引文格式：张清燕, 邱春霞, 淮贺举, 等. 基于GeoSim与AquaCrop模型的作物产量批量化模拟方法研究[J]. 地理空间信息, 2023, 21(5): 14-17. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.05.004

基于GeoSim与AquaCrop模型的作物产量批量化模拟方法研究

张清燕[1,2]，邱春霞[1]，淮贺举[2]，李存军[2]
（1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院，陕西 西安 710054；2. 北京农业信息技术研究中心，北京 100097）

摘　要：AquaCrop模型可模拟作物产量，以响应可用水量；但当进行大范围或长期模拟时，存在一定的局限性。鉴于此，借助地理空间仿真工具，模拟北京市2010—2019年冬小麦的产量与灌溉用水量，以探讨该工具对于AquaCrop长期模拟的有效性和适用性。结果表明，基于GeoSim工具的AquaCrop模型应用效果较好。该工具简化了模型生成项目文件和管理输出文件的任务，160次模拟仅用时11 s，提高了模拟效率；且实现了模拟结果的空间可视化，将AquaCrop模型应用扩展到时空分析尺度。研究结果可为AquaCrop模型区域尺度上的时空分析提供一个新思路，在一定程度上提高农业水资源管理效率。

关键词：AquaCrop模型；GeoSim工具；产量；灌溉用水量
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）05-0014-04

Research on Crop Yield Batch Simulation Method Based on GeoSim and AquaCrop Model

ZHANG Qingyan[1,2], QIU Chunxia[1], HUAI Heju[2], LI Cunjun[2]
(1. School of Surveying and Mapping Science and Technology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China)

Abstract: AquaCrop model is very useful for simulating crop yield in response to available water. However, AquaCrop model has some limitations in large-scale or long-term simulation. Therefore, we used geospatial simulation tool to simulate the winter wheat yield and irrigation water consumption in Beijing from 2010 to 2019, and discussed the effectiveness and applicability of this tool for AquaCrop long-term simulation. The results show that the application effect of AquaCrop model based on GeoSim is better. This tool simplifies the tasks of generating project files and managing output files, and only runs 11 seconds for 160 simulations, which improves the efficiency of simulation. The tool realizes the spatial visualization of simulation results, and extends the application of AquaCrop model to the spatio-temporal analysis scale. This study can provide a new idea for spatial-temporal analysis of AquaCrop model on regional scale, and improve the efficiency of agricultural water resources management to a certain extent.

Key words: AquaCrop model, GeoSim tool, yield, irrigation water consumption

随着人口膨胀与资源消耗的不断加剧，农业发展面临着多重挑战[1]。作物生长模型作为管理和调控现代农业技术的重要工具[2]，考虑了各种限制因素，模拟了作物在不同环境和管理条件下的生长[3]，在农业生态研究中具有重要作用。定量预测作物生长系统并对其进行优化管理是关系粮食生产安全的核心内容[4]。为科学化种植管理，国际粮农组织（FAO）开发了一款免费的水分生产力作物生长模型AquaCrop，力求在准确性、模型稳定性与复杂性之间寻求平衡[5]，并对世界各地不同环境下的不同作物进行了广泛测试，如Hsiao T C[6]等利用模型对玉米进行了一系列校准与验证。AquaCrop模型是基于地理点或同质地区的环境模拟模型，可模拟景观中某点的可用水量、气体通量、养分动态或作物生长发育过程[7]。模型模拟所需的数据包括气象数据、作物生长数据、土壤数据和土地管理实践数据等[8]，这些数据在时间和空间上通常是可变的，需要调整合适的模型输入参数，以反映不同位置状况。然而进行大范围或长期仿真时，为符合模型输入输出文件格式，对地理空间数据的管理与操作非常繁琐。FAO基于AquaCrop开发了一个插件程序AQuaCrop-saV60，即在AquaCrop标准用户界面中运行一个预定义的项目列表，虽然可简化多种模拟的运行，但需手

收稿日期：2021-12-02；修回日期：2022-01-10。
项目来源：北京市农林科学院青年基金资助项目（QNJJ202126）。
第一作者简介：张清燕（1997—），硕士研究生，主要从事作物水足迹方面的研究，E-mail: 1606813943@qq.com。

动创建模型输入文件和项目文件，对于大范围模拟仍需很长时间。因此，为简化处理地理空间数据任务，并将地理空间数据传递给模型或使模拟结果在空间上可视化，许多学者进行了开发，如Lorite I J[8]等设计了AquaData和AquaGIS软件，简化了模型生成项目文件和管理输出文件的任务，但对软硬件的要求较高，无法进行极端条件下的模拟；Throp和Broson开发了一种开源地理空间仿真工具GeoSim。该工具是QGIS中的一个插件，是与模型无关的基于GIS的建模系统，功能独立于特定的建模系统，可用于各种作物生长模型。与该工具一起使用时，模型需满足以下基本条件：模型是基于点的模拟，需读取输入数据并将输出结果写入ASCII文件且可从命令行进行调用。目前DSSAT、AquaCrop等模型可与该工具结合管理多个空间位置的仿真，以解决各种环境问题。

以往利用AquaCrop模型模拟农作物产量和水资源消耗量时，通常进行的是少量或小区域范围的模拟，采用手动键入模型输入参数的方式，准备工作较繁琐。对于模拟2010—2019年北京市冬小麦的产量和灌溉水，即长期模拟，标准版AquaCrop模型存在一定局限性。因此，本文借助GeoSim工具，探讨该工具基于AquaCrop模型进行批量化处理和可视化的性能，验证其对于长期模拟的适用性。

1　研究方法

1.1　AquaCrop模型

AquaCrop模型为水驱动生长模型，主要侧重于模拟可获得的作物生物量和产量，以响应可用水量，模拟的是作物在不同灌溉条件下耗水量与产量之间的关系[9]。AquaCrop模型直接将作物产量与用水联系起来，通过归一化的水分生产率估算实际作物蒸散产生的生物量，即其生长引擎的核心[10]。模型每天运行一次，在热时间或日历时间上执行。热量单位的积累定义了作物的物候。作物生产力水平通过生物量与收获指数获得，生物量与作物蒸腾密切相关，通过土壤水分平衡模拟作物蒸腾，将冠层覆盖度替代叶面积指数作为计算蒸腾的基础，并将土壤蒸发从蒸腾中分离出来，使模型的模拟更加真实，扩展了模型的外推能力[11]。模型的直观性很强，可利用较少的参数对作物生产力进行更有效、便捷的预测。

1）输入文件。AquaCrop模型仅需少量输入数据来反映作物水分响应机制，可将模型的输入文件集成为一个多次运行项目文件（.PRM）。每个多次运行项目文件包含12类输入文件，如表1所示，其中气象数据来源于中国气象数据网（https://data.cma.cn/）北京市2010—2019年18个气象站点。对于地下水文件，由于北京市种植区地下水位不浅，因此无需指定地下水位。根据田间实测数据，采用OTA法对冬小麦的非保守参数进行调参验证[12]，得到相应的模型输入参数。所有输入文件可通过AquaCrop标准用户界面进行创建和更改。进行长期模拟时，这些输入文件和项目文件的生成操作将非常繁琐。

表1　AquaCrop模型项目文件与输入文件

文件名	扩展名	主要输入
Project	.PRM	生长周期与模拟期时间、输入文件名和路径、作物参数
Climate	.CLI	温度、参考作物腾发量、降雨和CO_2文件名
Temperature	.TMP	每日最高、最低温度
Reference ET(ET_0)	.ET_0	使用Penman-Monteith方程和FAO-56准则[13]计算ET_0
Rain	.PLU	每日降雨数据
Atmospheric CO_2	.CO_2	MaunaLoa.CO_2
Crop	.CRO	品种、作物物候期、种植密度、最大有效根深
Irrigation	.IRR	灌溉制度、灌溉方法
Management	.MAN	施肥水平、田间覆盖、地表径流
Soil	.SOL	土层数、层深、土壤类型、田间持水量、饱和导水率
Groundwater	.GWT	地下水深度、水质变化
Initial conditions	.SWO	初始土壤水、盐分含量
Off-season onditions	.OFF	生长周期外的覆盖物存在和灌溉事件

2）输出文件。当在AquaCrop模型主界面启动模拟时，可指定模拟周期的步长，模拟结果被绘制成各种图表，也可数字化显示。默认情况下，输出文件储存在AquaCrop文件夹的OUTP子目录中。模拟结果分为每日数据、季节性结果和模拟结果评估，其中每日数据的输出文件包括气候输入变量、作物生长与生产、在土壤剖面不同深度的土壤水含量与土壤盐分、净灌溉需求等[14]；模拟结果评估是对冠层覆盖度、地上生物量与土壤含水量的模拟评估，可对结果进行图形或数值显示，以进一步处理与分析。

1.2　GeoSim工具

GeoSim工具是作为QGIS的插件开发的，目的是提供一个接口，使地理空间数据运行基于点的环境模拟。由于GeoSim是开源代码，因此对其改进和扩展将更灵活开放。GeoSim提供了5个工具，各工具都有自己的用户界面，可处理所需的输入，并显示仿真结果。GeoSim工具的一个重要的功能是可与任何基于点的环境模拟模型的输入输出文件进行交互，以优化模

型参数来减少误差。该工具需在GeoSim外部创建基础层多边形，GeoSim将模型所需的地理空间数据从基础层多边形传递到模型输入文件，进行自动仿真，并将仿真结果的关键信息传回到GIS数据库。它利用模板文件（.gst）与模型输入文件进行交互，通过指令文件（.gsi）读取模型输出数据。对于AquaCrop模型的多次仿真运行，手动输入庞大的输入文件是不可行的。该工具可帮助用户创建适当的AquaCrop模型输入文件，从而大大缩减任务所需时间。

1）创建模板文件。模板文件实际是模型所需输入文件的副本，即高度特定于AquaCrop模型，需要手动创建模板文件。在模板文件中，需构造唯一代码放置每个地理空间数据值。模拟北京市2010—2019年冬小麦产量与灌溉水需求，准备所有输入文件的模板文件较繁琐，若仅将其作为项目文件的副本，项目文件包含模型所需的所有输入文件，则模板文件中的唯一代码就是放置地理空间数据值中输入文件名称的位置，可减少空间变量的输入。在为空间单位运行AquaCrop模型前，GeoSim将在创建的模板文件中搜索每个唯一代码，并通过基础层多边形中的输入文件名称来覆盖每个唯一代码。

2）创建指令、控制文件。必须为每个包含空间数据的模型输出文件手动创建一个指令文件，AquaCrop模型输出的季节性结果包含所需的产量与灌溉水需求数据。指令文件指导GIS如何读取输出文件，并提取输出文件中所需的数据值分配给基础层多边形的适当属性。控制文件（.gst）指示GIS如何利用模板文件和指令文件进行模拟。对于模板文件，提供了每个唯一代码及其与相应的GIS属性字段之间的关系；对于指令文件，提供了GIS属性字段和从输出文件读取的数据值类型之间的关系。控制文件的格式是特定于GeoSim的，利用GeoSim工具中的Control File Creator来创建。

3）程序运行。模板、指令和控制文件准备完成后，GeoSim通过Simulation Controller工具读取创建的文件和输入数据，促进GIS数据库与作物模型文件之间的数据共享。由于模板文件是基于模型项目文件创建的，对信息的访问会更快。然后，启动AquaCrop插件程序，对基础层多边形中的所有要素进行仿真，GeoSim从模型的输出文件中读取模拟的冬小麦单产值与灌溉水需求量，并将这些数据返回到基础层属性表。模板、指令和控制文件的正确创建对于GeoSim工具仿真至关重要。

2 研究结果与分析

2.1 AquaCrop模型的适用性

本文采用2017—2018年与2018—2019年田间实验数据驱动模型，以实测的地上干生物量与产量数据为目标函数，对AquaCrop模型进行参数的校正与验证。虽然模型提供了作物的部分生理参数（该参数不随种植时间、地理位置、作物品种和管理措施的变化而变化，称为保守参数），但在应用模型时需对非保守参数进行校正。以模型自身提供的参数值为初赋值，采用OTA法对非保守参数建立模拟控制文件，并进行敏感性分析，不断调整各参数值，直至模拟值与实测值相吻合。模型部分调参结果如表2所示。

由2018—2019年冬小麦在生长阶段的植被覆盖度（CC）与地上干生物量（B）的模拟结果可知，对于CC来说，R^2=0.961 1，EF=0.91，d=0.98；对于B来说，R^2=0.966 1，RMSE=0.8，EF=0.93，d=0.98，

表2 AquaCrop模型本地化作物参数

参数	描述	单位	波动范围	取值
mat	从播种到成熟时长	GDD	1 750~3 250	2 497
eme	从播种到出苗时长	GDD	105~195	168
CC_0	初始冠层覆盖度	%	0.10~10.00	6.51
CC_x	最大冠层覆盖度	%	11~100	100
num	每hm^2植株数	–	2 450 000~4 550 000	4 342 695
sen	从播种到开始衰老时长	GDD	1 313~2 438	1 343
hilen	结产过程中收获指数建立时长	GDD	603~1 121	908
flo	播种到开花时长	GDD	1 142~2 122	1 266
flolen	开花期时长	GDD	192~356	270
rootdep	从播种到最大根深时长	GDD	1 118~2 076	1 228
remd	最大有效根深	m	0.10~4.00	1.2
wp	归一化水分生产率	g/m^{-2}	10.5~19.5	15
hi	参考收获指数	%	35~85	81

表明模型参数校正结果精度较高。

2.2　GeoSim应用结果与优势

利用GeoSim模拟的2010—2019年北京市冬小麦各区平均产量与平均净灌溉需求如图1所示，通州区的平均产量最高，为5.638 t/hm^2，平均净灌溉需求也占比最高，为3 394.45 m^3/hm^2；东城区、西城区与石景山区未种植小麦，默认单位产量与冬小麦净灌溉需求为0。GeoSim将地理空间信息从多个数据源缩放到一个基础层多边形上，缩减了模型生成项目文件和管理输出文件的时间，通过提供一种将基础层多边形中空间数据值放置在项目文件适当位置的机制来加快模型的仿真速度。尽管需要额外的时间来设置GeoSim所需的模板、指令和控制文件，以便在GIS数据库与模型输入输出之间交换数据，但其模板文件的参数交换机制已大大缩减了模型的准备工作。对于160个AquaCrop模拟，GeoSim在很短的时间内将两种参数交换到模型项目文件中，处理长期仿真仅需11 s。对于AquaCrop模型，若使用插件程序，则需在标准界面中创建多项目文件，耗时较长且在重复选择文件时会出现错误。本文针对的是AquaCrop模型的长期模拟，对于大范围的模拟，仿真持续时间会受到更大影响。

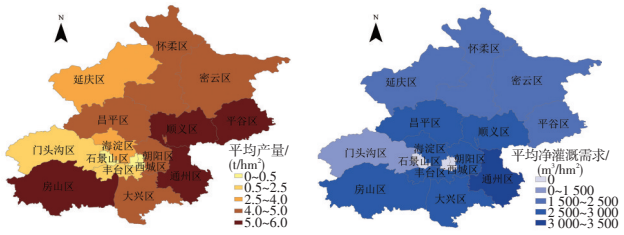


图1　2010—2019年北京市平均产量与净灌溉需求

AquaCrop插件程序单独对比GeoSim工具，只是适当缩短了在标准窗口中选择数据的时间，由于需为每个项目单独提供输入文件，当模拟领域较大或管理措施较多时，很难处理所有数据。AquaData和AquaGIS软件对比GeoSim工具，只能实现特定于AquaCrop模型的运行，且对软硬件有很严格的要求，需在计算机上安装与.NET framework唯一相关且至少为128 MB内存和两个处理器才能运行该软件，限制了模型的适用性。GeoSim工具使得地理空间工具开发与仿真工具脱钩，一种工具的更新不会导致另一种工具的不兼容。AqauCrop-OS模型对比GeoSim工具，需要一定的编程基础，且对输入文件的要求较高，该过程比较繁琐，限制了工具的适用性。AquaCrop-GIS对比GeoSim工具，也能进行批量化模拟，通过创建Excel文件来驱动AquaCrop模型，并为所有项目的运行提供输入组合，因此进行了许多不必要的模拟。以本文研究为例，运用AquaCrop-GIS模拟160个空间单元比GeoSim工具多运行100次，几乎多了1.5倍。因此，GeoSim对于AquaCrop的应用具有更高的模拟效率和更好的优势，其通用性、灵活性和开放性使模型模拟更加有效。

3　结　语

GeoSim是一种新颖的地理空间处理工具，可有效汇总研究区域的地理空间数据，以便使用模型进行空间分析。GeoSim通过基于点的环境模型，可轻松执行必要的地理空间数据处理任务，并使用地理处理结果进行空间模型模拟。对于AquaCrop模型的长期仿真，GeoSim工具显著提高了其大量模拟仿真产量与灌溉需求的适用性，提供了可靠的工具用于模型自动输入和输出管理。然而，对于更大范围的GeoSim应用，其灵活性有待考证。结合AquaCrop的传统应用发现，GeoSim工具既节省了操作时间又确保了结果质量。同时，GeoSim工具作为开源软件，其改进和扩展将更加灵活。

参考文献

[1]　陈露,王鹏皓,侯雪,等. 作物生长模型研究进展[J]. 现代农业科技,2020(14):254-255

[2]　张铁楠,付驰,李晶,等. 基于寒地春小麦AquaCrop与WOFOST模型适应性验证分析[J]. 作物杂志,2013(3):121-126

[3]　孙扬越,申双和. 作物生长模型的应用研究进展[J]. 中国农业气象,2019,40(7):444-459

[4]　朱艳,汤亮,刘蕾蕾,等. 作物生长模型(CropGrow)研究进展[J]. 中国农业科学,2020,53(16):3 235-3 256

[5]　Vanuytrecht E, Raes D, Steduto P, et al. AquaCrop: FAO's Crop Water Productivity and Yield Response Model[J]. Environmental Modelling and Software,2014,62(8):351-360

[6]　Hsiao T C, Heng L, Steduto P, et al. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: III. Parameterization and Testing for Maize[J]. Agronomy Journal,2009,110(3):448-459

[7]　朱秀芳,李宜展,潘耀忠,等. AquaCrop作物模型研究和应用进展[J]. 中国农学通报,2014,30(8):270-278

[8]　Lorite I J, Garic-Vila M, Santos C, et al. AquaData and AquaGIS: Two Computer Utilities for Temporal and Spatial Simulations for Water-limited Yield with AquaCrop[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2013(96): 227-237

[9]　Steduto P, Hsiao T C, Raes D, et al. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles[J]. Agronomy Journal, 2009,110(3):426-437

（下转第53页）