

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.01.032

基于增强回归树的麦-玉轮作农田蒸散影响因素分析

李成¹ 李兆哲¹ 王让会² 丁奠元³ 徐扬^{4,5}

(1. 扬州大学植物保护学院, 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. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 4. 扬州大学农学院, 扬州 225009;
5. 扬州大学植物功能基因组学教育部重点实验室, 扬州 225009)

摘要: 为探讨华北典型轮作农田蒸散(ET)变化规律,以山东禹城试验站冬小麦-夏玉米(麦-玉)轮作田为研究对象,基于涡度相关技术实测的8年观测数据与增强回归树方法,分析了农田ET逐日变化特征及其对环境因子的响应。结果表明:研究时段内逐日ET变化范围在0~9.6 mm/d之间,且不同阶段(小麦季、玉米季和农闲期)ET总量存在较大差异。一般而言,每年小麦季ET的峰值和总量均明显高于玉米季,而农闲期ET占全年ET总量的比例不足4%。净辐射是影响麦-玉轮作田不同阶段ET变化的首要因素,对各阶段ET的贡献率由高到低依次为小麦季(81.4%)、玉米季(52.7%)、农闲期(36.8%)。除净辐射外,其他环境因子对ET的影响则具有阶段性差异。饱和水汽压差对小麦季和玉米季ET存在一定的影响,而土壤含水率和风速对农闲期ET的贡献率相对较高。研究可为变化环境下农业水资源高效利用以及作物模型优化等提供科学依据。

关键词: 农田蒸散; 麦-玉轮作; 环境因子; 增强回归树

中图分类号: S161 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0317-09

OSID:



Influencing Factors of Evapotranspiration in Wheat – Maize Rotation Field Using Boosting Regression Tree

LI Cheng¹ LI Zhaozhe¹ WANG Ranghui² DING Dianyuan³ XU Yang^{4,5}

(1. College of 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 Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

4. College of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

5. Key Laboratory of Plant Functional Genomics, Ministry of Education, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to understand evapotranspiration (ET) of rotation fields in the North China Plain, a typical wheat – maize rotation field at the Yucheng site in Shandong Province was chosen as a case study. The continuous daily flux and meteorological observation data at this site were systematically collected to investigate the changing characteristics of ET and environmental factors from 2003 to 2010. Also the boosted regression tree was used to identify the influencing factors of ET in different growing seasons. The results showed that the ET was ranged from 0 mm/d to 9.6 mm/d, and the peak value of ET in the wheat season was usually higher than that in the maize season. Moreover, annual total value of ET in the wheat season was obviously higher than that in the maize season. As for the non-growing season, ET during this period accounted for less than 4% of annual total ET. The net radiation was an important factor affecting the seasonal changes of ET in different stages in this field. Its relative contribution was in the decreasing order of wheat season (81.4%), maize season (52.7%), and non-growing season (36.8%). In addition to net radiation, the vapour pressure deficit had also a certain impact on ET in different growing seasons, and its relative contribution in the maize season (17.6%) was higher than that in the winter

收稿日期: 2022-03-21 修回日期: 2022-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801013、32170636)、江苏省自然科学基金项目(BK20180939)、国家重点研发计划项目(2019YFC0507403)、江苏省农业气象重点实验室开放项目(JKLAM1802)和扬州大学高端人才支持计划项目(2020)

作者简介: 李成(1988—),男,副教授,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: 徐扬(1989—),女,副教授,博士,主要从事生物统计学研究,E-mail: yangx@yzu.edu.cn

wheat season (5.9%)。As for the non-growing season, the relative contribution of soil water content and wind speed was relatively higher, which were 22.5% and 17.0%, respectively. The research result can provide an important reference for formulating reasonable irrigation management and optimizing crop models under a changing environment.

Key words: cropland evapotranspiration; wheat-maize rotation; environmental factors; boosted regression tree

0 引言

农田水分循环过程是土壤-植物-大气连续体研究的重要内容^[1],蒸散(Evapotranspiration, ET)作为其中的关键变量之一,在农田与大气间的水分和能量交换中扮演了重要角色^[2]。农田 ET 包括植物蒸腾与土壤蒸发,它与农田灌溉、作物生长等过程关系密切^[3-4]。因此,在淡水资源日益趋紧的背景下,理解农田 ET 的动态变化对提高农业水资源利用效率、发展气候智慧型农业,具有重要的现实意义。

农田 ET 的实测方法有很多,主要包括涡度相关法、波文比法、稳定同位素法、蒸渗仪法、大孔径闪烁仪法等^[5]。其中,涡度相关法在测定时不会损坏植物且测量精度较高,是近年来应用较为广泛的方法之一^[6]。基于涡度相关法的农田 ET 研究表明:ET 在作物生长季内有明显的日、季节变化特征,但由于地理位置、水热条件、栽培管理方式的差异,使不同农田 ET 的变化幅度、峰值及其出现时间也有所不同^[7-8]。另一方面,目前基于该方法的研究大多采用短期观测资料进行分析(小于3年),在一定程度上易受天气条件的影响^[9],不利于全面认识农田 ET 的变化规律。已有研究表明:不同环境因子,如净辐射(Net radiation, R_n)、气温(Air temperature, T)、饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)、风速(Wind speed, WS)、土壤含水率(Soil water content, SWC)等,对作物生长和农田 ET 变化产生重要影响^[10-11]。但这些环境因子之间往往存在共线性问题^[12],使一些传统分析方法(如多元回归分析、结构方程模型等)在量化农田 ET 的影响因子和影响程度方面,可能存在一定偏差。为厘清这些环境因子对农田 ET 变化的影响,近年来兴起的机器学习方法,如随机森林方法、增强回归树(Boosted regression tree, BRT)方法等,在探究多因子相互关系方面有重要潜力^[13-14]。以 BRT 方法为例,它能在不预先设定数学表达式的前提下,模拟输入变量和输出变量之间的非线性关系,并通过提取各输入变量的边际效应,厘清它们对输出变量的影响^[15];同时 BRT 方法对各变量的数据类型、概率分布和共线性等具有较大的容忍度^[16],因而将该方法用于农田 ET 的多因子影响分析,可为阐明不同因子对农

田 ET 变化的影响贡献与影响方式等提供方法参考。然而,目前基于该方法对轮作田不同作物生长季及农闲期阶段 ET 变化及其影响因子的对比研究,还相对缺乏。

为此,本研究以华北典型麦-玉(冬小麦-夏玉米)轮作田为例,基于逐日观测数据(包括7个小麦生长季和8个玉米生长季),分析不同作物生长季和农闲期阶段 ET 的变化特征;并利用 BRT 方法,阐明农田 ET 对环境因子的响应特征,以期为变化环境下农业水资源高效利用以及作物模型优化等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究站点概况

研究站点位于山东省禹城市西南部(36.83°N, 116.56°E),是中国科学院生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)农田观测站之一。该站年平均气温为 13.2℃,年均降雨量为 582 mm,太阳总辐射达 5 225 MJ/m²,无霜期约 200 d^[17]。地貌类型为黄河冲积平原,土壤母质为黄河冲积物,耕层土壤有机质质量比在 10~12 mg/kg 之间,pH 值介于 7.8~8.0 之间^[18]。种植模式为小麦与玉米轮作,二者的播种与收获日期如表 1 所示。

1.2 数据获取与处理

本研究所用到的逐日观测数据,如潜热通量、 R_n 、 T 、VPD、WS 及表层(0~5 cm)SWC 等,由 CSAT3 型三维超声风速仪(Campbell Scientific 公司,美国)、LI-7500 型 H₂O/CO₂ 红外气体分析仪(LICOR Biosciences 公司,美国)和配套的自动微气象观测系统实测获得。将仪器设立在面积约 0.13 km² 的小麦-玉米轮作田中。其中,三维超声风速仪和 H₂O/CO₂ 红外气体分析仪安装在植被冠层上方 2.5 m 处,盛行风向的风浪区长度为 5 km,满足通量观测试验的基本要求。并且相关实测数据已通过质量控制,具有较高的可信度^[19]。观测时段为 2003 年 6 月至 2010 年 10 月,逐日 ET 通过潜热通量与汽化潜热的比值计算得到^[9]。根据表 1 中作物播种/收获日期,将逐日 ET 及环境要素数据划分为小麦季、玉米季

表 1 禹城站小麦与玉米的播种/收获日期

Tab. 1 Harvest date and sowing date of wheat and maize at Yucheng site

小麦		玉米	
播种日期	收获日期	播种日期	收获日期
		2003 年 6 月 16 日	2003 年 10 月 2 日
2003 年 10 月 24 日	2004 年 6 月 10 日	2004 年 6 月 21 日	2004 年 10 月 4 日
2004 年 10 月 10 日	2005 年 6 月 15 日	2005 年 6 月 19 日	2005 年 10 月 14 日
2005 年 10 月 29 日	2006 年 6 月 11 日	2006 年 6 月 18 日	2006 年 9 月 18 日
2006 年 10 月 6 日	2007 年 6 月 7 日	2007 年 6 月 14 日	2007 年 9 月 24 日
2007 年 10 月 7 日	2008 年 6 月 10 日	2008 年 6 月 13 日	2008 年 10 月 2 日
2008 年 10 月 16 日	2009 年 6 月 9 日	2009 年 6 月 15 日	2009 年 9 月 30 日
2009 年 10 月 23 日	2010 年 6 月 16 日	2010 年 6 月 20 日	2010 年 10 月 4 日

和农闲期阶段,分别进行统计分析。

1.3 BRT 方法

BRT 方法是一种在传统的分类回归树基础上,结合提升算法(Boosting)开发而来的自学习方法。它使用二元递归分割算法消除不同因子之间的相互作用,并通过多个回归树进行加权平均,从而提高模型的准确性^[14]。具体计算步骤如下^[15-16]:①随机抽取一定比例的数据样本,产生大量具有固定节点数的回归树模型,并利用剩余数据对拟合结果进行检验。②采用逐步迭代的方法,按顺序学习每一个回归树。在每个回归树前乘以一个较小学习速率后加入总预测模型。③利用交叉验证的方法,确定最优回归树的数量,以提高模型的稳定性和准确性,且避免出现拟合现象。④根据输入变量在分类回归树中对输出变量离差平方和的减少量,计算各输入变量的重要性程度,该重要性程度值是模型中多个回归树离差平方和减少量的平均值。由于 BRT 方法在处理非线性观测数据方面具有较高的预测精度,并且计算结果稳定、易于解释等优点,目前已被广泛用于归因分析和边际效应研究等领域^[20]。

本研究基于 R Studio 软件和 gbm 包(版本:2.1.8),分析不同环境因子(T 、 R_n 、VPD、WS 和 SWC)与 ET 之间的关系,进而识别影响 ET 的关键因子及其贡献率。BRT 涉及的相关参数如下:决策树复杂度为 8,学习速率为 0.001,分割比例为 0.75。具体的计算流程见文献^[15]。

2 结果与分析

2.1 麦-玉轮作田小气候特征

麦-玉轮作田 T 、 R_n 、VPD、WS、SWC 和 ET 的逐日变化曲线,如图 1 所示。 T 表现出冬季低、夏季高的单峰型变化特征,研究时段内 T 的日最高值和最低值分别出现在 2005 年 6 月下旬(32.7℃)和 2003 年 1 月上旬(-11.3℃),年平均 T 为 13.0~13.8℃,多年平均值为 13.4℃(表 2)。对于不同作物生长季

而言,小麦季平均 T 低于年平均水平,变化范围在 7.1~9.2℃之间;玉米季平均 T 变化范围为 23.6~25.0℃,多年平均值为 24.2℃。农闲期平均 T 介于小麦季和玉米季之间,达 19.2℃。

与 T 类似, R_n 也呈单峰型变化特征。研究时段内逐日 R_n 在 -47.2~217.8 W/m² 波动,年平均 R_n 介于 56.3~67.0 W/m²,多年平均值为 63.2 W/m²(表 2)。除 2003 年和 2008 年外,其他年份 R_n 的年平均值大多为 65 W/m² 左右。对于不同阶段而言,小麦季 R_n 为(47.4±2.2) W/m²,明显低于玉米季(100.6±9.1) W/m²,而农闲期 R_n 则介于二者之间,为(60.3±13.2) W/m²。

VPD 在年内呈现出双峰型特征,两个峰值分别出现在 6 月和 10 月,通常每年第 1 个峰值的 VPD 明显高于第 2 个峰值。研究时段内逐日 VPD 变化范围在 0~3.0 kPa 之间,多年平均值为 0.56 kPa(表 2)。就不同作物生长季而言,小麦季 VPD 的多年平均值较玉米季略低,二者分别为 0.48 kPa 和 0.71 kPa。

WS 和 SWC 在年内变化较为复杂,具有明显的波动特征。逐日 WS 变化范围在 0~8.2 m/s 之间,多年平均值为 1.8 m/s。其中 WS 超过 4 m/s 以上的天数主要集中在小麦季,约有 135 d;而玉米季和农闲期 WS 超过 4 m/s 以上的天数不足小麦季的 10%。研究时段内 SWC 基本在 0.2 m³/m³ 以上,其中小麦季 SWC 为(0.33±0.04) m³/m³,较玉米季 SWC 整体偏低(表 2)。

2.2 麦-玉轮作田 ET 变化特征

麦-玉轮作田 ET 的逐日变化曲线如图 1 所示。ET 在年内表现出双峰型变化特征,两个峰值分别出现在小麦季和玉米季,通常每年第 1 个高峰的 ET 明显高于第 2 个高峰。研究时段内逐日 ET 变化范围在 0~9.6 mm/d 之间,多年平均值为 682.6 mm(表 2)。

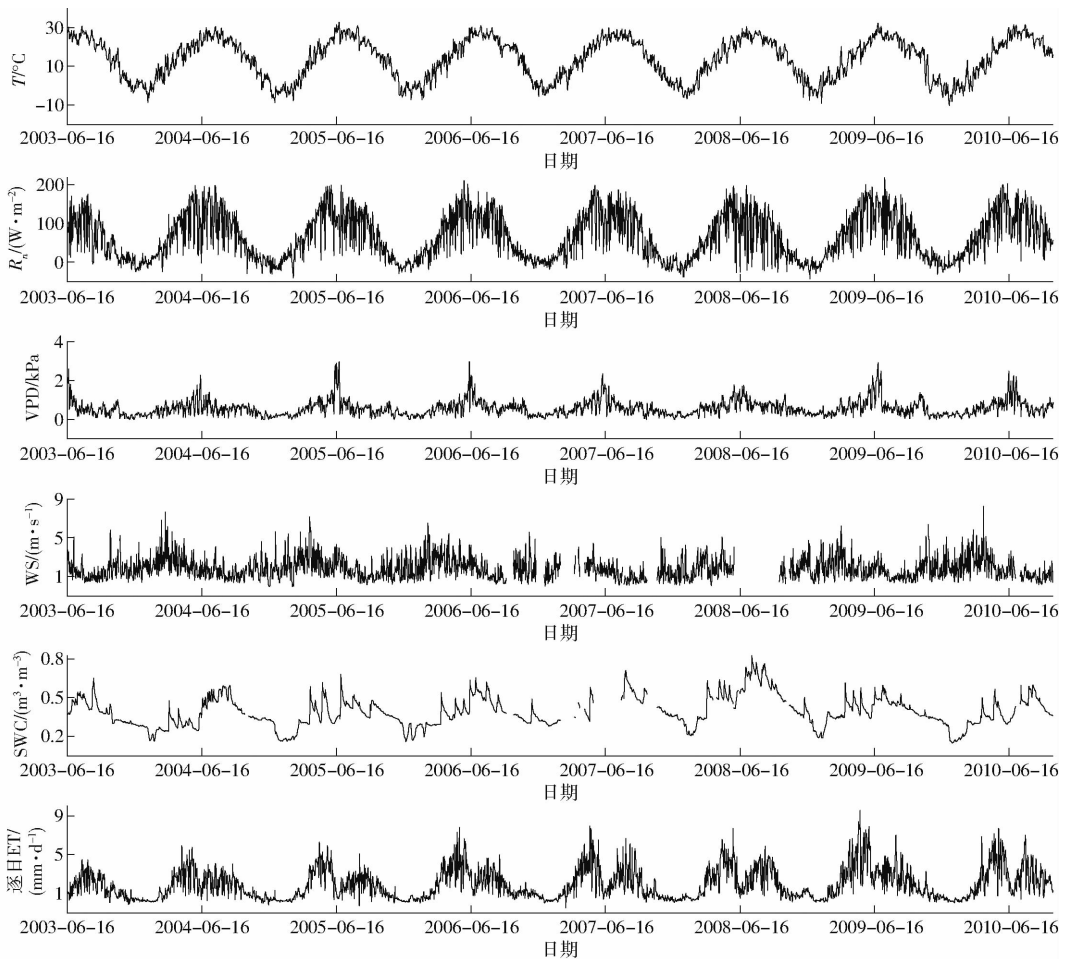


图1 研究时段内麦-玉轮作田 T 、 R_n 、VPD、WS 和 SWC 的季节变化曲线

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

表2 麦-玉轮作田 T 、 R_n 、VPD、WS、SWC 和

ET 的统计特征

Tab.2 Characteristics of T , R_n , VPD, WS, SWC and ET in wheat – maize rotation field

阶段	参数	最大值	最小值	平均值	标准差
全年	$T/^\circ\text{C}$	13.8	13.0	13.4	0.3
	$R_n/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	67.0	56.3	63.2	3.9
	VPD/kPa	0.62	0.47	0.56	0.05
	$\text{WS}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.0	1.4	1.8	0.2
	$\text{SWC}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	0.48	0.35	0.39	0.04
	ET/mm	852.2	539.5	682.6	104.9
小麦季	$T/^\circ\text{C}$	9.2	7.1	8.2	0.6
	$R_n/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	50.3	44.1	47.4	2.2
	VPD/kPa	0.52	0.46	0.48	0.02
	$\text{WS}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.3	0.2	1.9	0.8
	$\text{SWC}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	0.39	0.28	0.33	0.04
	ET/mm	503.9	315.1	408.5	58.4
玉米季	$T/^\circ\text{C}$	25.0	23.6	24.2	0.5
	$R_n/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	109.3	85.6	100.6	9.1
	VPD/kPa	0.81	0.60	0.71	0.07
	$\text{WS}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.5	0.8	1.2	0.2
	$\text{SWC}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	0.64	0.43	0.50	0.08
	ET/mm	315.0	221.7	261.2	36.4
农闲期	$T/^\circ\text{C}$	21.8	16.2	19.2	2.0
	$R_n/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	76.2	45.4	60.3	13.2
	VPD/kPa	1.08	0.75	0.86	0.12
	$\text{WS}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2.4	1.1	1.6	0.4
	$\text{SWC}/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3})$	0.52	0.35	0.43	0.07
	ET/mm	43.9	14.1	25.8	11.4

就不同阶段而言,小麦季ET的日最高值为9.6 mm/d,出现在2009年5月8日。研究时段内小麦季单日ET超过5 mm/d共有109 d,分布在4—6月。其中,出现在5月的天数最多,约有70 d;而出现在4月和6月分别有26 d和13 d。小麦季ET变化范围在315.1~503.9 mm之间,多年平均值为408.5 mm。

研究时段内玉米季ET的日最高值为7.0 mm/d,出现在2010年7月31日。玉米季单日ET超过5 mm/d共有18 d,分布在7—9月,其中以出现在8月的天数最多(11 d),7月次之(5 d)。玉米季ET变化范围在221.7~315.0 mm之间,多年平均值为261.2 mm。

农闲期ET的日最高值为3.5 mm/d,出现在2006年6月16日。与小麦季和玉米季相比,农闲期ET相对较低,变化范围在14.1~43.9 mm之间,多年平均值为25.8 mm。

2.3 麦-玉轮作田 ET 变化影响因子

考虑到环境因子之间可能存在较高的相关关系,本研究利用BRT方法分析不同作物生长季和农闲期阶段ET变化的多环境因子影响。对BRT模型

运行结果进行交叉验证:小麦季、玉米季和农闲期阶段观测值与模拟值的 R^2 分别为 0.92、0.81 和 0.89;均方根误差分别为 0.5、0.51、0.24 mm。上述结果反映了模型的拟合效果整体较好,证明 BRT 模型结果可信。各环境因子对麦-玉米轮作田 ET 的影响贡献率,如表 3 所示。

表 3 环境因子对麦-玉米轮作田 ET 的影响贡献率

Tab. 3 Contribution of environmental factors to ET in wheat - maize rotation field %

阶段	T	R_n	VPD	WS	SWC
小麦季	4.2	81.4	5.9	2.9	5.6
玉米季	6.0	52.7	17.6	11.0	12.7
农闲期	10.5	36.8	13.2	17.0	22.5

在影响小麦季 ET 变化的环境因子中(表 3), R_n 贡献率最大(81.4%),VPD 次之(5.9%),其余因子

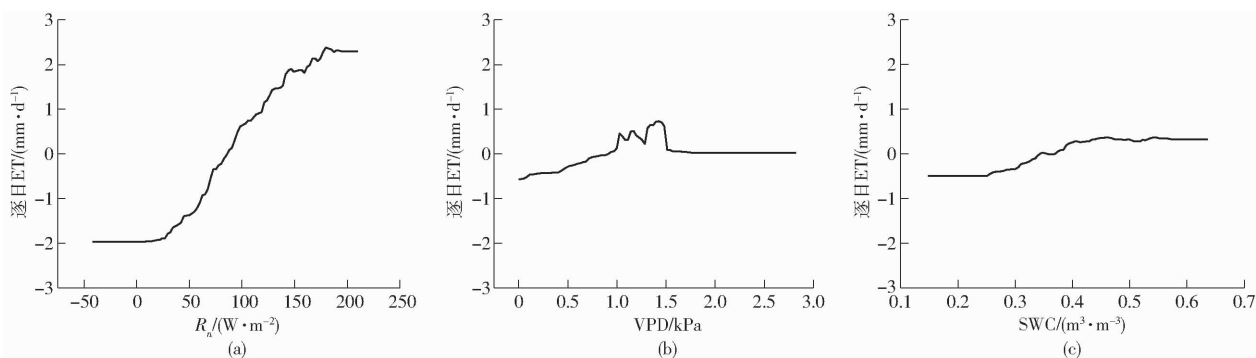


图 2 主要环境因子对小麦季 ET 影响的边际效应

Fig. 2 Marginal effects of main environmental factors on ET in wheat seasons

玉米季 ET 受各环境因子的影响也存在明显差异。 R_n 是影响玉米季 ET 变化的关键因子,贡献率达 52.7% (表 3)。如图 3a 所示,当 R_n 在 10 ~ 160 W/m^2 之间时,影响曲线随 R_n 的增大而快速上升,并在 R_n 达到 180 W/m^2 时,正影响力达到最大;当 R_n 超过 180 W/m^2 后, R_n 对 ET 的影响程度基本保持不变。VPD 对玉米季 ET 的影响仅次于 R_n ,其贡献率为 17.6% (表 3)。从

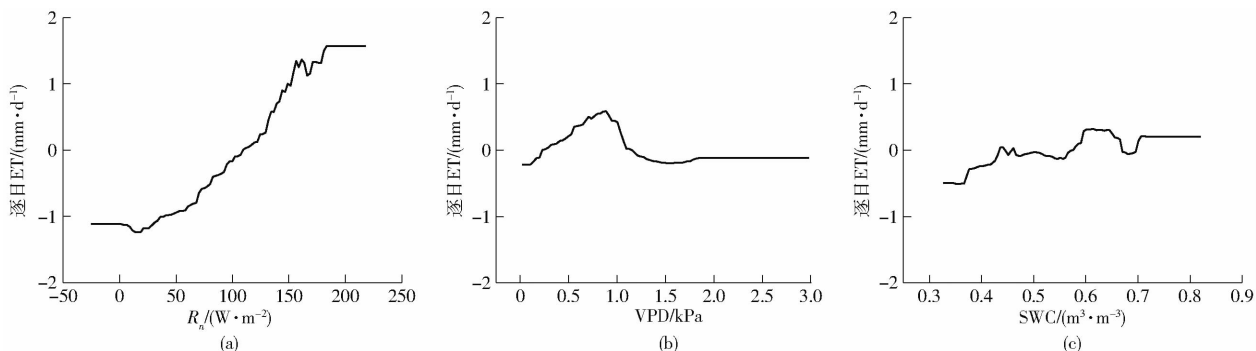


图 3 主要环境因子对玉米季 ET 影响的边际效应

Fig. 3 Marginal effects of main environmental factors on ET in maize seasons

农闲期 ET 受环境因子的影响如表 3 和图 4 所示。与小麦季和玉米季不同,影响农闲期 ET 变化的

按贡献率排序分别为 SWC(5.6%)、 T (4.2%)、WS(2.9%)。图 2 为贡献率排在前 3 位的环境因子与小麦季 ET 之间的边际效应,进而揭示主要环境因子(R_n 、VPD 和 SWC)对小麦季 ET 的影响。 R_n 对小麦季 ET 的影响随 R_n 增大而呈正相关关系(图 2a),特别是 R_n 在 30 ~ 180 W/m^2 时,影响程度陡然上升,并达到最大值;但当 R_n 超过 180 W/m^2 后, R_n 对 ET 的影响程度基本保持不变。VPD 与小麦季 ET 之间的影响曲线呈波动特征(图 2b)。当 VPD 在 0 ~ 1.2 kPa 时,随着 VPD 的增加,曲线呈上升趋势;并在 1.4 kPa 处曲线达到最高点,产生最高正影响力;此后随 VPD 的增加,曲线呈下降趋势,并逐步达到稳定状态。当 SWC 小于 0.4 m^3/m^3 时,对小麦季 ET 具有一定程度的影响;当 SWC 高于 0.4 m^3/m^3 时,则影响程度保持相对平稳(图 2c)。

VPD 对 ET 的影响曲线可知(图 3b),整体呈倒“U”形特征;当 VPD 约为 0.7 kPa 时,影响曲线出现最高值,然后开始出现局部下降趋势,并在 VPD 达到 1.7 kPa 时,曲线逐步达到稳定状态。SWC 也是影响玉米季 ET 变化的重要因子之一,其贡献率为 12.7% (表 3)。当 SWC 处于 0.35 ~ 0.60 m^3/m^3 时,影响曲线呈现出一定的波动增加趋势(图 3c)。

关键环境因子依次为 R_n 、SWC 和 WS,贡献率分别为 36.8%、22.5% 和 17.0% (表 3)。图 4 为贡献率排在

前3位的环境因子与ET之间的边际效应。影响曲线分别在一定范围内随 R_n 、SWC和WS的增大而增大,但当 R_n 超过 135 W/m^2 时,影响曲线不再随 R_n 的增加而继续增大(图4a)。SWC的影响曲线具有波动变化特征(图4b)。当SWC在 $0.36 \sim 0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 之间时,

曲线随SWC增加而呈上升趋势;当SWC增加至高于 $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 时,影响曲线不再随SWC的增大而变化。与SWC相似,当WS小于 1.8 m/s 时,随着WS的增加,曲线呈上升趋势;而当WS高于 2.7 m/s 时,其影响程度保持相对平稳(图4c)。

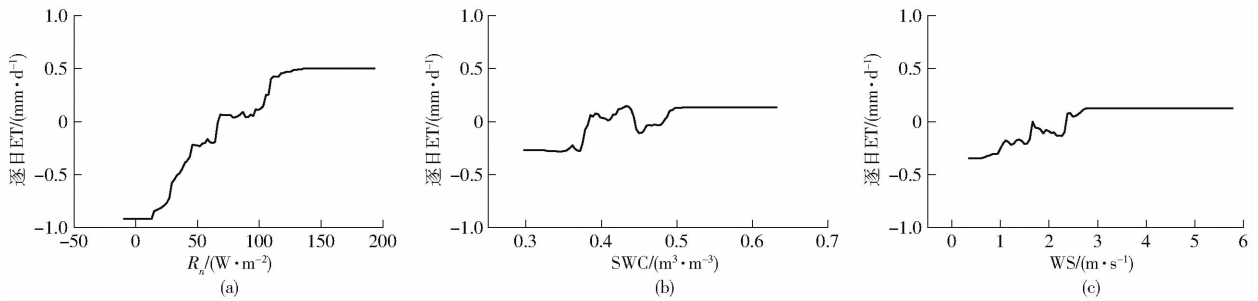


图4 主要环境因子对农闲期ET影响的边际效应

Fig.4 Marginal effects of main environmental factors on ET in non-growing seasons

3 讨论

为进一步理解禹城站农田ET特征,表4列出了华北平原不同站点农田ET的监测结果。如表4所示,基于涡度相关法的华北麦-玉轮作田ET大多介于 $640 \sim 791 \text{ mm}$ 之间,并表现出一定的空间异质性^[21-26],如封丘站和栾城站ET较高,分别为 791 、 693 mm ,而馆陶站ET较低,为 608.7 mm (表4)。由于各站点均位于华北平原,气候条件较为相似,受作物生长和农业管理(灌溉、施肥、作物品种等)等因素的影响,因而造成不同站点间ET数值上的差异^[27]。

表4 研究时段内华北平原不同站点农田ET结果对比

Tab.4 Comparisons of ET in different sites during study period across North China Plain

站点	省份	作物类型	研究时段	平均值/ mm	文献 序号
大兴	北京	小麦、玉米	2008—2010年	664.7*	[21]
馆陶	河北	小麦、玉米、棉花	2008—2010年	608.7*	[21]
栾城	河北	小麦、玉米	2008—2010年	693.0*	[22]
南皮	河北	小麦	2012—2015年	342.5	[23]
曲周	河北	小麦、玉米	2000—2010年	879.0	[24]
封丘	河南	小麦、玉米	2011—2014年	791.0*	[25]
位山	山东	小麦、玉米	2005—2009年	648.0*	[22,26]
本研究	山东	小麦、玉米	2003—2010年	682.6*	

注: *表示基于涡度相关法的农田ET结果。

就不同阶段而言,禹城站小麦季ET的多年平均值明显高于玉米季,这除了与二者生长季环境条件不同外,也与它们分属于不同作物类型有关。一般而言,C4植物(玉米)比C3植物(小麦)拥有更高的碳同化速率且气孔导度较小,使蒸腾耗水较低^[26,28]。而农闲期阶段地表近似“裸地”的状况,使

该阶段ET占全年ET总量的比例不足4%。考虑到机器学习方法在探究多因子相互关系方面的潜力,本研究利用BRT方法分析了不同作物生长季和农闲期阶段ET变化的多环境因子影响。结果表明: R_n 是影响麦-玉轮作田不同阶段ET变化的重要因子,这是因为无论是土壤蒸发还是植物蒸腾,辐射提供的能量可以改变系统中水热分配状况,使植物体内水分和土壤水分发生相变汽化过程,进而影响ET变化^[29]。但同时 R_n 对不同阶段ET变化的影响也存在明显差异,其贡献率由高到低依次为小麦季(81.4%)、玉米季(52.7%)、农闲期(36.8%)。除 R_n 外,VPD对作物生长季ET也存在一定的影响。一方面,VPD作为衡量大气干燥程度的重要指标,在土壤-植物-大气连续体中,能直接影响气孔开闭,控制植物蒸腾等生理过程^[30],对农田ET产生重要影响;另一方面,ET不随VPD增大而无限增大,存在一个阈值范围。FLETCHER等^[31]发现VPD阈值受到植物耐旱程度的影响,一般不超过 2.0 kPa ,而本研究发现:小麦季和玉米季VPD的这一阈值虽然在FLETCHER等^[31]的研究结果范围之内,但二者并不相同,分别为 1.4 kPa 和 0.7 kPa 。SWC作为衡量土壤干旱的重要指标,一般通过影响木质部的导水率,从而控制气孔导度^[32]。虽然SWC和VPD对农田碳-水交换的调节效应可能是独立的,但部分研究证实VPD对ET的影响可能受到SWC的调节^[33]。在地表近似“裸地”的农闲期时段,ET主要以土壤蒸发为主,此时SWC和WS对该时段ET变化的影响不可忽略。因此从模型建模的角度考虑,今后仍需要在作物模型中,针对不同作物类型和不同阶段,建立相应的参数化方案,从而有效降低ET模拟结果的不确定性^[34]。

由于研究区玉米季属于多降雨期,因而降雨对 ET 及各环境因子也可能产生一定的影响。为此,本研究选择 7 月下旬至 8 月上旬两次典型降雨时段,对比分析降雨时段前后 ET 与各环境因子的变化差异(表 5)。由表 5 可知,由于降雨期间太阳辐射减少、湿度增大,使 R_n 、 T 、VPD 较降雨前出现不同程度地下降,而降雨后土壤水分得到补充,使 SWC 出现增大;对 ET 而言,其在降雨期间出现下降,但降雨结束后的晴天阶段,ET 会大幅增加,这与前人的研究结果相似^[35-36]。但郭映等^[29]基于黄土高原丘陵沟壑区玉米田 ET 资料,发现 8 月中上旬白天气温较高,若降雨发生在傍晚时段,则对玉米田 ET 不会产生较大影响;

而 8 月下旬后,由于玉米处于生长晚期,此时气温骤降和阴雨天气会使 ET 减少^[29]。总体而言,降雨对玉米季 ET 影响具有一定的复杂性。一方面,全球变暖背景下降雨的时空异质性日趋增加,且有向极端化发展的倾向^[37]。因此,降雨的强度、发生时间、持续期和极值变化可能会对不同生育阶段玉米 ET 的影响存在明显差异。另一方面,北方地区 ET 受能量或水分的限制随降水类型不同而变化明显^[38],因而厘清降水对玉米季 ET 的影响还需要考虑种植区域的气候背景条件。为此,在后续的研究中,将通过加入更多不同地域、不同时间尺度(如逐小时、逐日等)的观测数据定量分析这一影响。

表 5 玉米季典型降雨时段 ET 与环境因子的变化特征

Tab. 5 Changes of ET and environmental factors in typical rainy period of maize seasons

统计时段	各阶段	降雨量/ mm	T / °C	R_n / ($W \cdot m^{-2}$)	VPD/ kPa	WS/ ($m \cdot s^{-1}$)	SWC/ ($m^3 \cdot m^{-3}$)	逐日 ET/ ($mm \cdot d^{-1}$)
2009 年 7 月 29 日— 8 月 9 日	降雨前:2009 年 7 月 29 日—8 月 1 日	0	25.9	123.5	6.01	0.6	0.44	3.5
	降雨期间:2009 年 8 月 2—5 日	42.3	24.0	67.3	3.99	0.8	0.46	1.9
	降雨后:2009 年 8 月 6—9 日	0	25.9	140.0	5.39	0.7	0.46	3.4
2004 年 7 月 21 日— 8 月 9 日	降雨前:2004 年 7 月 21—25 日	0	29.1	168.3	9.08	2.9	0.48	3.3
	降雨期间:2004 年 7 月 26 日—8 月 4 日	126.9	25.5	97.0	3.96	1.3	0.51	1.8
	降雨后:2004 年 8 月 5—9 日	0	27.2	147.4	5.82	1.5	0.54	3.0

注: T 、 R_n 、VPD、WS、SWC 和 ET 为各阶段的平均值。

除环境因子外,作物生长和农业管理等可能也会影响农田 ET 的变化。例如在作物生长初期,叶面积指数(LAI)较小, R_n 主要转化为显热通量;随着作物生长,LAI 逐步增加,光合速率增大,植物蒸腾作用加强, R_n 更多地转化为潜热通量,从而影响 ET 变化^[39]。对于灌溉而言,它使 SWC 升高,从而导致土壤蒸发量增加;同时 SWC 升高也使得植物根系吸收水量增加,进而使得植物蒸腾增加,促使 ET 升高^[40]。但受限于相关数据资料缺乏,目前对这方面的定量分析仍有待于深入探讨。以 LAI 为例,目前长时序 LAI 变化通常是利用遥感数据进行表征,但是受时空分辨率的影响,遥感 LAI 数据并不一定能反映地面涡度通量塔附近农田 LAI 的真实情况^[11],因此为了降低本研究的不确定性,暂未考虑 LAI 的定量影响。后续将围绕 LAI、灌溉和施肥等因子,尽可能多地获得相关特征变量的实测数据,并融入已

有的分析结果中,以便进一步提高对麦-玉轮作田 ET 变化的解释能力。

4 结论

(1) 麦-玉轮作田 ET 具有明显的双峰型季节变化特征,通常每年小麦季 ET 的峰值明显高于玉米季。就不同阶段而言,小麦季和玉米季多年 ET 平均值分别为 408.5 mm 和 261.2 mm,而农闲期 ET 多年平均值为 25.8 mm。

(2) R_n 是不同作物生长季 ET 季节变化的重要影响因素,特别是对小麦季 ET 影响的贡献率达 81.4%,远高于玉米季。此外,VPD 对小麦季和玉米季 ET 也存在一定的影响,且这种影响具有阈值差异。对于农闲期而言,影响该阶段 ET 变化的关键环境因子依次为 R_n 、SWC 和 WS,贡献率分别为 36.7%、22.5% 和 17.0%。

参 考 文 献

- [1] 梅旭荣,康绍忠,于强,等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6): 1149-1157.
MEI Xurong, KANG Shaozhong, YU Qiang, et al. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1149-1157. (in Chinese)
- [2] PASCOLINI-CAMPBELL M, REAGER J T, CHANDANPURKAR H A, et al. A 10 percent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019[J]. Nature, 2021, 593(7860): 543-547.

- [3] 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.
- [4] 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)
- [5] 张宝忠, 许迪, 刘钰, 等. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(6): 8–16. ZHANG Baozhong, XU Di, LIU Yu, et al. Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(6): 8–16. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 刘笑吟, 王海明, 王钥, 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] LEI H M, GONG T T, ZHANG Y C, 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.
- [9] ZHOU L, WANG Y, JIA Q Y, et al. Evapotranspiration over a rainfed maize field in Northeast China; how are relationships between the environment and terrestrial evapotranspiration mediated by leaf area? [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 538–546.
- [10] 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 Water Management*, 2016, 216: 1–12.
- [11] WANG Y, ZHOU L, JIA Q Y, et al. Direct and indirect effects of environmental factors on daily CO₂ exchange in a rainfed maize cropland—a SEM analysis with 10 year observations[J]. *Field Crops Research*, 2019, 242: 107591.
- [12] 李成, 王让会, 李兆哲, 等. 冬小麦-夏玉米农田蒸散与 CO₂ 净交换特征及影响因素[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 331–339. LI Cheng, WANG Ranghui, LI Zhaozhe, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration and net CO₂ exchange in winter wheat – summer maize field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 331–339. (in Chinese)
- [13] ROJAS-ROBLES N E, GARATUZA-PAYÁN J, ÁLVAREZ-YÉPIZ J C, et al. Environmental controls on carbon and water fluxes in an old-growth tropical dry forest [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020, 125(8): e2020JG005666.
- [14] SUN S B, CHE T, LI H Y, et al. Water and carbon dioxide exchange of an alpine meadow ecosystem in the northeastern Tibetan Plateau is energy-limited[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 283–295.
- [15] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802–813.
- [16] 宋成刚, 李红琴, 王军邦, 等. 青海海北高寒嵩草草甸系统水分利用效率特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(6): 90–96. SONG Chenggang, LI Hongqin, WANG Junbang, et al. Characterizing ecosystem water use efficiency of alpine Kobresia meadow over the Northeastern Qinghai–Tibetan Plateau [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(6): 90–96. (in Chinese)
- [17] 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. Effects of extreme heat on winter wheat canopy carbon assimilation [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1260–1267. (in Chinese)
- [18] BAO X Y, LI Z G, XIE F T. Eight years of variations in ecosystem respiration over a residue-incorporated rotation cropland and its controlling factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 139325.
- [19] ZHAO F H, YU G R, LI S G, et al. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 93(3): 99–108.
- [20] LIU Q, WANG T J, HAN Q, et al. Diagnosing environmental controls on actual evapotranspiration and evaporative fraction in a water-limited region from Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124045.
- [21] LIU S M, XU Z W, ZHU Z L, 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.
- [22] SHEN Y J, ZHANG Y C, SCANLON B R, et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 181: 133–142.
- [23] 张喜英, 刘小京, 陈素英, 等. 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究[J]. *中国生态农业学报*, 2016,

- 24(8): 995 – 1004.
- ZHANG Xiyang, LIU Xiaojing, CHEN Suying, et al. Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(8): 995 – 1004. (in Chinese)
- [24] HOLST J, LIU W P, ZHANG Q, et al. Crop evapotranspiration, arable cropping systems and water sustainability in southern Hebei, P. R. China[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141: 47 – 54.
- [25] WANG F F, MA D H, ZHAO W J, et al. A validation of eddy covariance technique for measuring crop evapotranspiration on different time scales in the North China Plain[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2021, 101(1): 134 – 146.
- [26] LEI H M, YANG D W. Interannual and seasonal variability in evapotranspiration and energy partitioning over an irrigated cropland in the North China Plain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 581 – 589.
- [27] ZHENG H, YU G R, WANG Q F, et al. Spatial variation in annual actual evapotranspiration of terrestrial ecosystems in China: results from eddy covariance measurements[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(10): 1391 – 1411.
- [28] LEI H M, YANG D W. Seasonal and interannual variations in carbon dioxide exchange over a cropland in the North China Plain[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(11): 2944 – 2957.
- [29] 郭映, 董阳, 党慧慧, 等. 基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾量及其影响因素[J]. *资源科学*, 2014, 36(7): 1501 – 1508.
- GUO Ying, DONG Yang, DANG Huihui, et al. Evapotranspiration and transpiration of maize in two time scales and the environmental effects[J]. *Resources Science*, 2014, 36(7): 1501 – 1508. (in Chinese)
- [30] 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.
- [31] FLETCHER A L, SINCLAIR T R, ALLEN L H, et al. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered ‘slow-wilting’ and commercial soybean[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(2): 145 – 151.
- [32] LIU L B, GUDMUNDSSON L, HAUSER M, et al. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally [J]. *Nature Communication*, 2020, 11(1): 4892.
- [33] 孟莹, 姜鹏, 方缘. 大气水分亏缺对中国两种典型草地生态系统总初级生产力的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(11): 3633 – 3642.
- MENG Ying, JIANG Peng, FANG Yuan. Contrasting impacts of vapor pressure deficit on gross primary productivity in two typical grassland ecosystems in China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(11): 3633 – 3642. (in Chinese)
- [34] ZHANG Y L, WU Z Y, SINGH V P, et al. Coupled hydrology-crop growth model incorporating an improved evapotranspiration module[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 246: 106691.
- [35] 张静, 王力, 韩雪, 等. 黄土塬区农田蒸散的变化特征及主控因素[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1421 – 1432.
- ZHANG Jing, WANG Li, HAN Xue, et al. Evapotranspiration of farmland on loess tableland and its major influencing factors [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(6): 1421 – 1432. (in Chinese)
- [36] SONG Y, RYU Y, JEON S. Interannual variability of regional evapotranspiration under precipitation extremes: a case study of the Youngsan River basin in Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3531 – 3540.
- [37] JIANG Z Y, TIAN Z, DONG G T, et al. High-resolution projections of mean and extreme precipitation over China by two regional climate models[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34: 965 – 985.
- [38] 张强, 杨泽粟, 郝小翠, 等. 北方蒸散对气候变暖响应随降水类型转换特征[J]. *科学通报*, 2018, 63(11): 1035 – 1049.
- ZHANG Qiang, YANG Zesu, HAO Xiaocui, et al. Transition features of surface evapotranspiration responding to climate warming with spatial precipitation-based climate type in northern China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(11): 1035 – 1049. (in Chinese)
- [39] 邱让建, 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)
- [40] ALBERTO M C 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.