

站点 CERES-Rice 模型区域应用效果和误差来源

熊 伟*

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘要:作物区域模拟是利用有限的空间数据,最大限度地反映出生育期、产量等作物性状的时空变化规律。由于目前的作物模型大多是田间尺度的站点模型,把它运用到区域水平的效果如何研究甚少。文章利用 CERES-Rice 模型,对作物模型在我国的区域应用效果进行了分析。首先利用田间观测数据在各实验点上对模型进行了详细的站点校准,以验证模型在我国的模拟能力;然后以我国水稻生态区(精确到亚区)为单位,运用均方根差(RMSE)法进行了区域校准和验证;最后利用区域校准后的 CERES-Rice 模型,模拟了 1980~2000 年的网格(50km×50km)水稻产量,并与同期农调队调查产量进行统计比较,以验证区域应用的效果,为区域模拟的推广和应用提供参考。结果表明:经过空间校准后的 CERES-Rice 模型,在水稻的主产区 1~4 区(占种植面积的 95%)模拟的平均产量与调查产量相对均方根差在 22% 以内,两者的符合度也较好,个别区域(5、6) RMSE% 在 24%~30% 之间;1980~2000 年水稻各产区模拟的平均产量与调查产量随时间变化趋势也具有一定的一致性;全国 1896 个网格中,大部分网格(71.01%)模拟的 21 年水稻年产量与调查产量的 RMSE% 在 30% 之内,且大部分分布在水稻主产区,考虑到水稻种植面积的权重后,认为利用区域校准和验证后的 CERES-Rice 模型进行水稻区域模拟,可以反映出产量的时空分布特征,能够为宏观决策提供相应的信息。但目前区域模拟中还存在着一一定的误差,有待今后进一步研究。

关键词:CERES-Rice 模型;区域应用;误差

文章编号:1000-0933(2009)04-2003-7 中图分类号:S165.27 文献标识码:A

The performance of regional simulation of CERES-Rice model and its uncertainties

XIONG Wei*

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 29(4): 2003~2009.

Abstract: One primary purpose of regional simulation is to predict the spatial yield variation and temporal yield fluctuation, with presently available geographical database. Most crop models are site-specific, and some researches have attempted to up-scale the crop models for regional simulation. However, few have emphasized on their performance and uncertainties. The performance of regional simulation in China was evaluated in this study, and CERES-Rice model was employed in the simulation. In order to assess the suitability of model application for environments in China, we first calibrated the crop model at plot scale over main rice areas. Second, we calibrated and validated the CERES-Rice model at regional scale using the statistic of RMSE, cultivar coefficients and management practices were aggregated into each sub Agro-Ecological Zone (AEZ). Last, for analyzing the performance of the regional simulation, we simulated the historical (1981—2000) rice yield at 50 km 50 km grid scale, and compared the simulated with census values. Results show: the pattern of yield variation captured by model in most of the rice areas, especially in the main rice planting regions, i. e. AEZ 1—4 (over 95% of the total rice cultivation area), with RMSE < 22%. Some regions showed bad results, i. e. AEZ 5 and 6 with RMSE% 24%—30%. Simulated year-to-year yields matched well with the census values. 71.01% of simulation grids showed a bias less than 30%, most of them concentrated in the main rice planting areas. Therefore, the regional simulation is able to produce a reasonable estimation in spatial yield variation and temporal yield fluctuation, it can be used as a tool

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30700477);国家科技支撑资助项目(2007BAC03A02)

收稿日期:2007-12-23; **修订日期:**2008-06-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiongwei@ami.ac.cn

to provide information for policy makers at macro scale. There were various sources of uncertainty in the study and were analyzed in the discussion section.

Key Words: CERES-Rice model; regional simulation; uncertainties

作物模拟模型作为一种系统分析方法,已广泛应用到气候变化影响评价、精准农业,以及地区农业规划等多个领域,成为农业生产定量评价的重要手段之一。大多数作物模型是基于田间尺度的站点模型,它在站点水平上已经得到广泛应用与验证,但未来农业规划决策和宏观经济部门以及气候变化影响评价领域更关注的是环境属性非均匀的行政区、生态区、流域或更大空间尺度上的信息^[1],此外,RS/GIS 技术以及各种区域模型(如大气环流 GCM、水文模型等)一般仅提供大范围的平均信息,当作物模型与这些区域尺度的模型结合时,不可避免地存在空间和时间尺度差异问题,这些都需要将站点作物模型升尺度到区域上。作物区域模拟是利用有限的空间数据,最大限度地模拟出生育期、产量等作物性状的时空变化规律,它是作物模型应用的一个新方向,也是宏观决策,气候变化影响评价等工作的需要。区域校准和验证是作物模型升尺度区域应用的前提,也是定量地计算出模型区域应用偏差大小和不确定性的必要过程,部分学者对此进行了尝试^[2~8],并从数学和统计学角度提出了模型区域校准的理论基础和解决方案,取得了一定的成果。

然而有关区域应用的效果问题,还鲜见报道,区域模拟结果能够在多大程度上再现实际的农业生产状况,是否可以达到预测和判断未来农业生产变化趋势的目的,一直是人们关注的焦点问题。文章利用区域校准和验证后的 CERES-Rice 模型,模拟了 50km × 50km 网格水平下 1980 ~ 2000 年我国灌溉水稻的产量,并与同时段农调队调查产量进行了比较,着重分析模拟结果,以了解区域应用的效果。

1 材料和方法

1.1 CERES-Rice 作物模型

20 世纪 70 年代末期,美国国际农业技术推广网络定位研究标准(IBSNAT)将美国国内众多作物模型集合在一起,命名为农业技术转让决策支持系统(DSSAT),用于模拟和分析各种环境因子相互作用下某种作物的生长发育过程和最终产量结果,如今该系统模型已经成为世界上应用最广的作物模型之一。本文选用的 CERES-Rice 模型来自 DSSAT 最新版(Version 4.0.1),该模型可逐日模拟不同水稻品种在各种气候生态和栽培管理条件下的生长、发育和产量状况^[9],以及帮助制定多目标的优化决策。

1.2 作物模型的站点校准过程

为了验证 CERES-Rice 模型在我国的模拟能力,首先需要对模型进行实验站点上的校准和验证,对此前人进行了大量研究^[10,11]。本文利用模型提供的 GENCL 模块对模型的品种参数进行了站点校准和验证,具体过程参见文献^[12]。

1.3 作物模型的区域校准过程和验证

区域校准是对模型进行区域性标定的重要过程。区域校准的目的就是利用不同空间分布的实验站点尽可能地找出地区间品种和管理的异质性,这些异质性主要体现在适应于不同气候类型的生态型品种和管理上,即在不同空间区域间要体现这种品种和管理上的空间异质性,而在同一空间区域内则要尽可能消弱它们的空间异质性。研究认为可以用一定气候区内的生态型品种及其管理作为该区代表性品种和管理^[13],因此在进行区域校准时仅需要找出一定区域内代表性品种类型即可。本文利用 1998 ~ 2000 年全国 145 个实验站共 525 季水稻实验的观测数据,选择了开花期、成熟期、每平方米粒数、穗粒数,地上部生物量和产量 6 项指标,以水稻生态区(AEZ,精确到亚区)为基本单元,通过降低区域内所有站点模拟值和实验值的均方根差(RMSE)来确定该区域内种植品种类型的遗传参数和管理参数。然后,运用校准确定的各区域品种和管理参数,模拟了全国各实验站点 1998 ~ 2000 年水稻成熟期和产量,通过比较模拟结果和实验观测数据的差异,以验证不同水稻生态区的区域校准效果。具体校准方法和验证结果参见文献^[12]。

1.4 区域应用和验证过程

为了评估 CERES-Rice 区域应用效果,利用区域校准和验证后的模型,模拟了 1981 ~ 2000 年的网格 (50km × 50km) 水稻产量,并与同期农调队调查结果相比较。区域模拟所需要的土壤数据来自中国农业科学院农业资源和农业区划研究所提供的 1:100 万空间数据库,该数据以土壤亚类为图斑,包含的参数有土壤分层数、顶层颜色、土壤结构组成、容重、有机质含量、含氮量、pH 值、A1 饱和度、盐交换率、土壤根系量等,由于该土壤数据库中不包含土壤水分特征,所以采用 Ritchie 方法^[14]由土壤结构和养分含量计算出土壤的基本保水性能,包括土壤最高持水量、最低持水量和饱和持水量。气象数据则来源于中国气象局提供的全国 750 个气象台站观测数据(1980 ~ 2000 年),包括日最高温、最低温、降水量和日照时数。模型所需太阳辐射数据按 Pohlert^[15]的方法由日照时数转换而来。

模拟过程中首先按照面积权重法,将土壤数据进行了空间网格化(网格分辨率 50 km × 50 km)^[16],每个网格的气象数据来源于离该网格最近的气象站点,肥料管理则不受限制(当 N 肥胁迫大于 0.2 时自动进行定量施肥直至胁迫解除),而其他管理(播种日期和播种密度等)和品种数据由校准过程确定。

网格调查产量,是将全国农调队 1980 ~ 2000 年实际调查的县级产量,首先采用线性去趋势法^[17]将历年调查产量调整到 2000 年技术水平,然后再利用面积权重法^[4]把县级调查产量转化为 50km × 50km 网格调查产量。

1.5 升尺度区域模拟效果分析

为了研究模型升尺度区域模拟效果,文章以水稻生态区(表 1)为单位,在区域空间尺度、时间尺度以及网格 3 个层面上计算了网格模拟产量与调查产量的均方根差(RMSE)和符合度指数 D-index(表示模拟值与实测值分布的符合程度,具体解释详见文献^[18]),来反映两者之间在时间和空间上的差异和联系,并对它们的差异进行显著性分析。

表 1 水稻各生态区的划分^[19]
Table 1 Rice Agro-Ecological Zone

生态区 AEZ	名称 Name	位置 Location	包括省市区 Provinces	亚区(个) subAEZ(ind.)	面积比例(%) Percentage
1	华南双季稻区	南岭以南,我国最南部	闽、粤、桂、滇的南部及海南省和南海诸岛全部。包括 194 个县(市)	3	17.6
2	华中双季稻区	东起东海之滨,西至成都平原西缘,南接南岭,北毗秦岭、淮河	包括苏、沪、浙、皖、赣、湘、鄂、川 8 省(市)的全部或大部 and 陕、豫两省南部	3	67
3	西南高原单、双季稻区	云贵和青藏高原	云贵、西藏共 391 个县(市)	3	8
4	华北单季稻区	秦岭、淮河以北,长城以南,关中原以东	包括京、津、冀、鲁、豫和晋、陕、苏、皖的部分地区,共 457 个县(市)	2	3
5	东北早熟单季稻区	辽东半岛和长城以北,大兴安岭以东	包括黑、吉全部和辽宁大部及内蒙古东北部,共 184 个县(旗、市)	2	3
6	西北干燥区单季稻区	大兴安岭以西,长城、祁连山与青藏高原以北	银川平原、河套平原、天山南北盆地的边缘地带	2	0.5

文中 RMSE 与 D-index 系数的计算公式如下:

$$RMSE = \left[\left\{ \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right\} / n \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中, RMSE(root mean square error)为均方根差, P_i 、 O_i 依次为模拟值和实测值, n 为区域内的站点数, i 是第 i 个站点。

$$D\text{-index} = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^n [|P'_i| + |O'_i|]^2 \right] \quad (2)$$

式中, $\bar{O}$ 为实测平均产量, $P'_i = P_i - \bar{O}$, $O'_i = O_i - \bar{O}$ 。

2 模拟结果分析

2.1 空间尺度上的区域模拟效果

图 1 反映了全国水稻历年区域模拟的平均产量与调查产量的关系。从总体来看,模拟的产量与调查产量具有一定的相关性,基本上可以反映出产量的空间变化特征,全国近 1900 个网格高估、低估值相对均匀地分布在 1:1 线两侧,但不同区域分布存在差异,全国区域模拟的相对均方根差 $RMSE\%$ 为 21.3%,两者之间的符合指数 D 为 0.57。

表 2 是各区域的模拟结果,从表中可见,各区域模拟的效果不同,模拟的相对均方根差在 16% ~ 31% 之间,符合度在 0.2 ~ 0.7 之间,其中 1 ~ 4 区效果相对较好,与调查值相比, $RMSE\%$ 低于 22%,符合度都在 0.55 以上,而且除 3 区外,其他 3 个区模拟的平均产量与调查平均产量之间无显著差异,可见模拟的历年平均产量能够反映出水稻种植区产量的空间分布情况,由于 1 ~ 4 区所占种植比例可以达到 95% 以上,因此就全国而言,

在水稻大部分种植区域,区域模拟可以反映空间变化的规律,1 ~ 4 区中,又以 1 区模拟效果最好($RMSE\% = 17.9\%$; $D = 0.66$)。而 5 区和 6 区的模拟效果相对较差,相对均方根差最大为 6 区 30.7%,5 区模拟值与调查值也仅有 23% 的符合程度。分析认为,5、6 区生态区划分过粗,跨越空间范围较大,按生态区归并的水稻品种和管理参数还不足以体现出该区域内的水稻品种和管理的空间差异;其二,这两个区域空间数据的数据数量较其它区少,特别是 6 区(西北干燥单季稻区),气象站点和水稻实验点明显偏少,对模型的空间校准和区域模拟过程中会带来一定的影响;此外,部分研究也指出^[20,21],由于 CERES-Rice 模型本身的缺陷,不能模拟出一些气象灾害,如低温冷害对水稻产量的影响,因此在对偏北地区的一季稻和南部地区的早稻模拟效果还不尽理想,从而导致区域模拟在我国北部地区(5 区)的模拟效果相对较差,今后还需要进一步校准修正。

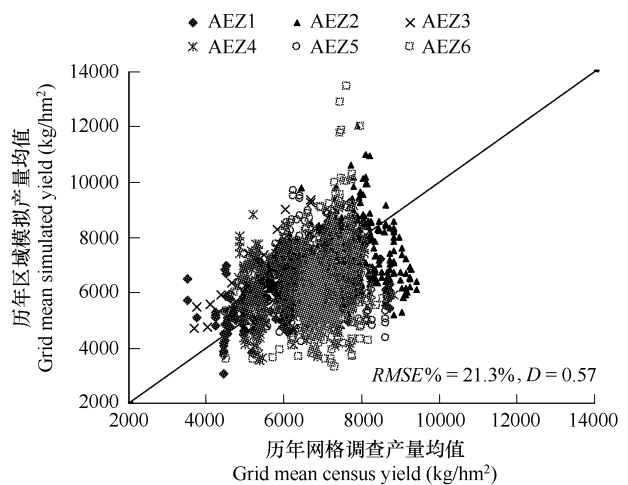


图 1 模拟的所有网格 21a(1980 ~ 2000 年)平均产量与调查平均产量之比较

Fig. 1 Comparison of simulated mean yields and census data for all grids

表 2 各区历年区域模拟的平均产量与网格调查平均产量的比较(kg/hm²)

Table 2 The comparison of simulated average yield and census yield at grid scale

生态区 AEZs	1	2	3	4	5	6
样本量 N	244	606	222	220	335	269
调查产量(平均偏差) $X_{cen}(SD)$	5841(912)	6993(1087)	6516(1015)	6393(1249)	6224(1143)	6128(1711)
模拟产量(平均偏差) $X_{sim}(SD)$	5913(1059)	7000(1065)	6222(781)**	6540(1114)	6718(620)**	7027(606)**
相关系数 r	0.203	0.137	0.111	0.091	0.085	0.070
R^2	0.451**	0.370**	0.333**	0.302**	0.291**	0.265**
$RMSE(RMSE\%)$	1042(17.9%)	1531(21.9%)	1093(16.8%)	1405(22.0%)	1530(24.6%)	1882(30.7%)
D	0.66	0.63	0.58	0.60	0.23	0.49

* $P = 0.05$ 水平显著 Significantly at the 0.05 level, * * $P = 0.01$ 水平显著 Significantly at the level 0.01 level

2.2 时间尺度上的模拟效果

对农业贸易和宏观决策而言,有时更关注产量的年际变化。从图 2 全国水稻各产区模拟的平均产量与调查产量在 1980 ~ 2000 年的波动变化中可以看出,区域模拟产量与调查产量随时间变化趋势具有一定的一致性,但不同区域这种一致性表现不同,种植面积最大的 2 区表现最好,模拟值与调查值符合度高达 0.75,除个别年份(1983 年、1996 年等)外,大部分年份两者波动一致,但波动幅度上有所不同;1 区、3 区、4 区效果略差,

但也有 0.35 以上的符合程度;相比起来 5、6 区效果不好,不但模拟值与调查值偏差较大,符合度也较其他区域低,5 区符合度指数仅为 0.29,这可能是由于水稻产量受多种因素影响,其中包括单/双季稻播种面积、农业投入水平、气候状况和灾害情况等,在目前的数据水平和技术水平下,还不能准确地把握住所有这些相关的信息,及这些因素对水稻产量造成的影响,因此时间序列的符合度不高。但整体来说,在水稻主产区(如 2 区),由于管理水平和播种面积等因素相对稳定,模拟值与实际值的差异较小,可以在一定程度上反映产量的年际波动情况。

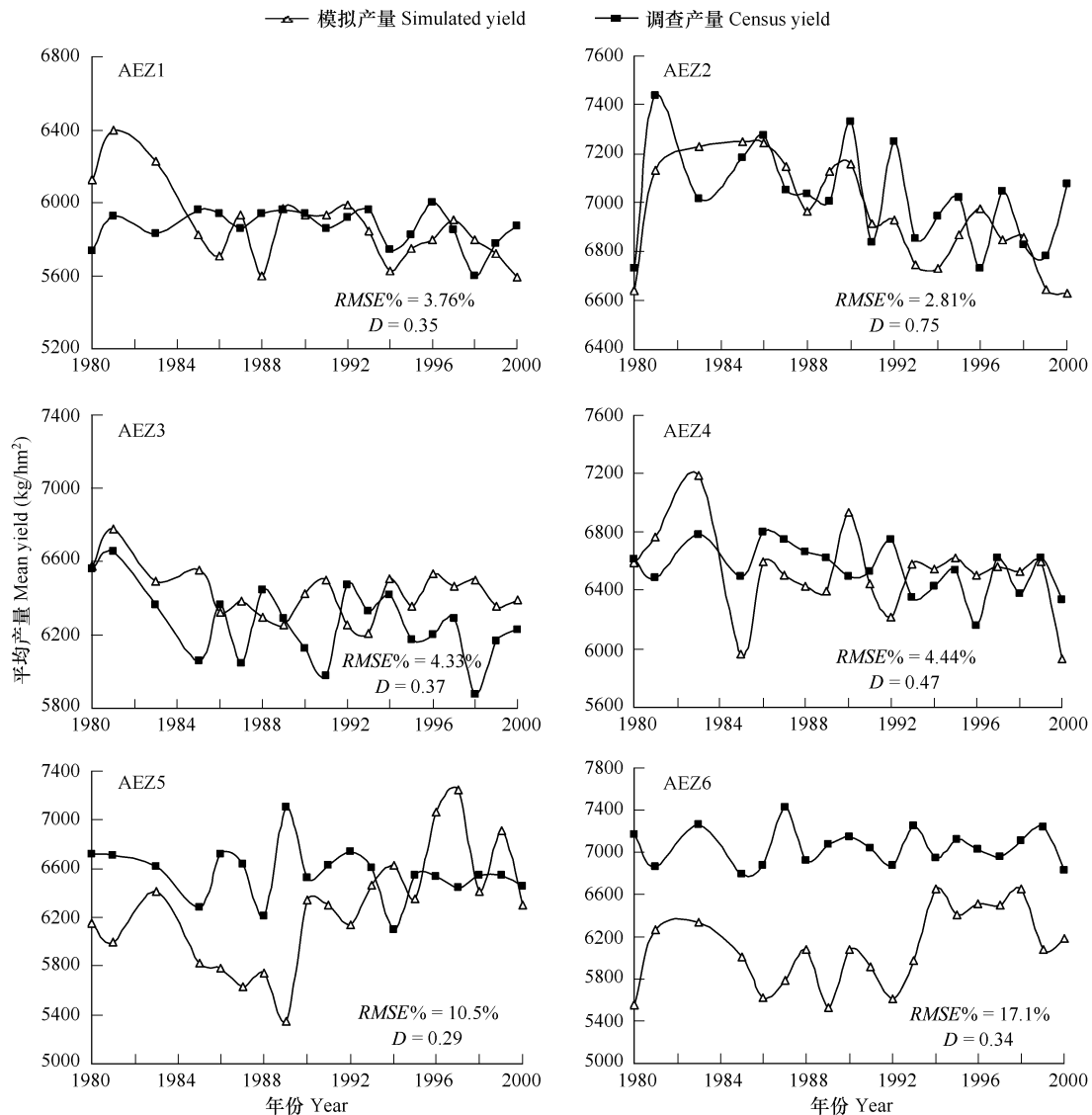


图 2 全国水稻各产区模拟的产量与调查产量在 1980 ~ 2000 年的波动变化

Fig. 2 The simulated and census year-to-year mean yield (1980 ~ 2000) for each AEZ

2.3 网格模拟的多年平均相对均方根差的空间分布

图 3 是全国 1896 个网格模拟产量与调查产量的多年平均的相对均方根差的空间分布情况,从结果来看,多数网格相对均方根差在 30% 以内,占网格总数的 71.01%,其中 $RMSE\% < 15\%$ 的有 553 个,占 41.08%; 30% ~ 45% 的网格有 321 个,占 16.93%;超过 45% 仅占 12.07%。就各区域而言,南方双季稻区(1、2 区) $RMSE\%$ 都比较小, $RMSE\% < 15\%$ 的网格多集中在这两个区域。个别地区(如 6 区)效果较差,个别网格 $RMSE\%$ 甚至达到 100% 以上,还需要进一步研究。由于我国的水稻生产主要分布在南部地区,考虑了种植面

积权重后,研究认为利用区域校准后的作物模型模拟水稻区域产量在主产区效果较好。

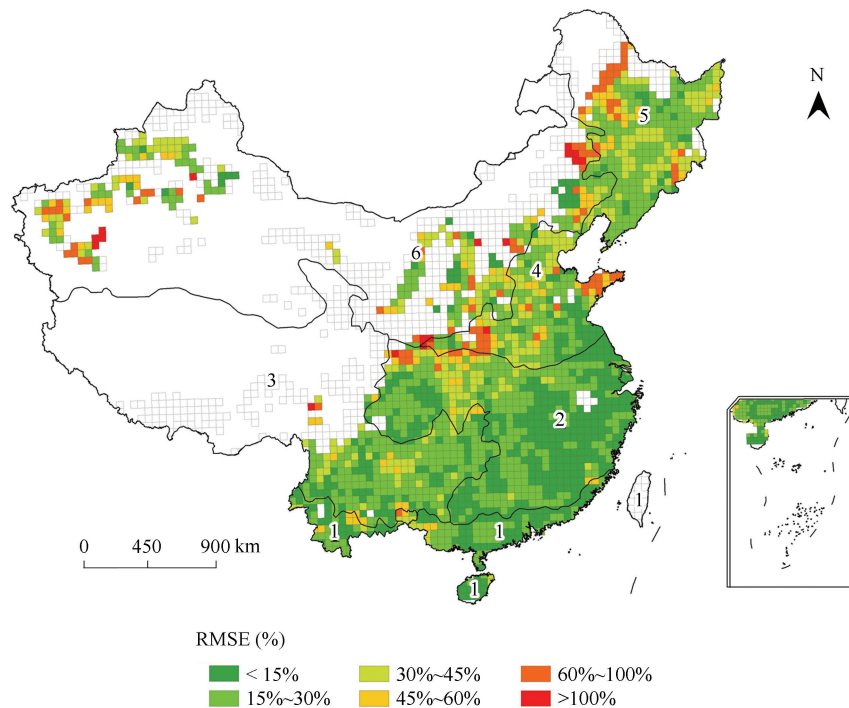


图3 各网格模拟产量与调查产量(1980~2000年)的相对均方根差的空间分布

Fig. 3 Relative RMSE of simulated to census yields for period of 1980—2000 at 50 km × 50 km grid scale

2.4 误差来源

从模型区域应用的效果看,尽管区域模拟基本可以反映出产量的时间、空间变化特征,但还存在一定误差,包括(1)模型本身的误差,如模型不能反映病虫害的影响,对一些气象灾害,如积水、冰雹、大风等还无法模拟,我们在经过详细站点校准和验证后这类误差可以降低到15%以下^[12]; (2)作物品种遗传参数的误差,目前采用试错法确定的品种遗传参数并不一定是作物生长对光温的真实需求和产量构成特征,如经过试错法计算的不同地点或同一地点不同时间的同一品种的遗传参数也存在着一定的差异,究竟取哪一个试验的结果,目前还只是依主观选择无任何胁迫试验条件下的结果,但考虑到实验观测的误差和可能的错误,所以遗传参数的误差也较大。(3)按一定区域范围归并的品种和管理参数引起的误差。由于空间数据量的限制,区域模拟中多采用一定区域归并的品种和管理参数(本研究中以水稻生态亚区为单位进行归并),这种归并的参数可能是该区域内最优的或具有代表性的品种和管理方式,但它毕竟与田间实际情况有较大的差异,无法体现出区域内品种和管理的多样性,部分研究尝试归并+抽样模拟的方式取得了较好的结果^[2]; (4)区域划分引起的误差。研究中采用AEZ作为水稻品种和管理参数归并的基本单位,部分区域由于资料的稀缺或非作物主产区(如AEZ 6),划分的区域范围过大,导致区域内还存在着较大的空间异质性,从而对模拟造成一定的影响,但是由于目前全国水稻生态区划研究甚少,本文采用的分区是目前研究中仍普遍采用的全国水稻区划结果,如果今后在前人研究基础上考虑气候变暖的状况进行更系统的全国分区,将可以降低这方面的误差。(5)空间数据的误差,包括土壤数据、天气数据和调查数据本身及数据处理方式和方法(如土壤水分计算方法、网格化计算方法等)等。

3 结论和讨论

区域模拟的目的是利用现有的空间数据,尽可能地模拟出产量的空间和时间变化格局,它与站点模拟的目的和要求存在着显著地差别,其一、它不是模型本身效果,而是模型、空间数据、空间校准方法等综合效果的

体现;其二、它的目的不是去精确地预测田间的实际作物生产,而是从空间上预测产量的地区差异,从时间上估计产量的年际变化,为宏观决策服务。本研究正是根据区域模拟的目的,利用按水稻生态亚区为单元进行空间校准和验证的 CERES-Rice 模型,模拟了我国 21a(1980~2000 年)的水稻网格产量,分别从空间尺度、时间序列、网格 3 个层次上,与同期农调队调查产量进行详细的比较,以期了解区域应用的效果及误差来源。

从区域应用结果来看,区域模拟可以在一定程度上反映出产量的时空变化规律,全国水稻产量的相对均方根差为 21.3%,符合度 0.57,各水稻生态区的模拟效果不同,水稻主产区(AEZ 1,2,3,4),模拟产量与调查产量相差不大,两者的符合度也较好,其他区域(AEZ 5,6)效果较差;时间序列上区域模拟产量与调查产量也具有一定的一致性,但不同区域这种一致性表现不同,2 区表现最好;从网格相对均方根差的分布看,全国大部分网格(71.01%)模拟的 21 年水稻年产量与调查产量的平均 RMSE% 在 30% 之内,且绝大部分分布在水稻主产区,考虑到水稻种植面积的权重后,认为区域模拟基本上可以模拟出产量的时空分布特征,能够为宏观决策提供相应的信息。

但目前作物模型区域应用过程中还存在一系列误差,主要包括(1)模型本身的误差;(2)作物品种遗传参数的误差;(3)归并的品种和管理参数引起的误差;(4)区域划分引起的误差;(5)空间数据的误差等。目前的研究还比较初步,对于如何减少模型区域应用的误差还有待进一步深入。

References:

- [1] Moen T N, Kaiser H M, Riha S J, *et al.* Regional yield estimation using a crop simulation model: concepts, methods, and validation. *Agricultural System*, 1994, 46: 79—92.
- [2] Hanson J W, Jones J W. Scaling-up crop models for climate variability application. *Agricultural Systems*, 2000, 65: 43—72.
- [3] Carbone G J, Mearns L O, Mavromatis T. Evaluating CROPGRO-Soybean performance for use in climate impact studies. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 537—544.
- [4] Jagtap S S, Jones J. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 93: 73—85.
- [5] Luxmoore R J, King A W, Tharp M L. Approaches to scaling up physiologically based soil-plant models in space and time. *Tree Physiology*, 1991, 9: 281—292.
- [6] Iwasa Y, Andreasen V, Levin S. Aggregation in model ecosystems. I. Perfect aggregation. *Ecological Modelling*, 1987, 37: 287-302.
- [7] Mavromatis T, Boote K J, Jones J W, *et al.* Developing genetic coefficients from crop simulation models using data from crop performance trials. *Crop Sci*, 2001, 41: 40—51.
- [8] Challinor A J, Wheeler T R, Slingo J M, *et al.* Design and optimization of a large-area process-based model for annual crops. *Agr. Forest Meteorol.*, 2004, 124: 99—120.
- [9] Singh U, Ritchie J T, Godwin D C. A user's guide to CERES-Rice v. 2. 10, Simulation manual IFDC-SM-4, Al, U. S. A. : IFDC, Muscle Shoals, 1993, 131.
- [10] Cheyglinted S, Ranamukhaarachchi S L, Singh G. Assessment of the CERES-Rice model for rice production in the Central Plain of Thailand. *The Journal of Agricultural Science*, 2001, 137: 289—298.
- [11] Saseendran S A, Singh K K, Rathore L S, *et al.* Evaluation of the CERES-Rice version 3.0 model for the climate conditions of the state of Kerala, India. *Meteorological Applications*, 1998, 5 (4): 385—392.
- [12] Xiong W, Lin Erda, Yang J, *et al.* Comparison of two calibration approaches for regional simulation of crop model. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(5): 2140—2147.
- [13] 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.
- [14] Ritchie J T, Gerakis A, Suleiman A. Simple model to estimate field-measured soil water limits. *Trans. ASAE*, 1999, 42: 1609—1614.
- [15] Pohlert T. Use of empirical global radiation models for maize growth simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 126: 47—58.
- [16] Xiong W, Lin E D, Ju H, Xu Y L. Climate change and critical thresholds in China's food security. *Climatic Change*, 2007, 81: 205—221.
- [17] Hollinger S E, Ehler E J, Carlson R E. ENSO Midwestern United States corn and soybean yield response to changing El Nino-southern oscillation conditions during the growing season. In: Rosenzweig C, Boote K J, Hollinger S, *et al.*, eds. *Impacts of El Nino and Climate Variability on Agriculture*. ASA Special Publication, American Society of Agronomy, Madison, WI, 2001. 63: 33—56.
- [18] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1982, 63: 1310—1313.
- [19] Zhu D F, Min S K. Rice production in China under current and future climates. In: Matthews R B, Kropff M J, Bachelet D, Van Laar H H. eds., *Modeling the impact of climate change on rice production in Asia*. CAB international, 1995.
- [20] Godwin D C, Meyer W S, Singh U. Simulation of the effect of chilling injury and nitrogen supply on floret fertility and yield in rice. *Aust. J. Exp. Agri.*, 1994, 34: 921—926.
- [21] Meyer W S, White R J G, Smith D J, Baer B D. Monitoring a rice crop to validate the CERES-Rice model. *CSIRO Technical Memorandum 94/13*, September 1994, 26—27.

参考文献:

- [12] 熊伟,林而达,杨婕,等.作物模型区域应用两种参数校准方法的比较. *生态学报*, 2008, (28)5: 2140~2147.