doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.031

不同空间分辨率驱动数据对作物模型区域模拟影响研究

何　亮[1]　侯英雨[1]　于　强[2,3]　靳　宁[2]

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100;
3. 悉尼科技大学生命科学学院, 悉尼 NSW 2007)

摘要: 为了探究不同空间分辨率驱动数据对作物模型区域模拟结果的影响,以中国北方冬麦区为研究区域,采用薄盘样条插值方法生成 4 种空间分辨率(5、10、25、50 km)的气象驱动数据,采用空间聚集方法构建相应空间分辨率的土壤参数集,以农业气象观测站数据为基础,通过泰森多边形方法扩展农田管理和作物模型品种参数,在以上基础上建立不同空间分辨率的 WOFOST 模拟平台,结合区域统计产量数据,诊断不同空间分辨率驱动数据对作物模型区域模拟的影响。研究表明:对于模拟的开花期、成熟期、潜在产量水平的地上生物量和穗质量、雨养产量水平的地上生物量和穗质量,4 种空间分辨率的区域平均值模拟结果之间无显著差异;高分辨率驱动数据下,模拟结果分布上有更多的极值。不同空间分辨率的模拟结果均能反映冬小麦生长的空间分布规律;与同区域统计产量相比,不同空间分辨率下 WOFOST 雨养产量可以解释观测产量年际变异的 75.4% ~85.4%。不同空间分辨率的潜在产量和雨养产量与气候因子相关分析表明,生育期辐射可以解释 16.6% ~29.6% 的潜在产量变化,生育期降水可以解释 13.3% ~17.8% 的雨养产量变化。高空间分辨率的数据存贮量和计算时间分别是低空间分辨率的 80 和 100 倍以上。研究结果可以为作物模型区域应用,尤其是空间分辨率的选择提供理论依据。

关键词: 空间分辨率; 驱动数据; WOFOST; 区域模拟; 不确定性

中图分类号: S126　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)02-0241-11

Influence of Different Resolutions Data on Regional Simulation of Crop Model

HE Liang[1]　HOU Yingyu[1]　YU Qiang[2,3]　JIN Ning[2]

(1. *National Meteorological Center*, *Beijing* 100081, *China*　2. *State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*
3. *School of Life Sciences*, *University of Technology Sydney*, *Sydney NSW* 2007, *Australia*)

Abstract: Crop model is constructed on the field scale. There are simulated errors due to the up-scaling when it is applied from filed scale to larger scale. Regional applications of crop model are becoming universal methodologies to explore the interactions between crop, climate and management in agriculture systems to provide policy and decision making for food production. A spatial resolution should be determined before using crop model to simulate yield in the regional scale. There is a dilemma in considering the spatial resolution. A high spatial resolution simulation needs more hardware resource and expensive computing cost while a coarse resolution simulation would result in loss of spatial detail of variability. Therefore, exploring the uncertainties of regional simulation of crop model due to different spatial resolutions is essential to application of crop model in large scale. A WOFOST regional simulation platform was constructed at different spatial resolutions to quantify the simulation errors by spatial resolution of model force data. Five spatial resolution meteorological data (5 km, 10 km, 25 km and 50 km) were interpolated by the thin plate smoothing spline method which was provided by the software ANUSPLIN. The corresponding resolution soil parameters were extracted from a fine resolution soil database by spatial aggregation. Spatial management and crop cultivar parameters were calculated from observed agro-meteorological sites and then extended to different resolutions by Thiessen polygon method. The simulated yields were compared at different resolutions and statistical yields, and it was found that

收稿日期: 2017-11-24　修回日期: 2017-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41705095)

作者简介: 何亮(1986—),男,高级工程师,博士,主要从事作物模型、农业气象和全球变化研究,E-mail: heliang_hello@163.com

the average value of anthesis, maturity date, total above ground production and yield at potential yield level and water limited level did not have significant difference. However, there were more extreme values in the high resolution. Each simulation of four resolutions can perform the spatial distribution of crop development. Compared with the regional statistical yields, simulated water limited yield at different resolutions contributed to the variation of statistical yields by 75.4% ~85.4%. The correlation analysis between potential yield and water-limited yield and climate factor indicated that the irradiation in the growing stage contributed to 16.6% ~29.6% of variability of potential yield, the precipitation in the growing stage contributed to 13.3% ~17.8% of variability of water-limited yield. The data storage capacity and computing cost at high resolution, i. e. 5 km was a hundred times more than coarse resolution, i. e. 50 km. The results provided theoretical and scientific basis for regional application, especially for selecting suitable spatial resolution for regional simulation.

Key words: spatial resolution; force data; WOFOST; regional simulation; uncertainty

0 引言

自 20 世纪 60 年代 de WIT[1] 进行叶片光合作用模拟研究以来,作物生长模拟逐渐成为农业资源规划、农业气象、农业信息和农业水土工程等学科的重要研究内容。随着人们对作物生理生态过程的深入理解和计算机技术的发展,考虑作物生长、大气、土壤、农田管理等因子相互作用的机理过程模型成为农业研究的重要工具之一[2-5]。作物模型动态、定量地模拟作物生长发育和产量形成,详细地刻画作物-大气-土壤的交互过程,在农业资源管理、农田管理决策、农业气象服务和农业风险评估等领域得到广泛应用。最近 20 年来,作物模型在气候变化对农业影响评估中发挥了重要作用[6-10]。

作物生长模型最初基于单点尺度开发,很多模型的应用也都基于单点模拟[11-13]。随着模型的发展与应用,作物模型逐渐需要扩展到区域尺度。例如,农业气候变化适应是在区域尺度开展的,相关政策决策者期待科学家回答“气候变化对中国农业有什么影响”,而非对一个田块的影响,回答这个问题需要把基于站点尺度的作物模型升尺度到空间。近年来,作物模型区域模拟研究受到国内外学者广泛关注[14-17],这是作物模型应用的发展趋势[18]。但在众多研究中,对作物模型空间升尺度不确定性的研究相对薄弱。

模型驱动数据一般包括气象、土壤、农田管理、作物品种 4 个方面。在模型从点到面的扩展中,由于作物品种、土壤类型和农田管理方式的区域差异,驱动数据难以直接获取,容易产生模型空间升尺度误差[19-20]。模型驱动数据空间分辨率的高低可能影响区域模拟结果。一般而言,高分辨率的驱动数据承载的空间异质性信息更丰富,模拟结果的空间异质性较好;低分辨率的驱动数据正好相反。近年来,国内外学者对驱动数据分辨率如何影响区域模拟进行了一些研究[21-26]。关于气象驱动数据,van BUSSEL 等[27]分析了 50、100 km 两种分辨率气象数据对德国冬小麦物候模拟的差异,认为 100 km 分辨率驱动数据模拟结果足以反映物候的空间异质性。也有一些研究认为,用高分辨率气象驱动数据模拟才能反映地面物候、产量等的空间异质性特征[25,28-30]。关于作物遗传参数,江敏等[31]比较了 CERES-Rice 模型作物遗传参数的空间分辨率对模拟结果的影响,认为在水稻亚区尺度,用一套参数的模拟结果就能满足需求,而不需要更细空间精度的多套遗传参数。关于土壤驱动参数,ANGULO 等[32]分别用 3 种比例尺的土壤信息驱动模型,发现不同比例尺土壤信息的模拟结果差异并不大。由上可见,站点驱动数据扩展到哪种空间分辨率更好并无定论。因此,揭示不同空间分辨率驱动数据对作物模型区域模拟结果的影响,可为作物模型在大区域应用时选择合适的分辨率提供理论支撑。

本研究以 WOFOST 模型为实例,以中国北方冬小麦种植区为研究区域,通过构建不同空间分辨率驱动数据的作物模型模拟平台,结合区域历史产量数据,诊断和分析不同空间分辨率驱动数据对作物模型空间模拟结果的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择北方冬麦区作为研究对象(图 1),根据国家气象中心农业气象业务指南[33],北方冬麦区主要包括河北大部、河南、山东、山西南部、江苏和安徽北部、陕西和甘肃部分地区,北方冬麦区小麦产量占全国总产的 80% 以上。研究区共包括 632 个国家级气象站点。数值高程模型(DEM)用来作为气象数据空间插值的协变量(图 1)。

1.2 WOFOST 作物模型

WOFOST 模型为荷兰瓦赫宁根大学 de WIT 学派开发的一个通用的作物模型[34]。通用作物模型,

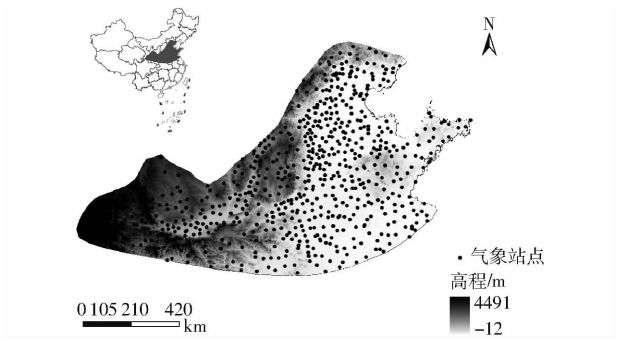

图 1　北方冬小麦区域及其 DEM

Fig. 1　Winter wheat region in North China and its DEM

即 WOFOST 模型中所有的作物都是按照同样的模型结构构建，通过改变不同的模型参数来反映不同的作物类型。WOFOST 模型包含了作物发育、CO_2 同化、呼吸作用、作物蒸腾、干物质分配、叶面积增长、干物质和叶片衰老和土壤水分平衡等过程[35]。WOFOST 模型可以模拟 3 种产量水平：光温限制的潜在产量水平、光温水限制的雨养产量水平和光温水肥限制的可获得产量水平。运行 WOFOST 模型需要气象、土壤、管理和作物品种 4 类驱动数据，气象数据主要包括太阳辐射、最高、最低气温、早晨的水汽压、2 m 高度的平均风速和降雨量。土壤参数主要为田间持水量、饱和含水率、凋萎系数、饱和导水率等。作物参数包括不同发育阶段所需的积温、光周期影响因子、不同生育期的最大光合速率、不同生育期的比叶面积、干物质分配系数、干物质和叶片的死亡率等。WOFOST 模型已经在国内外进行了大量的理论和应用研究[16,36-39]。本研究选择 WOFOST 模型作为模型空间化的实例，主要是考虑到 WOFOST 模型的土壤模块相对简单；其次 WOFOST 模型对大气与植被的交互作用，尤其是光合因素描述得较为详细，适合反映区域气候与作物的关系。

1.3　不同空间分辨率驱动数据构建

1.3.1　气象数据

北方冬小麦国家级气象站点共 632 个，研究时段选择 2010—2015 年共 5 个冬小麦生育期。根据气象站点日值气象数据，采用空间插值方法，将日值的站点数据生成不同空间分辨率的格点气象数据，考虑到站点数、空间面积的大小和空间插值误差，本研究选择 4 种空间分辨率，即：5、10、25、50 km。气象空间插值方法采用澳洲国立大学开发的 ANUSPLINE 工具，其主要算法是局部薄盘光滑样条算法[40-41]。它除了普通的样条自变量以外，还可以把高程等因素引入作为线性协变量。其基本的理论统计模型表达为

$$z_i = f(x_i) + \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_i + e_i \quad (i = 1, 2, \cdots, N) \tag{1}$$

式中　z_i——位于空间 i 点的因变量

x_i——d 维样条独立变量

f——估算的关于 x_i 的未知光滑函数

$\boldsymbol{y}_i$——p 维独立协变量

$\boldsymbol{b}$——y_i 的 p 维系数

e_i——期望值为 0、方差为 $w_i\sigma^2$ 的自变量随机误差，w_i 作为权重的已知局部相对变异系数，σ^2 为误差的方差，一般为常数

在本研究中，经度和纬度为样条自变量，高程为协变量。

1.3.2　土壤数据

土壤水力参数是作物模型模拟土壤水分平衡的重要参数，站点尺度的土壤参数数据主要来源于实地测量。本研究选择 DAI 等[42] 开发的 30″（约 1 km）空间分辨率全国土壤水力参数数据集和 SHANGGUAN 等[43] 开发的全国土壤特征空间数据集，这套土壤参数是目前国内唯一的高分辨率全国土壤水力参数数据集。在不考虑地下水影响的前提下，本研究把 1 km 的土壤数据通过空间聚集的方法生成 5、10、25、50 km 的空间土壤数据，主要涉及的土壤参数包括饱和含水率、凋萎系数、田间持水量、饱和导水率。

1.3.3　农田管理和品种参数

农田管理主要包括播种、施肥和灌溉等。本研究考虑 WOFOST 模型潜在产量水平和雨养产量2 个水平，不考虑空间施肥量和灌溉量。站点播种和出苗的时间根据北方冬小麦区 110 个农业气象站点 2010—2015 年的观测数据得到。首先根据观测播种和出苗时间计算出 5 a 平均播种和出苗时间，然后根据泰森多边形方法把站点的播种和出苗日期扩展到空间。泰森多边形法也称“最近邻点法”，是由荷兰气象学家 THIESSEN 提出的一种插值分析方法，该方法将整个数据平面按照已知的采样点分割成不同的多边形子区域，每个多边形构成由相应的采样点与周围领域点做垂直平分线，然后将垂直平分线依次连接组合而成，因此在泰森多边形内的点较之多边形外的任一点至已知点距离最近。获得播种和出苗的泰森多边形以后，通过矢量转栅格的方式，生成 4 种分辨率的空间播种和出苗参数。

WOFOST 模型的品种参数空间扩展方法与播种和出苗的空间扩展一致。本研究中从 5 年的农业气象观测站的物候计算得到站点的出苗到开花积温（TSUM1）、开花到成熟积温（TSUM2），通过泰森多边形方法将 2 个参数扩展至空间（图 2）。

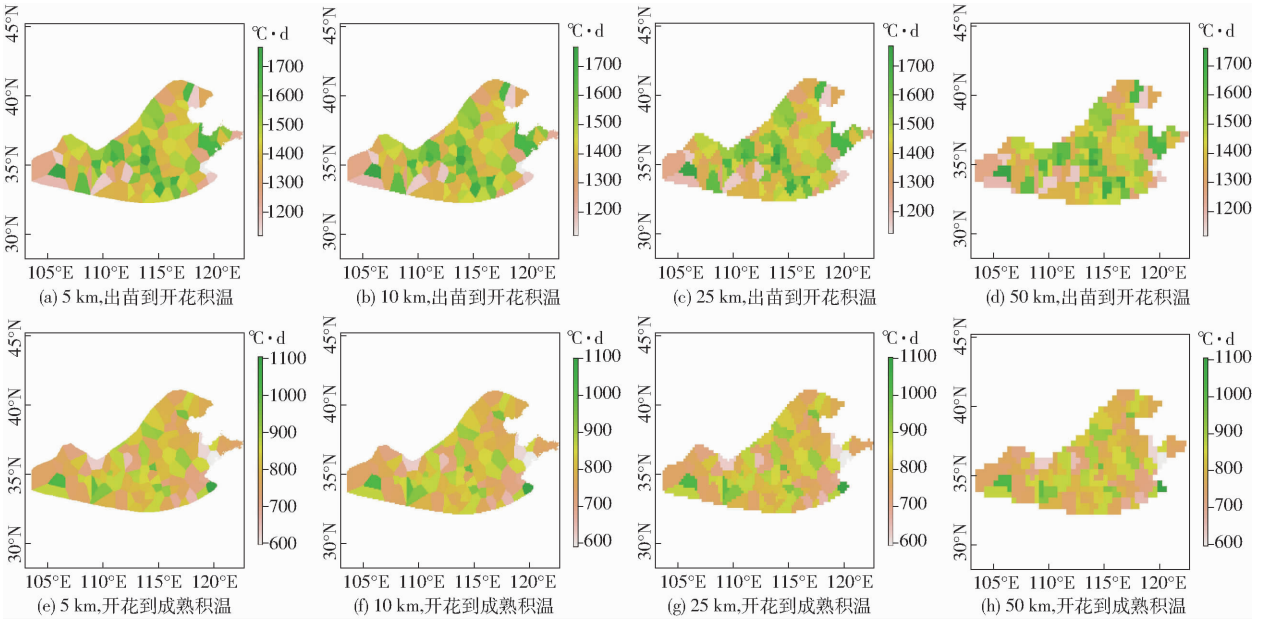

图 2 不同空间分辨率 WOFSOT 品种参数 TSUM1 和 TSUM2

Fig. 2 Spatial distributions of cultivar parameters of TSUM1 and TSUM2 in WOFOST at different spatial resolutions

1.4 其他模拟设置

WOFOST 模型其他的品种参数,例如最大光合速率、比叶面积等参考何亮等[37]的优化结果。模型模拟 2010—2015 年 5 个生长季节,4 种分辨率(5、10、25、50 km)的情景。由于北方冬小麦大部分播种前都进行灌溉,因此假设每个格点的初始土壤水分默认为达到田间持水量。

1.5 历史产量数据

2011—2015 年省级冬小麦产量数据来源于农业部种植业管理司(http://www.zzys.moa.gov.cn/),根据每个省的种植面积和产量加权计算得到整个北方冬小麦区域的 2011—2015 年冬小麦单产时间序列,产量数据用来验证不同空间分辨率的区域模拟精度。其次,利用冬小麦农业气象站 2011—2015 年的有地段观测产量的站点用来格点产量验证。

1.6 区域模拟系统框架

图 3 为本研究区域模拟系统框架图,共包含 4 层:第 1 层为站点尺度的气象、土壤、管理和品种参数;第 2 层为区域尺度的气象、管理和品种参数构建;第 3 层为 R 语言平台下的多分辨率作物模型模拟系统;第 4 层为模型输出与分析层。

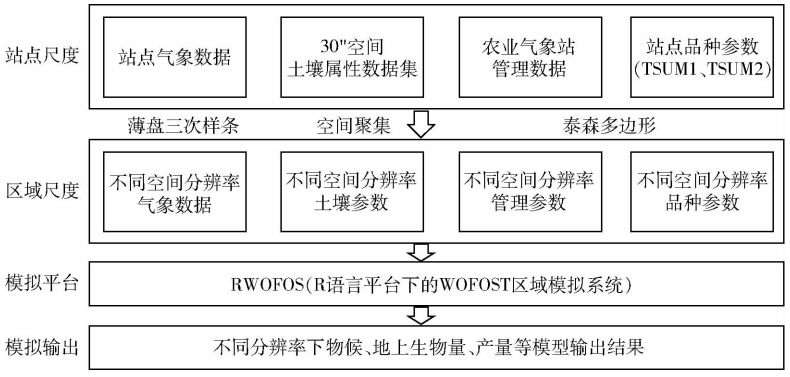

图 3 研究框架示意图

Fig. 3 Flow chart of research

2 结果与分析

2.1 作物物候模拟对比

图 4 为不同空间分辨率下 WOFOST 模型模拟的冬小麦开花期和成熟期的空间分布。由于 WOFOST 的物候期仅由温度和光周期因子决定,因此无论潜在产量水平还是雨养产量水平,开花期和成熟期是一致的。从空间分布看,不同分辨率的平均开花期和成熟期呈现南部比北部早,西北最晚;其次,高分辨率(5、10 km)的开花期和成熟期空间上还保留与图 2 类似的泰森多边形的痕迹,这是由于决定物候期的 2 个参数 TSUM1、TSUM2 是利用泰森

多边形构建的，低分辨率（25、50 km）的泰森多边形痕迹不明显，尤其对于 50 km，呈现出格点斑块化。图 5 为不同空间分辨率下开花期和成熟期的小提琴图和箱形图，黑点代表均值，黑色小横线代表中位数，由图 5 可知，不同分辨率开花期和成熟期的均值和中位数基本是一致的，但是从值的分布上看，高分辨率（5、10 km）高值的尾部分布较低分辨率长（图 5）。

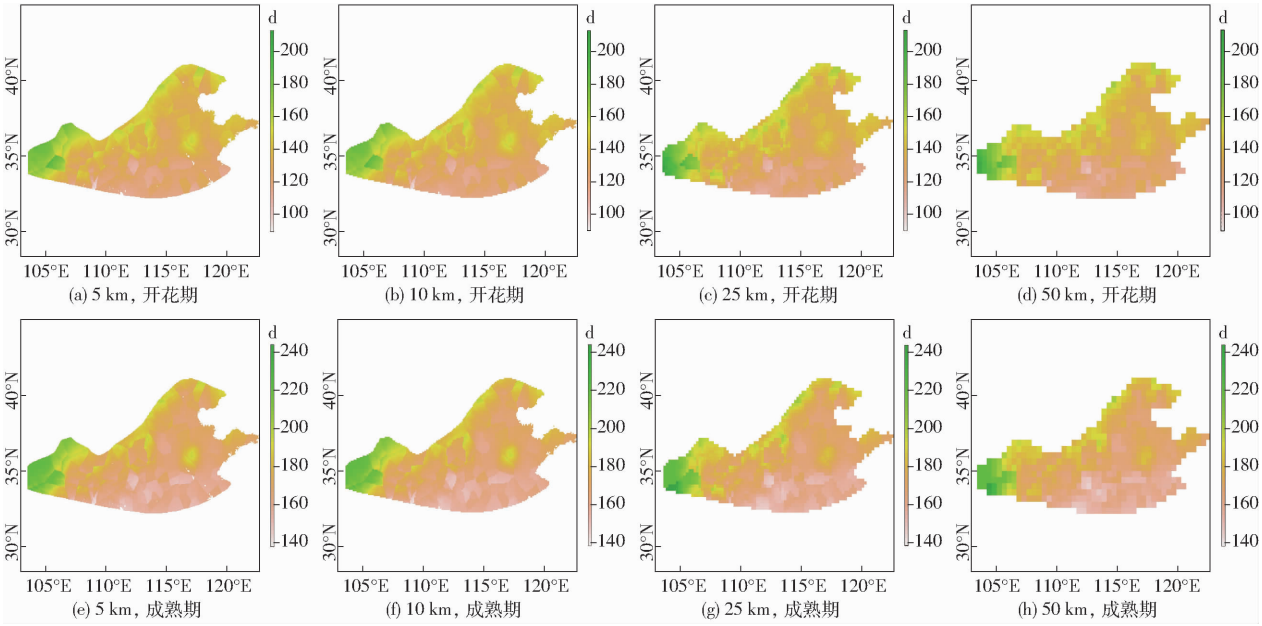

图 4　不同空间分辨率开花期和成熟期空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of anthesis and maturity dates at different resolutions

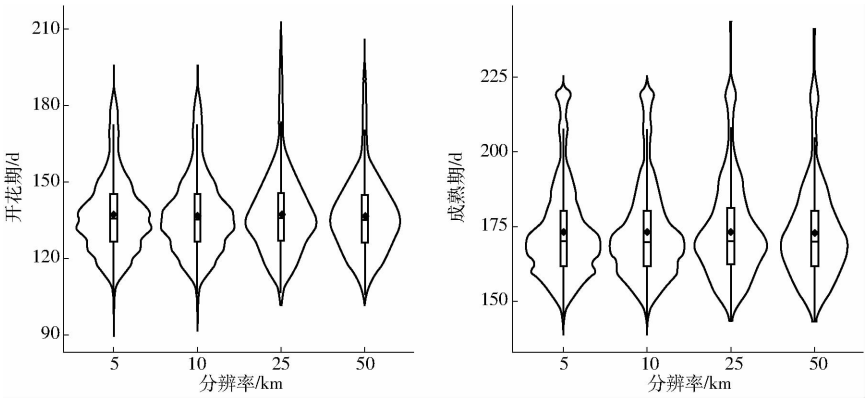

图 5　不同空间分辨率开花期和成熟期模拟对比

Fig. 5　Comparison of anthesis and maturity at different resolutions

2.2　潜在产量水平模拟对比

图 6 为潜在产量水平下不同空间分辨率驱动的 WOFOST 模型模拟的冬小麦地上生物量（TAGP）和籽粒质量（TWSO）模拟空间分布图。潜在产量水平反映的是光温生产潜力，由图 6 可知，无论是地上生物量还是籽粒质量，较大的区域分布在北部，西北、山东半岛等地潜在产量较大，南部相对较小。其次，与物候期的模拟结果类似，高分辨率（5、10 km）的地上生物量和籽粒质量空间上保留泰森多边形的痕迹，这也是由于品种参数 TSUM1、TSUM2 和播种参数是利用泰森多边形构建的，低分辨率（25、50 km）的泰森多边形痕迹不明显，尤其对于 50 km，呈现出格点斑块化。图 7 为地上生物量和籽粒质量的箱形图和小提琴图，不同分辨率下地上生物量和籽粒质量的均值和中位数无显著差异，北方冬小麦区 5 a 的平均潜在产量分别为 7 586.1、7 587.0、7 525.8、7 510.4 kg/hm^2；高分辨率（5、10 km）相对低分辨率（25、50 km）分布的尾部值较多，反映高分辨率有更多的极值。

2.3　雨养产量水平模拟对比

雨养产量水平下不同空间分辨率驱动的 WOFOST 模型模拟的冬小麦地上生物量和籽粒质量模拟空间分布如图 8 所示。与潜在产量水平相反，雨养产量水平下，地上生物量和籽粒质量不仅受到光温的限制，还受到水分的限制。从空间上看，无论是地上生物量还是籽粒质量基本呈现出北部比南部

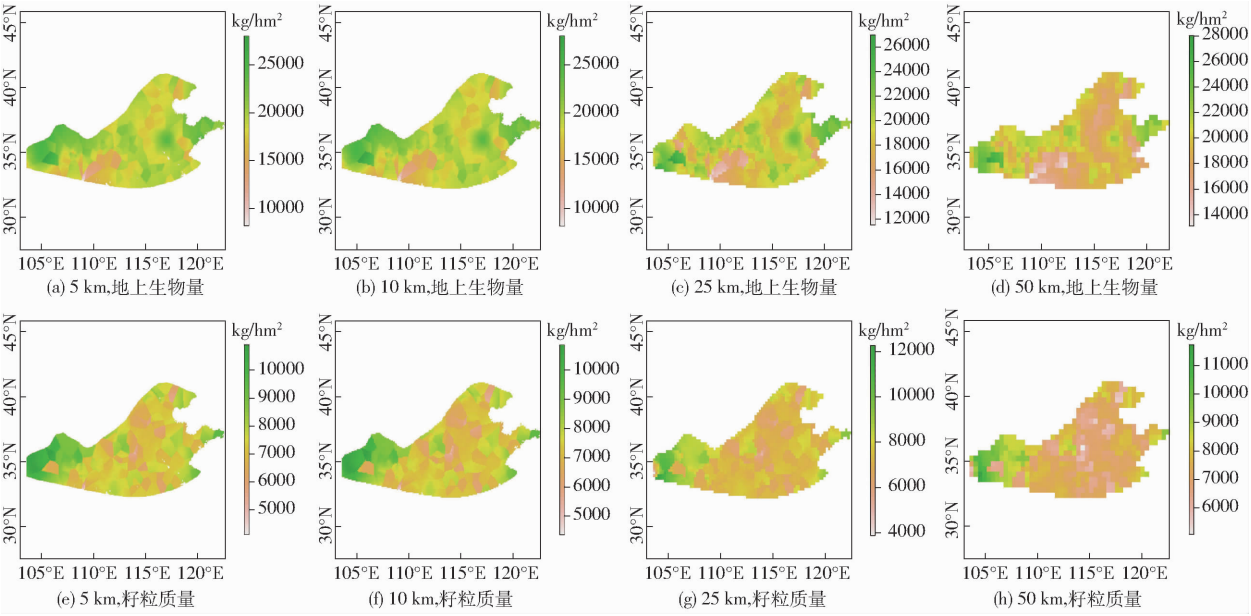

图 6 潜在产量水平下不同空间分辨率地上生物量和籽粒质量模拟空间分布

Fig. 6 Spatial distributions of TAGP and TWSO (total weight of storage organ) in potential production level at different resolutions

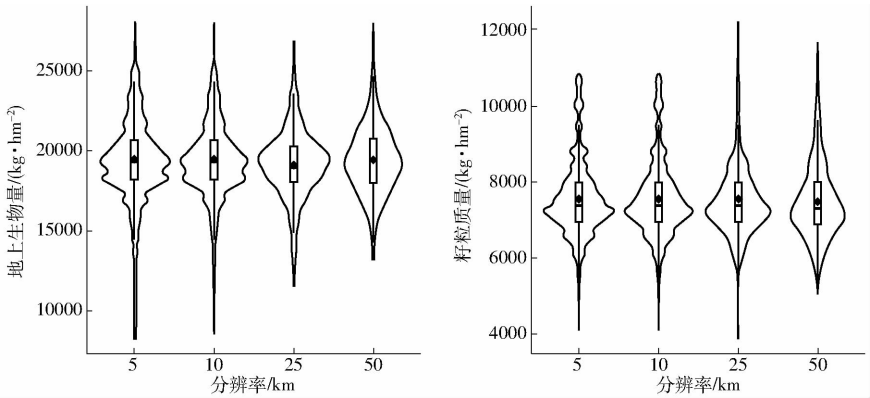

图 7 潜在产量水平下地上生物量和籽粒质量不同空间分辨率模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of TAGP and TWSO in potential production level at different resolutions

低的趋势;其次,高分辨率(5、10 km)的地上生物量和籽粒质量的泰森多边形痕迹较之物候期和潜在产量水平的结果弱,这是由于雨养产量的限制因素较多引起的,相对低分辨率(25、50 km)的模拟结果,仍有明显的格点斑块化(图 8c、8d、8g、8h)。在不同空间分辨率下,雨养产量水平下的地上生物量和籽粒质量的均值和中位数无显著差异(图 9),北方冬小麦区平均雨养产量分别为 3 560.9、3 595.8、3 609.3、3 676.2 kg/hm²;由图 9b 知,不同空间分辨率下籽粒质量分布与地上生物量差异较大,说明雨养产量下的收获指数在空间变异性较大。与 2.2 节中潜在产量和物候模拟结果类似,高分辨率下(5、10 km)模拟结果在尾部的值较低分辨率(25、50 km)也较多。

2.4 不同空间分辨率的模拟与观测结果对比及其与气象因子的关系

图 10a、10b 为近 5 年北方冬小麦区域的统计产量与区域平均潜在产量、雨养产量的对比,不同空间分辨率下,潜在产量可以解释观测产量的 25.1% ~ 28.7%,其中高分辨率(5 km)最高;雨养产量可以解释观测产量的 75.4% ~ 85.4%,高分辨率(5、10 km)比低分辨率高近 10 个百分点。说明雨养产量更能反映区域平均统计产量,且高分辨率能够更多地反映产量的年际变异。不同空间分辨率下,5 年平均潜在产量与观测产量的差值为产量差(Yield gap),分别是 2 403.2(5 km)、2 404.0(10 km)、2 342.8(25 km)、2 327.4 kg/hm²(50 km)。

图 10c、10d 为农业气象观测地段产量与相应不同分辨率格点的模拟产量对比图。由图可知,不同空间分辨率下,潜在产量可解释地段观测产量的 31.8% ~34.7%(图 10c),而相应的模拟雨养产量与地段产量无明显关系(图 10d)。农业气象观测的地段产量是当地管理措施水平下的观测产量,地段产量大部分灌溉较为充分,因此,模拟的潜在产量与

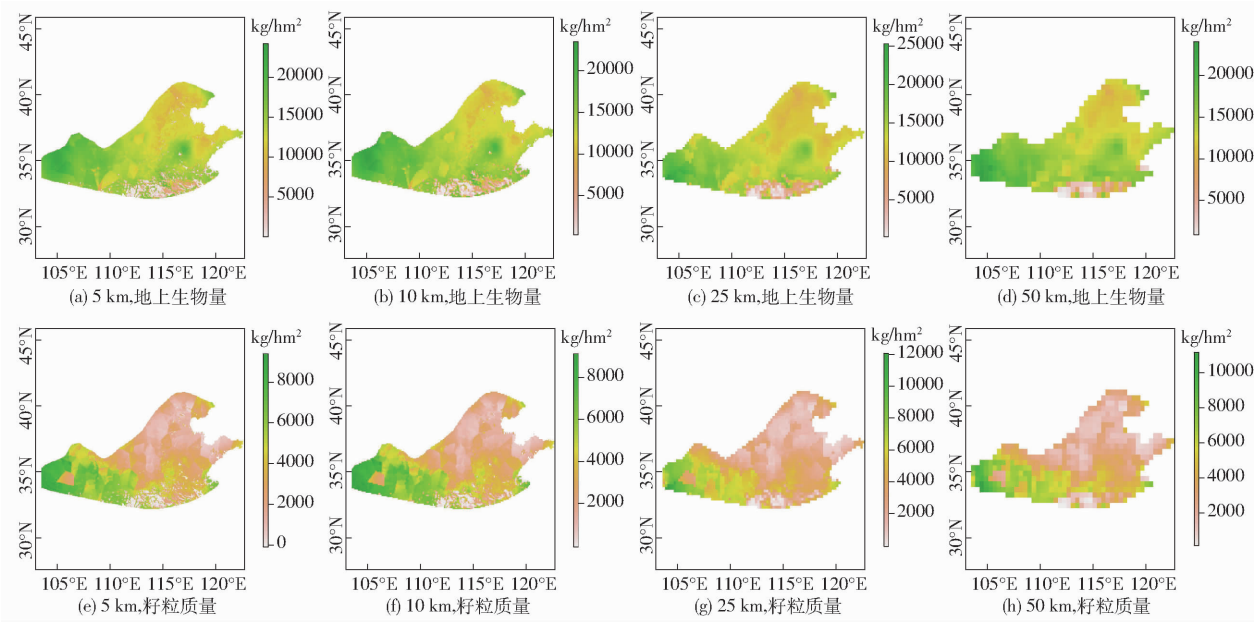

图 8　雨养产量水平下不同空间分辨率地上生物量和籽粒质量模拟空间分布

Fig. 8　Spatial distributions of TAGP and TWSO in water-limited production level at different resolutions

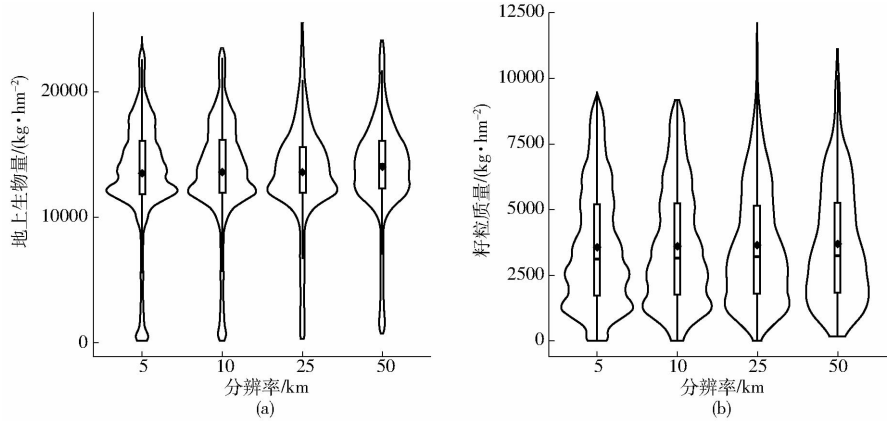

图 9　雨养产量水平下地上生物量和籽粒质量不同空间分辨率模拟结果对比

Fig. 9　Comparison of TAGP and TWSO in water-limited production level at different resolutions

观测地段产量相关性较好。

潜在产量主要受到光温限制，雨养产量受到水分限制，为了探究辐射、水分与产量的关系，在不同空间分辨率下，5 a 所有格点的潜在产量与生育期辐射量、雨养产量与生育期降水量之间关系的散点图如图 11 所示。从散点图看，不同空间分辨率下，生育期辐射与潜在产量的相关性很好，生育期辐射可以解释 16.6% ~29.6% 的潜在产量变化；生育期降水与雨养产量的相关性较好，生育期降水可以解释 13.3% ~17.8% 的雨养产量变化。

不同空间分辨率的计算效率和数据储存空间对比如表 1 所示，运行平台为 Intel i5 -4590，3.3 GHz，14 GB RAM，64 位系统，模拟 5 个生长季的结果，在数据的存储空间上，50 km 分辨率 5 a 的模型运行数据仅 0.08 GB，5 km 的模型运行数据达到 6.76 GB；在模型运行的时间上，5 km 分辨率运行 5 个生长季需要 142.2 h，是 50 km 的 100 多倍。从运行效率和存储空间上，高分辨率呈几何指数增加。

3　讨论

本研究利用 WOFOST 模型进行潜在产量和雨养产量 2 个产量水平的模拟，潜在产量由光温 2 个因子决定，雨养产量由光温水 3 个因子决定。对于 4 种不同的分辨率，相比潜在产量，模拟的北方冬小麦区域平均雨养产量与观测的平均产量相关性较大，雨养产量基本能够解释观测产量年际变异的 75.4% ~85.4%（图 10b）。说明在大尺度上，区域模拟能够基本反映区域的作物生长状况。4 种不同空间分辨率反映的区域产量差在 2 300 ~2 400 kg/hm² 之间，与目前现有冬小麦产量差的研究相比，比 WU 等[36] 用 WOFOST 模型计算的平均产量差 3 200 kg/hm²、LI 等[44] 利用 APSIM - Wheat 模型计算的产量差

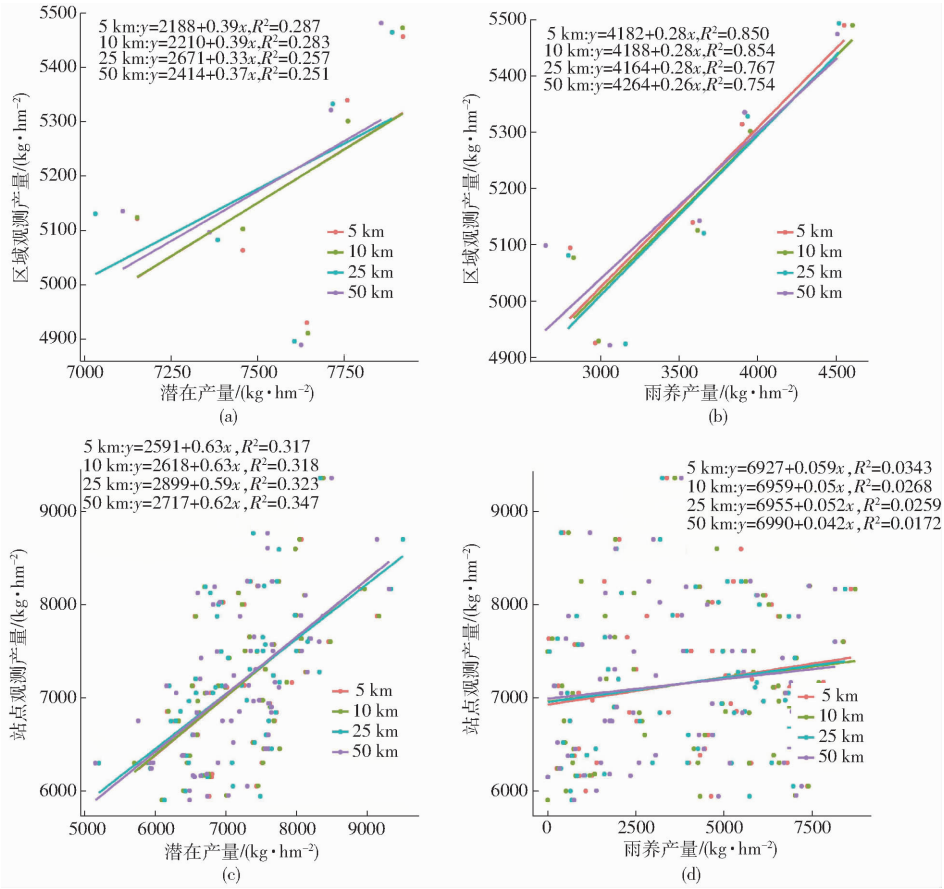

图 10 不同空间分辨率区域的平均潜在产量、雨养产量与区域统计产量对比以及不同分辨率格点的潜在产量、雨养产量与农气站地段产量对比

Fig. 10 Comparisons between average potential and water-limited yield and observed yield at different resolutions, between site observed yield and simulated potential and water-limited yield

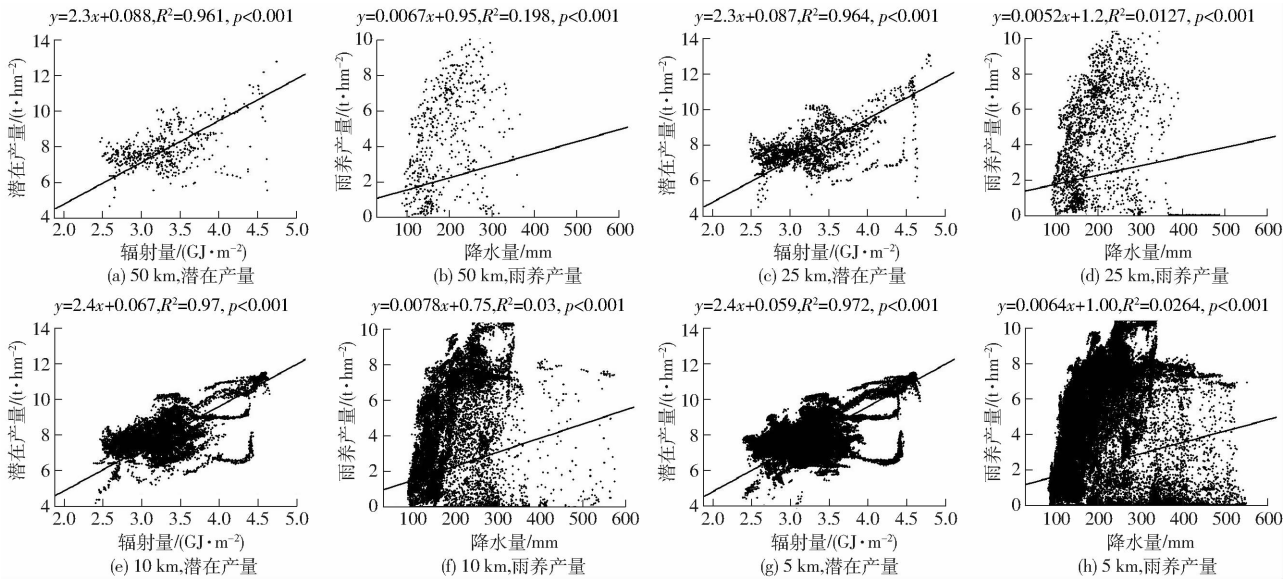

图 11 不同空间分辨率潜在产量与生育期总辐射量以及雨养产量与生育期降水量之间的关系

Fig. 11 Relationships between potential yield and irradiation in growth stage and between water-limited yield and precipitation in growth stage

3 000 kg/hm² 略低,与 LU 等[45]利用 EPIC 模型计算的华北平原产量差 2 700 kg/hm² 相当。造成与 WU 等[36]结果的差异主要是因为 WU 中结果利用的是潜在产量直接减去模型的雨养产量,而本文中是潜在产量减去实际观测产量。同 LI 等[44]的差异主要是由所用模型的不同导致的。

从不同空间分辨率的模拟结果差异来看,4 种不同分辨率对于大尺度的平均状况模拟结果差异不

表 1　不同空间分辨率模拟效率和数据存储空间对比

Tab. 1　Comparison of simulated efficiency and storage capacity of data at different resolutions

参数	50 km	25 km	10 km	5 km
运行时间/h	1.08	4.24	27.15	142.2
数据存储空间/GB	0.08	0.30	1.73	6.76

大,无论是区域平均物候(图 5)、平均潜在产量(图 7)和平均雨养产量(图 9)高分辨率和低分辨率的模拟结果无显著差异,但是从模拟结果的分布看,高分辨率具有更多的极端值(分布的尾部较宽)。这说明空间分辨率的提高并未改善区域平均值精度,但是在空间分布上,高分辨率更能反映一些极值情况。ZHAO 等[26]利用 SIMPLACE 模型模拟的 5 种分辨率的德国小麦和玉米结果也表明,从大区域平均状况上,不同分辨率的结果之间无显著差异,且也出现了高分辨率具有更多的极值。MO 等[46]利用 250 m、1 km、8 km 分辨率估算流域的 GPP 也表明,区域平均的 GPP 估算精度在不同分辨率的区别并不大。这表明,如果把作物模型应用到区域尺度,如果仅仅需要获取区域的平均状况,粗分辨率即可以反映区域的整体作物生长水平。相反,如果要得到区域空间异质性的细节,则需要较高的分辨率。模拟物候、地上生物量和产量的空间格局主要受到气候、品种参数、土壤参数的空间格局的影响。从潜在产量水平的空间分布上(图 6)看,整体趋势上北部较南部高,这主要是北部的辐射高导致;从雨养产量水平的空间分布(图 8)看,整体趋势北部较南部低,这是南部降水量较高导致。但是从模拟的结果空间地带上看,模拟结果还受到了品种参数的影响,由于品种参数由站点观测的物候反推得到,然后利用泰森多边形扩展到空间,所以模拟结果的空间分布也表现出泰森多边形的痕迹,例如图 4、6、8 的 50 km 分辨率尤为明显。

作物模型区域模拟中管理和品种参数的区域化是模型空间升尺度的关键过程之一。本研究中采样了以农业气象观测站为基准,获取站点的播种、出苗、出苗到开花、开花到成熟的积温信息后,结合泰森多边形方法把点的参数升尺度到空间。相比熊伟等[20]和吕尊富等[47]利用“生态分区法”——将全国小麦划分几个大区,一个大区用一套品种参数,本研究的泰森多边形法相比“生态分区法”考虑了更多农业气象观测数据,但也有相似之处即对区域进行了简化——利用站点的品种参数代表了一点区域的情况。本研究仅仅考虑了光温限制的潜在产量、光温水限制的雨养产量,并未考虑空间灌溉对产量的影响,北方冬小麦尤其是华北平原地区,灌溉十分频繁,要更真实地模拟冬小麦的空间分布,需要进一步将空间灌溉信息考虑进来,这也是本研究不足之处。真实的作物空间管理信息具有更大的空间异质性,在高分辨率的模拟过程中,获得真实的播种、灌溉等管理信息难度非常大,如何通过更好的方法进行管理和品种参数的升尺度是将来作物模型高精度模拟需要解决的难题之一[23]。其次,研究中的品种差异仅仅考虑了反映品种特性的积温参数,对于其他的关键品种参数,例如光合参数,未考虑其地带性差异,这可以在下一步借鉴 HU 等[48]的方法,利用遥感 fPAR 信息反演优化得到空间的光合参数。遥感信息与作物模型通过数据同化方式结合起来,将进一步提高作物模型参数估计和空间模拟精度,如黄健熙等[49]将 NDVI、FANG 等[50]将遥感叶面积指数、HUANG 等[51]将叶面积和 ET 产品结合到作物模型当中,显著提高了作物模型空间模拟精度。

作物模型区域模拟的关键问题是解决气象、管理和品种等驱动数据空间升尺度的问题。本研究从驱动数据空间分辨率的角度探究了不同分辨率对区域模拟精度的影响,还存在一些不足和待继续进一步研究的地方。如本研究的空间模拟未考虑作物真实空间分布。其次,从作物模型空间升尺度的方法上,本研究仅“先插值后模拟”——即先把驱动数据空间化后模拟的角度进行了升尺度,相比另一种空间升尺度方法“先模拟后插值”——即先把模型从站点进行模拟,再将模型结果进行空间插值,本研究未对升尺度方法异同进行探究。最后,从高分辨率模拟的储存资源和计算效率看,利用云计算和高性能计算方法改善高精度模拟的效率也是作为模型区域应用亟待解决的问题。

4　结束语

研究构建了 4 种不同空间分辨率(5、10、25、50 km)的驱动数据,以中国北方冬小麦区为研究区域,探究驱动数据空间分辨率对 WOFOST 模型区域模拟误差的影响。研究发现,从区域模拟的物候、潜在产量和雨养产量 2 个水平生物量和产量,4 种不同空间分辨率的结果无显著差别,但是高分辨率有更多的极值出现。高空间分辨率的数据存贮量和计算时间分别是低空间分辨率的 80 倍和 100 倍以上。这表明 WOFOST 模型在大区域应用时,根据合适的计算资源,选择较低的空间分辨率也可以满足空间模拟的需求。

参 考 文 献

1 de WIT D C. Photosynthesis of leaf canopies [R]. Wageningen, Netherland:Agricultural Research Reports, 1965.

2 HOLZWORTH D P, SNOW V, JANSSEN S, et al. Agricultural production systems modelling and software: current status and future prospects[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 72(C): 276 - 286.

3 高亮之. 农业模型研究与 21 世纪的农业科学[J]. 山东农业科学, 2001(1): 43 - 46.
GAO Liangzhi. Agricultural model research and agriculture science in the 21st century[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2001(1): 43 - 46. (in Chinese)

4 林忠辉, 莫兴国, 项月琴. 作物生长模型研究综述 [J]. 作物学报, 2003, 29(5): 750 - 758.
LIN Zhonghui, MO Xingguo, XIANG Yueqin. Research advances on crop models[J]. Acta Agronomica Sinica, 2003, 29(5): 750 - 758. (in Chinese)

5 潘学标. 作物模型原理[M]. 北京:气象出版社, 2003.

6 ROSENZWEIG C, ELLIOTT J, DERYNG D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(9): 3268 - 3273.

7 TAO Fulu, ZHANG Zhao, LIU Jiyuan, et al. Modelling the impacts of weather and climate variability on crop productivity over a large area: a new super-ensemble-based probabilistic projection [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(8): 1266 - 1278.

8 XIONG Wei, HOLMAN I, CONWAY D, et al. A crop model cross calibration for use in regional climate impacts studies [J]. Ecological Modelling, 2008, 213(3 - 4): 365 - 380.

9 YANG Xiaoguang, CHEN Fu, LIN Xiaomao, et al. Potential benefits of climate change for crop productivity in China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 208:76 - 84.

10 冯利平, 莫志鸿, 黄晚华, 等. 湖南省季节性干旱对双季稻生长及产量影响的模拟研究[J]. 作物学报, 2011, 37(5): 895 - 902.
FENG Liping, MO Zhihong, HUANG Wanhua, et al. A simulated study on the effects of seasonal drought on growth and yield of double cropping rice in Hunan Province[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(5): 895 - 902. (in Chinese)

11 ROSENZWEIG C, JONES J W, HATFIELD J L, et al. The agricultural model intercomparison and improvement project (AgMIP): protocols and pilot studies [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170(3): 166 - 182.

12 李军, 邵明安, 张兴昌, 等. EPIC 模型中作物生长与产量形成的数学模拟[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2004, 32(增刊): 25 - 30.
LI Jun, SHAO Mingan, ZHANG Xingchang, et al. Simulation equations for crop growth and yield formation in the EPIC model [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(Supp.): 25 - 30. (in Chinese)

13 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(12): 2379 - 2388.
YAO Ning, SONG Libing, LIU Jian, et al. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(12): 2379 - 2388. (in Chinese)

14 FANG Hongliang, LIANG Shunlin, HOOGENBOOM G, et al. Corn-yield estimation through assimilation of remotely sensed data into the CSM - CERES - Maize model [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(10): 3011 - 3032.

15 HUANG Jianxi, TIAN Liyan, LIANG Shunlin, et al. Improving winter wheat yield estimation by assimilation of the leaf area index from Landsat TM and MODIS data into the WOFOST model [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 204:106 - 121.

16 de WIT A J, van DIEPEN C A. Crop model data assimilation with the ensemble kalman filter for improving regional crop yield forecasts [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 146(1 - 2): 38 - 56.

17 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 589 - 598.
MO Xingguo, LIU Suxia, LIN Zhonghui, et al. Patterns of evapotranspiration and GPP and their responses to climate variations over the North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 589 - 598. (in Chinese)

18 ANTLE J M, JONES J W, ROSENZWEIG C E. Next generation agricultural system data, models and knowledge products: introduction [J]. Agricultural Systems, 2017, 155:186 - 190.

19 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[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 89 - 91.
LIU Buchun, WANG Shili, MA Yuping. A study on abroad challenges of scaling-up of crop models for regional applications[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(4): 89 - 91. (in Chinese)

20 熊伟, 林而达. CERES - Maize 区域应用效果分析[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 3 - 7.
XIONG Wei, LIN Erda. Performance of CERES - Maize in regional application[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 3 - 7. (in Chinese)

21 ANDERSON M C, KUSTAS W P, NORMAN J M. Upscaling and downscaling—a regional view of the soil-plant-atmosphere continuum [J]. Agronomy Journal, 2003, 95(6): 1408 - 1423.

22 ANGULO C, RÖTTER R, LOCK R, et al. Implication of crop model calibration strategies for assessing regional impacts of climate change in Europe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 170:32 - 46.

23 EWERT F, van ITTERSUM M K, HECKELEI T, et al. Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(1 - 2): 6 - 17.

24 HANSEN J W, JONES J W. Scaling-up crop models for climate variability applications [J]. Agricultural Systems, 2000, 65(1): 43 - 72.

25 HOFFMANN H, ZHAO G, ASSENG S, et al. Impact of spatial soil and climate input data aggregation on regional yield simulations[J]. Plos One, 2016, 11(4):e0151782.

26 ZHAO G, SIEBERT S, ENDERS A, et al. Demand for multi-scale weather data for regional crop modeling [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2015, 200: 156 - 171.

27 van BUSSEL L G J V, MÜLLER C, KEULEN H V, et al. The effect of temporal aggregation of weather input data on crop growth

models' results[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(5):607 - 619.
28 van BUSSEL L G J V, EWERT F, ZHAO G, et al. Spatial sampling of weather data for regional crop yield simulations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 220:101 - 115.
29 ZHAO G, HOFFMANN H, van BUSSEL L G J, et al. Effect of weather data aggregation on regional crop simulation for different crops, production conditions, and response variables [J]. Climate Research, 2015, 65:141 - 157.
30 ZHAO G, HOFFMANN H, YELURIPATI J, et al. Evaluating the precision of eight spatial sampling schemes in estimating regional means of simulated yield for two crops [J]. Environmental Modelling & Software, 2016, 80:100 - 112.
31 江敏, 金之庆. CERES - Rice 模型区域应用中遗传参数升尺度的一种方法[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(2): 172 - 178.
JIANG Min, JIN Zhiqing. A method to upscale the genetic paramters of CERES - Rice in regional applications[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(2): 172 - 178. (in Chinese)
32 ANGULO C, GAISER T, RÖTTER R P, et al. 'Fingerprints' of four crop models as affected by soil input data aggregation[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 61:35 - 48.
33 毛留喜, 魏丽. 大宗作物气象服务手册[M]. 北京:气象出版社, 2015.
34 SUPIT I, HOOIJER A A, van DIEPEN C A. System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Volume 1: theory and algorithms[R]. CGMS Publication, 15956, EUR 15956 EN, the Office for Official Publications of the E.U., Luxembourg,1994.
35 邬定荣, 欧阳竹, 赵小敏,等.作物生长模型 WOFOST 在华北平原的适用性研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(5): 594 - 602.
WU Dingrong, OUYANG Zhu, ZHAO Xiaomin, et al. The applicability research of WOFOST model in North China Plain[J]. Acta Phytoecological Sinica, 2003, 27(5): 594 - 602. (in Chinese)
36 WU Dingrong, YU Qiang, LU Changhe, et al. Quantifying production potentials of winter wheat in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 24(3):226 - 235.
37 何亮, 侯英雨, 赵刚, 等. 基于全局敏感性分析和贝叶斯方法的 WOFOST 作物模型参数优化 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 169 - 179.
HE Liang, HOU Yingyu, ZHAO Gang, et al. Parameters optimization of WOFOST model by integration of global sensitivity analysis and Bayesian calibration method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 169 - 179. (in Chinese)
38 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Ⅰ.潜在生产水平[J]. 作物学报, 2005, 31(6): 697 - 705.
MA Yuping, WANG Shili, ZHANG Li, et al. A preliminary study on a regional growth simulation model of winter wheat in north China based on scaling-up approach Ⅰ. potential production level[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(6): 697 - 705. (in Chinese)
39 黄健熙, 贾世灵, 马鸿元, 等. 基于 WOFOST 模型的中国主产区冬小麦生长过程动态模拟 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 222 - 228.
HUANG Jianxi, JIA Shiling, MA Hongyuan, et al. Dynamic simulation of growth process of winter wheat in main production areas of China based on WOFOST model[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 222 - 228. (in Chinese)
40 HUTCHINSON M F. The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation [J]. Data Assimilation Systems, 1991, 27:104 - 113.
41 刘志红, LI Lingtao, McVICAR T R,等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008, 34(2): 92 - 100.
LIU Zhihong, LI Lingtao, McVICAR T R, et al. Introduction of the professional interpolation sofeware for meteorology data: ANUSPILIN[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(2): 92 - 100. (in Chinese)
42 DAI Yongjiu, SHANGGUAN Wei, DUAN Qingyun, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling[J]. Journal of Hydrometeorology, 2013, 14(3):869 - 887.
43 SHANGGUAN Wei, DAI Yongjiu, LIU Baoyuan, et al. A soil particle-size distribution dataset for regional land and climate modelling in China[J]. Geoderma, 2012, 171 - 172(1):85 - 91.
44 LI Kenan, YANG Xiaoguang, LIU Zhijuan, et al. Low yield gap of winter wheat in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 59:1 - 12.
45 LU Changhe, FAN Lan. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 143(1):98 - 105.
46 MO Xingguo, LIU Suxia, CHEN Dan, et al. Grid-size effects on estimation of evapotranspiration and gross primary production over a large Loess Plateau basin, China[J]. Hydrological Sciences Journal, 2009, 54(1):160 - 173.
47 吕尊富, 刘小军, 汤亮,等. 基于 WheatGrow 和 CERES 模型的区域小麦生育期预测与评价[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6):1136 - 1148.
LÜ Zunfu, LIU Xiaojun, TANG Liang, et al. Regional prediction and evaluation of wheat phenology based on the WheatGrow and CERES models [J]. Scientific Agricultura Sinica, 2013, 46(6):1136 - 1148. (in Chinese)
48 HU Shi, MO Xingguo, LIN Zhonghui. Optimizing the photosynthetic parameter Vcmax, by assimilating MODIS - fPAR, and MODIS - NDVI with a process-based ecosystem model[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014, 198 - 199:320 - 334.
49 黄健熙, 罗倩, 刘晓暄,等. 基于时间序列 MODIS NDVI 的冬小麦产量预测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(2): 295 - 301. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20160239&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.039.
HUANG Jianxi, LUO Qian, LIU Xiaoxuan, et al. Winter wheat yield forecasting based on time series of MODIS NDVI [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2):295 - 301. (in Chinese)
50 FANG Hongliang, LIANG Shuilin, HOOGENBOOM G. Integration of MODIS LAI and vegetation index products with the CSM - CERES-maize model for corn yield estimation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32:1039 - 1065.
51 HUANG Jianxi, MA Hongyuan, SU Wei, et al. Jointly assimilating MODIS LAI and ET products into the SWAP model for winter wheat yield estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 4060 - 4071.