中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

华北平原灌溉麦田水分利用效率的SEM多因素影响研究

张传伟，齐永青，戴茂华，张玉翠，沈彦俊

引用本文:
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(中英文), 2020, 28(6): 876–886.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190924

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和WUE的影响

Effect of climate, genotype, and water management on winter wheat yield and water use efficiency in Hebei Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(2): 200–210 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190671

作物水分利用效率研究方法及尺度传递研究进展

A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 50–59 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180501

分根灌溉下水氮耦合对草莓果实品质及产量的影响

Effects of water and nitrogen coupling on strawberry yield and quality under partial root-zone irrigation

中国生态农业学报. 2018, 26(5): 657–667 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170938

环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究

Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 995–1004 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160162

基于Copula的京津冀平原作物水分利用效率驱动因子分析

Analysis of water use efficiency and driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain using the Copula method

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(12): 1833–1845 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190340

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 6 月 第 28 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2020, 28(6): 876−886

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190924

张传伟, 齐永青, 戴茂华, 张玉翠, 沈彦俊. 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(中英文), 2020, 28(6): 876−886

ZHANG C W, QI Y Q, DAI M H, ZHANG Y C, SHEN Y J. 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

华北平原灌溉麦田水分利用效率的 SEM 多因素影响研究*

张传伟[1,2], 齐永青[1], 戴茂华[3], 张玉翠[1**], 沈彦俊[1,2**]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北省农林科学院旱作农业研究所 衡水 053000)

摘 要: 水分利用效率(WUE)常被嵌入到多种生态系统模型中, 用于评估生态系统对气候变化的响应。然而, 自然条件下多种因素不仅直接影响 WUE, 还通过影响冠层结构等间接影响 WUE, 其中的影响机制仍不明晰。为了明确多种因素对冬小麦 WUE 的协同影响, 本研究基于 2015 年(温暖湿润年)和 2016 年(温暖干旱年)涡度相关系统观测的小麦关键生育期(返青、拔节、抽穗、灌浆)的数据, 分析了 WUE 的变化, 并借助结构方程模型(SEM), 以叶面积指数(LAI)为中间变量, 分析了多种因素[净辐射(R_n)、空气温度(T_a)、饱和水汽压差(VPD)、风速(WS)、土壤含水量(SWC)]对 WUE 的影响机制。结果表明, 2015 年平均 WUE 为 1.52 g(C)·kg^{-1}(H_2O), 2016 年平均 WUE 为 1.22 g(C)·kg^{-1}(H_2O)。不管在温暖湿润年还是温暖干旱年, T_a、LAI 和 VPD 均是影响 WUE 的主要因素。WUE 随 LAI 增加而增加, T_a 增加也有助于提高 WUE, 而当温度相近时, VPD 增加会降低 WUE。T_a、LAI 和 VPD 对 WUE 的影响在温暖湿润年和温暖干旱年重要性程度不同, 温暖湿润年最重要的影响因素为 LAI, 温暖干旱年为 T_a; VPD 在温暖湿润年既直接影响 WUE, 同时又通过影响 LAI 的变化间接作用于 WUE, 但在温暖干旱年仅具有直接影响。R_n 在温暖干旱年和温暖湿润年表现也不相同: 在温暖湿润年对 WUE 具有显著的影响, 在温暖干旱年影响不显著, 这与温暖湿润年降雨量大及降雨频次高有关。显然, 模拟 WUE 时考虑不同年份气象条件会使结果更为准确。WS 未对 WUE 产生显著的影响, 潜在原因可能是其对冠层上部接收辐射充足的叶片影响较大, 而对冠层内部叶片无显著影响。农田生态系统不同生育阶段对辐射、温度等的耐受性及响应方式不同, SEM 可以将 LAI 设置为中间变量以综合这种阶段性的变化, 因此, 对于冠层结构季节变幅大的生态系统, SEM 是研究其环境控制机制的有力工具。这些研究结果可为今后精确模拟生态系统 WUE 以及预测 WUE 对气候变化的响应提供科学依据。

关键词: 水分利用效率; 结构方程模型(SEM); 涡度相关系统; 微气象; 冬小麦

中图分类号: Q148 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of multi-factor on water use efficiency as identified by the SEM method in irrigated wheat farmlands in the North China Plain*

* 国家重点研发计划课题(2016YFC0401403)、国家自然科学基金项目(31870422, 41930865)和中国科学院青年创新促进会项目(2017138)资助

** 通信作者: 沈彦俊, 研究方向为水文学与水资源, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn; 张玉翠, 研究方向为生态水文学与同位素水文学, E-mail: yczhang@sjziam.ac.cn
张传伟, 研究方向为农田多尺度水分利用效率及尺度传递。E-mail: zhangchuanwei0815@163.com

收稿日期: 2019-12-30 接受日期: 2020-03-18

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0401403), the National Natural Science Foundation of China (31870422, 41930865) and the Fund of Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (2017138).

** Corresponding authors: SHEN Yanjun, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn; ZHANG Yucui, E-mail: yczhang@sjziam.ac.cn

Received Dec. 30, 2019; accepted Mar. 18, 2020

ZHANG Chuanwei[1,2], QI Yongqing[1], DAI Maohua[3], ZHANG Yucui[1**], SHEN Yanjun[1,2**]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Dry Farming, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Hengshui 053000, China

Abstract: Water use efficiency (WUE) is usually embedded in a variety of ecosystem models to assess the ecosystem response to climate change. However, under natural conditions, multiple environmental factors affect WUE directly and indirectly by influencing the canopy structure. Currently, the mechanisms that influence WUE are not clear. In order to clarify the synergistic effect of various factors on the WUE of winter wheat, experiments were conducted in the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences. Variables were observed using an eddy covariance system during key growth stages (greening, jointing, heading, filling) of winter wheat in 2015 (warm and wet year) and 2016 (warm and dry year). The variation in winter wheat WUE and the controlling mechanisms of various factors (net radiation, R_n; air temperature, T_a; vapor pressure deficit, VPD; wind speed, WS; soil water content, SWC) were analyzed by means of a structural equation model (SEM). The structural equation model can systematically analyze the impacts of different factors on WUE on the basis of interactions among different factors. Compared to traditional univariate or multiple linear regression, SEM had intermediate variables, which can decompose the effects of micrometeorological factors into direct and indirect effects. In this study, leaf area index (LAI) was the intermediate variable. The results showed that average WUE in 2015 was 1.52 $g(C)\cdot kg^{-1}(H_2O)$, while it was 1.22 $g(C)\cdot kg^{-1}(H_2O)$ in 2016. T_a, LAI, and VPD were the main factors that influenced WUE, regardless of whether the year was warm and wet (WW) or warm and dry (WD). Leaf area index and T_a had positive effects on WUE, while VPD inhibited WUE, which means that under similar temperatures, increased water vapor content in the air can enhance WUE. T_a, LAI, and VPD were of different importance in WW and WD years. LAI was the most significant influencing factor in WW years, while T_a played a more important role in WD years. In WW years, VPD not only affected WUE directly but also indirectly through altering LAI, while it only had a direct effect in WD years. R_n also was different between WW and WD years, having a significant effect on WUE in WW year but no significant effect in WD year. This phenomenon was caused by the heavier and more frequent rainfall in WW year. Obviously, taking the climate conditions in different years into consideration will increase accuracy when simulating WUE. WS had no significant effect on WUE, probably because WS only affects the leaves receive sufficient radiation in the upper part of the canopy, and these effects can be ignored for leaves inside the canopy. Farmland ecosystems have different tolerances and responses to radiation and temperature at different growth stages. LAI can be set as an intermediate variable to reveal this stepwise change in SEM. Therefore, for ecosystems with large seasonal changes in canopy structure, SEM is a powerful tool to investigate mechanisms of environmental control. This research can provide a scientific basis for accurately simulating WUE and predicting the response of WUE to climate change.

Keywords: Water use efficiency; Structural equation model (SEM); Eddy covariance system; Micro-meteorology; Winter wheat

据 IPCC(2013)预测[1], 北半球中纬地区干旱发生的频率及程度将进一步提高, 极端事件的发生也将更加频繁, 将对区域水和碳循环过程造成极大的影响[2]。作为定量描述植物光合碳吸收量与蒸腾失水量之间耦合关系的关键——水分利用效率[3], 其在生态系统水平的表现是评估生态系统对气候变化响应的有效指标[4-5]。因此, 明确多种微气象因子对生态系统水分利用效率的调控过程可以为预测生态系统对未来气候变化的响应提供有价值的信息[6-7]。

生态系统的水分利用效率通常被定义为初级生产力(GPP)/蒸散(ET)[8]或者生态系统净碳交换量(NEE)/蒸散(ET)[9], 其中 GPP 可由涡度相关系统测得的 NEE 通过“daytime”[10]和“nighttime”[11]两种算法分离得到。从表达形式来看, 影响生态系统蒸散以及碳交换的环境因素, 如净辐射、饱和水汽压差、土壤含水量等[12-13], 均会对水分利用效率产生影响。以往的研究往往是针对单一的因素与水分利用效率进行相关性分析[14-15], 以此来判断它们对水分利用效率的影响程度。或者, 对大量的数据进行挖掘, 分析水分利用效率对某一因素的响应趋势[16-17]。然而, 在自然条件下, 各种因素不仅直接作用于水分利用效率, 因素之间也存在相互影响, 共同影响着水分利用效率[5]。这使得规律的挖掘极为困难, 无法控制单一因素变化的同时保证其他因素不变, 一种因素的影响可能会被其他因素的作用掩盖或增强, 从而造成不同的研究结果。例如, 随干旱的发生, 生态系统水分利用效率存在增加[18]、降低[15]、增加之后降低 3 种可能[19]。干旱所造成的饱和水汽压差增大会诱导气孔张开, 蒸腾量增加; 而干旱引起的土壤含水量的减少又会抑制气孔的开度, 导致蒸腾量减少。

因此在两者共同作用下蒸腾量和水分利用效率的变化存在很大的不确定性。

对于华北平原的冬小麦(*Triticum aestivum*)而言，生长季节内降水难以满足作物本身的需求，需要依靠抽取地下水灌溉，导致了区域内地下水位的严重下降，与此同时，又要守住耕地的“红线”，保证粮食需求。因此，明确多种因素共同作用对水分利用效率的影响，对于提高水分利用效率和实现华北平原的农业与水资源的可持续发展也至关重要。与森林生态系统所具备的稳定冠层结构不同，农田生态系统的叶面积指数季节变化特征明显，作物不同生育阶段对温度、辐射等的耐受性不同，研究微气象因素对冬小麦水分利用效率的影响，叶面积指数是一个不得不考虑的重要因素。Zhang 等[20]指出，由气象因素导致的 LAI 变化可能对 WUE 的变化起着重要的作用。

结构方程模型(structural equation model, SEM)为分析多种气象因素对水分利用效率的共同影响提供了便利，主要具备以下优点：1)在考虑不同因素之间交互作用的基础上，系统分析不同因素对水分利用效率的影响；2)与传统的一元或多元线性回归相比，允许中间变量的存在，可将微气象因子对水分利用效率的影响分解为直接和间接影响。因此，本研究借助 SEM 建模，利用 2015—2016 年中国科学院栾城农业生态系统试验站涡度相关系统定位观测的农田生态系统水碳通量数据，分析多种微气象因子对水分利用效率的直接影响，以及通过影响叶面积指数所产生的间接作用。可以为提高水分利用效率、深入理解微气象因子对水分利用效率的影响机制，以及预测和模拟水分利用效率对未来气候变化的响应提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究站点概况

试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站(37°53′N, 114°41′E, 海拔 50.1 m)展开，该站位于太行山山前平原，属于典型的半干旱半湿润大陆性季风气候，种植模式为冬小麦-夏玉米(*Zea mays*)一年两熟，其中冬小麦 10 月初播种，次年 6 月中旬收获，生长时长约 245 d；夏玉米 6 月中旬播种，9 月末收获，生长季时长约 107 d。

该站年均温度 12.6 ℃(1984—2016 年)，2016 年最高达 13.6 ℃，1990 年最低 11.2 ℃，年均温度呈波动上升趋势(图 1)；年均降雨量 438.3 mm，其中 1996 年降雨量最大(774.4 mm)，最低出现在 2014 年，仅 247.6 mm，并且 70%的降水出现在 7—9 月[21]，降水时间分布不均，冬小麦生长期内降水量少，无法满足小麦生长的水分需求，需要通过地表漫灌的方式弥补水分的亏缺。小麦季进行 2~3 次灌溉，年灌溉量视降水量而定，一般为 120~320 mm。土壤质地为粉砂壤土，田间持水量约 35%[22-23]。

1.2 水碳通量、气象、土壤含水量、叶面积指数数据获取

1.2.1 水-热-碳通量、气象及土壤含水量数据

中国科学院栾城农业生态系统试验站设有典型农田通量观测塔，水碳通量数据观测即由安装在观测塔上的涡度相关系统完成，于 2007 年 11 月 6 日正式开始水碳通量数据观测。该系统由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell., USA)和开路式 CO_2/H_2O 分析仪(IGRA, Li-7500, LICOR, USA)以及数据采集器 CR3000 组成，数据采集频率为 10 Hz, CO_2/H_2O 分析仪安装在塔上距地面 3.5 m 处。观测指标包括潜热(LE, $W\cdot m^{-2}$)、感热(H, $W\cdot m^{-2}$)以及 CO_2 通量。通量塔辅有辐射分量、温湿度、降水量等常规气象数据观测装置，包括空气温湿度计(HMP155, Vaisala, Finland)、四分量辐射表(CNR-4, Kipp&Zonen, Netherland)和雨量筒(CSITE525-MM, Campbell, USA)。土壤含水量观测(Hydraprobe 土壤三参数 TDR 时域反射仪)包括 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm、120 cm、160 cm、200 cm 共 8 个深度，自 2015 年 1 月 1 日开始每 30 min 采集一组，本研究用到的日尺度土壤含水量为 8 个深度的均值。

1.2.2 叶面积指数数据

在任一行 1 m 内随机选取冬小麦 10 株，记录 10 株小麦的总茎数(n), 1 m 内小麦总茎数(N, 重复 3 次取平均值，用直尺量取 10 株小麦所有绿色叶片的长(a_1, a_2, $\cdots$, a_n)和宽(b_1, b_2, $\cdots$, b_n)，取折算系数 0.85, 1 m^2 内合计有 4 行小麦，则小麦的叶面积指数(leaf area index, LAI)为：

$$\mathrm{LAI}=[0.85\times\frac{a_1\times b_1+a_2\times b_2+\cdots+a_n\times b_n}{n}]\times \mathrm{N}\times 4 \tag{1}$$

小麦叶面积指数在越冬期前测量 1 次，返青期开始测量 1 次，之后每隔 10 d 测量 1 次，至整个生育季结束。采用线性插值的方法获得测量间隔内每日叶面积指数。

1.3 通量数据处理及插补

感热、潜热、CO_2 通量数据由软件 EddyPro 7.0(LICOR, USA)经过严格的数据校正和质量控制

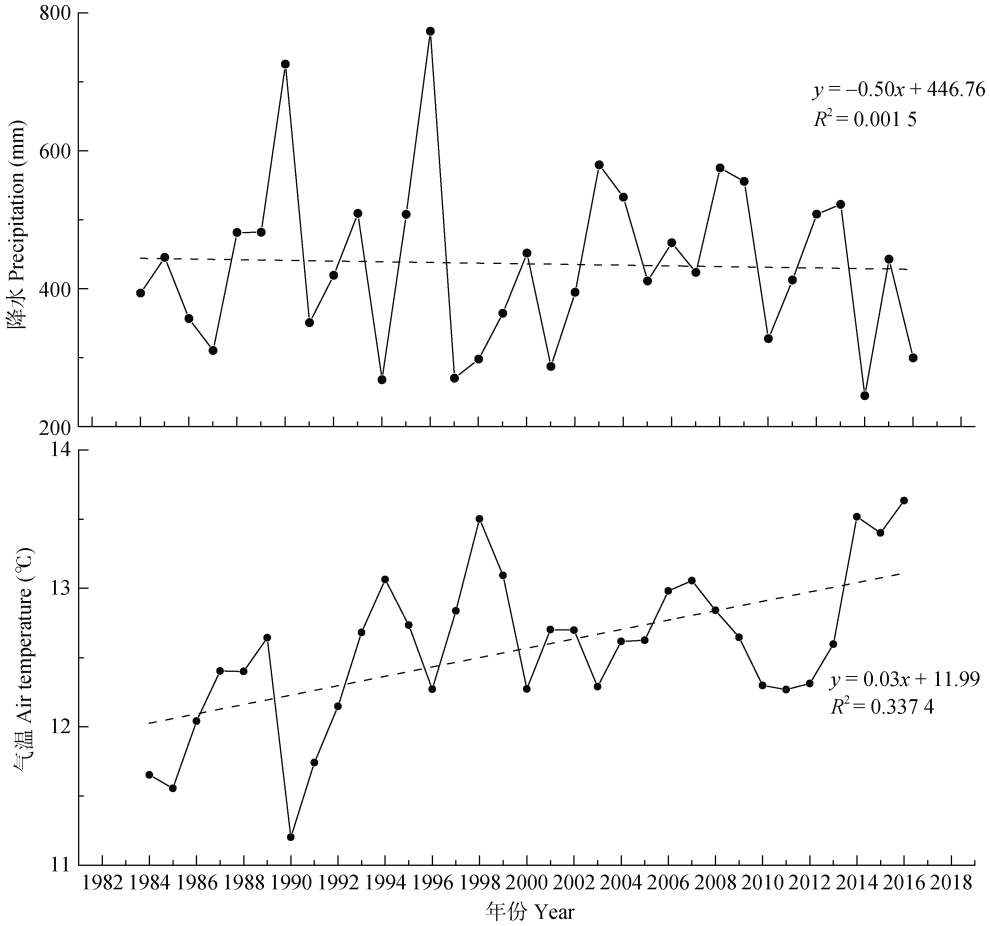

图 1　1984—2016 年研究区年均气温和降水量变化

Fig. 1　Variations of annual mean air temperature and precipitation in the study area from 1984 to 2016

处理为 30 min 步长。包括: 1)旋转校正, 倾斜校正, 通量密度校正, 响应频率校正等[24-27]; 2)剔除夜间湍流较弱, 即摩擦风速小于 0.1 $m \cdot s^{-1}$ 的数据; 剔除降雨前后 2 h 内的数据; 3)计算数据的平均值及方差, 以 4 倍方差为检验标准, 剔除异常值; 4)缺失值插补, 数据缺失在 2 h 范围内采用线性插值; 数据缺失大于 2 h 的数据采用平均昼夜变化(mean diurnal variation, MDV)插值[28]。具体数据处理流程见图 2。

日尺度蒸散量(ET, mm)数据由潜热通量(LE, $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)汽化潜热($\lambda$, 取 2.45 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)计算得到:

$$ET=LE/\lambda \tag{2}$$

生态系统 CO_2 净交换量[NEE, $g(C) \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$]由涡度相关系统计算得到, 农田群体水分利用效率[WUE, $g(C) \cdot kg^{-1}(H_2O)$]由下式表示:

$$WUE=(-NEE)/ET \tag{3}$$

1.4　结构方程模型(SEM)

结构方程模型(structural equation model, SEM)是基于变量的协方差矩阵分析变量之间关系的一种统计方法, 是多元数据分析的重要工具, 它的优势在于多变量间交互关系的定量研究。SEM 建模支持显变量(可直接观测到的变量)建模、显变量和潜变量(不可直接观测的变量)混合建模。本研究中采用显变量建模, 模型的检验采用 3 种指标, 包括: CMIN/Df<5(CDMI, 卡方; Df, 自由度); AGFI>0.9(调整拟合优度指数); RMSEA<0.1(近似均方根误差)。

构建的结构方程模型如图 3 所示, 其中箭头代表某一变量对另一变量的影响作用, 单箭头代表单向作用, 双箭头代表互相影响。叶面积指数为中间变量, 水分利用效率为因变量。

1.5　研究时段选取以及水分利用效率影响因素选取的依据

冬小麦越冬期间, 气温和土壤温度均较低, 冬小麦生长十分缓慢, 农田蒸散主要由土壤蒸发组成, 农田生态系统二氧化碳的净碳交换量(NEE)主要由土壤呼吸组成。因此, 水分利用效率常因较低的蒸散量而突然增高或降低, 并且波动随机没有规律, 该时期的水分利用效率研究意义不大, 所以本研究忽略播种到越冬期水分利用效率的变化。同时, SEM 样本量大于 100 时运行结果更为准确, 综合以上两

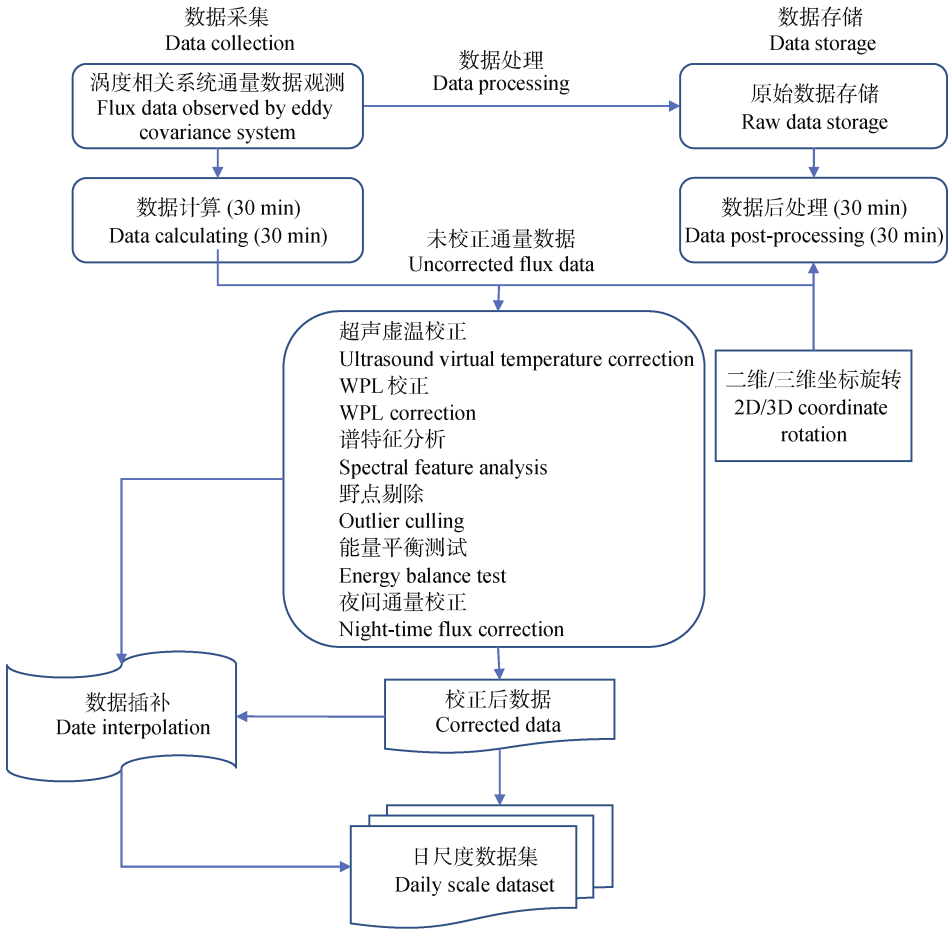

图 2 涡度相关系统水碳通量数据处理流程

Fig. 2 Disposing processes of water and carbon flux data of the eddy covariance system

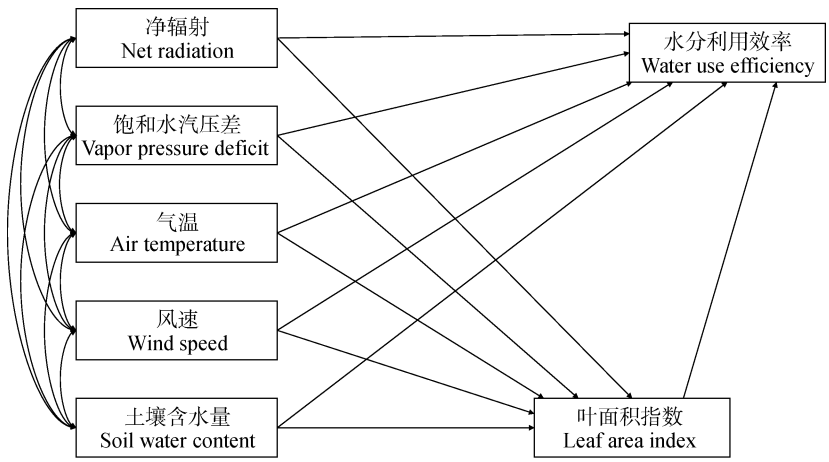

图 3 多种微气象因素与水分利用效率交互关系的结构方程模型逻辑图

Fig. 3 Logical diagram of structural equation model of interaction between multiple micro-meteorological factors and water use efficiency

点，研究时段选择冬小麦播种后次年的 2 月 15 日到 5 月 31 日，包括小麦返青期(3 月 1 日—31 日)、拔节期(4 月 1 日—15 日)、抽穗期(4 月 16 日—5 月 5 日)、灌浆期(5 月 6 日—31 日)，2015 年和 2016 年数据样本量分别为 106 和 107。

农田水分利用效率以净初级生产力(NEP)与蒸散量(ET)的比值表示，影响 NEP 与 ET 的环境因素都会对水分利用效率产生影响。小麦不同生长阶段

叶面积指数(LAI)通常对 ET 以及碳的吸收产生决定性的作用; 土壤含水量(SWC)与作物根系水分吸收利用有关; 气温影响(T_a)与光合作用有关的酶的活性; 饱和水汽压差(VPD)与叶片水汽向外扩散的驱动力有关; 风速(WS)会影响叶片表面的边界层阻力, 从而影响蒸腾作用。净辐射(R_n)为小麦的一切生命活动以及农田的土壤蒸发提供能量, 相比于与光合作用直接相关的光合有效辐射, R_n 的影响范围更广。故本文选取 R_n、VPD、T_a、WS、SWC、LAI 共 6 个因素进行结构方程模型建模。

2　结果与讨论

2.1　气象因子、土壤含水量及小麦叶面积指数变化

如图 4 所示, 试验站 R_n 2015 年为 2 621 MJ·m^{-2}, 2016 年为 2 665 MJ·m^{-2}, 为作物的生长提供了充足的能量保证; R_n 年际变化呈单峰形式, 2015 年和 2016 年日均 R_n 分别为 7.2 MJ·m^{-2} 和 7.3 MJ·m^{-2}。2015 年年均温 13.4 ℃, 2016 年平均 13.6 ℃, 日均温在 –10.4~31.4 ℃之间波动, 气温年较差分别为 28.4 ℃和 30.1 ℃。VPD 为 0~2.8 kPa; 该站极少出现大风天气, 日均风速约 95%的时间都在 3 m·s^{-1} 以下。

冬小麦单个生长季内 LAI 也呈单峰形式(图 4e), 越冬期生长速度缓慢, LAI 变化较平缓, 返青之后快速生长, LAI 增长速度加快; 峰值出现在 5 月份, 为冬小麦抽穗末期或灌浆前期, 进入灌浆期之后, 叶片逐渐萎蔫, 叶面积减小。由于试验地块为典型的灌溉农田, SWC 通常保持较高水平, 除 2016 年 12 月(未进行冬灌), 土壤体积含水量基本维持在 20%(图 4f)以上; 冬小麦灌溉后以及 7、8 月份降水较多, 土壤体积含水量在 30%左右。

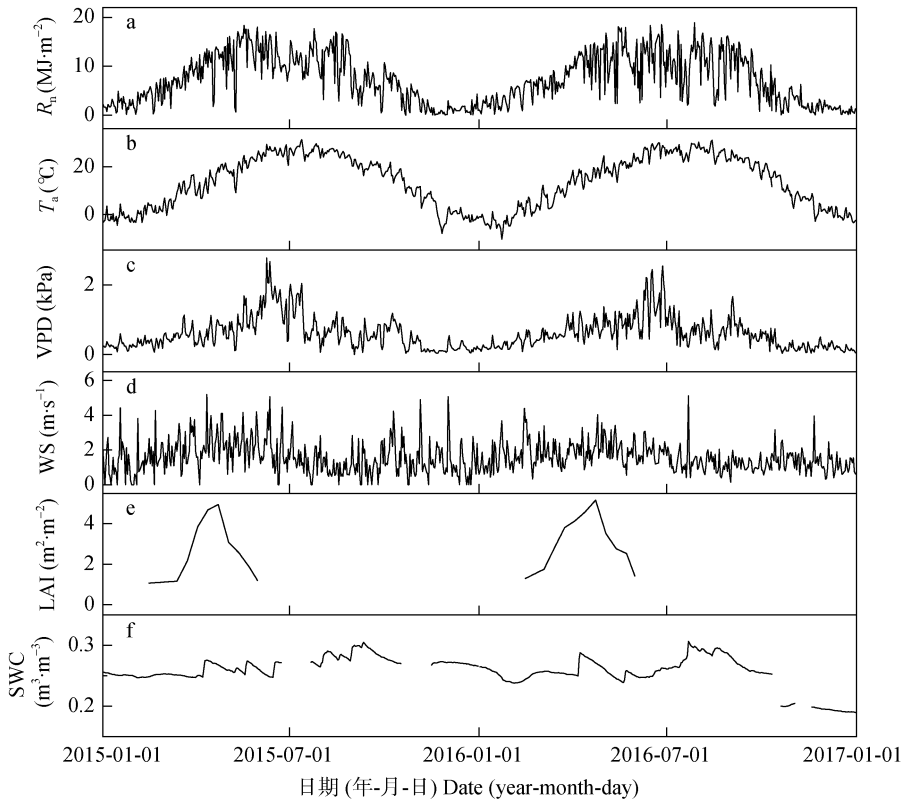

图 4　2015—2016 年研究区净辐射(R_n)、空气温度(T_a)、饱和水汽压亏缺(VPD)、风速(WS)、叶面积指数(LAI)和土壤含水量(SWC)的季节变化

Fig. 4　Seasonal variations of net radiation (R_n), air temperature (T_a), vapor pressure deficit (VPD), wind speed (WS), leaf area index (LAI) and soil water content (SWC) from 2015 to 2016 in the study area

2.2　水分利用效率(WUE)及微气象因子的影响

小麦关键生育期日尺度 WUE 变化整体呈抛物线型(图 5), 最大 4.76 g(C)·kg^{-1}(H_2O), 2015 年平均 WUE 为 1.52 g(C)·kg^{-1}(H_2O), 2016 年平均 WUE 为 1.22 g(C)·kg^{-1}(H_2O)。

本研究利用 SEM 分析多种环境因素对 WUE 的影响作用。相比于之前研究中普遍采用的以单一因素与 WUE 建立线性相关的方式[14,29], SEM 能够在充分考虑外界因素之间交互关系的基础上, 确定不同因素对 WUE 的影响。与以 SPSS 等进行的多元线性

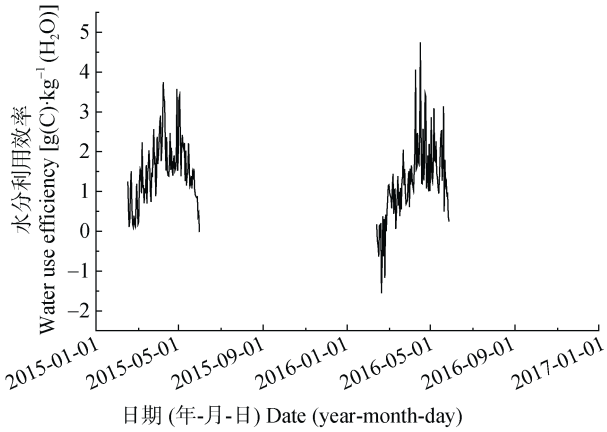

图 5 冬小麦水分利用效率季节变化

Fig. 5 Seasonal change of water use efficiency (WUE) of winter wheat

回归相比, SEM 具有可以设置中间变量(本文为 LAI)的优势, 将外界因素对 WUE 的影响分离为直接影响和通过影响 LAI 产生的间接影响。

基于 2015 年和 2016 年的数据, 以 R_n 等微气象因子为自变量, LAI 为中间变量建立的 WUE-SEM 共解释了 WUE 44%的变化, CMIN/DF=2.05, AGFI=0.96, RMSEA=0.07, 模型拟合度优(图 6)。本文中基于 2015 年和 2016 年小麦关键生育期的数据分析结果与之前发表的一些研究结果类似[15,30], LAI、T_a 和 VPD 是影响日尺度 WUE 最主要的 3 个因素, 按照总影响的绝对值排序为 T_a(0.65)>LAI(0.49)>VPD(−0.45)(表 1), 但与之前的一些研究中将 VPD 作为控制 WUE 最主要的影响因素不同[31]。其原因有很多, 例如, 有的研究将生长前期以及后期的数据剔除以保证研究时段内植物具有稳定的 LAI[32], 而有的研究是针对具有稳定密闭冠层的森林生态系统[15]。因此, 在这些研究中 LAI 对 WUE 的影响减小甚至可以忽略。此外, T_a 对 WUE 具有显著的促进作用, 这与针对温带生态系统的研究结果一致, 但与针对亚热带生态系统的研究结果相反[33-34]。Zhu 等[33]将在亚热带生态系统 T_a 对 WUE 的负向作用归结为植物受到土壤水分胁迫, 但对于本研究中的灌溉麦田, 土壤水分不是限制 WUE 的因素。T_a 对 WUE 的显著影响不仅得益于对 WUE 的直接影响(0.49), 还包括其通过促进 LAI 的增长而提高 WUE(0.15)。VPD 对 WUE 产生了显著的负向作用, T_a 对 WUE 具有显著的促进作用, 更高的 WUE 倾向于出现在 T_a 更高而 VPD 更低时。这表明当 T_a 高且空气中水汽含量大时, 小麦的水分利用效率更高。温度升高促进小麦的光合作用, 空气水汽含量高则叶片蒸腾失水的驱动力减弱, 故水分利用效率提升。

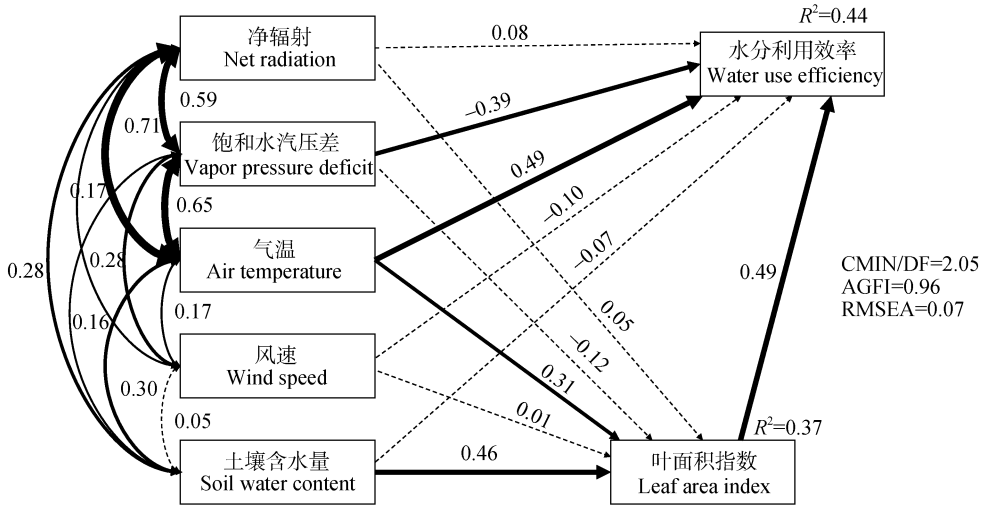

图 6 微气象因子对水分利用效率影响的结构方程模型

Fig. 6 Structural equation model of the effects of micro-meteorological factors on water use efficiency

线的粗细代表影响程度, 不显著路径以虚线表示。The thickness of lines represent the degree of influence, non-significant paths have been expressed with dashed lines.

辐射是农田水分循环以及植物光合作用的能量来源, 然而基于 SEM 分析 2015 年和 2016 年冬小麦关键生育期的数据发现, R_n 对 WUE 并未产生显著的影响, 有两方面的原因: 一方面辐射增加时, 光合速率增大, 但同时农田蒸散也在增大, WUE 的变化存在不确定性; 另一方面辐射通常对 WUE 的日变化影响显著, 但对 WUE 季节变化的影响并没有明显的规律, 即使在阴天辐射较低时 WUE 也可能更高[35]。

WS 未对 WUE 产生显著的直接或间接影响。有研究表明, 在辐射充足的情况下, 由于对流冷却作用, WS 的提高会增加叶片吸收 CO_2 的同时减少蒸腾[36], 从而提高叶片的 WUE。根据这一结果, 影响不显著的潜在原因可能是 WS 对冠层上部接受辐射充足的叶片影响显著, 而冠层内部由于辐射的衰减导致叶片接收辐射不足, 因此受到 WS 的影响很小。

SWC 对 LAI(0.46)的影响最大, 其对 LAI 具有积极的正向作用。当 SWC 提高, LAI 增大, 一方面减少了到达地表的太阳辐射, 土壤蒸发减小; 另一方面, 作物水分充足时通常具有更高的气孔开度, 可从外界吸收更多的 CO_2 进行光合作用, NEE 增大, 从而提高 WUE。但 SWC 仅通过作用于 LAI 间接影响 WUE(0.22), 对 WUE 的直接影响并不显著。

整体来看, 模型对于 WUE 变化的解释度并不高(44%), 很可能受到不同年份土壤水分条件、降雨量及温度等微气象因子不同程度的影响, 导致模型对 WUE 的解释度较低。因此, 分别以 2015 年和 2016 年的数据进行建模, 分析不同年份气象因素对 WUE 影响的差异。

2.3　不同气象年型水分利用效率及其环境影响

1984—2016 年小麦关键生育期(2 月 15 日—5 月 31 日)内平均降雨量 73 mm, 平均气温 11.8 ℃。2015 年降雨量 94 mm, 平均气温 12.5 ℃, 降雨量和温度均高于平均线; 2016 年降雨量 27 mm, 平均气温 13.3 ℃, 降雨量远低于平均线, 而温度高于平均线(图 7)。据此, 将 2015 年和 2016 年分别归类为温暖湿润年(warm and wet year, WW)和温暖干旱年(warm and dry year, WD)。分别以 WW 年和 WD 年数据运行水分利用效率结构方程模型(图 8), 结果显示区分不同气象年份之后, WUE 变化的解释度得到了提高, 2015 年和 2016 年 WUE 的解释度分别为 54%和 52%。从对 WUE 的总影响来看, WW 年和 WD 年 WUE 主要的影响因素均为 T_a、LAI、VPD; 但在 WW 年和 WD 年重要性程度不同, WW 年 LAI(0.63)>T_a(0.55)>VPD(−0.51), WD 年为 T_a(0.80)>LAI(0.42)>VPD(−0.35)(表 2)。将总影响拆解为直接影响和间接影响, 结果表明 WW 年内 T_a、VPD、SWC 对 LAI 均具有显著的影响, 然而 WD 年则只有 T_a 和 SWC 对 LAI 具有显著的影响。WW 年更多的阴雨天气使得这些时间内 VPD 接近于 0, 不利于叶片气孔的张开从而降低了小麦与外界 CO_2 的交换, 延缓了 LAI 的增长。然而对于 WD 年, VPD 不是限制 LAI 增长的显著因素, 这也间接提高了 T_a 对 LAI 的促进作用。WW 年平均 LAI 为 2.6, WD 年为 3.1 也证实了这一点。

不论是 WW 年还是 WD 年, SWC 对 WUE 均没有显著的直接影响, 而是通过促进 LAI 的增长而间接影响 WUE, 同时 VPD 对 WUE 具有显著的负向影响, 这与之前一些研究结果[3,16]一致, 更高的 WUE 倾向于出现在水分充足而 VPD 低时[例如, 本研究中 WW 年平均 VPD 为 0.57 kPa, 0~2 m 平均 SWC 为 33%, 平均 WUE 为 1.52 g(C)·kg^{-1}(H_2O); WD 年平均 VPD 为 0.70 kPa, 0~2 m 平均 SWC 为 29%, 平均 WUE 为 1.22 g(C)·kg^{-1}(H_2O)], 这也意味着干旱会降

表 1　微气象因子对水分利用效率影响的标准化通径系数

Table 1　Standardized path coefficients of the effects of micro-meteorological on water use efficiency

	净辐射 Net radiation	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	气温 Air temperature	风速 Wind speed	土壤含水量 Soil water content	叶面积指数 Leaf area index
直接影响 Direct effect	−0.08	−0.39***	0.50***	−0.10	−0.08	0.49***
间接影响 Indirect effect	−0.02	−0.06	0.15**	0.01	0.22**	0.00
总影响 Total effect	−0.10	−0.45***	0.65***	−0.09	0.14	0.49***

和*分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平影响显著。** and *** mean significant effect at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

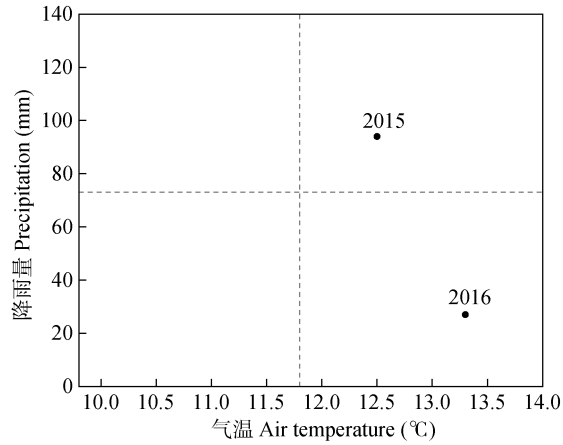

图 7　2015 年和 2016 年小麦关键生育期(2 月 15 日—5 月 31 日)平均气温以及总降雨量

Fig. 7　Mean air temperature and total precipitation during key growing stages (Feb. 15 to May 31) of wheat in 2015 and 2016

垂直虚线代表 1984—2018 年小麦关键生育期平均气温, 水平虚线代表降雨量。The vertical and horizontal dashed lines represent mean air temperature and total precipitation during key growing stages of wheat from 1984 to 2018, respectively.

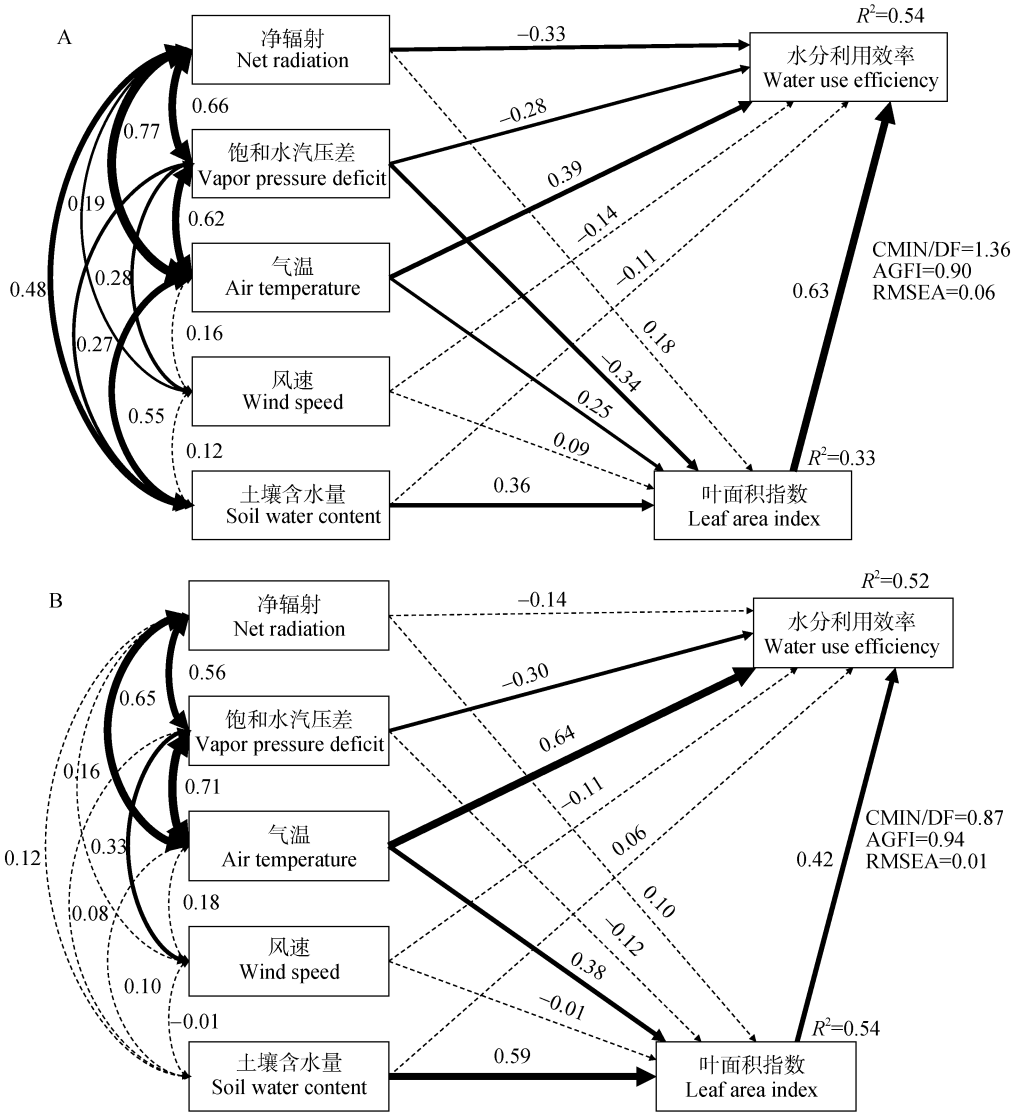

图 8 温暖湿润年(2015 年, A)和温暖干旱年(2016 年, B)微气象因子对水分利用效率影响的结构方程模型

Fig. 8 Structural equation models of the effects of micro-meteorological factors on water use efficiency in the warm and wet year (2015, A) and warm and dry year (2016, B)

线的粗细代表影响程度，不显著路径以虚线表示。The thickness of lines represent the degree of influence, non-significant paths have been expressed with dashed lines.

表 2 2015 年和 2016 年微气象因子对水分利用效率影响的标准化通径系数

Table 2 Standardized path coefficients of the effects of micro-meteorological factors on water use efficiency

年份 Year	类型 Type	净辐射 Net radiation	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	气温 Air temperature	风速 Wind speed	土壤含水量 Soil water content	叶面积指数 Leaf area index
2015	直接影响 Direct effect	-0.33^{***}	-0.29^{***}	0.39^{***}	−0.14	−0.11	0.63^{***}
	间接影响 Indirect effect	0.12	-0.22^{**}	0.16^{**}	0.06	0.23^{**}	0.00
	总影响 Total effect	-0.22^{**}	-0.51^{***}	0.55^{***}	−0.08	0.12	0.63^{***}
2016	直接影响 Direct effect	−0.14	-0.30^{***}	0.64^{***}	−0.11	0.06	0.42^{***}
	间接影响 Indirect effect	0.04	−0.05	0.16^{**}	−0.01	0.25^{**}	0.00
	总影响 Total effect	−0.10	-0.35^{***}	0.80^{***}	−0.12	0.31^{***}	0.42^{***}

和*分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平影响显著。** and *** mean significant effect at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

低 WUE，与 Xie 等[15]的研究结果一致，而与 Krishnan 等[18]的研究结果相反。

R_n在 WW 年对 WUE 具有显著的负向作用(−0.22)，这主要是由于在 WW 年降水频繁(研究时段内共计 17 次)使得 R_n 降低，植物与外界环境的碳交换减弱，尽管 ET 也减小，但 ET 减小幅度小于 NEE，故 WUE 降

低。在 WD 年降水较少(研究时段内共计 6 次), 因此, R_n 对 WUE 的影响作用并不显著。

WS 的变化没有明显的规律, 它通常对瞬时 WUE 起作用, 但对 WUE 的季节变化无规律可循。

3 结论

本研究基于 2015 年和 2016 年中国科学院栾城农业生态系统试验站水-热-碳通量数据集, 借助 SEM 建模的手段分析了多种微气象因子对小麦 WUE 的影响机制, 并区分不同气象年型(温暖湿润年和温暖干旱年)进一步丰富了研究结果。主要得出以下结论:

1)T_a、LAI、VPD 是影响 WUE 的主要因素, 在不同的气象年型亦是如此, 这 3 个因素是模拟和预测 WUE 变化时需要重点考虑的对象。T_a 与 VPD 对 WUE 的影响方向相反, T_a 对 WUE 起促进作用, 而 VPD 抑制 WUE。这表明气温相近时, 空气中水汽含量增大会促进 WUE 升高。

2)在温暖湿润年和温暖干旱年环境因素的重要性程度不同, LAI 在温暖湿润年影响最大, 而温暖干旱年则为 T_a。R_n 在温暖湿润年和温暖干旱年表现也不同, 在温暖湿润年对 WUE 具有显著的负向影响, 而在温暖干旱年影响并不显著。未来的研究倘若增加寒冷湿润年、寒冷干旱年以及温度和降雨较平均的年份, 研究结果将更为丰富和完整。同时, 这也意味着在预测和模拟 WUE 对环境因素变化的响应时考虑不同的气象年型将使结果更为准确。

3)WUE 在温暖湿润年比温暖干旱年更高[温暖湿润年平均 WUE 为 1.52 $g(C)\cdot kg^{-1}(H_2O)$, 温暖干旱年平均 WUE 为 1.22 $g(C)\cdot kg^{-1}(H_2O)$]的原因在于 VPD 对 WUE 具有显著的负作用, 而 SWC 则对 WUE 具有促进作用, 表明干旱会降低 WUE。

4)农田生态系统生育期内冠层结构变幅大, 不同生育阶段对温度、辐射的耐受性不同, SEM 可以将 LAI 设置为中间变量来反映环境因素对 WUE 产生的直接影响以及通过影响 LAI 产生的间接影响, 这种方法有益于研究此类生态系统的环境影响机制。

参考文献 References

[1] ALLEN S K, PLATTNER G K, NAUELS A, et al. Climate change 2013: The physical science basis. An overview of the Working Group 1 contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[J]. Computational Geometry, 2007, 18(2): 95–123

[2] NIU S L, YANG H J, ZHANG Z, et al. Non-additive effects of water and nitrogen addition on ecosystem carbon exchange in a temperate steppe[J]. Ecosystems, 2009, 12(6): 915–926

[3] BEER C, CIAIS P, REICHSTEIN M, et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2): GB2018

[4] XIE J, CHEN J Q, SUN G, et al. Ten-year variability in ecosystem water use efficiency in an oak-dominated temperate forest under a warming climate[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 218/219: 209–217

[5] NIU S L, XING X R, ZHANG Z, et al. Water-use efficiency in response to climate change: From leaf to ecosystem in a temperate steppe[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1073–1082

[6] XUE B L, GUO Q H, OTTO A, et al. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013[J]. Ecosphere, 2015, 6(10): 174

[7] ZHANG T, PENG J, LIANG W, et al. Spatial-temporal patterns of water use efficiency and climate controls in China's Loess Plateau during 2000–2010[J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 105–122

[8] LAW B E, FALGE E, GU L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1/4): 97–120

[9] 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

[10] LASSLOP G, REICHSTEIN M, PAPALE D, et al. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: Critical issues and global evaluation[J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 187–208

[11] REICHSTEIN M, FALGE E, BALDOCCHI D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm[J]. Global Change Biology, 2005, 11(9): 1424–1439

[12] WANG Y, ZHOU L, JIA Q, et al. Water use efficiency of a rice paddy field in Liaohe Delta, Northeast China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 187: 222–231

[13] KWON H, LAW B E, THOMAS C K, et al. The influence of hydrological variability on inherent water use efficiency in forests of contrasting composition, age, and precipitation regimes in the Pacific Northwest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 488–500

[14] MA J Y, JIA X, ZHA T S, et al. Ecosystem water use efficiency in a young plantation in Northern China and its relationship to drought[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 275: 1–10

[15] XIE J, ZHA T S, ZHOU C X, et al. Seasonal variation in ecosystem water use efficiency in an urban-forest reserve affected by periodic drought[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 221: 142–151

[16] ZHOU S, YU B F, HUANG Y F, et al. The effect of vapor pressure deficit on water use efficiency at the subdaily time

scale[J]. Geophysical Research Letters, 2014, 41(14): 5005–5013

[17] ZHANG Q, FICKLIN D L, MANZONI S, et al. Response of ecosystem intrinsic water use efficiency and gross primary productivity to rising vapor pressure deficit[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(7): 074023

[18] KRISHNAN P, BLACK T A, GRANT N J, et al. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 139(3/4): 208–223

[19] GAO Y, MARKKANEN T, AURELA M, et al. Response of water use efficiency to summer drought in a boreal Scots pine forest in Finland[J]. Biogeosciences, 2017, 14(18): 4409–4422

[20] ZHANG F M, JU W M, SHEN S H, et al. How recent climate change influences water use efficiency in East Asia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(1/2): 359–370

[21] SUN H Y, ZHANG X Y, LIU X J, et al. Impact of different cropping systems and irrigation schedules on evapotranspiration, grain yield and groundwater level in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 202–209

[22] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain[J]. Industrial Crops and Products, 2007, 25(3): 239–247

[23] SHEN Y J, LEI H M, YANG D W, et al. Effects of agricultural activities on nitrate contamination of groundwater in a Yellow River irrigated region[J]. Water Quality: Current Trends and Expected Climate Change Impacts, 2011, 348: 73–80

[24] WEBB E K, PEARMAN G I, LEUNING R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447): 85–100

[25] MOORE C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 37(1/2): 17–35

[26] HOLLINGER D Y, KELLIHER F M, BYERS J N, et al. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere[J]. Ecology, 1994, 75(1): 134–150

[27] AUBINET M, VESALA T, PAPALE D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis[J]. Springer Science & Business Media, 2012, 365–376

[28] 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

[29] GAO L, ZHAO P, KANG S Z, et al. Surface soil water content dominates the difference between ecosystem and canopy water use efficiency in a sparse vineyard[J]. Agricultural Water Management, 2019, 226: 105817

[30] HU Z M, YU G R, WANG Q F, et al. Ecosystem level water use efficiency: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498–1507

[31] ZHANG D L, DU Q J, ZHANG Z, et al. Vapour pressure deficit control in relation to water transport and water productivity in greenhouse tomato production during summer[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 43461

[32] ZHANG Q, FICKLIN D L, MANZONI S, et al. Response of ecosystem intrinsic water use efficiency and gross primary productivity to rising vapor pressure deficit[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(7): 074023

[33] ZHU X J, YU G R, WANG Q F, et al. Seasonal dynamics of water use efficiency of typical forest and grassland ecosystems in China[J]. Journal of Forest Research, 2014, 19(1): 70–76

[34] TAN Z H, ZHANG Y P, DENG X B, et al. Interannual and seasonal variability of water use efficiency in a tropical rainforest: Results from a 9 year eddy flux time series[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(2): 464–479

[35] TONG X J, MU Y M, ZHANG J S, et al. Water stress controls on carbon flux and water use efficiency in a warm-temperate mixed plantation[J]. Journal of hydrology, 2019, 571: 669–678

[36] SCHYMANSKI S J, OR D. Wind increases leaf water use efficiency[J]. Plant, Cell & Environment, 2016, 39(7): 1448–1459