

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0085

王富强,王金杰,王利娜. 涝渍胁迫对冬小麦拔节期碳通量的影响[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):178-184.
WANG F Q,WANG J J,WANG L N. Waterlogging effects on winter wheat carbon flux at jointing stage[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(4):178-184. (in Chinese)

涝渍胁迫对冬小麦拔节期碳通量的影响

王富强^{1,2,3},王金杰¹,王利娜⁴

(1. 华北水利水电大学,郑州 450046;2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心,郑州 450046;3. 河南省水环境模拟与治理重点实验室,郑州 450046;4. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038)

摘要:为探究涝渍胁迫下农田生态系统碳平衡关系,在五道沟实验站设立典型试验区,以冬小麦拔节期为研究时段开展控制试验,设置涝、渍试验组和正常试验组,测量不同情景下冬小麦碳通量,并分析其变化趋势。研究结果表明:在正常情景下,拔节期冬小麦碳通量表现为碳汇,13时碳通量最低,晴天碳通量低于阴雨天,连续阴雨天后初晴日碳通量大幅降低;涝渍情景可以降低拔节期冬小麦的碳通量,其中涝水情景的影响更为明显,第3d后涝渍情景对冬小麦碳通量影响明显减弱;碳通量随温度呈三次曲线变化,在正常和渍水情景下冬小麦碳通量在7℃左右达到最高点,在涝水情景下5℃左右达到最高点;(拔节期碳的累积主要用于植株茎部生长,渍水3d为降低碳通量且不影响植株生长的最佳时点。)研究成果可为维持农田生态系统碳平衡和建设生态灌区提供科学依据。

关键词:涝渍胁迫;冬小麦;碳通量;拔节期;淮北平原

中图分类号:S512 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Waterlogging effects on winter wheat carbon flux at jointing stage

WANG Fuqiang^{1,2,3}, WANG Jinjie¹, WANG Lina⁴

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China; 3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research (IWHR), Beijing 100038, China)

Abstract: In order to explore the relationship between carbon balance of farmland ecosystem under waterlogging stress, a typical test area was set up in Wudaogou experimental station, and the winter wheat jointing stage was used as the research period to carry out the control experiments. The surface/subsurface waterlogging test and the normal test were set to measure and analyze the changing trend of the carbon flux under different conditions. The results show that: under normal conditions, the carbon flux of winter wheat in the jointing stage is carbon sink, with the lowest carbon flux is at 13 o'clock, the carbon flux on a sunny day is lower than that on a rainy day, the carbon flux on a sunny day after continuous rainy days is reduced, the waterlogging condition can reduce the carbon flux of winter wheat in the jointing stage, the influence of the surface waterlogging condition is more obvious, and the effect of the waterlogging condition on the winter wheat carbon flux after the third day is significantly weakened; moreover, the temperature is another important factor affecting the carbon flux of winter wheat in the jointing stage. The carbon flux changes with the temperature in cubic curves, under normal and waterlogging scenarios, the carbon flux of winter wheat reaches the highest point around 7℃, in the case of surface waterlogging, it reaches the highest point around 5℃; the

收稿日期:2019-11-12 修回日期:2020-04-22 网络出版时间:2020-05-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20200509.1516.003.html>

基金项目:国家自然科学基金(51579101;51879106;51709111);国家重点研发计划(2016YFC0401401);河南省科技创新杰出青年支持计划(184100510014)

作者简介:王富强(1979—),男,河南济源人,教授,博士,主要从事水循环模拟与调控、生态水文学等研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

accumulation of carbon at the jointing stage is mainly used for the growth of plant stems, and waterlogging for 3 days is the best time to reduce carbon flux without affecting plant growth. The results of the research can provide scientific evidence for keeping the carbon balance of farmland ecosystems and constructing the ecological irrigated areas.

Key words: waterlogging stress; winter wheat; carbon flux; jointing stage; Huaibei plain

大气生态系统、海洋生态系统及陆地生态系统在 CO_2 交换过程中有 20% CO_2 去向不明,这一问题被称为“碳失汇”^[1-2]。随着“碳失汇”的研究不断发展,农田生态系统“碳失汇”问题的重要程度逐渐凸显^[3],作为农田生态系统的重要组成部分,土壤活动碳库有机碳贮量占据了全部生物量碳汇的 2/3^[4]。

日尺度上,农田生态系统碳通量曲线主要表现为单峰型和双峰型,因受人类影响过大,有时会变为无规则曲线^[5-6]。生长期尺度上,作物的主要生长期因光合效率较高,使得 CO_2 吸收量增多,最终表现为碳汇。作物的次要生长期光合效率较弱,导致 CO_2 吸收量减少,最终表现为弱碳汇^[7],其中冬小麦以拔节期及抽穗期碳通量最低^[8]。季节尺度上,碳通量在作物主要生长季夏季表现为碳汇,次要生长季春秋表现为弱碳汇,非生长季冬季表现为碳源^[9-10]。

干旱和洪涝事件是影响碳通量的重要环境因素^[11-13],土壤含水量、温度及 N 沉均会受其影响^[14-15],进而影响土壤的通气性,阻碍作物呼吸作用及光合作用的进行^[16]。呼吸作用主要由植物根系呼吸和土壤微生物呼吸两部分组成^[17-18],涝渍胁迫对呼吸作用的直接影响表现为对根系及微生物生理过程的影响,间接影响表现为对氧扩散的影响^[19]。涝渍胁迫对光合作用的影响主要体现在对作物的气孔导度及叶绿素的影响^[20],在胁迫较弱时主要影响作物的气孔导度,随着胁迫的加重会逐渐转变为影响作物的叶绿素,进而使光合作用显著降低^[21]。

国内外在土壤含水量对呼吸作用及光合作用的影响方面已经开展很多试验研究,但是针对作物不同生长期采用试验识别涝渍事件对碳通量影响的研究还较少。本研究通过控制性试验,定性化识别涝渍胁迫下拔节期冬小麦碳通量变化,分析涝渍胁迫对农田生态系统碳平衡的影响。研究成果可为增加区域碳汇、维系生态系统碳平衡提供科学依据。

1 试验区概况

试验地点选取五道沟水文水资源实验站,见图 1。实验站位于淮北平原蚌埠市境内(117°21' E, 33°09' N)。属于暖温带湿润季风气候,年内降水量差异较大,主要集中在夏季,逐年降水量有所升

高^[22],4月下旬到6月上旬易发生涝渍胁迫^[23]。淮北平原为安徽省开发利用程度较高的平原地区,该区以砂姜黑土和黄潮土为主。砂姜黑土自动调节水分的能力差,易发生涝渍灾害影响作物生长^[24]。试验区选用砂姜黑土作为试验土壤,土壤施肥后 pH 为 7.6,有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾的质量分数分别为 1.04%、0.15%、0.11‰、0.03‰ 和 0.23‰。机械组成:小于 0.002 mm 占比 41%,0.02~0.002 mm 占比 40.6%,0.02~0.05 mm 占比 12%,0.05~2 mm 占比 6.4%。



图 1 试验区位置及设施布局

Fig. 1 Location and facility layout of test area

2 试验设计

2.1 试验方案

试验播种时间为 2017 年 11 月 10 日,因试验在大棚下进行,生长期较大田情景有所缩短,拔节期时间为 3 月 13 日至 3 月 31 日。试验方法采用控制变量试验法,小麦品种为“1688”(315 kg/hm²),试验设定正常组和试验组,试验组设定涝渍胁迫环境,其他条件与正常组相同(三元复合肥 750 kg/hm²,尿素 225 kg/hm²)。试验方法选用静态明箱法测量拔节期冬小麦的 CO_2 质量浓度,测量得到的数据计算后用于分析涝渍胁迫对拔节期冬小麦碳通量的影响。

试验区面积为 150 m²,设正常情景(CK)1 个,涝水情景(SF)2 个(3、5 d),渍水情景(SW)3 个(3、5、10 d)(图 2)。单个情景小区面积为 4 m²,四周布设隔水铁皮板(地下 1.5 m,地上 0.2 m),各情景小区间隔 1 m,减弱情景小区间的影响,小区外围种植同品种小麦模拟大田环境。

涝渍试验组由人工控制水分灌溉量,综合考虑

本次试验所选用冬小麦品种、地区特性,为接近冬小麦涝渍极限,并确保冬小麦存活,确定涝水情景时长为 5 d,渍水情景时长为 10 d^[25]。涝水情景将水由上方灌入模拟涝水胁迫,并在分隔板 2 cm 处开设流

水口,控制积水深度。渍水情景将管道铺设在土壤下方,让水由下方浸润模拟渍水情景,在分隔板贴地面处开设流水口,控制田间无积水。正常组及外围田地正常灌水,保证冬小麦正常生长。

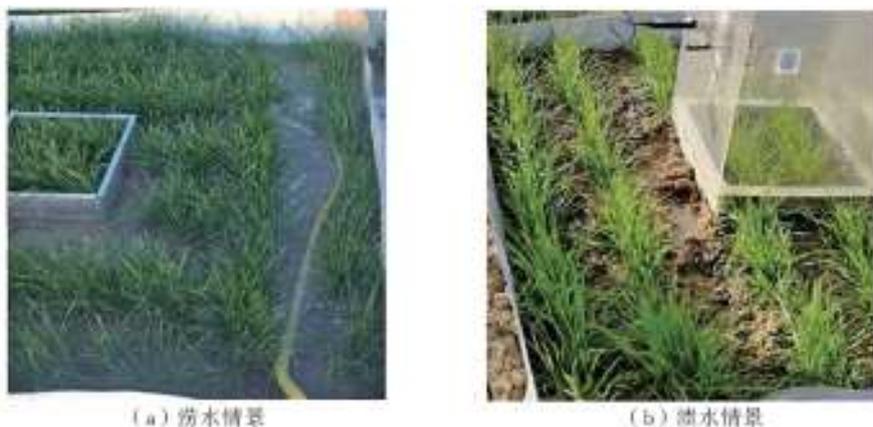


图 2 涝渍情景设置
Fig. 2 Waterlogging scenario setting

2.2 监测方法

试验采用静态明箱法测量冬小麦的碳通量。为保证箱体质量,选用厚度为 5 mm 的有机玻璃为材料进行制作,箱体尺寸为 50 cm×50 cm×100 cm,见图 3。箱内安装风扇 2 个,箱体开设温度计放置孔 1 个、CO₂ 测量孔 1 个。箱体下端安装 2 cm 宽挡板与底座贴合,挡板上粘贴泡沫塑料保证箱体密封性。在尽量不影响土体环境及小麦生长的情况下,将底座在各个采样点埋入地下 10 cm,测量时先将明箱放置在底座上,之后放置温度计及手持式 CO₂ 测量仪(德图 Testo 535 型)并打开风扇,监测时长为 15 min,共计数 4 次,间隔时间为 5 min。此外在测量前需要先记录当天的天气及温度。

在收割后对冬小麦的生长发育状况进行测定取得试验数据,测定方法以《农业气象观测规范——冬小麦》^[26]为依据。

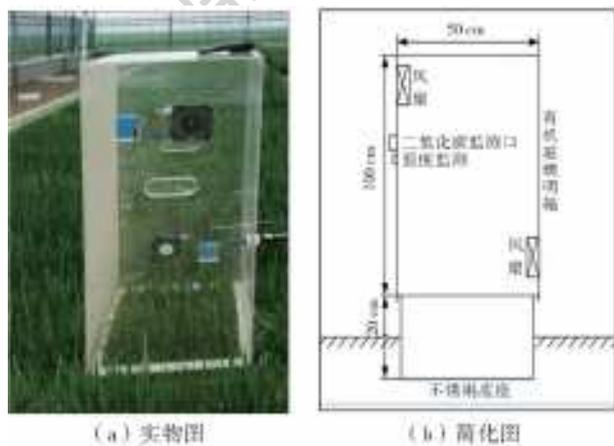


图 3 静态明箱
Fig. 3 Transparent test box

2.3 数据处理

在每天的 9、13、17 时 3 个时点测量试验组及正常组的碳通量,此外在试验前 3 d 加测 1 d、5 d 和 21 时 3 个时点的数据。数据测量后利用式(1)进行碳通量的计算:Q 为负表示土壤在这一阶段主要表现为吸收 CO₂;Q 为正表示土壤在这一阶段主要表现为释放 CO₂。

$$Q = \frac{(237 + T)10^6 MV \Delta C}{237 \times 22.4 S \Delta t} \quad (1)$$

式中:Q 为 CO₂ 通量,mg/(m²·s⁻¹);T 为箱内温度,°C;M 为摩尔质量,g/mol;V 为明箱体积,m³;ΔC 为静态明箱内 CO₂ 质量浓度变化量,10⁻⁶;S 为静态明箱所覆盖的面积,m²;Δt 为时间变化量。

3 结果分析

拔节期逐日 9 时温度及天气状况见表 1。10 d 内存在多日阴雨天气,天气状况会对碳通量产生一定的影响。

表 1 9 时温度及天气情况

Tab. 1 Temperature and weather conditions at 9:00 o' clock

时间	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	8 d	9 d	10 d
天气	晴	阴雨	阴雨	晴	多云	阴雨	阴雨	阴雨	晴	晴
温度/°C	13.0	14.0	15.8	2.6	4.8	8.4	7.6	4.2	4.2	5.4

3.1 拔节期日尺度碳通量曲线变化特征

选取涝渍情景前 5 d 的碳通量数据,分析不同情景下碳通量变化特征,探讨涝渍胁迫对碳通量的影响。

3.1.1 正常情景下冬小麦碳通量变化特征

正常情景下,冬小麦碳通量在第 2、4、5 d 呈现

出先逐渐降低随后升高的趋势,13时为其碳通量的最低点,在第1、3 d呈逐渐上升的趋势,9时为其碳通量的最低点(表2、图4)。在拔节期,日出时间大约为6时30分,日落时间大约为18时30分,因此17时光照强度相对其他时间较弱,导致碳通量较高,表现为正值。比较逐日碳通量可知,较第1 d的晴天,第2 d的阴雨天碳通量有所升高,在13时升高幅度相对较小,而在其他两个时点升高幅度较大。第3 d碳通量大幅升高,碳通量曲线也趋于平缓。雨后初晴的第4 d,碳通量大幅降低。

表2 正常情景碳通量

Tab.2 Carbon flux under the normal condition

单位:mg/(m ² ·s)					
时间	第1 d	第2 d	第3 d	第4 d	第5 d
9时	-5.64	-1.90	-1.49	-6.61	-5.61
13时	-4.18	-3.93	-0.50	-7.30	-6.09
17时	0.03	1.95	2.41	-0.74	-0.10

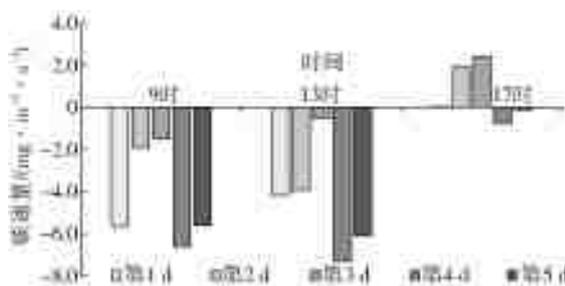


图4 正常情景碳通量

Fig.4 Carbon flux change under the normal condition

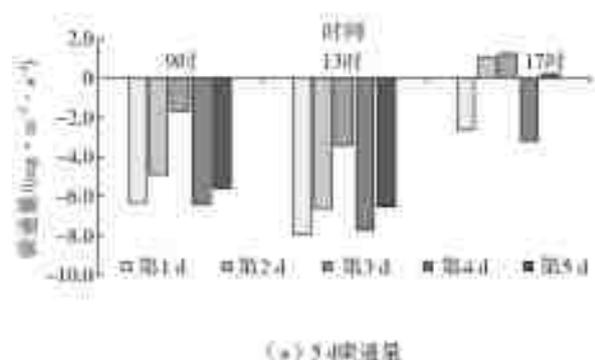


图5 涝水情景碳通量

Fig.5 Carbon flux under the surface waterlogging condition

比较逐日碳通量可知,9时碳通量最低点在第4 d(-6.43),13时碳通量最低点在第5 d(-7.10),第4 d略高于第5 d,17时最低点在第4 d(-2.05)。

渍水情景在拔节期可以有效的降低冬小麦碳通量,日内以13时降低幅度最大,逐日间以第3 d降低幅度最大,其次为第1 d,第4 d降低幅度最小甚至产生小幅度的增量。

3.1.2 涝水情景下冬小麦碳通量变化特征

涝水情景冬小麦碳通量整体低于正常情景,日内变化也更为规律,基本表现为先降后升,13时为其碳通量的最低点,见表3、图5。比较逐日碳通量可知:9时碳通量最低点在第4 d(-6.40),第1 d略高于第4 d;13时碳通量最低点在第1 d(-7.95),第4 d略高于第1 d;17时碳通量最低点在第4 d(-3.22)。

涝水情景在拔节期可以有效地降低冬小麦碳通量,日内以13时降低幅度最大,逐日间以第1 d降低幅度最大,其次为第2、3 d。对于不同的天气,涝水情景在晴天造成的影响相对较大,在阴雨天可以有效改善原本碳通量较高的问题,但在连续阴雨的转晴日影响相对较小。

表3 涝水情景碳通量

Tab.3 Carbon flux under the surface waterlogging condition

单位:mg/(m ² ·s)					
时间	第1 d	第2 d	第3 d	第4 d	第5 d
9时	-6.32	-4.88	-1.69	-6.40	-5.61
13时	-7.95	-6.61	-3.42	-7.71	-6.54
17时	-2.57	1.08	1.23	-3.22	0.20

3.1.3 渍水情景下冬小麦碳通量变化特征

渍水情景下碳通量变化趋势大致表现为先降后升,与涝水情景相似,13时为其碳通量的最低点,见表4、图6。

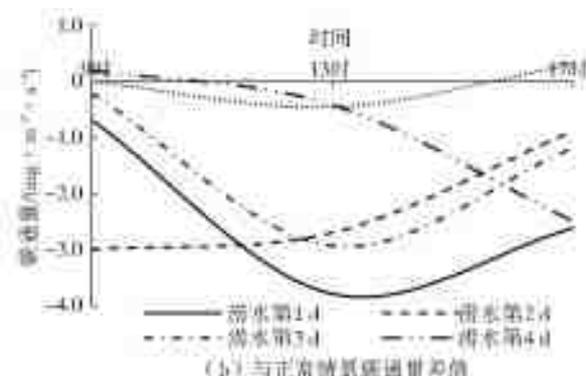


表4 渍水情景碳通量

Tab.4 Carbon flux under the subsurface waterlogging condition

单位:mg/(m ² ·s)					
时间	第1 d	第2 d	第3 d	第4 d	第5 d
9时	-5.82	-3.77	-2.13	-6.43	-5.03
13时	-6.57	-5.30	-3.48	-6.82	-7.10
17时	-1.23	1.90	2.00	-2.05	-0.46

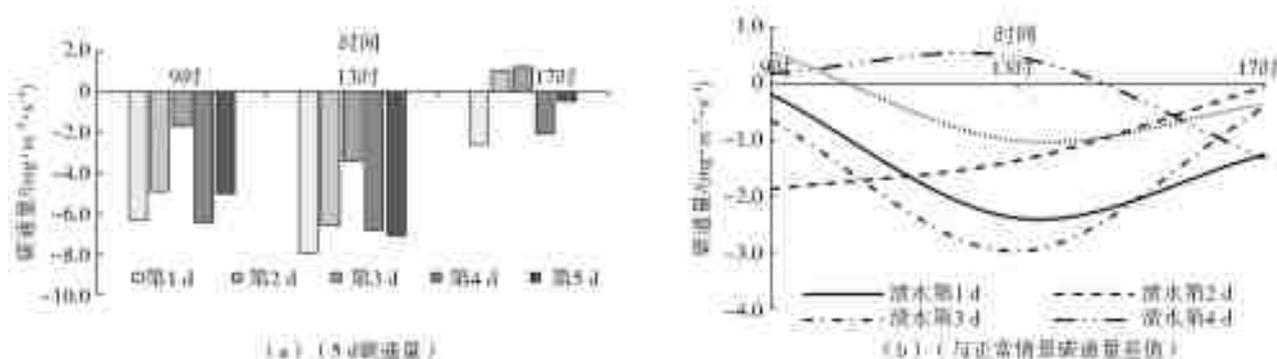


图 6 渍水情景碳通量

Fig. 6 Carbon flux under the subsurface waterlogging

3.2 拔节期逐日碳通量变化特征

3.2.1 日尺度特征

将冬小麦拔节期前 3 日测量的 6 个时点作为各自时段内的代表碳通量,折算后累加得到全日碳通量。再与 9、13、17 时 3 个时点的碳通量数据进行拟

合,分析时点碳通量与全日碳通量之间的相互关系(图 7)。由图 7 可知:3 个时点碳通量均与全日碳通量存在显著正相关关系,9、13、17 时的 R^2 值分别为 0.94、0.84、0.67;以 9 时的模拟效果最好,17 时最差,因此选取 9 时的碳通量数据作为代表进行逐日碳通量分析。

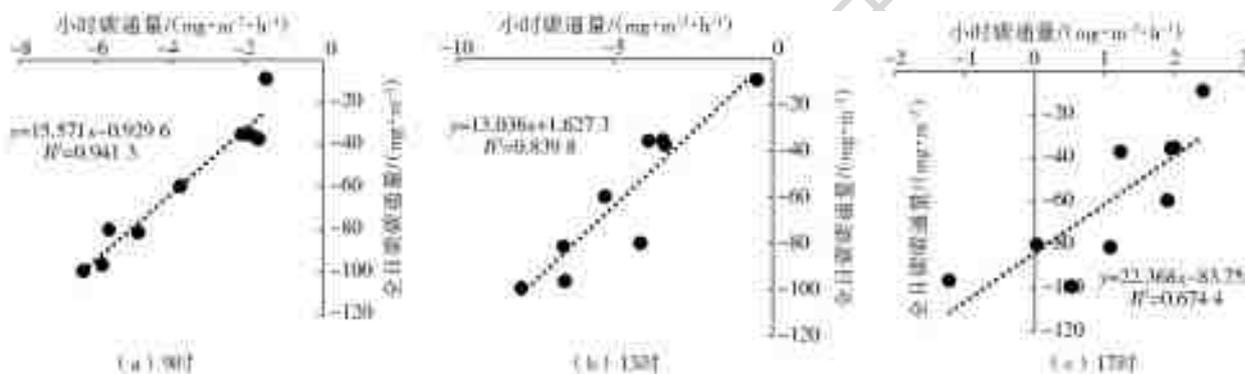


图 7 时点碳通量与全日碳通量拟合图

Fig. 7 Fitting graph of hourly carbon flux and full-day carbon flux

3.2.2 3 种情景下逐日碳通量变化

正常情景下,冬小麦碳通量在天气为连续阴雨的 2、3 d 呈现出逐渐上升趋势,但在转晴后的第 4 d 出现了大幅度的下降(图 8)。第 5 d 至第 7 d 的连续降雨天逐渐上升,于第 7 d 达到最高,第 8 d 的阴雨天出现小幅下降,之后的连续晴天呈大幅下降趋势。拔节期冬小麦碳通量在晴天呈逐日下降趋势,在阴雨天呈逐日上升趋势。

正常情景。涝渍情景对碳通量的降低效果随时间逐渐减小,较渍水情景,涝水情景对碳通量的降低效果更为明显。

较正常情景,渍水情景在前 3 d 碳通量更低,其中降低幅度最大的为第 2 d。第 4 d 后(含第 4 d)碳通量曲线变化趋势与正常情景相似,变幅较小。其中第 5 d 至 8 d 有小幅上升。涝水情景在前 2 d 碳通量较低,其中以其第 2 d 降幅最大,第 3 d 后(含第 3 d)几乎无差别,碳通量变化趋势与正常情景变化趋势相似,变幅较小。

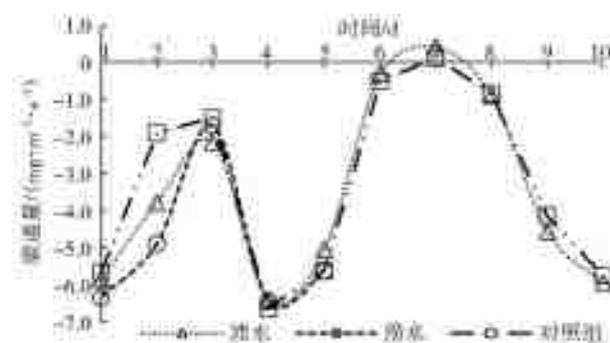


图 8 逐日碳通量变化

Fig. 8 Carbon flux curve

在第 1、2 d 拔节期碳通量为涝水情景 < 渍水情景 < 正常情景,在第 3 d 为渍水情景 < 涝水情景 <

3.2.3 温度对碳通量的影响

将拔节期碳通量与生长期逐日温度进行拟合,以三次曲线拟合效果最佳(图 9)。渍水情景的

拟合曲线与正常情景相似,均表现为先升后降再升的趋势,其中7℃为其碳通量最高点的拐点,13℃为其碳通量最低点的拐点。涝水情景表现为略升高后缓慢降低之后急速升高的趋势,其中5℃为其碳通量最高点的拐点,11℃为其碳通量最低点的拐点。

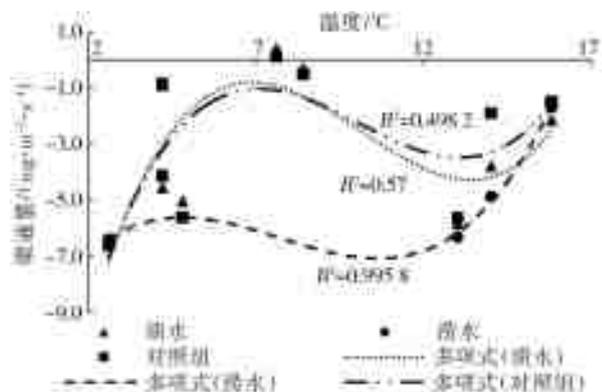


图9 温度与碳通量拟合

Fig. 9 Temperature and Carbon flux fitting curve

3.3 对生长发育的影响

在收割后测定渍水3、5 d以及涝水3、5 d冬小麦的株高、株数、穗粒数及千粒重,与正常情景进行对比,得到各要素的不同增减比例(表5)。株高出现明显增幅,在渍水3 d的增幅最大,达4.21%。其次为渍水5 d,涝水情景下增幅相对较小。株数及穗粒数相对正常情景降幅较大,其中以涝水5 d降幅最大,渍水3 d降幅最小。千粒重在渍水情景下有增幅,渍水3 d增幅大于5 d,在涝水情景下出现降幅,涝水3 d降幅小于5 d。

将冬小麦的生长发育状况与碳通量进行联合分析可知,在拔节期冬小麦碳的累积主要作用于增加植株高度。渍水情景碳通量高于涝水情景,其株高也高于涝水情景。在同一情景下前3 d的碳通量较低,植株碳累积较多,使得3 d株高较高。随着涝渍时间的增长,植株根系受到损伤,影响冬小麦后期生长,株数及穗粒数大幅降低。因此渍水3 d既有利于降低冬小麦碳通量,又对冬小麦生长的影响较小。

表5 不同涝渍胁迫情景对冬小麦生长发育的影响

Tab. 5 Effects of waterlogging stress on growth of winter wheat
单位: %

项目	渍水3 d	渍水5 d	涝水3 d	涝水5 d
株高/cm	+3.21	+2.76	+1.63	+0.26
株数/(株·m ⁻²)	-0.81	-2.76	-1.28	-4.57
穗粒数/(粒·穗 ⁻¹)	-1.74	-3.74	-3.48	-5.48
千粒重/g	+1.39	+0.17	-1.05	-2.36

4 结论

(1) 拔节期冬小麦碳通量整体表现为碳汇,以

13时最低。正常情景下,碳通量在晴天表现为逐日下降后趋于平缓,在阴雨天表现为逐日上升后趋于平缓,阴雨天碳通量相对高于晴天,阴雨初晴日碳通量大幅降低。

(2) 涝渍情景对拔节期冬小麦的碳通量产生降低影响,其中涝水情景的影响更为明显,第3 d后涝渍情景对冬小麦碳通量影响明显减弱。较晴天,涝渍情景在阴雨天对碳通量的改善效果较差。在连续阴雨后的初晴天,涝渍情景对碳通量的影响较小。

(3) 碳通量随温度呈三次曲线变化。正常情景和渍水情景碳通量最高拐点为7℃,最低拐点为13℃;涝水情景最高拐点为5℃,最低拐点为11℃。

(4) 拔节期涝渍情景下冬小麦碳的累积主要用于茎部生长。渍水3 d对株高的增幅最大,对其他要素影响较小,既可以降低碳通量又不会对植株生长产生负影响。

本次试验仅使用一年试验数据进行分析,数据相对较少,在今后的分析中需进行多年试验综合分析涝渍情景对碳通量的影响以及改善碳通量曲线的最佳时点和最佳温度,并联合分析碳通量变化对作物干物质的影响以及涝渍对作物根系的影响研究。

参考文献:

- [1] 张文海,王晶,苏日娜. 二氧化碳的失汇[J]. 环境与发展, 2011, 23(3): 52-53. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-0370. 2011. 03. 020.
- [2] WHITE M C. Missing sink [J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 2013, 77(37): 354-354. DOI: 10. 1029/EO077i037p00354-03.
- [3] REICHSTEIN M, BAHN M, CIAIS P, et al. Climate extremes and the carbon cycle [J]. Nature, 2013, 500(7462): 287-295. DOI: 10. 1038/nature12350.
- [4] MAIRE G L, DELPIERRE N, JUNG M, et al. Detecting the critical periods that underpin interannual fluctuations in the carbon balance of European forests [J]. Journal of Geophysical Research Biogeosciences, 2015, 115(G3): 1116-1120. DOI: 10. 1029/2009JG001244.
- [5] 郭维华,李思恩. 西北旱区葡萄园水碳通量耦合的初步研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 61-63. DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2010. 05. 008.
- [6] 范连连,谢继萍,马健,等. 准噶尔盆地南缘草本层碳通量及土壤呼吸的变化特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(10): 2567-2573. DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 2013. 0280.
- [7] SAITO M, MIYATA A, NAGAI H, et al. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005,

- 135(1):93-109. DOI: 10. 1016/j. agrformet. 2005. 10. 007.
- [8] 袁再健,沈彦俊,褚英敏,等. 华北平原冬小麦生长期典型农田热碳通量特征与过程模拟[J]. 环境科学, 2010, 31(1):41-48. DOI:10. 13227/J. HJKX. 2010. 01. 043.
- [9] 李祎君. 玉米农田水热碳通量动态及其环境控制机理研究[D]. 北京:中国科学院, 2008.
- [10] 袁庄鹏. 碳通量变化特征及影响因子研究[D]. 上海:上海师范大学, 2013.
- [11] 王利娜,朱清科,严登华,等. 黄土高原油松人工林干旱风险评价[J]. 南水北调与水利科技, 2017 (6): 179-186. DOI:10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 06. 026.
- [12] WANG F Q, SUN M Q, L S B, et al. Analysis of spatial-temporal evolution of agricultural drought based on regional agricultural drought index[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2018, 112: 351-356. DOI: 10. 5004/dwt. 2018. 22344.
- [13] ARAKI H, HOSSAIN M A, TAKAHASHI T. Waterlogging and hypoxia have permanent effects on wheat root growth and respiration[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2012, 198(4): 264-275. DOI: 10. 1111/j. 1439-037x. 2012. 00510. x.
- [14] 王效科,白艳莹,欧阳志云,等. 全球碳循环中的失汇及其形成原因[J]. 生态学报, 2002, 22(1): 94-103. DOI:10. 3321/j. issn:1000-0933. 2002. 01. 013.
- [15] SKAGGS R W, YOUSSEF M A, GILLIAM J W, et al. Effect of controlled drainage on water and nitrogen balances in drained lands[J]. *Transactions of the Asabe*, 2010, 53(6): 1843-1850. DOI: 10. 13031/2013. 35810.
- [16] WANG K, BIAN S, JIANG Y. Anaerobic metabolism in roots of Kentucky bluegrass in response to short-term waterlogging alone and in combination with high temperatures[J]. *Plant & Soil*, 2009, 314(1/2): 221-229. DOI: 10. 1007/s11104-008-9721-2.
- [17] 李元,时伟宇,闫美杰,等. 土壤呼吸影响因素概述及展望[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 311-316.
- [18] LIN Z B, ZHANG R D, TANG J, et al. Effects of high soil water content and temperature on soil respiration[J]. *Soil Science*, 2017, 176(3): 150-155. DOI: 10. 1097/ss. 0b013e31820d1d76.
- [19] 王兵,姜艳,郭浩,等. 土壤呼吸及其三个生物学过程研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 483-490. DOI: 10. 19336/j. cnki. trtb. 2011. 02. 046.
- [20] BRADFORD K J. Effects of soil flooding on leaf gas exchange of Tomato plants[J]. *Plant Physiology*, 1983, 73(2): 475-479. DOI: 10. 1104/pp. 73. 2. 475.
- [21] 卢从明,张其德,匡廷云,等. 水分胁迫抑制水稻光合作用的机理[J]. 作物学报, 1994, (5): 601-606.
- [22] 陈柏丽,朱永华,王春艳,等. 淮北平原降水量和参考作物蒸散量时空演变规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6): 109-116. DOI: 10. 13522/j. cnki. ggps. 2017. 0447.
- [23] 张成. 安徽省淮北与沿淮地区冬小麦生育后期的涝渍害分析[J]. 安徽农业科学, 1984(4): 22-28.
- [24] 张义丰,王又丰,刘录祥. 淮北平原砂姜黑土旱涝(渍)害与水土关系及作用机理[J]. 地理科学进展, 2001(2): 169-76. DOI: 10. 11820/dlkxjz. 2001. 02. 010.
- [25] 吴启侠,朱建强,杨威,等. 小麦对渍涝的响应及排水指标确定[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 91-98. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-6819. 2014. 16. 013.
- [26] QX/T 299—2015. 农业气象观测规范冬小麦[S].