拟模型的构建多是基于单个生态点和少数作物品种^[24-25]，每个品种都有自己的一套品种参数。Iglesias 等^[26]认为，目前大部分模型系统尚缺乏磷钾素等平衡过程以及病虫害影响等，因此选用品种参数组合来代表一类熟制或生态型的品种，可以消弱品种的空间异质性。本研究按照江苏省小麦气候生态区划将江苏分为 6 个生态区，而品种参数是在此生态区基础上的品种类型参数的组合。但生态区域划分的合理性在一定程度上影响模拟精度，如果区域划分过大，同一区域内农田管理措施依然做相同处理，必然造成较大的模拟误差。

关于气象要素的空间栅格化处理研究较多^[16,27]。庄立伟等^[16]采用了克里格法（Kriging）、距离权重反比法（IDW）、及带有高度梯度修正的距离权重反比法（GIDW）3 种插值方法对东北地区逐日气象要素的插值结果进行了比较，表明 3 种方法均具有平滑数据的作用，并且插值结果的空间分布形式基本保持不变，从精度上考虑，对于时间、空间变幅较大的日最高、最低气温和日降水量，IDW 和 GIDW 方法具有较高估值精度，而且计算简单，可以满足区域作物生长模型的需要。本研究中对逐日气象要素的空间栅格化处理采用了 Supermap5.0 软件提供的距离反比权重法（IDW）。此外，土壤数据来自全国数字化土壤图与

土壤类型数据库,由于 WheatGrow 模型系统需要不同土层的土壤数据,不能与国家的土壤栅格属性数据库完全接轨,因此在区域化应用过程中,WheatGrow 模型的简化有待进一步研究。

3.3 区域模拟的进一步完善

本研究在生长模型区域应用方面获得的一些初步的方法与结论,虽然还存在许多不足,但是从结果来看具有较好的可行性。在下一步的研究中,可以尝试更大区域范围(比如小麦主要生态区)的小麦生产力模拟预测。扩大模拟区域范围仍然可以在以下方面进行技术的改进与完善:(1)在对模型输入因子进行空间化插值过程中加入一定的修正系数,使插值结果更准确的反应实际情况。例如在对气象资料的栅格化处理中,加入海拔高度的影响等;(2)模型本身的改进与完善,以及与土壤栅格数据库接轨过程中的模型简化处理;(3)建立完善可靠的基础数据库是模拟质量的关键。

4 结论

本研究探讨了生长模型在区域化应用过程中的升尺度方法,并将小麦生长模型与地理信息系统(GIS)相耦合,建立了小麦区域生产力预测模型。以江苏省2000年小麦产量的区域模拟为例,借助GIS技术完成了气象要素、土壤特性、管理措施等模型基本输入数据的空间栅格化预处理,通过将研究区域划分为许多均质栅格,解决了研究区域内环境的空间变异,然后基于栅格批量运行生长模型,实现了小麦生产力的区域模拟。结果显示,模拟得到的栅格产量变异图,可以较好地反映江苏省区域内小麦产量的变化规律,表明基于模型和GIS对不同生态条件下的小麦生产力进行模拟,具有较好的可行性。

References

- [1] 毛 竞, 关 欣, 李巧云. 我国数字农业发展现状与发展趋势. 广东农业科学, 2007, (12): 126-128.
Mao J, Guan X, Li Q Y. The progress and trend of digital agriculture in China. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2007, (12): 126-128. (in Chinese)
- [2] 王石立, 马玉平. 作物生长模拟模型在我国农业气象业务中的应用研究进展及思考. 气象, 2008, 34(6): 3-10.
Wang S L, Ma Y P. The progress in application of crop growth simulation models to agro-meteorological services in China. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(6): 3-10. (in Chinese)
- [3] Stehfest E, Heistermann M, Priess J A, Ojima D S, Alcaml J. Simulation of global crop production with the ecosystem model DayCent. *Ecological Modelling*, 2007, 209: 203-219.
- [4] 曹云者, 刘 宏, 王中义, 宇振荣. 基于作物生长模拟模型的河北省玉米生产潜力研究. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 826-832.
Cao Y Z, Liu H, Wang Z Y, Yu Z R. Potential productivity of maize based on model simulation in Hebei Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 826-832. (in Chinese)
- [5] Ren J Q, Chen Z X, Zhou Q B, Tang H J. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, 10(4): 403-413.
- [6] Wesseling J G, Feddes R A. Assessing crop water productivity from field to regional scale. *Agricultural Water Management*, 2006, 86: 30-39.
- [7] 刘布春, 王石立, 马玉平. 国外作物生长模型区域应用中升尺度问题的研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 89-91.
Liu B C, Wang S L, Ma Y P. A study on abroad challenges of scaling-up of crop models for regional applications. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(4): 89-91. (in Chinese)
- [8] Hansen J W, Jones J W. Scaling-up crop models for climate variability applications. *Agricultural Systems*, 2000, 65: 43-72.
- [9] Xiong W, Holman I, Conway D, Lin E, Li Y. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. *Ecological Modelling*, 2008, 213: 365-380.
- [10] Goudriaan J, van Laar H H. *Modelling Potential Crop Growth Processes* (Textbook and Exercises). Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [11] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土种志. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996.
Jiangsu Soil Survey Bureau. *Jiangsu Soil Species*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1996. (in Chinese).
- [12] 江苏省土壤普查办公室. 江苏土壤. 北京: 中国农业出版社, 1995.
Jiangsu Soil Survey Bureau. *Jiangsu Soil*. Beijing: China Agriculture Press, 1995. (in Chinese).
- [13] 江苏农业统计局. 江苏省农村统计年鉴(2001). 南京: 江苏省农村统计年鉴出版社, 2000.
Jiangsu Statistic Bureau. *Jiangsu Agriculture Statistic Data (2001)*. Nanjing: Jiangsu Rural Statistic Press, 2000. (in Chinese)
- [14] 黄严帅, 范袁斌, 李炳生, 戴学文, 张洪程, 许 轲. 氮肥运筹对弱筋小麦宁麦 9 号群体结构和产量的影响. 中国农学通报, 2008, 24(9): 122-126.
Huang Y S, Fan Y B, Li B S, Dai X W, Zhang H C, Xu K. Effects of nitrogen application strategies on population structure and grain yield

- of the weak-gluten wheat Ningmai9. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(9): 122-126. (in Chinese)
- [15] 陆增根, 戴廷波, 姜东, 荆奇, 吴正贵, 周培南, 曹卫星. 氮肥运筹对弱筋小麦群体指标与产量和品质形成的影响. *作物学报*, 2007, 33(4): 590-597.
- Lu Z G, Dai T B, Jiang D, Jing Q, Wu Z G, Zhou P N, Cao W X. Effects of nitrogen strategies on population quality index and grain yield & quality in weak-gluten wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(4): 590-597. (in Chinese)
- [16] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究. *应用气象学报*, 2003, 14(5): 606-706.
- Zhuang L W, Wang S L. Spatial interpolation methods of daily weather data in northeast China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, 14(5): 606-706. (in Chinese)
- [17] 孙 额. 江苏农业资源与综合区划. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989.
- Sun E. *Agricultural Resources and Regional Planning of Jiangsu*. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1989. (in Chinese)
- [18] Michele R, Nicola L, Zina F. Evaluation and application of the OILCROP-SUN model for sunflower in southern Italy. *Agricultural Systems*, 2003, 78: 17-30.
- [19] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 1982, 65(11): 1310-1313.
- [20] 朱大威, 黄耀, 金之庆, 张稳, 姜军. 基于模型和 GIS 的江苏省氮肥施用适宜性分析—以 2000 年为例. *中国农业科学*, 2008, 41(5): 1373-1382.
- Zhu D W, Huang Y, Jin Z Q, Zhang W, Jiang J. Nitrogen management evaluated by models combined with GIS-A case study of Jiangsu croplands in 2000. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(5): 1373-1382. (in Chinese)
- [21] 熊 伟. 用 GIS 和作物模型对作物生产进行区域模拟方法. *中国农业气象*, 2004, 25(2): 28-32.
- Xiang W. Spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(2): 28-32. (in Chinese)
- [22] 王宗明, 张 柏, 宋开山, 刘殿伟, 李晓燕, 李建平. GIS 支持下的松嫩平原黑土区作物生产力模拟. *农业系统科学与综合研究*, 2007, 23(1): 27-32.
- Wang Z M, Zhang B, Song K S, Liu D W, Li X Y, Li J P. Simulating the crop productivity at black zone of Songnen plain supported by GIS. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2007, 23(1): 27-32. (in Chinese)
- [23] Easterling W E, Weiss A, Haysl C J, Linda O M. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: the case of the US Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90: 51-63.
- [24] Thornley J H M, Cannell M G R. Modelling the components of plant respiration: representation and realism. *Annals of Botany*, 2000, 85: 55-67.
- [25] Bouman B A M, van Keulen H, van Laar H H, Rabbinge R. The 'School of de Wit' crop growth simulation models-A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems*, 1996, 52: 171-198.
- [26] Iglesias A, Rosenzweig C, Pereira D. Agricultural impacts of climate change in Spain: developing tools for a spatial analysis. *Global Environmental Change*, 2000, 10: 69-80.
- [27] 李正泉, 于贵瑞, 刘新安, 范辽生, 王秋凤, 任传友. 东北地区降水与湿度气候资料的栅格化技术. *资源科学*, 2003, 25(1): 72-77.
- Li Z Q, Yu G R, Liu X A, Fan L S, Wang Q F, Ren C Y. Grid technology for precipitation and humidity information in northeast China. *Resources Science*, 2003, 25(1): 72-77. (in Chinese)

(责任编辑 郭银巧)