

# CERES-Wheat 模型在我国小麦区的应用 效果及误差来源<sup>\*</sup>

熊 伟<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081)

## 摘 要

气候模型与作物模型耦合是评价未来气候变化对作物生产影响的常用方法之一,但当两者结合时,存在着空间和时间尺度差异问题,将作物模型升尺度到区域是解决该差异的一种方法。将 CERES-Wheat 模型升尺度进行区域模拟,利用区域校准后的 CERES-Wheat 模型,模拟了 1981—2000 年全国各网格小麦产量,与同期农调队调查产量相比较,以探讨 CERES-Wheat 模型在我国小麦区的模拟效果及误差来源。结果表明:全国小麦产量的区域模拟值与农调队调查产量的相对均方根误差为 27.9%,符合度为 0.75,全国 59.2%的模拟网格相对均方根误差在 30%以内,其中相对均方根误差小于 15%的占 26.3%;各区的效果不同,种植面积最大的小麦种植生态 2 区,模拟效果最好。总体来说,CERES-Wheat 的区域模拟,可以反映产量变化规律,能为宏观决策提供相应信息,尤其是在主产区;但区域模拟中还存在一系列误差,今后还需进一步研究。

**关键词:** CERES-Wheat 模型;区域模拟;模拟效果;误差来源

## 引 言

近年来,全球气候变化及其可能造成的影响受到广泛关注,农业生产作为借助自然体的一种社会活动,受气候变化影响,研究未来气候变化对我国农业生产的影响有重要意义,国内外学者对此展开了大量研究<sup>[1-4]</sup>,大部分研究采用气候模型(GCM, RCM 等)与作物模型耦合的方法来评价气候变化对作物生产的影响,但由于气候模型一般仅提供大范围(50 km×50 km 以上)的平均信息,而作物模型则大多基于站点尺度,当作物模型与这些模型结合时,不可避免地存在空间和时间尺度差异问题,将作物模型升尺度到区域是解决该矛盾的方法之一。作物模型的区域模拟是利用目前有限的空间和时间数据,最大限度地模拟产量、生育期等作物性状的空间和时间变异规律,它是作物模型应用的新方向。然而无论作物模型进行何种尺度的模拟,首要的工作之一是对模型的适应性和模拟效果进行评估。国内

外对模型升尺度区域应用进行了一些尝试<sup>[5-8]</sup>,但尚无其应用效果及误差来源的相关报道。本研究利用区域校准后的 CERES-Wheat 模型,模拟了 1981—2000 年全国各气候生态区小麦产量,与同期农调队调查产量比较,以了解区域校准后的 CERES-Wheat 模型在我国小麦生态区的模拟效果及误差来源,为今后作物模型在气候变化影响评价等领域的运用提供一些参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 CERES-Wheat 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-Wheat 模型来自 DSSAT

\* 国家自然科学基金项目(30700477)和国家科技支撑计划课题(2007BAC0302)共同资助。

2008-01-30 收到,2008-08-13 收到再改稿。

最新版 (Version 4.0.2), 该模型可逐日模拟小麦生长发育过程和产量<sup>[9]</sup>。

## 1.2 CERES-Wheat 模型区域模拟

本研究中 CERES-Wheat 模型区域模拟的具体流程为模型站点校准和验证→模型区域校准和验证→模型区域模拟和效果分析。

### 1.2.1 模型站点校准和验证 (简称站点校准)

无论运用作物模型进行何种研究, 首先都要对模型的适应性和模拟效果进行评估, 为了了解 CERES-Wheat 模型在我国的模拟能力, 对其进行了试验站点校准和验证。关于 CERES-Wheat 模型的站点校准已有大量研究<sup>[10-12]</sup>。本文利用 CERES-Wheat 模型的 GENCL 模块对模型的品种参数进行站点校准。校准所需田间数据和气象数据均来自国家气象信息中心, 田间数据包括 1990—2000 年贵州、湖北、山西、甘肃、新疆、江苏、西藏及天津等 19 个试验站点的田间实测数据 (包括田间管理、产量和生育期等), 气象数据包括我国 750 个气象台站观测数据 (包括日最高及最低气温、降水量和日照时数), 太阳辐射数据按 Pohlert 的方法<sup>[13]</sup> 由日照时数转换而成。选择最近气象站观测数据作为该试验点的气象数据。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 1:100 万空间数据库, 该数据以土壤亚类为图斑, 包含土壤分层数、顶层颜色、土壤质地、容重、有机质含量、含氮量、pH 值、盐交换率、土壤根系量等, 因其中不包含土壤水分特征, 故采用 Ritchie 方法<sup>[14]</sup> 利用土壤结构和养分含量得到土壤基本保水性能 (土壤最高、最低与饱和持水量)。利用 GIS 选取与每个试验站一致的土类。首先利用 1990 年数据在每一个试验点上对模型的品种参数进行校准, 然后利用校准的品种参数模拟这 19 个试验站点 1990—2000 年的小麦成熟期和产量 (田间管理与试验站的实际情况保持一致), 并将模拟结果与同期实测值进行比较, 以了解站点校准效果。

### 1.2.2 模型区域校准和验证

模型区域模拟时, 由于模拟空间范围较大, 无法对区域内站点逐一校准, 因此必须对模型进行区域校准。模型的区域校准是对模型进行区域性标定的过程, 其目的是在不同空间分布的试验站点中找出地区间品种和管理的异质性, 这些异质性体现在适应于不同气候类型的生态型品种和管理上, 即在不同气候生态区品种和管理有空间异质性, 而同一气候类型空间区域则尽可能消弱异质性。作物模型的输入数据一般有气象、土壤、田间管理和作物品种参数数据。目前, 气象和土壤数据在一定空间尺度的

归并基本可满足作物模型区域应用的要求。而田间管理多种多样且经常变化, 目前很少精确收集, 所以在区域模拟中一般利用假定的或最优的设置进行模拟。作物品种参数是作物与环境关系的量化, 是作物模型的关键指标, 由于品种类型的多样性, 作物模型品种参数的校准往往工作量很大。但模型研究认为<sup>[15]</sup>, 品种间差异大部分体现在病虫害抗性、品质等方面, 而目前作物模型还不能对此很好地描述。因此, 为了减少模型区域应用过程中校准工作的工作量, 可以用一定气候区的生态型品种和管理作为该区代表性品种和管理, 即作为代表性品种和管理, 能够体现出该气候区品种的生育期长短和产量构成等特性, 而在不同气候区, 各代表性品种和管理在生育期长短和产量构成上又存在显著差异。

本研究将站点校准后的模型, 采用均方根误差 (RMSE) 法<sup>[16]</sup> 进行区域校准。模型区域校准所用的田间试验数据来自国家气象信息中心, 包括 1998—2000 年分布在不同小麦气候生态区<sup>[17]</sup> 的 200 多个农业气象试验站 (24.3°N (云南玉溪)~51.7°N (黑龙江呼玛)) 的田间试验资料 (田间管理措施包括品种、播种期、施肥、灌溉、播种密度、行距, 物候期包括开花期、成熟期、收获期等和产量构成要素), 剔除受重大灾害影响的试验后最终选出 435 季 (春小麦 114 个, 冬小麦 321 个)。气象和土壤数据的来源、选择和处理方式同站点校准。

校准是依次选择 1998—2000 年中的 1 年为校准年, 另外 2 年作比较, 进行 3 次校准, 以所有比较中, 计算的该区内所有站点的模拟与实测值的均方根误差最小为参数确定的标准。对一个小麦生态区具体步骤如下: ① 首先将站点校准后, 区域内各站点品种参数的平均值作为模型各参数的初始值。② 选择任意一年该区所有站点的田间实测数据来校准模型的品种参数, 按 Hunt 等<sup>[18]</sup> 和 Mavromatis 等<sup>[19]</sup> 的试错法进行, 即调整某个参数时, 保持其余参数不变, 按一定步长逐步调整该参数, 同时模拟出区域内所有站点的结果; 选择对该参数最为敏感的模拟值, 与实测值进行比较, 当区域内所有站点的模拟值和实测值的均方根误差最小时确定该参数。比如, 校准灌浆期系数, 保证其余参数不变, 以 0.1 为步长调整灌浆期系数, 模拟出区域内所有站点的生育期和产量, 由于灌浆期系数对成熟期最敏感<sup>[18]</sup>, 因此根据成熟期模拟值和实测值的均方根误差来确定灌浆期系数, 即区域内所有站点成熟期的模拟值和实测值的均方根误差最小时所对应的灌浆期系数, 就是该模型区域校准后所得参数灌浆期系数值。依

此方法对下一个参数进行调整。具体参数调整顺序和模拟值与参数值敏感对应关系可参见文献[18]。  
 ③用剩余两年的实测数据对模型参数进行验证。  
 ④选择另外年份的实测数据,重复②和③两步。  
 ⑤从所有校准结果中,选择验证年中均方根误差最小的品种参数为该区域的代表性品种。

为了了解不同小麦生态区(AEZ)的区域校准效果,运用校准确定的各区域品种参数,模拟全国各站点1998—2000年小麦成熟期和产量,以小麦生态区为单位,计算模拟值与实测值的RMSE、符合度指数 $D$ (表示模拟值与实测值分布的符合程度,详见文献[20])以及对它们的差异进行配对样本的方差分析。

1.2.3 模型区域模拟和效果分析

为了评估不同小麦区的区域模拟效果,利用区域校准后的模型,模拟1981—2000年50 km×50 km网格的小麦产量,并与同期农调队的调查结果相比较。

模拟过程中,按照面积权重法将土壤数据空间网格化(网格分辨率50 km × 50 km)<sup>[21]</sup>,选择距网格最近气象站点的观测气象数据,水肥管理设为无胁迫状态,其他管理和品种数据由校准过程确定,模拟了1981—2000年我国小麦产量。调查产量是将全国农调队1981—2000年县级调查产量,首先采用线性趋势法<sup>[22]</sup>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把县级调查产量转化为50 km×50 km网格调查产量,首先求算网格内各县种植面积所占网格面积比例,然后将网格内各县级调查产量与其相应比例的乘积进行累加,即为网格调查产量。

研究以小麦种植生态区(图1)为单位,在区域空

间与网格尺度上计算了模拟产量与统计产量的均方根误差和符合度指数 $D$ ,以反映两者之间的空间联系和差异,并对其差异进行显著性分析。

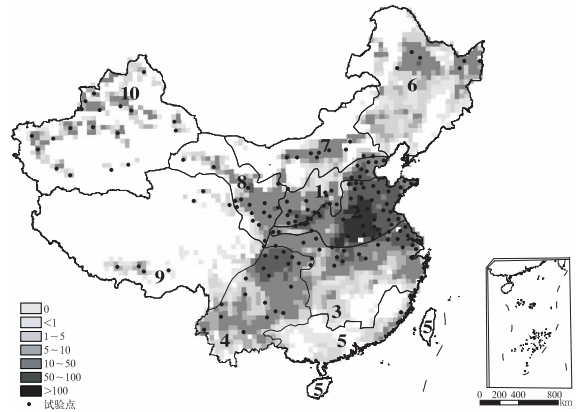


图1 我国小麦种植生态区和播种面积(单位:10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>)

Fig. 1 Chinese wheat agro-ecological zones and its sowing area(unit: 10<sup>3</sup>hm<sup>2</sup>)

2 结果分析

2.1 站点校准效果

经站点校准后,各站点1990—2000年的成熟期、产量模拟值与实测值间都有很好的相关性,相对均方根误差均小于15%,符合程度高达0.9以上(图2),说明模拟值与实测值比较接近,符合程度较高,可见站点校准的效果较好,模型能较好地反映出该站点生育期和产量的时空变化特点,在我国具有较好适用性。经站点校准后的作物模型误差可控制在

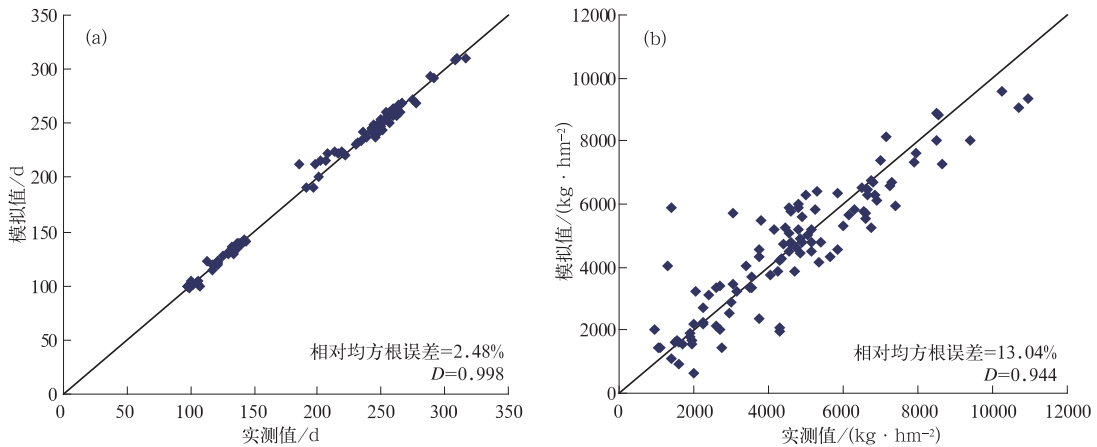


图2 1990—2000年各站点成熟期(a)和产量(b)的模拟值与实测值关系

Fig. 2 Comparison of observed and simulated duration from sowing to maturity(a) and yields(b) during 1990—2000

15%以内,其主要来源于模型还不能模拟的因素,如病虫害害、极端气候事件等。

## 2.2 小麦不同生态区的区域校准效果

以小麦生态区为单位,进行参数区域校准,利用校准后的参数,模拟了区域各站点 1998—2000 年的小麦成熟期和产量。剔除无效样本(如成熟期 $>350$ 或产量为 0)后,391 个有效样本成熟期和产量的模拟值与同期实测值较均匀地分布在 1:1 线附近,成熟期分布更为集中,成熟期的模拟更好。模拟相对均方根误差为 7.35%,符合度高达 0.98;而产量的相对均方根误差为 22.8%,符合度为 0.85(图 3)。与站点校准效果相比,无论成熟期还是产量,区域校准都增大了模拟的相对均方根误差,降低符合度,这主要是由于按一定区域范围归并的品种和管理参数引起的不确定性。区域模拟中采用一定区域归并的品种和管理参数(本研究中以小麦生态区为单位进行归并),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差异,无法体现出区域内品种和管理的多样性,目前这类不确定性还无法避免和消除,今后可

尝试“归并+抽样”模拟的方式降低。

不同小麦生态区产量的区域校准效果见表 1。表中可见,除 5 区外(主要原因是由于样本量少),其他各区的模拟产量与实测产量都显著相关;且除 1 区和 2 区外,其他区模拟产量与实测产量差异不显著;各区域产量模拟值与实测值之间的相对均方根误差,在 16.5%~35.5%之间,最大的 4 区相对均方根误差为 35.5%,8 区也略高于 30%(31.5%),这是由于这两个区域内海拔相差较大,气候类型较其他区多样,单一品种和管理类型还不足以概括小麦种植的区域差异。如果对作物生态区域划分进行更细致研究,理论上可得到更好的模拟结果。其他区相对均方根均在 25%以内,最好的是 2 区相对均方根误差为 16.5%。各区的符合度指数在 0.21~0.94 之间,除了 5 区(0.21)外(样本量太少),其他区符合度指数均超过 0.5,但需要指出的是 9 区校准站点只有 6 个,且分布很不均匀,可能会影响校准的准确性。总之,在大多数生态区区域校准后的模型能反映出产量分布情况,个别区域还需要进一步校准和修订。

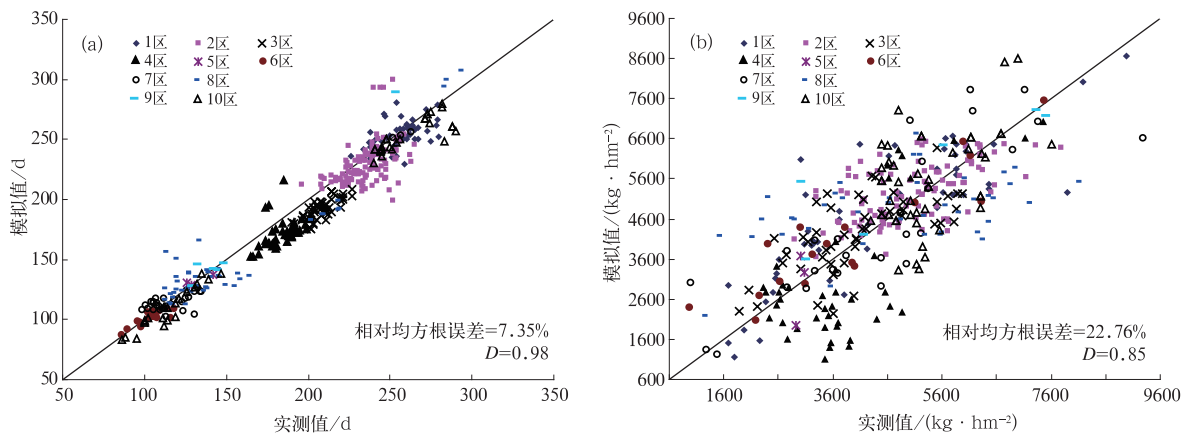


图 3 成熟期(a)和产量(b)的模拟值与实测值关系

Fig. 3 Comparison of observed and simulated duration from sowing to maturity(a) and yields(b)

表 1 各生态区模拟和实测的小麦产量统计比较

Table 1 Statistic of observed and simulated yields for each agro-ecological zone

| 生态区                         | 1     | 2     | 3     | 4     | 5    | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 总和    |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 样本量                         | 53    | 108   | 48    | 42    | 3    | 17    | 28    | 41    | 6     | 45    | 391   |
| 实测产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 4461  | 5037  | 4051  | 3807  | 3000 | 3889  | 4508  | 4732  | 5120  | 5393  | 4612  |
| 模拟产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 4757* | 5256* | 4264  | 3110  | 2958 | 4159  | 4498  | 4836  | 5710  | 5539  | 4712  |
| 相关系数                        | 0.84* | 0.56* | 0.67* | 0.71* | 0.72 | 0.83* | 0.84* | 0.46* | 0.86* | 0.47* | 0.73* |
| 相对均方根误差/%                   | 22.2  | 16.5  | 20.8  | 35.5  | 23.4 | 19.8  | 23.1  | 31.5  | 21.7  | 20.3  | 22.8  |
| 符合度 D                       | 0.91  | 0.73  | 0.80  | 0.76  | 0.21 | 0.94  | 0.93  | 0.59  | 0.89  | 0.66  | 0.85  |

注: \* 表示达到 0.05 显著性水平, ☆ 表示达到 0.01 显著性水平。下同。

### 2.3 小麦不同生态区的区域模拟效果

利用区域校准的 CERES-Wheat 模拟了 1981—2000 年全国小麦产量,与同期农调队调查产量相比较(图 3)。由图 3 可见,小麦的网格模拟产量与调查产量具有一定相关性,基本可反映产量的空间变化特征,全国 2206 个网格高估、低估值相对均匀地分布在 1:1 线两侧,网格模拟值与调查值之间相对均方根误差为 27.91%,符合度  $D$  为 0.75。与产量的区域校准效果相比,区域模拟会增加模拟的相对均方根误差,降低符合度,这部分误差可能是空间数据造成的,它包括模拟时输入的土壤和天气数据、农调队数据本身的准确性及数据处理方式和方法(如土壤水分与网格化计算方法等)等带来的误差。今后需研究区域模拟对空间数据的敏感性,以根据模拟目的选用不同质量的空间数据。

表 2 是各区的网格模拟结果。从表 2 可见,除 5 区外,各区网格模拟产量与调查产量均表现为线性相关,两者的相对均方根误差在 16%~37%之间,

符合度  $D$  在 0.2~0.8 之间,其中种植面积最大的 2 区(占总面积的 39.9%)模拟效果最好,与网格调查产量的相对均方根误差为 26.6%,符合度  $D$  为 0.68;1,7,10 区效果次之,相对均方根误差都在 20%

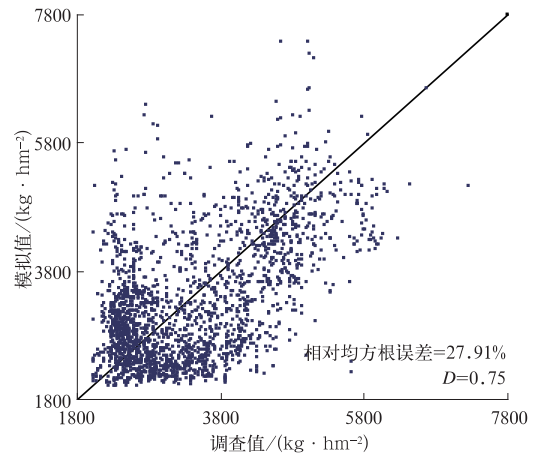


图 4 网格模拟产量与调查产量的关系

Fig. 4 Simulated and census yields for grids

表 2 各区历年网格模拟的平均产量与调查平均产量的比较

Table 2 Comparison of grid level simulated and census mean yields for agro-ecological zones

| 生态区                         | 1                 | 2                 | 3                 | 4                 | 5                 | 6                 | 7                 | 8                 | 9                 | 10                | 全国                |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 样本量                         | 142               | 236               | 398               | 273               | 227               | 441               | 133               | 119               | 96                | 141               | 2206              |
| 调查产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 3443              | 4385              | 2984              | 2941              | 2610              | 2988              | 3571              | 4024              | 3938              | 4238              | 3333              |
| 模拟产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 3221 <sup>☆</sup> | 4665 <sup>☆</sup> | 3672 <sup>☆</sup> | 2945              | 2675 <sup>*</sup> | 2472 <sup>☆</sup> | 4091 <sup>☆</sup> | 3874              | 3373 <sup>☆</sup> | 4717 <sup>☆</sup> | 3406              |
| 相关系数                        | 0.61 <sup>☆</sup> | 0.52 <sup>☆</sup> | 0.65 <sup>☆</sup> | 0.22 <sup>☆</sup> | 0.05              | 0.21 <sup>☆</sup> | 0.78 <sup>☆</sup> | 0.52 <sup>☆</sup> | 0.26 <sup>*</sup> | 0.32 <sup>☆</sup> | 0.55 <sup>☆</sup> |
| 相对均方根误差/%                   | 22.2              | 16.6              | 30.7              | 35.7              | 30.5              | 24.9              | 24.7              | 36.7              | 36.0              | 21.9              | 27.9              |
| 符合度 $D$                     | 0.69              | 0.68              | 0.68              | 0.22              | 0.28              | 0.30              | 0.78              | 0.64              | 0.31              | 0.47              | 0.75              |

左右,符合度也都高于或接近 0.5;受区域校准效果的影响(表 1),4,8 区模拟的相对均方根误差都超过 35%;9 区相对均方根误差为 36%,符合度  $D$  为 0.31。造成 9 区偏差大的原因,其一是该区域校准时样本量少,可能使校准不够准确;其二是该区种植面积小,种植存在很多不规范,农调队调查数据也可能缺乏准确。总的来说,考虑面积权重后,模型在大部分小麦种植区(如 1,2,3,7,10 区,面积之和占 71.8%)基本上能反映出生态区的产量分布情况,个别区域还需要进一步细致校准和调整。

图 4 是全国 2206 个网格模拟产量与调查产量的相对均方根误差情况,从结果来看,59.2%的网格相对均方根误差在 30%以内,其中相对均方根误差小于 15%的占 26.3%;相对均方根误差为 30%~50%的网格占 36.6%;超过 50%的占 4.2%。就各

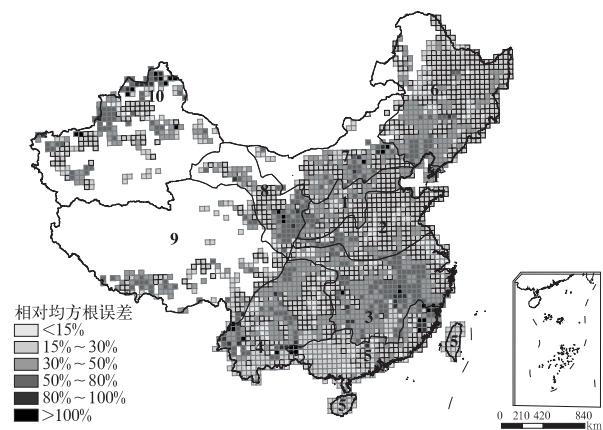


图 5 全国各网格模拟产量与调查产量的相对均方根误差

Fig. 5 Relative root mean square error of simulated to census wheat yields at grid level



区域而言,种植面积最大的 2 区网格相对均方根误差相对较小,比其他区效果好,而非主产区的相对较大。

#### 2.4 误差来源分析

目前作物模型区域模拟中还存在一系列误差,主要包括:① 模型本身的误差,如模型不能反映病虫害草害的影响,对一些气象灾害,如积水、冰雹、大风等还无法模拟;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同一品种遗传参数也存在一定差异,究竟取哪一个试验的结果,目前还只是主观选择无任何胁迫试验条件下的结果,考虑到试验观测的误差和可能的错误,因此遗传参数的误差也较大,在经过详细站点校准和验证后可以将这两类误差降低到 15% 以下;③ 按一定区域范围归并的品种和管理参数引起的误差,这类误差在模型区域校准过程中体现出来,主要是区域内品种和管理多样性造成的,部分区域由于资料的稀缺(如 5 区、9 区),样本量较少或样本空间分布不均,造成校准或模拟效果不够准确,今后尚需补充更多样本以提高校准和模型模拟能力;④ 区域划分引起的误差,研究中采用小麦生态区作为小麦品种和管理参数归并的基本单位,有的区域划分范围过大(如 4 区、8 区等),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影响,由于目前全国小麦生态区划研究甚少,本文采用的分区是目前研究中仍普遍采用的全国小麦区划结果<sup>[17]</sup>,但区划中未考虑气候变暖的现实,增大了区域应用的误差,如果今后在前人研究基础上考虑气候变暖状况进行更系统的全国分区,将可以降低这方面带来误差;⑤ 空间数据的误差,包括土壤、天气和统计数据本身的准确性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 小 结

1) 用经空间校准后的 CERES-Wheat 模型进行区域模拟,基本可以反映出产量的分布特征,与农调队实际调查产量相比,相对均方根误差为 27.9%,符合度  $D$  为 0.75。

2) 小麦各种植区的区域模拟效果不同,种植面积最大的 2 区(占全国面积 39.9%),模拟相对均方

根误差最小(16.6%),两者的符合度也较好( $D=0.68$ ),1,7,10 区效果次之,相对均方根误差都在 20% 左右,符合度也都高于或接近 0.5;4,8,9 区则效果最差,相对均方根误差超过 35%。

3) 从全国 2206 个网格看,59.2% 的网格相对均方根误差在 30% 以内,其中相对均方根误差小于 15% 的占 26.3%,2 区网格相对均方根误差比其他区小,效果最好。

#### 参 考 文 献

- [1] 林而达,张厚宣,王京华. 全球气候变化对中国农业影响的模拟. 北京:中国农业出版社,1997.
- [2] 熊伟,许吟隆,林而达,等. 两种温室气体排放方案下我国水稻产量变化模拟. 应用生态学报,2005,16(1):65-69.
- [3] 气候变化与作物产量编写组. 气候变化与作物产量. 北京:中国农业科技出版社,1992.
- [4] 熊伟,居辉,许吟隆,等. 气候变化下我国小麦产量区域模拟研究. 中国生态农业学报,2006,14(2):167-170.
- [5] 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.
- [6] Carbone G J, Mearns L O, Mavromatis T. Evaluating CROPGRO-Soybean performance for use in climate impact studies. *Agronomy J*, 2003, 95:537-544.
- [7] Jagtap S S, Jones J. Adaptation and evaluation of the CROPGRO-soybean model to predict regional yield and production. *Agr Ecosyst Environ*, 2002, 93:73-85.
- [8] 马玉平,王石立,张黎,等. 基于升尺度方法的华北冬小麦区域生长模型初步研究. 作物学报,2005, 31(6): 697-705.
- [9] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, et al. The DSSAT cropping system model. *Europ J Agronomy*, 2003, 18: 235-265.
- [10] 金之庆,方娟,葛道阔,等. 全球气候变化影响我国冬小麦生产之前瞻. 作物学报,1994,20(2):186-197.
- [11] 江敏,金之庆,高亮之,等. 全球气候变化对中国冬小麦生产的阶段性影响. 江苏农业科学,1998,14(2):90-95.
- [12] 张宇,王石立,王馥棠. 气候变化对我国小麦发育及产量可能影响的模拟研究. 应用气象学报,2000,11(3):264-270.
- [13] Pohlert T. Use of empirical global radiation models for maize growth simulation. *Agr Forest Meteorol*, 2004, 126: 47-58.
- [14] Ritchie J T, Gerakis A, Suleiman A. Simple model to estimate field-measured soil water limits. *Trans ASAE*, 1999, 42:1609-1614.
- [15] Iglesias A, Rosenzweig C, Pereira D. Agricultural impacts of climate change in Spain: Developing tools for a spatial analysis. *Global Environ Chang*, 2000, 10: 69-80.
- [16] Xiong W, Holman I, Conway D, et al. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies. *Ecol Model*, 2008, 213: 365-380.

- [17] 居辉,熊伟,许吟隆,等. 气候变化对中国小麦产量的影响. 作物学报, 2005, 31(10): 1340-1343.
- [18] Hunt L A, Pararajasingham S, Jones J W, et al. GENCALC: Software to facilitate the Use of crop models for analyzing field experiments. *Agronomy J*, 1993, 85: 1090-1094.
- [19] 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.
- [20] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull Amer Meteor Soc*, 1982, 63: 1310-1313.
- [21] Xiong W, Lin E D, Ju H, et al. Climate change and critical thresholds in China's food security. *Clim Change*, 2007, 81: 205-221.
- [22] 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//Rosenzweig C, Boote K J, Hollinger S, et al. Impacts of El Nino and Climate Variability on Agriculture. ASA Special Publication, American Society of Agronomy, Madison, WI, 2001, 63: 33-56.

## The Performance of CERES-Wheat Model in Wheat Planting Areas and Its Uncertainties

Xiong Wei<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory for Agro-environment and Climate Change, Ministry of Agriculture PRC, Beijing 100081)

### Abstract

Crop models, coupling with climate data from climate models (GCMs, RCMs), are often employed to assess the impacts of climate change on crop production. However, there is a systematic mismatch of resolutions between climate models and crop models. Scaling up the crop model to regional scale is an appropriate method to resolve this problem. CERES-Wheat crop model is used to simulate the wheat yields of 1981—2000 at 50 km×50 km grid scale. Performances of this simulation in wheat planting areas are evaluated based on the comparison of simulated yields to census values. The relative root mean square error (RMSE) between simulated and census yields for whole China is 27.9%, and the agreement index is 0.75. Of 2206 simulation units (50 km×50 km grid), 59.2% show relative RMSE less than 30%, in which 26.3% less than 15%. The performances differ among regions. Smallest bias occurs in agro-ecological zone 2 (the largest wheat planting areas accounting for 39.9% of China's wheat planting area), with relative RMSE of 16.6% and  $D=0.68$ . To sum up, CERES-Wheat crop model is able to produce reasonable results temporally and spatially. It can provide simulation information for policy making at macro scale despite existing uncertainties. The uncertainties of this regional simulation are ascribed to simplification and limitations of crop models, the aggregated inputs in wheat planting area, and errors in dataset etc, which need to be addressed in future.

**Key words:** CERES-Wheat; regional simulation; performance; uncertainties