

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.01.036

冬小麦-夏玉米农田蒸散与 CO₂ 净交换特征及影响因素

李 成¹ 王让会² 李兆哲¹ 徐 扬³

(1. 扬州大学园艺与植物保护学院, 扬州 225009; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;
3. 扬州大学农学院, 扬州 225009)

摘要: 为探明黄淮海平原农田蒸散量(ET)和 CO₂ 净交换量(NEE)的多因素协同影响,选取中国科学院禹城综合试验站冬小麦-夏玉米农田为研究对象,基于涡度相关观测系统实测的 2003—2010 年逐日通量数据,利用结构方程模型,分析了农田 ET 和 NEE 特征及其影响因素。结果表明:季节尺度上 ET 和 NEE 表现出双峰型变化特征,但二者在不同的生长季具有显著差异。与玉米季相比,麦季 ET(NEE)的峰值明显高于(低于)玉米季。研究时段内麦季和玉米季 ET 总量的多年平均值分别为 398.63、256.59 mm,并且二者均呈波动增加的趋势($P < 0.05$);而麦季和玉米季 NEE 总量的平均值分别为 -272.57、-293.57 g/m²,但二者的年际变化趋势不显著($P > 0.05$)。净辐射是影响农田 ET 和 NEE 季节变化的重要因素,并主要体现在直接作用上。净辐射和气温通过叶面积指数对麦季 ET 和 NEE 产生较大的间接影响;而在玉米季,饱和水汽压差通过叶面积指数对 ET 和 NEE 的间接影响较大。此外,土壤含水率和风速对不同生长季 ET 和 NEE 的影响存在一定的差异。

关键词: 农田生态系统; 冬小麦-夏玉米农田; 蒸散量; CO₂ 净交换量; 结构方程模型

中图分类号: S161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)01-0331-09 **OSID:** 

Characteristics and Influencing Factors of Evapotranspiration and Net CO₂ Exchange in Winter Wheat – Summer Maize Field

LI Cheng¹ WANG Ranghui² LI Zhaozhe¹ XU Yang³

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
3. College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Aiming to reveal the synergistic effect of various factors on cropland evapotranspiration (ET) and net CO₂ exchange (NEE) in the Huang – Huai – Hai Plain, a field experiment based on an eddy covariance technique was conducted at a typical winter wheat – summer maize field in Yucheng City, Shandong Province. Based on daily observation data of water and carbon fluxes from 2003 to 2010 and the structural equation model, the characteristics and influencing factors of ET and NEE were systematically analyzed. The results showed that the ET and NEE of different photosynthetic plants (e. g., wheat and maize) had significant differences. Seasonal variations of ET generally showed bimodal curves, with the first peak (in May) higher than the second one (in August) in each year. The ET in the wheat season fluctuated between 315.56 mm and 499.54 mm, with a multi-year average of 398.63 mm, whereas it fluctuated from 221.68 mm to 314.95 mm in the maize season, with a multi-year average of 256.59 mm. The significant trends of ET were found in these two different growing seasons ($P < 0.05$). Compared with the ET, the NEE also showed a double-peak curves, with the first peak (in April) lower than the second one (in August) in each year. The NEE in the wheat season fluctuated between -367.84 g/m² and -149.93 g/m², with a multi-year average of -272.57 g/m², whereas it fluctuated from

收稿日期: 2020-12-07 修回日期: 2021-01-25
基金项目: 国家自然科学基金项目(41801013、31801028)、江苏省自然科学基金项目(BK20180939)、国家重点研发计划项目(2019YFC0507403)和江苏省农业气象重点实验室开放项目(JKLAM1802)
作者简介: 李成(1988—),男,讲师,博士,主要从事地气交换与气候变化研究,E-mail: licheng_nj@163.com
通信作者: 王让会(1963—),男,教授,博士,主要从事生态水文学与遥感应用研究,E-mail: rhwang@nuist.edu.cn

-469.63 g/m² to -118.79 g/m² in the maize season, with a multi-year average of -293.57 g/m². The net radiation was an important factor affecting seasonal changes of the ET and NEE in this field, which were mainly found to impose direct effects on the ET and NEE. As for indirect effects, radiation and temperature had great indirect effects on the ET and NEE through the leaf area index in the wheat season, whereas the indirect effect of VPD were larger in the maize season. Additionally, other environmental factors, e. g., the soil water content and wind speed had different effects on the ET and NEE in different growing seasons.

Key words: agroecosystem; winter wheat – summer maize field; evapotranspiration; net CO₂ exchange; structural equation model

0 引言

全球变暖背景下,与水资源短缺和 CO₂ 浓度递增相关联的“水问题”和“碳问题”,备受人们关注^[1-3]。农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,受人类活动影响强烈,其中的水分、能量与碳交换过程是农田重要的生态水文过程^[4-6]。因此,理解农田水碳交换过程对农业水资源高效利用以及陆地生态系统模型优化等具有重要意义^[7-8]。

一般而言,蒸散量(ET)和 CO₂ 净交换量(NEE)被认为是农田水碳交换过程的关键变量^[9-10]。与传统的箱式法相比,基于涡度相关技术能连续测定农田 ET 和 NEE 的变化状况,且具有较高的精度^[11-13]。观测结果表明,在单一种植模式下,作物生育期内 ET 的日变化表现出单峰倒“U”形特征,NEE 则表现出明显的“U”形特征;在多熟种植模式下,NEE 的季节变化大致呈“W”形双峰特征^[14-17]。但 ET 和 NEE 的日变化和季节变化规律往往因地域、时段、作物类型等而有所差异^[18]。目前基于涡度相关法的农田 ET 和 NEE 研究大多采用短期观测资料开展分析(小于 3 年),这在一定程度上易受天气条件的制约^[19-20]。前期研究表明,光、温、水等对作物生长以及农田 ET 和 NEE 的变化有重要影响,并通过相关性或回归方程等方法,阐明单一环境因素,如净辐射(R_n)、气温(T)、饱和水汽压差(VPD)、风速(WS)、土壤含水率(SWC)等对 ET 或 NEE 的影响程度^[21-23]。然而,这些环境因素之间也存在着较高的相关关系,它们共同影响着农田 ET 和 NEE 的变化,这使得一些量化研究的结果往往存在一定的不确定性^[24]。此外,外界环境因素也会通过株高、叶面积指数(LAI)等的变化,间接影响农田 ET 和 NEE 的变化^[25-26]。因此,定量解析环境因素对农田 ET 或 NEE 变化的直接和间接影响是农田水碳交换研究亟待解决的重要问题之一。

为此,本研究以黄淮海平原典型冬小麦-夏玉米农田为例,基于长达 7 年的逐日通量和气象观测数据,利用结构方程模型(SEM),分析农田 ET 和 NEE

的特征及多因素协同影响,以期为区域农田生产力提升以及资源环境可持续发展等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站点概况

试验站点位于中国科学院禹城综合试验站内(36.83°N,116.56°E,海拔 28 m),属暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温 13.1℃,年降雨量 610 mm,日照时数 2 640 h,无霜期约 200 d,土壤母质为黄河冲积物,以潮土和盐化潮土为主,耕层土壤有机质质量比为 10 ~ 12 mg/kg, pH 值为 7.8 ~ 8.0^[27]。种植模式为冬小麦-夏玉米复种,其中冬小麦的生育期一般为 10 月上旬至翌年 6 月上旬,而夏玉米的生育期为 6 月中旬至 10 月上旬^[28]。作为我国农田生态系统观测网络的重要站点之一,该站点所处的自然地理环境与农业生产水平在黄淮海平原旱作农田中具有一定的代表性和典型性。

在禹城综合试验站内,安装一套开路式涡度相关观测系统(36.57°N,116.38°E,海拔 23.4 m),设立在下垫面为冬小麦-夏玉米轮作的农田中,由 CSAT3 型三维超声风速仪(Campbell Scientific Inc., 美国)与 LI-7500 型 H₂O/CO₂ 红外气体分析仪(LICOR Biosciences, 美国)组成,安装高度为植被冠层上方 2.5 m,用于测定农田生态系统 CO₂ 通量与能量交换特征,并由高速数据采集器(CR5000 型, Campbell Scientific Inc., 美国)自动采集数据^[29]。试验地与周围大片冬小麦-夏玉米轮作农田(约 13.33 hm²)相连,构成大范围均一的下垫面,盛行风向的风浪区长度达 5 km,满足涡度相关观测系统要求的下垫面均一标准^[30]。

1.2 数据获取与处理

冬小麦-夏玉米农田逐日通量和气象观测数据来自于中国科学院禹城综合试验站,时间跨度为 2003 年 6 月—2010 年 6 月(共包括 7 个冬小麦/夏玉米的生长季资料)。其中,水热通量和 CO₂ 通量由涡度相关观测系统测得;同期 R_n 、 T 、VPD、WS 及表层 SWC 等由配套的自动微气象观测系统测得。通

过中国生态系统研究网络 (China FLUX) 技术体系对获得的观测数据进行坐标轴旋转、WPL 校正等质量控制和数据处理后,生成逐日通量和气象观测数据。利用潜热通量与汽化潜热的比值,计算得到逐日 ET^[31]。作物生育期内 LAI 数据来源于卫星遥感数据 (MCD15A3H),时间分辨率为 4 d,空间分辨率为 500 m。通过线性插值方法,获得冬小麦和夏玉米生育期内逐日 LAI 数据^[22]。

1.3 结构方程模型

SEM 是一种多变量统计方法,用于探究多个因子之间的相互关系。与传统方法相比,它不仅能够判别各因子之间的关系强度,而且能对模型进行拟合和判断^[32],这为理解农田 ET 和 NEE 变化的多因素影响提供了重要途径。本研究首先综合前人的研究成果^[21-22],选择 R_n 、 T 、VPD、WS 和 SWC 为自变量,LAI 为中间变量,ET (或 NEE) 为因变量。将环境因素对 ET (或 NEE) 的影响分离为直接影响和通过影响 LAI 产生的间接影响,即各自变量对中间变量或因变量具有单向影响作用,而各自变量之间存在相互影响作用;其次,根据显著性关系,依次消除非重要路径,直到获得最终模型。模型评价指标包括卡方与自由度比值 (CSFD, 小于 5.0),调整拟合优度指数 (AGFI, 大于 0.90),近似均方根误差 (RMSEA, 小于 0.10 (ET、NEE 单位分别为 mm/d、

g/(m²·d))),各指标的定义及计算参照文献[22];最后,根据最优模型的结果,获得各因素对 ET (或 NEE) 变化的直接影响、间接影响和总影响。

2 结果与分析

2.1 冬小麦-夏玉米农田小气候特征

冬小麦-夏玉米农田 T 、 R_n 、VPD、WS 和 SWC 的季节变化特征如图 1 所示。 T 表现出冬季低、夏季高的单峰型变化特征 (图 1a),其中 1 月最低,为 -1.83℃,7 月最高,为 26.18℃,研究时段内年平均 T 为 12.83~13.73℃,多年平均值为 13.23℃,最高温与最低温差值在 34.62~41.11℃之间波动。与 T 类似, R_n 也呈单峰型变化特征,但其波动幅度较大,年平均 R_n 为 56.11~67.02 W/m²,多年平均值 63.20 W/m²,并且 R_n 峰值出现的时间通常早于 T 出现的时间 (图 1b)。受 T 和相对湿度的共同影响,VPD 表现出双峰型的变化特征 (图 1c),通常每年第 1 个高峰 (6 月) 的 VPD 明显高于第 2 个高峰 (10 月),特别是在每年 6 月下旬期间,VPD 会出现一些“尖峰”值,整体上 VPD 多年平均值为 0.57 kPa。WS 的多年平均值为 1.86 m/s,麦季出现风速在 3 m/s 以上的次数普遍在 45 d 以上,明显多于玉米季 (图 1d)。试验地表层 SWC 基本在 0.2 m³/m³ 以上 (图 1e),特别是每年夏季期间 SWC 相对较高。

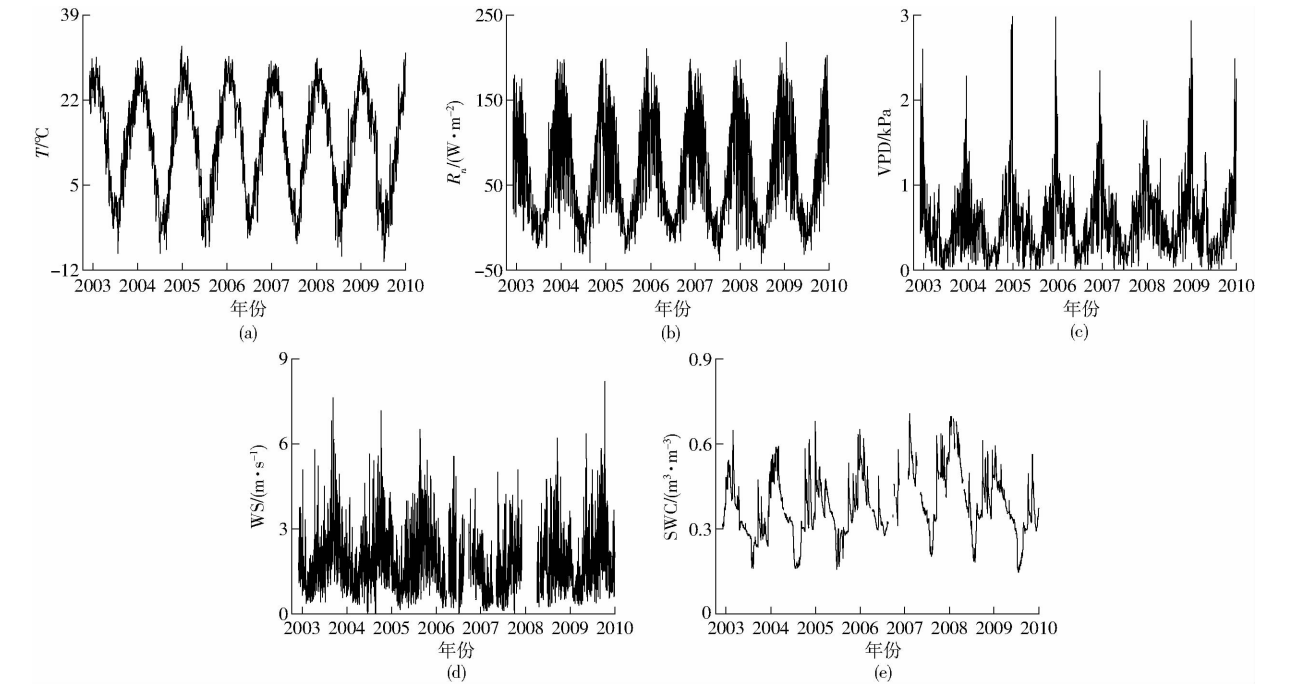


图 1 研究时段内冬小麦-夏玉米农田 T 、 R_n 、VPD、WS 和 SWC 的季节变化曲线

Fig.1 Seasonal changes of T , R_n , VPD, WS and SWC in winter wheat - summer maize field during study period

2.2 冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 的变化特征

冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 的季节变化特征如图 2 所示。ET 表现出双峰型变化特征

(图 2a),2 个峰值分别对应于麦季和玉米季,通常每年第 1 个高峰 (5 月) 的 ET 明显高于第 2 个高峰 (8 月)。麦季和玉米季 ET 最高值分别为

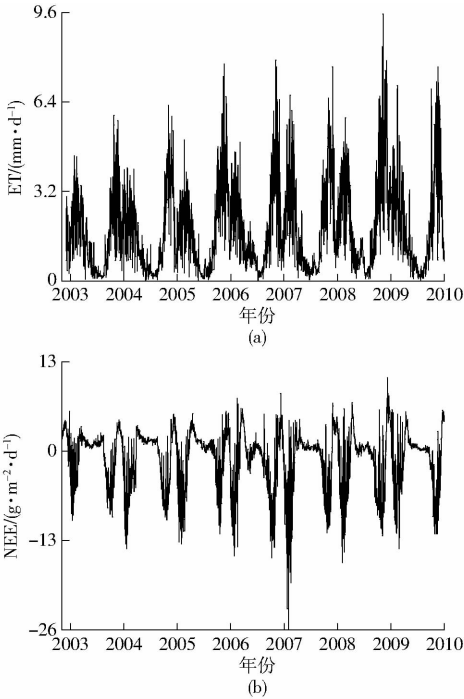


图2 研究时段内冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 的季节变化曲线

Fig.2 Seasonal changes of ET and NEE in winter wheat - summer maize field during study period

9.55 mm/d(2009 年 5 月 8 日)和 6.99 mm/d(2009 年 8 月 13 日)。研究时段内麦季 ET 总量在 315.56 ~ 499.54 mm 之间波动,多年平均值为 398.63 mm,并且呈波动增加的趋势($P < 0.05$),每季增速约为 21.48 mm(图 3a)。玉米季 ET 总量在 221.68 ~ 314.95 mm 之间波动,多年平均值为

256.59 mm,玉米季 ET 总量也呈现出波动增加的趋势($P < 0.05$),每季增速约为 14.15 mm(图 3a)。

NEE 代表生态系统 CO₂净交换量,负值表示生态系统吸收 CO₂,正值表示生态系统释放 CO₂。如图 2b 所示,NEE 表现出双峰倒“U”形变化特征,存在 2 个明显的吸收峰值,通常 NEE 在每年麦季的吸收高峰(4 月)弱于玉米季的吸收高峰(8 月),特别是玉米季 NEE 最高值达 -25.94 g/(m²·d)(2007 年 8 月 11 日)。研究时段内麦季 NEE 总量在 -367.84 ~ -149.93 g/m²之间波动,多年平均值为 -272.57 g/m²(图 3b),但年际变化趋势不显著($P > 0.05$)。玉米季 NEE 总量在 -469.63 ~ -118.79 g/m²之间波动,多年平均值为 -293.57 g/m²;与麦季 NEE 总量类似,玉米季 NEE 总量的变化趋势也不显著($P > 0.05$)。

2.3 冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 季节变化的影响因素

不同于以往的单因素相关分析或多元回归分析方法,本研究利用 SEM 方法具有设置中间变量的优势,将 LAI 设为中间变量,从而将环境因素对 ET 或 NEE 的影响分离为直接影响和通过 LAI 而产生的间接影响。受样本容量所限,目前仅对冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 季节变化的多因素影响展开分析。

以 R_n 、 T 、VPD、WS 和 SWC 为自变量,LAI 为中间变量,麦季 ET 为因变量,基于调整后的 SEM 方法能解释 87% 的麦季 ET 变化,各评价指标如 CSFD 为 3.38,AGFI 为 0.98,RMSEA 为 0.04 mm/d,反映了模型拟合度优(图 4a,图中实线和虚线分别代表正影响和负影响,隐去不显著的路径,下同)。从总影响系数上看(表 1), R_n 是影响 ET 变化最重要的因素,其次是 LAI、VPD 和 SWC,而 T 和 WS 的影响较弱。 R_n 对 ET 的显著影响不仅源于其对 ET 的直接影响(0.52),还包括其通过促进 LAI 的增长而间接增加 ET(0.22)。VPD 和 SWC 对 ET 的作用也主要通过直接作用引起,二者通过 LAI 对 ET 产生的间接影响几乎可以忽略。 T 对 ET 存在显著的直接和间接影响,但影响的方向相反,使得 T 对 ET 的总影响相对较小(-0.13)。WS 对 ET 存在显著的直接影响,但影响程度较小(0.06)。总体而言,麦季 ET 随 R_n 、LAI、VPD、WS 和 SWC 的增加而增加,但随 T 的增加而减小。

同样,基于 SEM 方法能解释玉米季 64% 的 ET 变化,CSFD 为 1.86,AGFI 为 0.98,RMSEA 为 0.03 mm/d,模型拟合度优(图 4b)。各因素按照总影响由大到小依次为 R_n 、LAI、VPD、WS、 T 、SWC

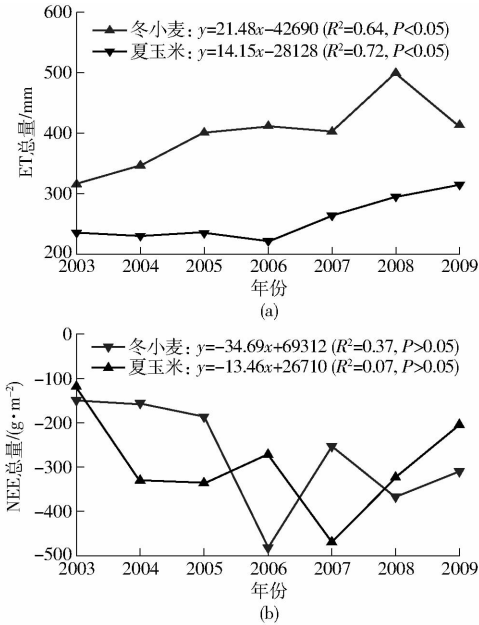


图3 研究时段内冬小麦-夏玉米农田 ET 总量和 NEE 总量的年际变化曲线

Fig.3 Annual changes of cumulative ET and cumulative NEE in winter wheat - summer maize field during study period

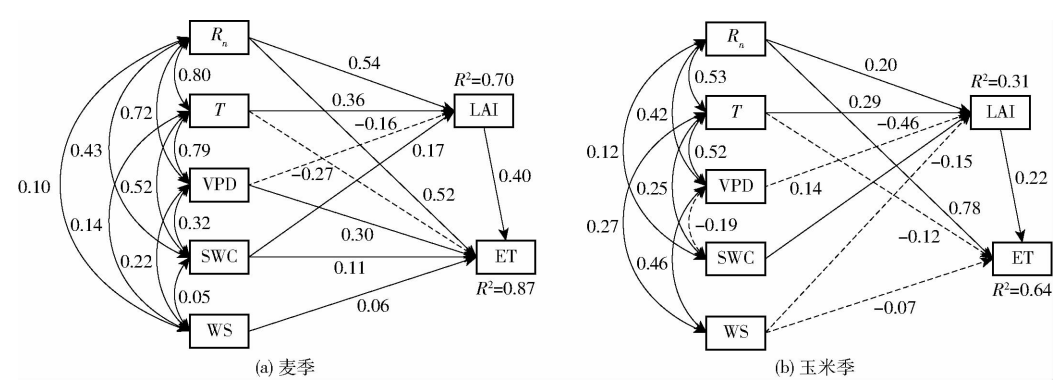


图 4 冬小麦-夏玉米农田 ET 的 SEM 结果

Fig. 4 SEM results of ET in winter wheat – summer maize field

(表 1)。与麦季类似, R_n 也是影响玉米季 ET 最重要的因素,并且主要由直接影响引起(0.78),其通过 LAI 对 ET 的间接影响较小(0.05)。虽然 VPD 和 WS 具有相同的影响作用(−0.10),但影响的方式有很大差异。VPD 主要通过 LAI 间接影响 ET,WS 对 ET 的直接和间接影响相当。在玉米季中 T 对 ET

也存在显著的直接和间接影响,但影响的方向相反,使得 T 对 ET 的总影响相对较小(−0.06),这与麦季中 T 对 ET 的影响类似。此外 SWC 主要通过 LAI 间接影响 ET,但影响作用有限(0.03)。总体而言,玉米季 ET 随 R_n 、LAI 和 SWC 的增加而增加,但随 VPD、WS 和 T 的增加而减小。

表 1 各因素对冬小麦-夏玉米农田 ET 直接影响、间接影响和总影响的标准化系数							
Tab.1 Standardized direct, indirect, and total effects of each factor on ET in winter wheat – summer maize field							
时段	影响类型	R_n	T	VPD	SWC	WS	LAI
麦季	直接影响	0.52 *	−0.27 *	0.30 *	0.11 *	0.06 *	0.40 *
	间接影响	0.22 *	0.14 *	−0.06 *	0.07 *	0	0
	总影响	0.74 *	−0.13 *	0.24 *	0.18 *	0.06 *	0.40 *
玉米季	直接影响	0.78 *	−0.12 *	0	0	−0.07 *	0.22 *
	间接影响	0.05 *	0.06 *	−0.10 *	0.03 *	−0.03 *	0
	总影响	0.83 *	−0.06 *	−0.10 *	0.03 *	−0.10 *	0.22 *

注：* 表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关,下同。

冬小麦-夏玉米农田 NEE 变化的多因素影响结果如图 5a 所示。对于麦季 NEE 而言,基于调整后的 SEM 方法能解释 70% 的 NEE 变化,CSFD 为 2.33,AGFI 为 0.99,RMSEA 为 0.03 g/(m²·d),模型拟合度优。从总影响系数上看,各因素的重要性由大到小依次为 R_n 、LAI、 T 、SWC、VPD、WS(表 2)。 R_n 是影响麦季 NEE 最重要的因素,其中直接影响和间接影响分别为 −0.51 和 −0.37。除 R_n 外, T 对

NEE 的影响也存在显著的直接和间接影响,但影响的方向相反,分别为 0.47 和 −0.24。不同于 R_n 和 T ,SWC 和 VPD 主要通过 LAI 对 NEE 产生间接影响,但二者对 NEE 的影响方向相反。虽然 WS 对 NEE 的影响也主要由直接作用引起,但其对 NEE 的影响较小,几乎可以忽略。总体而言,麦季 NEE 随 R_n 、LAI、SWC 和 WS 的增加而减小,但随 T 和 VPD 的增加而增加。

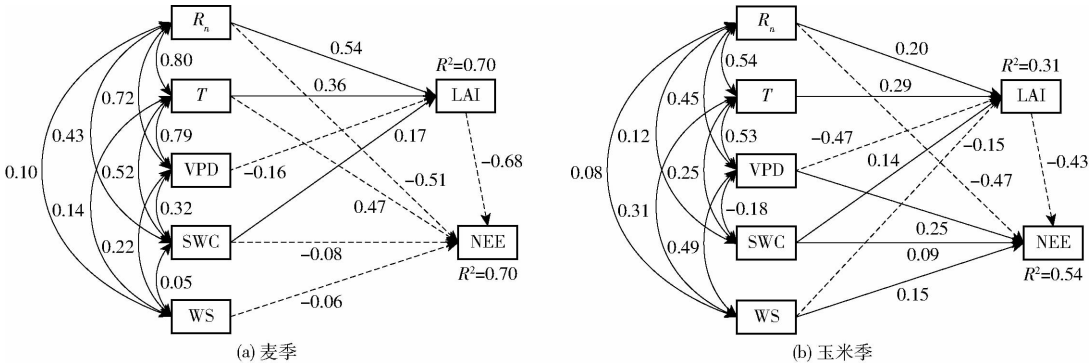


图 5 冬小麦-夏玉米农田 NEE 的 SEM 结果

Fig. 5 SEM results of NEE in winter wheat – summer maize field

表 2 各因素对冬小麦-夏玉米农田 NEE 直接影响、间接影响和总影响的标准化系数

Tab.2 Standardized direct, indirect, and total effects of each factor on NEE in winter wheat – summer maize field							
时段	影响类型	R_n	T	VPD	SWC	WS	LAI
麦季	直接影响	-0.51 *	0.47 *	0	-0.08 *	-0.06 *	-0.68 *
	间接影响	-0.37 *	-0.24 *	0.10 *	-0.12 *	0	0
	总影响	-0.88 *	0.23 *	0.10 *	-0.20 *	-0.06 *	-0.68 *
玉米季	直接影响	-0.47 *	0	0.25 *	0.09 *	0.15 *	-0.43 *
	间接影响	-0.09 *	-0.12 *	0.17 *	-0.06 *	0.06 *	0
	总影响	-0.56 *	-0.12 *	0.42 *	0.03	0.21 *	-0.43 *

如图 5b 所示,SEM 方法能解释玉米季 54% 的 NEE 变化(CSFD 为 2.14;AGFI 为 0.98;RMSEA 为 0.04 g/(m²·d))。从总影响系数上看(表 2), R_n 和 LAI 是影响 NEE 的重要因素,其次是 VPD、WS 和 T ,而 SWC 对 NEE 的影响几乎可以忽略。 R_n 对 NEE 的显著影响主要源于其对 NEE 的直接影响 (-0.47),它通过促进 LAI 的增长而对 NEE 产生的间接影响较小(-0.09)。VPD 和 WS 对 NEE 的影响主要是由直接作用引起,它们的间接影响较小。 T 主要通过 LAI 间接影响 NEE,而它的直接影响作用几乎可以忽略。虽然 SWC 对 NEE 存在显著的直接和间接影响,但影响的方向相反,使得 SWC 对 NEE 的总影响不显著。总体而言,玉米季 NEE 随 R_n 、LAI 和 T 的增加而减小,但随 VPD、WS 和 SWC 的增加而增加。

3 讨论

以往有关农田 ET 和 NEE 研究大多基于短期(小于 3 年)观测资料开展分析,本研究基于长时序通量观测数据可以发现:麦季和玉米季农田 ET 和 NEE 的变化表现出显著差异。与冬小麦田相比,夏玉米田拥有较高的 NEE 和较低的 ET,说明它能固定更多的 CO₂ 而散失较少的水分,即它的水分利用效率高于冬小麦田,这与前人的研究结果相似^[32-35]。麦季和玉米季农田 ET 和 NEE 的变化差异除了因为它们所处的生长季环境条件不同外,也与二者分别代表不同的光合型植物有关。C4 植物(夏玉米)光合作用是由维管束鞘细胞和叶肉细胞共同完成的,与 C3 植物(冬小麦)相比,它拥有更高的 CO₂ 同化速率且气孔导度较小,使蒸腾耗水较低,因而具有较高的水分利用效率^[36]。另一方面,研究时段内麦季和玉米季农田 ET 均呈波动增加的趋势($P < 0.05$),但二者 NEE 的年际变化趋势不显著($P > 0.05$)。由于这一时段内外界环境条件相对稳定,因而这可能与各年份种植作物的品种及农田管理方式的不同有关,但受限于相关数据资料,目前对这一现象的归因仍有待于深入探讨。

前人研究结果证实,在 30 min 尺度上, R_n 是影响生态系统 ET 和 NEE 变化的首要控制因素,此外还包括 VPD^[22]。但是在季节尺度上,这个结果还存在一定的争议,一些研究表明 T 和 VPD 可能对 NEE 的影响大于 R_n ^[21,37]。为此,本研究不同于以往的单因素相关分析或多元回归分析方法,而是利用 SEM 方法具有设置中间变量的优势,将 LAI 设为中间变量,从而将环境因素对 ET 或 NEE 的影响分离为直接影响和通过 LAI 而产生的间接影响。结果表明, R_n 仍是影响冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 季节变化的重要因素,并主要体现在直接作用上,这是因为辐射能提高叶温,使叶片内外的水汽压差增大,增强蒸腾速率,同时也能诱导气孔开闭,进而影响 ET 和 NEE 变化^[6]。随着时间尺度的增加,LAI 对 ET 和 NEE 的影响也逐步显现^[38],并具有仅次于 R_n 的较强影响力。进一步分析发现:在麦季, R_n 和 T 通过 LAI 对 ET 和 NEE 产生较大的间接影响;在玉米季,VPD 和 T 通过 LAI 对 ET 和 NEE 的间接影响较大,这反映了作物生长对农田 ET 和 NEE 的季节变化具有调节作用,相似的研究结果也在东北地区的玉米田中得到了证实^[23]。除 R_n 和 LAI 外,其他因素对 ET 和 NEE 的影响存在较大差异。例如,VPD 对 ET 和玉米季 NEE 具有较强的影响,但对麦季 NEE 的影响较小。VPD 作为衡量大气干旱的重要指标,LIU 等^[39] 基于模型-数据融合的方法,发现植被的蒸腾作用对于 VPD 较为敏感,而 YUAN 等^[40] 基于遥感数据发现,由于 VPD 的增加,陆地植被生长和固碳功能出现普遍下降,这与玉米季 VPD 对 ET 和 NEE 影响的分析结果相似,但与麦季 NEE 的结果存在一定的差异,反映了 VPD 增加对不同生长季作物 NEE 的影响较为复杂,存在一定的空间异质性。SWC 作为衡量土壤干旱的重要指标,在以往基于回归分析的研究中,由于其较低的相关性而被忽略。在本研究中,SWC 对麦季 ET 和 NEE 的影响明显高于玉米季,但这并不意味着玉米季 ET 和 NEE 不受 SWC 的影响。基于 SEM 分析结果表明,SWC 对玉米季 ET 和 NEE 存在一定的直接和间接作用,但方

向相反,从而导致总影响相对较弱,而 WS 对玉米季 ET 和 NEE 的影响强于麦季。综上所述,虽然 R_n 和 LAI 是影响冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 季节变化的重要因素,但不同生长季的 ET 和 NEE 对其他环境因素的响应方式仍存在一定的差异。目前大多数陆地生态系统模型主要通过植物功能型进行建模,但同一植物功能型中不同植物类型对水热条件响应的差异性,使得模拟结果存在较大的不确定性^[41],这需要在后续的生态系统模型的农业子模型中,针对不同作物类型,建立相应的机理表达和参数优化,从而有效降低模拟结果的不确定性。

除了生物与环境因素对农田 ET 和 NEE 的影响外,近年来相关研究也表明,灌溉、施肥等管理措施会影响农田 ET 和 NEE 的变化^[18]。例如,灌溉改变土壤水热状态,引起土壤含水率在较短时间内迅速上升,并改变包括土壤热通量在内的农田小气候状况,使得以气孔为节点的叶片光合-蒸腾作用较灌溉前明显增强,进而使 ET 和 NEE 的绝对值明显增加^[42]。施肥会改变土壤理化性质,在促进作物根系生长、提升作物光合作用和产量的同时,对生态系统土壤呼吸和 CO₂ 通量也有不同程度的影响。王进等^[43]研究发现较高的化肥施用量是导致棉田总初级生产力较高的重要原因之一。LAI 作为描述作物生长的重要生物物理参数,随生长阶段、环境条件及管理措施的不同而呈动态变化,并具有表征作物物候的能力^[44]。物候变化对生态系统水碳交换过程产生重要影响,但 DU 等^[45]基于通榆玉米田的涡度观测资料,发现生长季起止期和生长季长度与农田 NEE 年际变化之间没有显著的相关关系,这可能与农田管理措施所带来的扰动有关。另一方面,生长季的变化也使总初级生产力和生态系统呼吸同时发生改变,加之潜在发生的气候异常事件,都有可能使

物候影响农田水碳交换过程存在一定的不确定性^[41]。后续将进一步搜集试验站长期通量和气象观测数据以及农田管理资料,定量区分研究时段内不同气象年型的特征,进而基于 SEM 方法识别在不同气象年型和不同农田管理方式下,影响农田 ET 和 NEE 变化的关键因素。此外,本研究仅将 LAI 作为连接农田 ET 或 NEE 与环境因素之间的中间变量。事实上,LAI 并非是唯一既响应环境因素变化,又同时影响 ET 或 NEE 变化的生物因素^[46]。后续应将更多包含不同信息的生物因素与 LAI 进行融合,以便进一步提高模型的模拟能力。

4 结论

(1)冬小麦-夏玉米农田 ET 表现出双峰形的季节变化特征,通常每年第 1 个高峰的 ET 明显高于第 2 个高峰。麦季和玉米季 ET 总量的多年平均值分别为 398.63、256.59 mm,并且二者均呈波动增加的趋势 ($P < 0.05$),年增速分别为 21.48、14.15 mm。

(2)冬小麦-夏玉米农田 NEE 表现出双峰倒“U”形季节变化特征,每年麦季 NEE 的吸收高峰明显低于玉米季。麦季和玉米季 NEE 总量的多年平均值分别为 -272.57、-293.57 g/m²。与 ET 总量不同的是,麦季和玉米季 NEE 总量的年际变化趋势不显著 ($P > 0.05$)。

(3) R_n 是影响冬小麦-夏玉米农田 ET 和 NEE 变化的重要因素,并主要体现在直接作用上。在间接作用方面, R_n 和 T 通过 LAI 对麦季 ET 和 NEE 产生较大的间接影响;VPD 则对玉米季 ET 和 NEE 的间接影响较大。其他环境因素,如 SWC 和 WS,在不同生长季对 ET 和 NEE 的影响仍存在一定的差异。

参 考 文 献

[1] BALDOCCHI D D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of global change biology[J]. *Global Change Biology*,2020,26(1):242-260.

[2] CARLSON K M, GERBER J S, MUELLER N D, et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands[J]. *Nature Climate Change*,2017,7(1):63-68.

[3] 于贵瑞,何洪林,周玉科. 大数据背景下的生态系统观测与研究[J]. *中国科学院院刊*,2018,33(8):832-837.
YU Guirui, HE Honglin, ZHOU Yuke. Ecosystem observation and research under background of big data[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*,2018,33(8):832-837. (in Chinese)

[4] YANG S H, XU J Z, LIU X Y, et al. Variations of carbon dioxide exchange in paddy field ecosystem under water-saving irrigation in Southeast China[J]. *Agricultural Water Management*,2016,166:42-52.

[5] 康绍忠,霍再林,李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. *中国科学基金*,2016,30(3):208-212.
KANG Shaozhong, HUO Zailin, LI Wanhong. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: advance and future strategies[J]. *Science Foundation in China*,2016,30(3):208-212. (in Chinese)

[6] 邱建让,杨再强,景元书,等. 轮作稻麦田水热通量及影响因素分析[J]. *农业工程学报*,2018,34(17):82-88.
QIU Rangjian, YANG Zaiqiang, JING Yuanshu, et al. Analysis of water and heat flux over rice-wheat rotation field and

- influencing factors[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(17):82–88. (in Chinese)
- [7] 刘笑吟,王海明,王钊,等. 节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征研究[J]. 农业机械学报,2021,52(7):271–282.
LIU Xiaoyin, WANG Haiming, WANG Yue, et al. Characteristics of rice transpiration and soil evaporation and their proportion variation in water-saving irrigated paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):271–282. (in Chinese)
- [8] 杨大文,丛振涛,尚松浩,等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. 水利学报,2016,47(3):390–397.
YANG Dawen, CONG Zhentao, SHANG Songhao, et al. Research advances from soil water dynamics to ecohydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):390–397. (in Chinese)
- [9] FONG B N, REBA M L, TEAGUE T G, et al. Eddy covariance measurements of carbon dioxide and water fluxes in US mid-south cotton production[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2020,292:106813.
- [10] FENG J T, ZHANG B Z, WEI Z, et al. Effects of averaging period on energy fluxes and the energy-balance ratio as measured with an eddy-covariance system[J]. Boundary-Layer Meteorology,2017,165:545–551.
- [11] ZHANG Y C, LEI H M, ZHAO W G, et al. Comparison of the water budget for the typical cropland and pear orchard ecosystems in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management,2018,198:53–64.
- [12] GAO X, GU F X, HAO W P, et al. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment,2017,586:1193–1203.
- [13] 冯禹,郝卫平,高丽丽,等. 地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输的影响研究[J]. 农业机械学报,2018,49(12):300–313.
FENG Yu, HAO Weiping, GAO Lili, et al. Effects of plastic mulch on water and heat flux transfer in rainfed maize fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(12):300–313. (in Chinese)
- [14] WANG Y W, LUO W J, ZENG G N, et al. Characteristics of carbon, water, and energy fluxes on abandoned farmland revealed by critical zone observation in the Karst region of Southwest China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2020,292:106821.
- [15] LIU X Y, XU J Z, YANG S H, et al. Temporal upscaling of rice evapotranspiration based on canopy resistance in a water-saving irrigated rice field[J]. Journal of Hydrometeorology,2020,21(7):1639–1654.
- [16] ZHANG B Z, XU D, LIU Y, et al. Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in North China[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2016,216:1–12.
- [17] 魏甲彬,徐华勤,周玲红,等. “双季稻-冬闲田”生态系统碳交换动态变化及其影响因素[J]. 农业环境科学学报,2018,37(5):1035–1044.
WEI Jiabin, XU Huaqin, ZHOU Linghong, et al. Seasonal variation in carbon exchange and its modulating factors of a double cropping rice ecosystem in Southern China[J]. Journal of Agro-Environment Science,2018,37(5):1035–1044. (in Chinese)
- [18] 田容才,文双雅,阳会兵. 基于涡度相关法的农田生态系统碳通量研究进展[J]. 激光生物学报,2019,28(5):415–420.
TIAN Rongcai, WEN Shuangya, YANG Huibing. Research progress on carbon flux in agro-ecosystem based on eddy covariance system[J]. Acta Laser Biology Sinica,2019,28(5):415–420. (in Chinese)
- [19] 陈世苹,游翠海,胡中民,等. 涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用[J]. 植物生态学报,2020,44(4):291–304.
CHEN Shiping, YOU Cuihai, HU Zhongmin, et al. Eddy covariance technique and its applications in flux observations of terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(4):291–304. (in Chinese)
- [20] QIAO S, WANG H, PRENTICE I, et al. Extending a first-principles primary production model to predict wheat yields[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2020,287:107932.
- [21] MONTAGNANI L, ZANOTELLI D, TAGLIAVINI M, et al. Timescale effects on the environmental control of carbon and water fluxes of an apple orchard[J]. Ecology and Evolution,2018,8(1):416–434.
- [22] WANG Y, ZHOU L, JIA Q Y, et al. Water use efficiency of a rice paddy field in Liaohe Delta, Northeast China[J]. Agricultural Water Management,2017,187:222–231.
- [23] WU J, GUAN K Y, HAYEK M, et al. Partitioning controls on Amazon forest photosynthesis between environmental and biotic factors at hourly to interannual timescales[J]. Global Change Biology,2017,23(3):1240–1257.
- [24] 张传伟,齐永青,戴茂华,等. 华北平原灌溉麦田水分利用效率的 SEM 多因素影响研究[J]. 中国生态农业学报,2020,28(6):876–886.
ZHANG Chuanwei, QI Yongqing, DAI Maohua, et al. Effects of multi-factor on water use efficiency as identified by the SEM method in irrigated wheat farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2020,28(6):876–886. (in Chinese)
- [25] WANG Y, ZHOU L, PING X Y, et al. Ten-year variability and environmental controls of ecosystem water use efficiency in a rainfed maize cropland in Northeast China[J]. Field Crops Research,2018,226:48–55.
- [26] LEI H, GONG T, ZHANG Y, et al. Biological factors dominate the interannual variability of evapotranspiration in an irrigated cropland in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2018,250–251:262–276.
- [27] 姜雨萌,赵风华,刘金秋,等. 极端高温对冬小麦冠层碳同化的影响[J]. 中国生态农业学报,2015,23(10):1260–1267.

JIANG Yumeng, ZHAO Fenghua, LIU Jinqiu, et al. Effect of extreme heat on winter wheat canopy carbon assimilation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1260 – 1267. (in Chinese)

[28] YANG X Y, LI J, YU Q, et al. Impacts of diffuse radiation fraction on light use efficiency and gross primary production of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 233 – 242.

[29] ZHAO F, YU G, LI S, et al. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2007, 93: 99 – 108.

[30] LEE X, YU Q, SUN X, et al. Micrometeorological fluxes under the influence of regional and local advection: a revisit[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122(1 – 2): 111 – 124.

[31] ALBERTO M R, QUILTY J R, BURESH R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2014, 136: 1 – 12.

[32] 王酉石, 储诚进. 结构方程模型及其在生态学中的应用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(3): 337 – 344.
WANG Youshi, CHU Chengjin. A brief introduction of structural equation model and its application in ecology[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(3): 337 – 344. (in Chinese)

[33] TANG X G, DING Z, LI H P, et al. Characterizing ecosystem water-use efficiency of croplands with eddy covariance measurements and MODIS products[J]. Ecological Engineering, 2015, 85(2): 212 – 217.

[34] HUANG M T, PIAO S L, ZENG Z Z, et al. Seasonal responses of terrestrial ecosystem water-use efficiency to climate change[J]. Global Change Biology, 2016, 22(6): 2165 – 2177.

[35] 冯保清, 雷慧闽, 吕华芳. 位山灌区冬小麦及夏玉米群体水分利用效率分析[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 29 – 32.
FENG Baoqing, LEI Huimin, LÜ Huafang. Analysis of water use efficiency for winter wheat and summer maize cropland in Weishan irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 29 – 32. (in Chinese)

[36] TRAORE A K, CIAIS P, VUICHARD N, et al. 1982—2010 trends of light use efficiency and inherent water use efficiency in African vegetation: sensitivity to climate and atmospheric CO₂ concentrations[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8923 – 8944.

[37] LI X Y, LIU L J, YANG H J, et al. Relationships between carbon fluxes and environmental factors in a drip-irrigated, film-mulched cotton field in arid region[J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192467.

[38] CHU H S, CHEN J Q, GOTTGENS J F, et al. Response and biophysical regulation of carbon dioxide fluxes to climate variability and anomaly in contrasting ecosystems in Northwestern Ohio, USA[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 220: 50 – 68.

[39] LIU Y L, KUMAR M, KATUL G G, et al. Plant hydraulics accentuates the effect of atmospheric moisture stress on transpiration[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(7): 691 – 695.

[40] YUAN W P, ZHENG Y, PIAO S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396.

[41] PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: a review[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1551 – 1563.

[42] 郭晓旭, 李思恩, 赵鹏, 等. 葡萄园水碳通量对灌溉、降雨和霜冻的响应[J]. 中国农业大学学报, 2013, 23(4): 88 – 93.
GUO Xiaoxu, LI Sien, ZHAO Peng, et al. Responses of water and carbon fluxes in vineyard to irrigation, rainfall and frost[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 23(4): 88 – 93. (in Chinese)

[43] 王进, 白洁, 陈曦, 等. 新疆绿洲覆膜滴灌棉田碳通量特征研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 70 – 78, 136.
WANG Jin, BAI Jie, CHEN Xi, et al. Carbon fluxes in cotton field with plastic mulched drip irrigation in Xinjiang Oasis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 70 – 78, 136. (in Chinese)

[44] LUO Y, ZHANG Z, CHEN Y, et al. ChinaCropPhen1km: a high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000—2015 based on leaf area index (LAI) products[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(1): 197 – 214.

[45] DU Q, LIU Z H, LI Y H, et al. The effect of phenology on the carbon exchange process in grassland and maize cropland ecosystems across a semiarid area of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 695: 133868.

[46] 靳宁, 张东彦, 李振海, 等. 基于多光谱卫星模拟波段反射率的冬小麦水分状况评估[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 243 – 252.
JIN Ning, ZHANG Dongyan, LI Zhenhai, et al. Evaluation of water status of winter wheat based on simulated reflectance of multispectral satellites[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 243 – 252. (in Chinese)