

# 华北平原玉米管理措施与地表水热 收支数据集研发

刘凤山<sup>1,2\*</sup>, 葛全胜<sup>2,3</sup>, 陶福祿<sup>2,3</sup>, 蔡杨星<sup>1</sup>, 卜建超<sup>1</sup>, 白妮妮<sup>4</sup>

1. 福建农林大学生命科学学院, 国家菌草工程技术研究中心, 福州 350002;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049;

4. 福建农林大学林学院, 福州 350002

**摘 要:** 农田地表特征变化通过影响陆-气界面水热交换过程是区域气候变化的重要反馈因素。本数据集以华北平原玉米物候动态为依据, 建立了不同播种期和生长期的3种情景: 春玉米(播种期早, 生长期正常)、夏玉米(播种期晚, 生长期正常)、潜在玉米(播种期早, 生长期延长), 利用改进后的 SiBcrop 模型模拟了 1980–2009 年不同情景下地表水热通量的响应。结果表明, 不同情景对叶面积指数、净辐射、潜热、显热和冠层温度等参数产生了重要的影响, 播种期、收获期和情景之间玉米生长动态的差异是地表能量收支改变的关键节点。播种期提前具有一定的增温效应, 生长期延长没有明显的增温效应。研究结果对于适应和缓解气候变化下的农田管理具有一定的指导意义。

**关键词:** 玉米; 物候期; 地表能量分配; 反照率

**DOI:** <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.16>

**CSTR:** <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.16>

**数据可用性声明:**

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.07.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.07.V1>.

## 1 前言

地表是气候系统中热量、水分和气体等要素相互作用的重要场地, 地表特征变化通过改变陆-气界面的水热交换成为气候变化的重要反馈过程<sup>[1]</sup>。农田地表特征受到人为活动的强烈干预, 成为区域气候的重要驱动因素<sup>[2]</sup>。提高陆-气界面物质和能量传输过程的模拟精度, 定量农田管理措施通过地表水热过程的气候反馈, 对于农业生态系统适应和缓解气候变化具有一定的意义。

收稿日期: 2021-11-20; 修订日期: 2022-04-26; 出版日期: 2022-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(41801020)

\*通讯作者: 刘凤山, 福建农林大学, liufs.11b@igsnr.ac.cn

数据引用方式: [1] 刘凤山, 葛全胜, 陶福祿等. 华北平原玉米管理措施与地表水热收支数据集研发[J]. 全球变化数据学报, 2021, 6(2): 290–297. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.16>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.16>.

[2] 刘凤山, 葛全胜, 陶福祿等. 华北平原玉米生长与地表水热收支数据集(1980–2009) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.07.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.07.V1>.

2 数据集元数据简介

《华北平原玉米生长与地表水热收支数据集(1980–2009)》<sup>[2]</sup>的元数据信息见表 1。

表 1 《华北平原玉米生长与地表水热收支数据集(1980–2009)》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	华北平原玉米生长与地表水热收支数据集(1980–2009)
数据集短名	MaizeNorthChina_1980-2009
作者信息	刘凤山, 福建农林大学, liufs.11b@igsnr.ac.cn 葛全胜, 中国科学院地理科学与资源研究所, geqs@igsnr.ac.cn 陶福祿, 中国科学院地理科学与资源研究所, taofl@igsnr.ac.cn 蔡杨星, 福建农林大学, 275196219@qq.com 卜建超, 福建农林大学, 2450594360@qq.com 白妮妮, 福建农林大学, 2450594360@qq.com
地理区域	华北平原
数据年代	1980–2009
数据格式	.xlsx 数据量 64.6 MB (压缩后 62.1 MB)
数据集组成	数据集包括以下变量: 站点名、情景、日期、玉米生长动态 (包括叶面积指数、生长度日、叶片生物量、播种期、出苗期)、地表能量收支 (包括显热、潜热, 短波辐射四分量——可见光、红外光、散射光、直射光, 下行长波辐射、净辐射)、冠层温度、土壤表层水分等
基金项目	国家自然科学基金 (41801020)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[3]</sup>
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

3 数据研发方法

以华北平原为研究区, 选择 1981–2009 年具有完整的物候和气象记录的站点开展研究。包括密云、宝坻、黄骅、唐山、潍坊、新乡、郑州、商丘、驻马店和南阳站等 10 个站点符合条件 (表 2)。河北省馆陶站和山东省禹城站具有较好的生长和通量观测数据, 用于 SiBcrop 模型的校准和验证, 提高模型对玉米物候期、叶面积指数、潜热、显热、冠层温度等过程的模拟精度 (表 2)。其中, 禹城站数据的测量时间为 2004–2005 年<sup>1</sup>。馆陶站涡度相关数据的测量时间为 2009–2010 年<sup>2</sup>。以上站点的多年平均温度在 11.86–14.33 °C

<sup>1</sup> 中国通量观测研究网. <http://www.cnern.org.cn/>.

<sup>2</sup> 国家青藏高原科学数据中心. <http://data.tpdac.ac.cn>.

之间波动，年降水在 617.96–1,060.3 mm 之间波动，土壤类型为砂壤土<sup>[4,5]</sup>。

建立包括不同播种期和不同生长期长度的 3 种玉米情景（表 3）。春玉米情景播种期为所选站点春玉米的播种期中位数，即儒略日 136（DOY136），生长度日达到 2,730 °C·d 则收获；夏玉米情景播种期为所选站点夏玉米的播种期中位数（DOY162），生长度日达到 2,730 °C·d 则收获；潜在玉米情景播种期为所选站点春玉米的播种期中位数（DOY136），收获期为所选站点夏玉米的收获期中位数，根据两个生育期计算 10 个站点的平均生长度日为 3,036 °C·d；模型中其他参数保持不变。

利用校准好的 SiBcrop 模型<sup>[6,7]</sup>模拟不同玉米情景下地表水热收支的响应。模拟时间为 1980–2009 年，模拟步长为半小时，模拟过程中初始边界条件、气象数据、土壤类型等条件保持一致。春玉米和夏玉米情景之间的差异体现播种期变化的影响，春玉米和潜在玉米情景之间的差异体现生长期变化的影响，夏玉米和潜在玉米之间的差异体现播种期和生长期两者的共同作用。

表 2 站点的基本信息

站点名	纬度（N）	经度（E）	海拔（m）	温度（°C）	降水（mm）	数据
黄骅	38.37	117.35	7.3	12.92	589.48	气象、物候
唐山	39.67	118.15	28.6	11.85	636.56	气象、物候
南阳	33.03	112.58	130.7	15.16	897.9	气象、物候
商丘	34.45	115.67	51	14.37	770.15	气象、物候
新乡	35.32	113.88	74	14.55	611.38	气象、物候
驻马店	33	114.02	83.3	15.16	1,079.31	气象、物候
郑州	34.72	113.65	111.3	14.76	708.83	气象、物候
潍坊	36.75	119.18	19.3	12.74	609.19	气象、物候
宝坻	39.73	117.28	6	11.77	608.09	气象、物候
密云	40.38	116.87	73.1	11.27	691.31	气象、物候
禹城	36.83	116.57	28	13.1	582	气象、物候、通量
馆陶	36.52	115.13	40	13.82	490.47	气象、通量

表 3 玉米的模拟情景

模拟情景	参数		模拟时间
	播种期	生长度日	
春玉米	不早于 DOY136	2730 °C·d	1980–2010
夏玉米	不早于 DOY162	2730 °C·d	1980–2010
潜在玉米	不早于 DOY136	3036 °C·d	1980–2010

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集包括：站点名、情景、日期、玉米生长动态（包括叶面积指数、生长度日、叶片生物量、播种期、出苗期）、地表能量收支（包括显热、潜热，短波辐射四分量——可见光、红外光、散射光、直射光，下行长波辐射、净辐射）、冠层温度、土壤表层水分等。

4.2 数据结果

叶面积指数在不同情景、不同年份、不同站点之间存在一定的差异（图 1）。不同情景之间，春玉米播种期早，峰值较小，收获期早；潜在玉米播种期早，峰值最高，收获期晚；夏玉米的播种期晚、峰值较小，收获期晚。不同年份之间叶面积指数有明显的波动，多数情况下，不同情景之间叶面积指数的年际波动类似，即某一年的叶面积指数较高，则 3 个情景的叶面积指数都较高。站点之间叶面积指数的差异与空间位置有一定的关系，位于南方的站点具有较优的水热条件，总体具有较高的叶面积指数。根据叶面积指数的平均值<sup>[8]</sup>，三种情景叶面积指数的差异在-2.5~2.5 区间；相对大小，在生育期前期，潜在玉米>春玉米>夏玉米，后期逐渐变为夏玉米>潜在玉米>春玉米。各站点在不同情景之间的生长差异主要体现在生育期后期，生长期前期的差异较小，如，春玉米与夏玉米相比，生长期后期夏玉米的叶面积指数更高，且靠近南方的站点差异更大；潜在玉米与春玉米相比，潜在玉米的叶面积指数更高，靠近北方的站点差异更大；北方站点潜在玉米的叶面积指数一般高于夏玉米，南方站点潜在玉米的叶面积指数低于夏玉米，并随着夏玉米的收割变为正值。

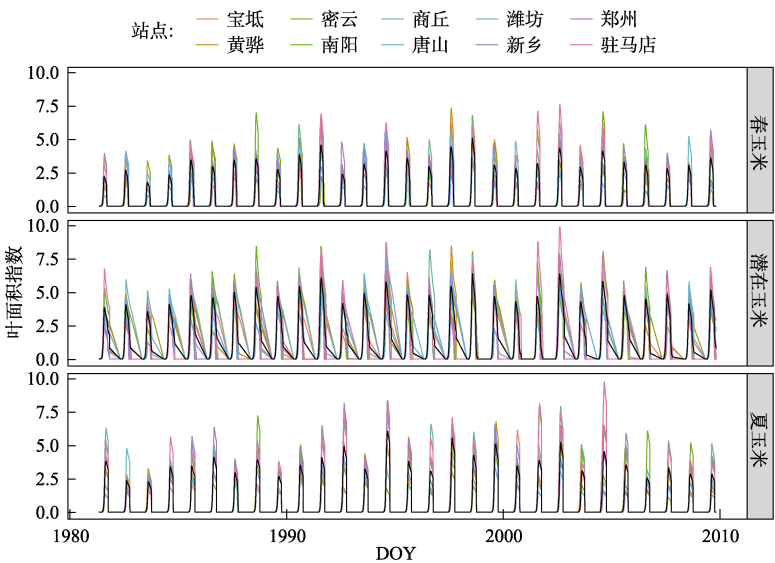


图 1 不同站点叶面积指数的季节动态变化图

地表净辐射展现出明显的季节动态（图 2）。随着玉米的生长而逐渐增加，在生育盛期达到峰值，之后逐渐下降。净辐射的峰值在  $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，非生长期降低为  $-50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同年份之间净辐射存在较大的差异，与叶面积指数存在一定的相关性，但是有些叶面积指数高的年份（如 1998、2004）净辐射并不是最高的，这与气象条件有密切关系。根据净辐射的平均值，净辐射在不同情景之间的差异可以达到  $\pm 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，早播种和晚收割的情景具有较高的净辐射；在生长期中，具有较高叶面积指数的情景捕获的净辐射约为  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

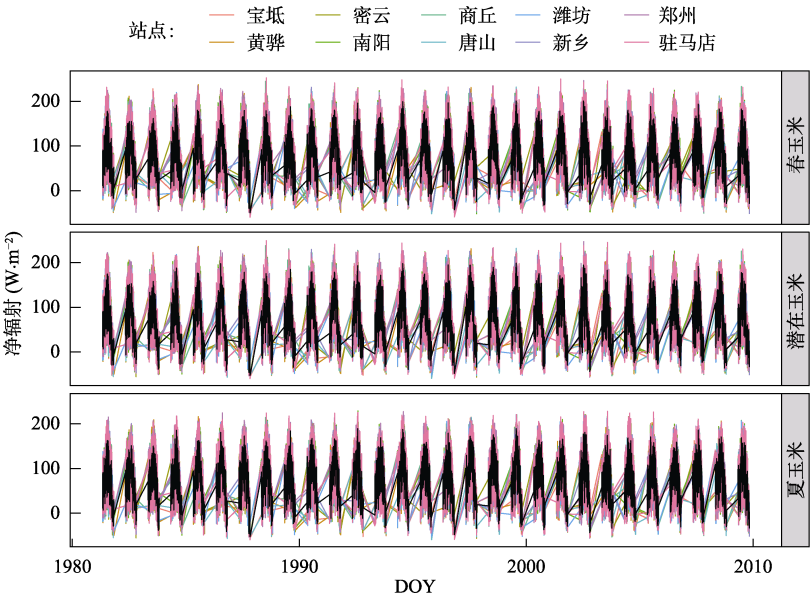


图 2 不同站点净辐射的季节动态变化图

潜热通量的变化与净辐射类似（图 3），潜热的峰值在  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，部分站点的潜热峰值超过  $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同情景之间潜热通量的差异 $\pm 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，主要体现在 2 个时期：不同情景之间生长期生长差异越大，潜热差异越大；收获期的作物收割立即显著降低潜热通量。

显热通量在  $0\text{--}50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  范围内波动，部分站点的部分年份峰值超过  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ （图 4）。不同情景之间显热通量存在差异，播种期不同造成的差异在  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  左右，收获期的差异引起的波动超过  $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；生育期中由于生长不同造成的差异小于  $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。站点之间显热通量的差异，与净辐射和潜热的规律类似，位于南方的站点具有更高的净辐射，分配到显热和潜热的量更多；北方站点的地表能量通量的量较低。

玉米生长季中冠层温度的波动范围在  $280\text{--}300 \text{ K}$ 。模拟情景之间冠层温度差异在 $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ （图 5）。不同情景中玉米的播种期和收获期前后是气温差异变化的关键节点<sup>[8]</sup>：播种期（早播种，DOY145，简称为 D1；晚播种，DOY173，简称为 D2）、叶面积指数峰值转变时间（DOY225，简称为 D3）、收获期（春玉米，DOY253，简称为 D4；夏玉米，DOY279，简称为 D5；潜在玉米，DOY304，简称为 D6）。

不同情景之间冠层温度的差异随着以上关键节点的变化而变化。例如春玉米与夏玉米情景模拟值之间的差异，D1 到 D2 时间和 D3 到 D5 时间，冠层温度差异为正，D2 到 D3 时间冠层温度差异为负。潜在玉米与春玉米情景模拟值之间的差异，在 D4 到 D5 时间有较为明显的负值差异，D5 到 D6 时间冠层温度差异为正。潜在玉米与夏玉米情景模拟值之间的差异冠层温度差异与春-夏情景类似，在 D5 到 D6 时间有正的差异，而春玉米和夏玉米情景已经收获，两者冠层温度并无差异。

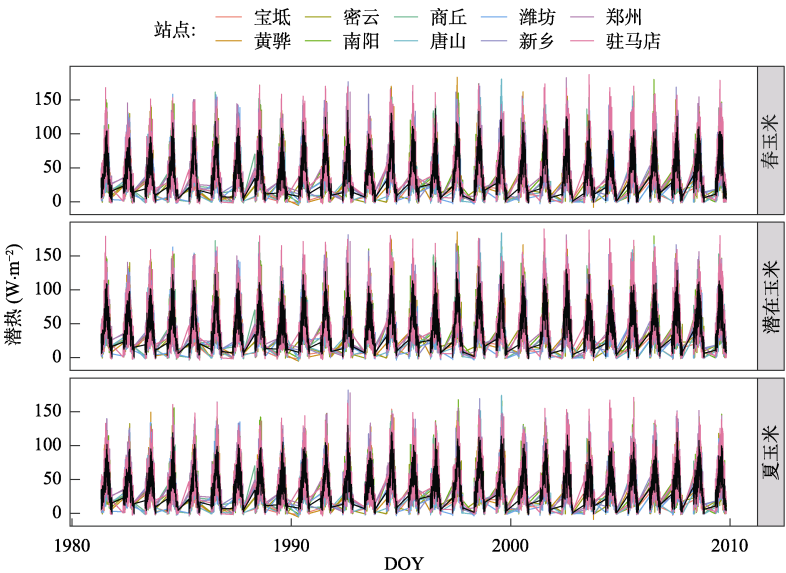


图 3 不同站点潜热的季节动态变化图

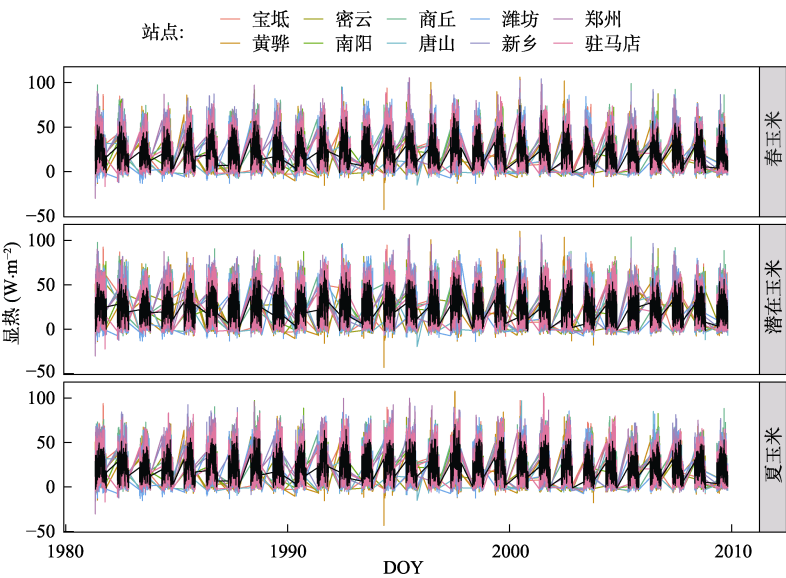


图 4 不同站点显热的季节动态变化图

4.3 数据结果验证

利用 3 个统计参数分析了模型对叶面积指数、潜热和显热的模拟精度（表 4）。模型对玉米生长动态具有较好的模拟；对于潜热和显热通量的模拟精度较差。不同站点之间的通量误差不同。禹城站的显热通量模拟精度高于馆陶站，馆陶站的潜热模拟精度优于禹城站。不同模拟情景之间物候期与实际情况有一定的差异。平均来说，春玉米模拟播种期比实际播种期推迟 7.4 天，收获期推迟 18.5 天。夏玉米模拟播种期比实际播种期推迟 5.1 天，收获期推迟 17.5 天。

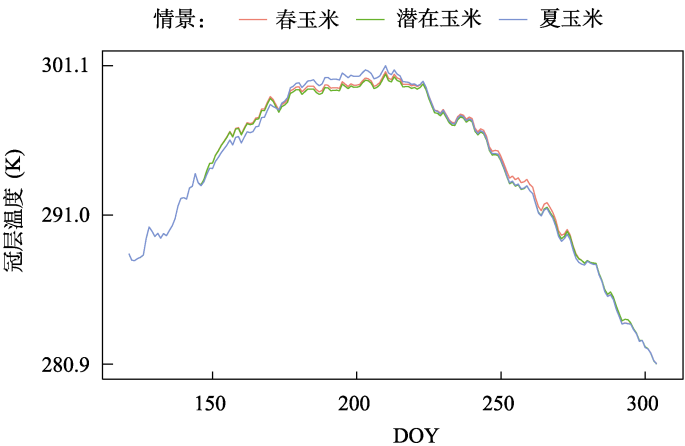


图 5 不同模拟情景冠层温度的差异

表 4 SiBcrop 模型的模拟精度

参数	禹城站			馆陶站		
	$R^2$	RMSE	IOA	$R^2$	RMSE	IOA
LAI	0.93	0.49	0.96	—	—	—
LH	0.53	$17.97 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	0.83	0.83	$14.22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	0.9
SH	0.6	$14.82 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	0.77	0.47	$9.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	0.75

注：LAI，叶面积指数；LH，潜热；SH，显热。

5 讨论和总结

温带地区农业物候期变化，通常表现出地表能量分配-冷却效应超过地表反照率-升温效应，造成物候期变化总体以降温为主。在 Agro-IBIS 模型中，玉米生长期延长引起潜热通量和显热通量的变化幅度超过  $47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  和  $-20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2[9]}$ ；提前播种造成 6 月份潜热增强，显热降低，成熟期到收获期的缩短增强了 10 月份净辐射<sup>[10]</sup>；冬小麦-夏玉米轮作系统与玉米单作相比，冬小麦收获具有增温降湿的作用，进而影响到大气环流和降水<sup>[11,12]</sup>。气候变化背景下播种期提前和生长期延长是农业生态系统的重要变化，本数据集展示了播种期和生长期长度对地表能量收支的影响，数据的量级与前人结果接近，但是包含的信息更多，对于华北平原轮作系统的改制和管理有较好的指导意义。

陆面过程模型对地表水热通量存在一定的模拟误差。如基于遥感数据驱动的 SiB2 模型，华北平原冬小麦-夏玉米轮作系统潜热和显热的模拟误差分别为  $35.6\text{--}40.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $32.6\text{--}69.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2[13]}$ ；VIP 模型中的模拟误差分别为  $40.37$ 、 $47.7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2[14]}$ 。利用 Community Land Model 模拟玉米生长过程，潜热通量的模拟误差为  $87.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (RMSE)、 $0.71$  ( $R^2$ )、 $0.89$  (IOA)；显热通量的模拟误差为  $67.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (RMSE)、 $0.4$  ( $R^2$ )、 $0.77$  (IOA)<sup>[15]</sup>。本数据集的模拟误差与前人结果接近，并提供了播种期和收获期的精度，具有较好的应用价值。

本数据集提供了基于模型模拟的 3 种玉米情景下的地表水热收支。基于气候变化背景下玉米物候期动态，构建了华北平原 2 个玉米播种期和 2 个生长期等情景，利用改进后的



SIBcrop 模型不同情景对陆-气界面物质和能量交换的影响。研究结果发现玉米情景之间存在不同的地表水热收支过程, 玉米生长过程的差异与气象条件的交互作用, 在间种期、生长期、间获期等时期对净辐射、潜热、显热和冠层温度等因子有不同的影响, 播种期提前具有一定的升温潜力, 生长期延长的增温效应不显, 该气候反馈过程对于指导华北平原缓解气候变化具有参考价值。

**作者分工:** 刘凤山、葛全胜和陶福禄对数据集的开发做了总体设计; 蔡杨星和卜建超采集和处理了气象数据; 刘凤山、陶福禄设计了模型和算法; 蔡杨星、卜建超和白妮妮做了数据验证; 刘凤山、陶福禄撰写了数据论文等。

**利益冲突声明:** 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

## 参考文献

- [1] Mahmood, R., Pielke, R. A., Hubbard, K. G., *et al.* Land cover changes and their biogeophysical effects on climate [J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(4): 929–953.
- [2] 刘凤山, 葛全胜, 陶福禄等. 华北平原玉米生长与地表水热收支数据集(1980–2009)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.07.V1>. <https://cstr.science.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.07.V1>.
- [3] 全球变化科学研究数据出版系统, 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新)。
- [4] Liu, F., Chen, Y., Bai, N., *et al.* Divergent climate feedbacks on winter wheat growing and dormancy periods as affected by sowing date in the North China Plain [J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(7): 2275–2287.
- [5] 阿多, 熊凯, 赵文吉等. 1960–2013 年华北平原气候变化时空特征及其对太阳活动和大气环境变化的响应[J]. *地理科学*, 2016, 36(10): 1555–1564.
- [6] Liu, S., Xu, Z., Zhu, Z., *et al.* Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24–38.
- [7] Jia, Z., Liu, S., Xu, Z., *et al.* Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: D13113. DOI: 10.1029/2011JD017037.
- [8] 刘凤山, 葛全胜, 陶福禄等. 华北平原玉米播种期和品种变化对冠层温度的影响及地表生物物理机理[J]. *地理科学进展*, 2022, 41(4): 682–692.
- [9] Bagley, J. E., Miller, J., Bernacchi, C. J. Biophysical impacts of climate-smart agriculture in the Midwest United States [J]. *Plant Cell and Environment*, 2015, 38(9): 1913–1930.
- [10] Sacks, W. J., Kucharik, C. J. Crop management and phenology trends in the US corn belt: impacts on yields, evapotranspiration and energy balance [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 882–894.
- [11] Zhang, X., Tang, Q., Zheng, J., *et al.* Warming/cooling effects of cropland greenness changes during 1982–2006 in the North China Plain [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024038.
- [12] Zhang, X., Tang, Q., Zheng, J., *et al.* Suppression of spring rain by surface greening over North China Plain [J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(10): 2752–2758.
- [13] Lei, H., Yang, D., Shen, Y., *et al.* Simulation of evapotranspiration and carbon dioxide flux in the wheat-maize rotation croplands of the North China Plain using the Simple Biosphere Model [J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(20): 3107–3120.
- [14] Mo, X., Liu, S., Lin, Z. Evaluation of an ecosystem model for a wheat-maize double cropping system over the North China Plain [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 32: 61–73.
- [15] Peng, B., Guan, K.Y., Chen, M., *et al.* Improving maize growth processes in the community land model: Implementation and evaluation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250: 64–89.