

温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响

张凯, 王润元, 王鹤龄, 赵鸿, 赵福年, 阳伏林, 陈斐, 齐月, 雷俊

引用本文:

张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2019, 27(3): 413–421.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190031>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

1961–2010年气候变化对西南冬小麦潜在和雨养产量影响的模拟分析

Impact simulation of climate change on potential and rainfed yields of winter wheat in Southwest China from 1961 to 2010

中国生态农业学报. 2016(3): 293–305 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150962>

自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制

Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions

中国生态农业学报. 2015(2): 174–182 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.140874>

秸秆覆盖时间和覆盖量对冬小麦田温度效应及地上地下生长的影响

Effects of amount and time of straw mulching on soil temperature, root growth and yield of winter wheat

中国生态农业学报. 2017, 25(12): 1779–1791 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170977>

基于云模型的冬小麦气候适宜度评价方法*—以安徽省宿州市为例

Evaluation of climate suitability of winter wheat based on cloud model analysis— A case study of Suzhou, Anhui Province

中国生态农业学报. 2016, 24(7): 944–956 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.151317>

大气CO₂浓度升高对谷子生长发育及玉米螟发生的影响

Effect of elevated [CO₂] on growth and attack of Asian corn borers (*Ostrinia furnacalis*) in foxtail millet (*Setaria italica*)

中国生态农业学报. 2017, 25(1): 55–60 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160687>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190031

张凯, 王润元, 王鹤龄, 赵鸿, 赵福年, 阳伏林, 陈斐, 齐月, 雷俊. 温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 413–421

ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, ZHAO H, ZHAO F N, YANG F L, CHEN F, QI Y, LEI J. Influence of climate warming and rainfall reduction on semi-arid wheat production[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 413–421

温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同影响*

张 凯^{1,2}, 王润元^{1**}, 王鹤龄¹, 赵 鸿¹, 赵福年¹, 阳伏林¹,
陈 斐¹, 齐 月¹, 雷 俊³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室 兰州 730020; 2. 中国气象局定西干旱气象与生态环境野外试验基地 定西 743000; 3. 甘肃省定西市气象局 定西 743000)

摘 要: 为探索和验证未来气候变化对半干旱雨养区春小麦生产的影响, 了解春小麦生长发育和产量对增温和降水减少协同响应的基本特征, 采用开放式红外增温系统装置和水分控制观测场, 设置不同温度[增温 0 °C (对照)、增温 1.0 °C、增温 2.0 °C]和水分梯度(正常降水、降水减少 30%)模拟气候变化对半干旱区春小麦产量、生物量、穗部性状以及株高、叶面积、叶绿素和叶片净光合速率的影响。结果表明: 温度升高和降水减少在春小麦的籽粒产量和生物产量上均表现出显著的协同作用。在不增温、增温 1.0 °C、增温 2.0 °C 下降降水减少 30% 处理比正常降水处理分别减产 24.41%、12.93% 和 27.38%, 生物量分别减少 19.25%、10.31% 和 22.11%。因为籽粒产量的降幅略大于生物产量的降幅, 所以导致经济系数降低。温度升高和降水减少抑制了春小麦穗的形成, 在各增温条件下, 穗长、穗重、总小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重表现为降水减少 30% 处理低于正常降水处理, 而无效小穗数和不孕率表现为降水减少 30% 处理高于正常降水处理。温度升高和降水减少的协同作用对春小麦叶片净光合速率有极显著影响, 对叶面积和叶绿素含量有显著影响。二因子协同作用使春小麦叶片净光合速率降低, 导致春小麦株高、叶面积、叶绿素含量和茎秆重降低。研究结果可为进一步开展气候变暖下春小麦的响应与适应研究和未来半干旱区春小麦的安全种植提供理论依据。

关键词: 温度升高; 降水减少; 春小麦; 生长发育; 产量; 半干旱区

中图分类号: S162.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-6237(2019)03-0413-09

Influence of climate warming and rainfall reduction on semi-arid wheat production*

ZHANG Kai^{1,2}, WANG Runyuan^{1**}, WANG Heling¹, ZHAO Hong¹, ZHAO Funian¹,
YANG Fulin¹, CHEN Fei¹, QI Yue¹, LEI Jun³

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration / Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster

* 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-2, GYHY201106029)、甘肃省气象局气象科研项目(GSMAMs2016-14)、国家自然科学基金项目(41305134, 41775107, 41775105)和干旱气象科学研究基金项目(IAM201505)资助

** 通信作者: 王润元, 主要从事气候变化对农业的影响、农业气象灾害研究。E-mail: wryww@163.com

张凯, 主要从事干旱半干旱区气候变化对农业影响及适应技术、干旱致灾过程和机理研究。E-mail: lanzhouzhk@163.com

收稿日期: 2018-12-31 接受日期: 2019-01-19

* This study was supported by the Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest of China (GYHY201506001-2, GYHY201106029), the Meteorological Research Project of Gansu Meteorological Bureau (GSMAMs2016-14), the National Natural Science Foundation of China (41305134, 41775107, 41775105) and the Drought Meteorological Research Foundation (IAM201505).

** Corresponding author, E-mail: wryww@163.com

Received Dec. 31, 2018; accepted Jan. 19, 2019

Reduction in Gansu Province / Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China; 2. Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Field Experimental Station, China Meteorological Administration, Dingxi 743000, China; 3. Meteorological Bureau of Dingxi City, Dingxi 743000, China)

Abstract: Infrared simulations were conducted in semi-arid Dingxi, Gansu, Northwest China to investigate the influence of climate changes that result in increased temperatures and reduced rainfalls on spring wheat production. Spring wheat was grown in one of the following six simulations formed in a factorial arrangement of three ambient temperature changes (+0, +1.0 and +2.0) and two rainfalls [normal (W_0) and 30% below average (W_{30}): 0- W_0 , 0- W_{30} , 1- W_0 , 1- W_{30} , 2- W_0 , and 2- W_{30}]. Wheat yield, biomass, panicle characteristics, plant height, leaf area, chlorophyll, and net photosynthetic rate in each simulation were obtained. Decreased rainfall reduced wheat grain yield by 24.41%, 12.93%, and 27.38%, and wheat biological yield by 19.25%, 10.31%, and 22.11%, for +0, +1.0, and +2.0, respectively. The decreases suggested that the impact of climate warming was especially unfavorable for the economical return of wheat production. Wheat grown with decreased rainfall was lower in panicle length and weight, total spikelet number, number of grains per panicle, weight of grains per panicle, and 1000-grain weight, and higher in sterile spikelet number and spikelet sterility rate. Wheat net photosynthetic rate, leaf area, and chlorophyll content were reduced as the ambient temperature was increased and rainfall decreased. Spring wheat growth and production were severely affected when the ambient temperature increased 1 to 2 and rainfall dropped 30% in semi-arid China, suggesting that it is important to develop adaptation cropping to climate changes.

Keywords: Temperature increase; Rainfall reduction; Spring wheat; Growth and development; Yield; Semi-arid area

全球气候变化是人类迄今面临的最复杂的挑战之一。气温升高和干旱事件的频率和强度增加是最显著的特点。IPCC第5次评估报告指出, 1880—2012年, 全球平均地表温度升高了0.85; 1951—2012年全球平均地表温度的升温速率[0.12 (10a)⁻¹], 几乎是1880年以来的两倍。过去的3个连续10年比之前自1850年以来的任何一个10年都暖, 并预测21世纪全球气温升幅可能超过1.5~2.5^[1]。在最近的50年, 中国年平均地表气温升高1.1, 明显高于全球或北半球同期平均升温幅度^[2]。中国北方主要农业区增暖显著且干旱面积呈扩大的趋势^[3], 而温度升高和降水减少是形成当前中国北方大部分地区显著干化的主要原因^[4]。

小麦(*Triticum aestivum*)是世界上最重要的粮食作物之一, 小麦丰歉对我国粮食总产量的提高也至关重要^[5]。中国北方是春小麦的主要种植区。西北地区是中国北方春小麦的主要产区之一, 种植面积约占全国总种植面积的1/5, 占当地耕地面积的40%和粮食作物播种面积的51%^[6]。小麦的生长过程不仅受自身遗传特性的控制, 还受到环境因子的影响。高温和干旱是两个对小麦最具威胁的逆境因子, 对小麦的生理、生化特性都产生重要的影响, 进而影响小麦的生长发育、产量和品质^[7]。伴随全球气候变暖, 暖干化趋势加重必将对我国北方地区春小麦的生长产生重要的影响。

为了阐明温度升高和降水减少对小麦的影响, 国内外学者做了大量的研究工作。其研究方法主要有: 模型模拟与预测、卫星遥感监测、环境模拟控

制试验^[8]。在模拟试验中多采用人工温室、开顶箱、红外增温装置和遮雨棚-水分观测场等来控制温度、降水变化。研究结果表明, 温度升高导致小麦生育期缩短^[9-10], 株高和叶面积指数降低^[11-12], 灌浆时间缩短, 造成穗粒数、粒重和产量下降^[13-15]。干旱胁迫导致小麦生育进程明显加快, 叶面积减小, 植株矮化, 叶片含水量降低, 叶绿素含量减少^[16], 平均灌浆速率增加^[17], 植株总干物质重降低, 干物质向各器官分配的比例发生变化^[18]。尽管国内外就大气增温和干旱胁迫对小麦生长发育、产量和品质的影响分别进行了较深入地研究, 取得显著进展。但主要集中于对增温或干旱某一因子变化影响方面的研究, 而在生产实践中的温度胁迫很难与水分胁迫截然分开, 特别对于小麦, 高温和干旱在生育中、后期经常交互频繁发生, 由于试验条件等限制, 目前关于增温和干旱二者协同作用对小麦影响的试验研究还较少, 因此难以回答半干旱区春小麦对气温升高和降水减少协同究竟有怎样的响应, 对此有必要进一步明确阐释和系统化研究。因此, 本研究在遮雨棚下, 采用红外线辐射器增温装置和水分控制观测场开展大田模拟试验, 研究大气增温和降水减少的协同作用对半干旱区春小麦生长发育及产量的影响, 为进一步开展气候变暖下春小麦的响应与适应研究, 及未来半干旱区春小麦的安全种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验基地情况

试验于2014年在中国气象局定西干旱气象与生

态环境野外科学试验基地(104°37'E, 35°35'N)进行(图1)。该基地位于甘肃省中部, 属典型黄土高原半干旱气候, 年平均气温6.7℃; 降水量386 mm, 分布不均匀, 主要分布在6—8月; 年平均日照时数

2 433.0 h, 无霜期140 d^[19]。土壤为黄绵土, 土壤pH 7.8, 有机质含量为110.7 g·kg⁻¹, 有效氮、总氮分别为51.1 mg·kg⁻¹和0.84 g·kg⁻¹, 有效磷、总磷分别为14.12 mg·kg⁻¹和1.24 g·kg⁻¹^[11]。

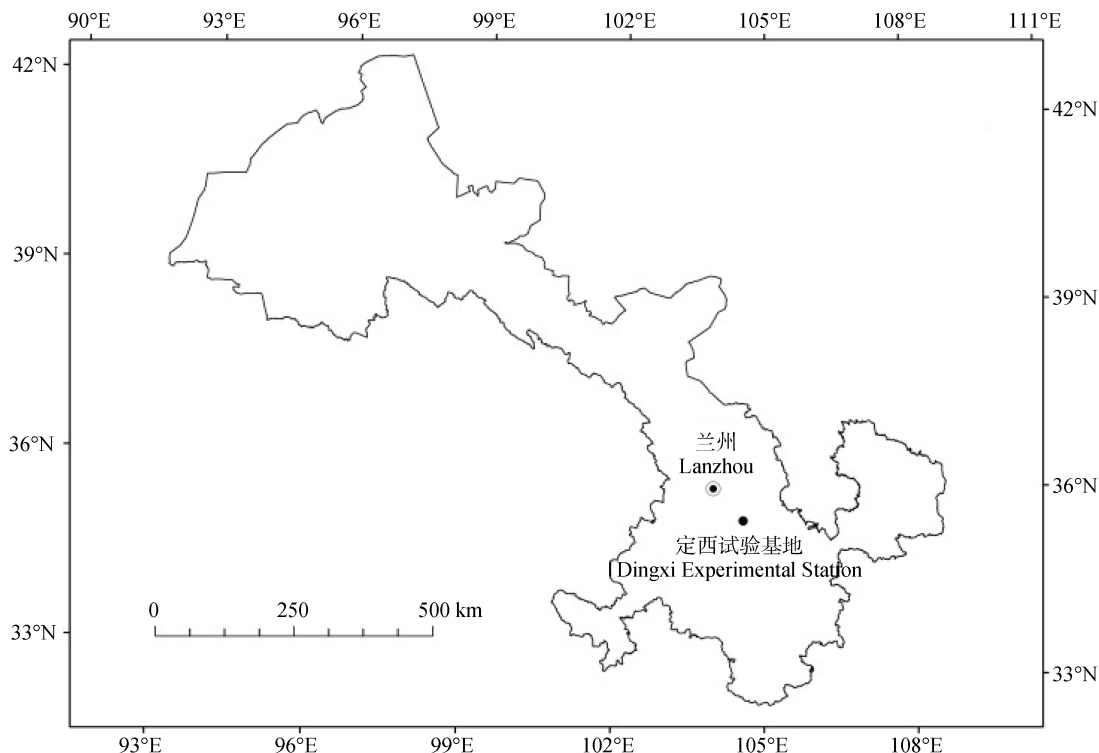


图1 试验地点位置示意图

Fig. 1 Location of the experiment site in Gansu Province

1.2 试验设计

试验春小麦品种为‘定西24号’, 为当地常见品种。播种日期为2014年4月1日, 播种量为225 kg·hm⁻², 播种时施用农家肥56 000 kg·hm⁻²、磷酸二铵228 kg·hm⁻²和尿素138 kg·hm⁻²作基肥。收获期为7月底到8月初, 生育期约120 d。

试验采用的红外线辐射器增温装置(图2)由4部分组成, 包括远红外加热部分、动力部分、控制部分和温度监测部分。远红外加热部分由额定功率1 500 W的远红外加热黑体管(长度1.8 m, 直径

1.8 cm)、铁制支架和白色不锈钢反射罩(长度2 m, 宽0.2 m)3部分构成。远红外加热黑体管悬挂在铁制支架上面, 可以根据冠层温度上下调节; 铁制支架由3根铁管焊接在一起组成, 并将整个支架固定在土壤中。动力部分是380 V的交流电。控制部分由微电脑时控开关定时、自动控制。温度监测部分由温度传感器(观测精度为±0.1℃)组成, 实时自动记录春小麦冠层的温度数据。在春小麦全生育期, 试验采用白天(7:00—19:00)不间断增温模式。



图2 试验基地增温装置和水分观测场

Fig. 2 Infrared heaters and moisture-controlled fields used in the experiment

设计不增温、增温1.0、增温2.0与正常降水、降水减少30%的组合,共6个处理,即:不增温下的正常降水(0- W_0)、不增温下的降水减少30%(0- W_{30})、增温1.0下的正常降水(1- W_0)、增温1.0下的降水减少30%(1- W_{30})、增温2.0下的正常降水(2- W_0)、增温2.0下的降水减少30%(2- W_{30})。每个处理3个重复。小区面积2 m×2 m,地下2 m均为水泥隔墙,以达到控制试验田水分的横向移动。试验地有大型遮雨棚,在有降水出现时,及时将遮雨棚推到水分试验场。利用人工灌溉方式模拟降水量。试验以定西市历史年份(1961—2011年)春小麦生育期(4—7月)的平均日降水量作为标准,计算各月减少30%的降水量(图3),然后再把每月减少后的降水量换算成灌水量后分4次进行灌溉,即每隔7 d灌溉一次。

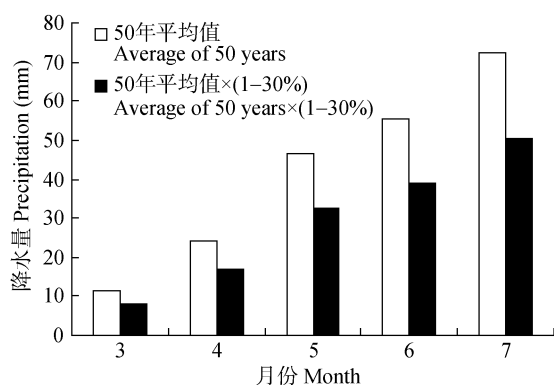


图3 研究地点 1961—2011 年春小麦生长季平均降水量
Fig. 3 Average monthly precipitation in the growing season of spring wheat during 1961–2011 in the study site

1.3 测定项目和方法

1.3.1 气温和土壤湿度观测

在每个小区,采用温度传感器实时自动记录春小麦冠层的温度。每个生育期测0~100 cm深土壤含水量,每20 cm一层,用土钻取土,然后用烘干法测定。每个处理3个重复,对每个处理的数据平均,得到各处理的气温和土壤含水量。

1.3.2 生长发育指标观测

观测不同处理下春小麦的生育期,准确记录春小麦播种和进入出苗、拔节、开花、孕穗、抽穗、灌浆、成熟的日期,以及三叶期、拔节期、开花期、孕穗期、抽穗期、灌浆期的生育时期天数。

出苗整齐后,选取样株进行挂牌标记。在春小麦各生长期,每个小区选取样株3株进行株高、叶面积、叶绿素等生长指标的观测。叶面积测定采用量测法,用直尺量测叶片的长度和最宽处,然后用长和宽的乘积再乘以折算系数确定单株叶面积。叶绿

素相对含量采用SPAD-502叶绿素计在旗叶中部测定。干物质重采用取样法测量,测量时每个处理选取生长一致的春小麦10株从地上部分剪掉,分叶、茎和穗分别装袋,称鲜重,然后105℃下杀青30 min,80℃左右烘干至恒重,冷却后称干物质重。

在春小麦抽穗—开花期,利用LI-6400光合作用测定仪(LI-COR, USA)于晴天9:00—11:30进行春小麦叶片净光合速率(P_n , $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)测定。测定时,每个处理随机选取3株,每株测定5个重复(测定旗叶),取平均值。

1.3.3 籽粒产量及穗部性状观测

春小麦成熟后,每个处理连续取有代表性的麦穗20株,进行考种分析,按照《农业气象观测规范》^[20],分别测量穗长、穗重、总小穗数、无效小穗数、不孕率、穗粒数、穗粒重、千粒重等穗部性状及籽粒产量。

1.4 数据统计分析

用SPSS 18.0统计分析软件对数据进行统计分析,用Duncan分析方法进行多重比较。用Minitab软件进行双因素方差分析(two-way ANOVA)。

2 结果与分析

2.1 不同处理下大气温度与土壤相对湿度的变化特征

由图4可知,在不增温、增温1.0、增温2.0条件下,春小麦整个生育期内,与正常降水处理比较,降水减少处理的日平均气温分别高0.22、0.34和0.35,0~60 cm土壤相对湿度分别平均减少16.07%、20.15%和21.10%。通过对6个处理的平均根层(0~20 cm)土壤相对湿度干旱指数(R)分析及与气象干旱等级标准(GB/T20481—2006)^[21]进行比较可知,0- W_0 和1- W_0 两种处理土壤相对湿度干旱指数分别为54.02%和50.31%,属于轻旱等级;0- W_{30} 和2- W_0 处理土壤相对湿度干旱指数分别为41.02%和44.25%,属于中旱等级;1- W_{30} 和2- W_{30} 的土壤相对湿度干旱指数分别为35.22%和31.49%,属于重旱等级,干旱胁迫程度严重。

2.2 温度升高和降水减少对春小麦产量的影响

从表1看出,增温2.0处理的春小麦平均籽粒产量和平均生物产量均显著低于增温1.0和不增温处理,说明随增温幅度提高,春小麦籽粒产量和生物产量逐渐降低。降水减少处理的平均籽粒产量和平均生物产量均显著低于正常降雨处理,说明降水减少对产量形成具有明显抑制作用。就籽粒产量而言,不增温、增温1.0和增温2.0条件下降水减少30%较正常降水分别减产24.41%、12.93%和

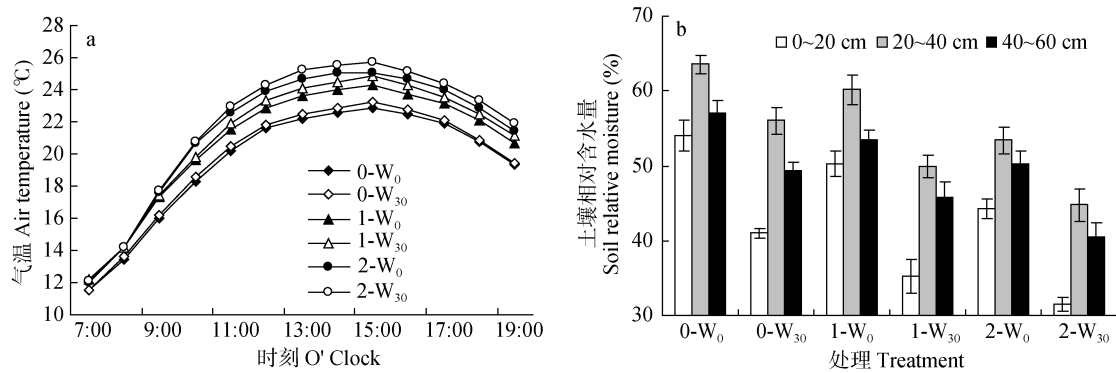


图4 温度升高和降水减少协同作用下气温(a)和土壤相对湿度(b)的平均日变化

Fig. 4 Mean diurnal variations of air temperature (a) and soil relative moisture (b) under treatments of three temperature levels and two precipitation levels

0-W₀: 不增温、正常降雨量; 0-W₃₀: 不增温、降雨量减少30%; 1-W₀: 增温1、正常降雨量; 1-W₃₀: 增温1、降雨量减少30%; 2-W₀: 增温2、正常降雨量; 2-W₃₀: 增温2、降雨量减少30%。0-W₀: normal temperature and precipitation; 0-W₃₀: normal temperature and precipitation reduced by 30%; 1-W₀: temperature increased by 1 and normal precipitation; 1-W₃₀: temperature increased by 1 and precipitation reduced by 30%; 2-W₀: temperature increased by 2 and normal precipitation; 2-W₃₀: temperature increased by 2 and precipitation reduced by 30%.

表1 温度升高和降水减少协同作用对春小麦产量的影响
Table 1 Effects of temperature increase and rainfall decrease on yield of spring wheat

处理 Treatment	平均籽粒产量 Average grain yield (g·plant ⁻¹)	平均生物产量 Average biological yield (g·plant ⁻¹)	经济系数 Harvest index
0-W ₀	1.221±0.04a	2.862±0.11a	0.427±0.01a
0-W ₃₀	0.923±0.09bc	2.311±0.09c	0.399±0.02ab
1-W ₀	0.959±0.09b	2.484±0.05b	0.385±0.03b
1-W ₃₀	0.835±0.06c	2.228±0.13c	0.375±0.01b
2-W ₀	0.610±0.05d	1.877±0.09d	0.325±0.01c
2-W ₃₀	0.443±0.08e	1.462±0.14e	0.301±0.03c

不同小写字母表示差异在 $P<0.05$ 水平显著。0-W₀: 不增温、正常降雨量; 0-W₃₀: 不增温、降雨量减少30%; 1-W₀: 增温1、正常降雨量; 1-W₃₀: 增温1、降雨量减少30%; 2-W₀: 增温2、正常降雨量; 2-W₃₀: 增温2、降雨量减少30%。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). 0-W₀: normal temperature and precipitation; 0-W₃₀: normal temperature and precipitation reduced by 30%; 1-W₀: temperature increased by 1 and normal precipitation; 1-W₃₀: temperature increased by 1 and precipitation reduced by 30%; 2-W₀: temperature increased by 2 and normal precipitation; 2-W₃₀: temperature increased by 2 and precipitation reduced by 30%.

表2 温度升高和降水减少协同作用对春小麦影响的双因子方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of the interactive effects of temperature increase and rainfall decrease on spring wheat

变量 Variable	温度 Temperature			降水量 Precipitation			交互作用 Interaction		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
籽粒产量 Grain yield	2	125.21	0.000**	1	46.13	0.000**	2	3.45	0.048*
生物产量 Biological yield	2	151.52	0.000**	1	83.01	0.000**	2	3.63	0.042*
株高 Plant height	2	24.78	0.000**	1	22.66	0.000**	2	0.84	0.442
叶面积 Leaf area	2	304.28	0.000**	1	148.98	0.000**	2	4.62	0.020*
叶绿素含量 Chlorophyll content	2	66.38	0.000**	1	162.02	0.000**	2	3.75	0.038*
净光合速率 Net photosynthetic rate	2	617.69	0.000**	1	923.66	0.000**	2	31.75	0.000**

*: $P<0.05$; **: $P<0.01$ 。

27.38%，即增温2.0下降水减少导致的减产最高。生物产量减少的趋势与籽粒产量大体相同，不增温、增温1.0、增温2.0下降水减少30%分别减产19.25%、10.31%和22.11%，且均达显著水平。不同增温条件下降水减少30%的经济系数低于正常降水处理，不增温、增温1.0、增温2.0下降水减少30%处理分别减少6.60%、2.75%和7.40%。温度升高和降水减少的协同作用在春小麦的籽粒产量和生物产量上均达到显著水平($P<0.05$ ，表2)。

2.3 温度升高和降水减少对春小麦穗部性状的影响

温度升高和降水减少的协同作用使春小麦穗部性状发生了显著变化。在各增温处理中，穗长、穗重、总小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重均表现为降水减少30%处理低于正常降水处理，且除千粒重外都表现为差异显著($P<0.05$ ，表3)。降水减少30%处理的无效小穗数和不孕率高于正常降水处理，其中不孕率差异显著($P<0.05$ ，表3)。不增温、增温

表 3 温度升高和降水减少协同作用对春小麦穗部性状的影响

Table 3 Effects of temperature increase and rainfall decrease on spike characteristics of spring wheat

处理 Treatment	穗长 Length of panicle (cm)	穗重 Weight of panicle (g)	单株总小穗数 Total spikelet number per plant	单株无效小穗数 Sterile spikelet number per plant	不孕率 Spikelet sterility rate (%)	穗粒数 Grains per panicle	穗粒重 Grains weight per panicle (g)	千粒重 1000-grain weight (g)
0-W ₀	13.70±0.31a	1.42±0.09a	33.80±1.33a	5.20±0.75d	15.42±2.38e	29.00±0.63a	1.18±0.09a	40.62±3.10a
0-W ₃₀	12.35±0.68bc	1.03±0.15b	28.80±2.04bc	6.00±0.63bcd	20.99±3.20cd	22.60±1.36bc	0.76±0.07c	33.71±1.33b
1-W ₀	12.89±0.77ab	1.07±0.11b	30.40±2.42b	5.80±0.75cd	19.14±2.38de	24.60±1.74b	0.88±0.07b	35.94±0.70b
1-W ₃₀	10.88±0.50d	0.85±0.04c	27.60±1.36cd	6.80±1.17abc	24.78±4.93bc	20.80±0.75cd	0.67±0.06c	32.21±2.94bc
2-W ₀	11.95±0.46c	0.82±0.13cd	26.20±1.33d	7.20±0.75ab	27.59±3.41b	19.00±0.63d	0.54±0.08d	28.09±3.49cd
2-W ₃₀	9.68±0.71e	0.67±0.09d	23.40±1.36e	8.00±0.63a	34.41±4.31a	15.80±0.75e	0.41±0.08e	25.65±4.56d

不同小写字母表示差异在 $P<0.05$ 水平显著。0-W₀: 不增温、正常降雨量; 0-W₃₀: 不增温、降雨量减少 30%; 1-W₀: 增温 1、正常降雨量; 1-W₃₀: 增温 1、降雨量减少 30%; 2-W₀: 增温 2、正常降雨量; 2-W₃₀: 增温 2、降雨量减少 30%。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). 0-W₀: normal temperature and precipitation; 0-W₃₀: normal temperature and precipitation reduced by 30%; 1-W₀: temperature increased by 1 and normal precipitation; 1-W₃₀: temperature increased by 1 and precipitation reduced by 30%; 2-W₀: temperature increased by 2 and normal precipitation; 2-W₃₀: temperature increased by 2 and precipitation reduced by 30%.

1.0、增温 2.0 下, 降水减少 30% 处理与正常降水处理相比, 穗长分别降低 9.85%、15.59% 和 19.00%, 穗重分别减轻 27.68%、20.56% 和 18.29%, 总小穗数分别减少 14.79%、9.21% 和 10.69%, 穗粒数分别减少 22.07%、15.45% 和 16.84%, 穗粒重分别降低 35.59%、23.86% 和 24.07%, 千粒重分别降低 17.01%、10.37% 和 8.69%, 无效小穗数分别增加 15.38%、17.24% 和 11.11%, 不孕率分别增加 36.12%、29.47% 和 24.72%。随着增温幅度的提高, 不同处理下的春小麦穗长、穗重、总小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重呈减小趋势, 而无效小穗数和不孕率呈增加趋势。说明温度升高和降水减少抑制了春小麦穗的形成, 表现在穗长变短, 穗粒数减少, 穗重和穗粒重降低等。

2.4 温度升高和降水减少对春小麦光合速率和生长发育指标的影响

在抽穗—开花期, 不增温、增温 1.0、增温

2.0 条件下, 降水减少 30% 与正常降水处理相比, 春小麦叶片净光合速率 (P_n) 分别降低 9.54%、16.45% 和 22.19%, 差异均达到显著水平 ($P<0.05$, 表 4)。随着增温幅度的提高, 不同处理的春小麦叶片 P_n 呈减小趋势。温度升高和降水减少的协同作用对春小麦叶片 P_n 的影响达极显著水平 ($P<0.01$, 表 2)。

在不增温、增温 1.0、增温 2.0 条件下, 降水减少 30% 与正常降水相比, 株高分别降低 8.00%、5.07% 和 11.11%, 叶面积分别减小 24.35%、29.26% 和 30.80%, 叶绿素含量分别降低 13.64%、18.01% 和 26.76%, 茎秆重分别降低 21.11%、33.37% 和 27.94%。除株高 1-W₃₀ 与 1-W₀ 差异不显著外, 其他均达到显著水平 ($P<0.05$, 表 4)。随增温幅度提高, 春小麦株高、叶面积、叶绿素和茎秆重呈减小趋势。温度升高和降水减少的协同作用对叶面积和叶绿素的影响达显著水平 ($P<0.05$), 而对株高的影响不显著 (表 2)。

表 4 温度升高和降水减少协同作用对春小麦净光合速率和生长发育指标的影响

Table 4 Effects of temperature increase and rainfall decrease on leaf net photosynthetic rate and growth characteristics of spring wheat

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	株高 Plant height (cm)	叶面积 Leaf area (cm^2)	叶绿素含量 Chlorophyll content (SPAD)	茎秆重 Stem weight ($\text{g}\cdot\text{plant}^{-1}$)
0-W ₀	25.38±0.21a	76.66±1.47a	79.53±3.23a	52.36±1.15a	1.028±0.09a
0-W ₃₀	22.96±0.42b	70.53±1.80bc	60.17±4.03c	45.22±1.63c	0.811±0.07b
1-W ₀	23.34±0.16b	72.33±1.73b	67.81±3.99b	48.20±1.20b	0.851±0.07b
1-W ₃₀	19.50±0.26d	68.66±2.13bc	47.97±3.08d	39.52±1.37d	0.567±0.06d
2-W ₀	21.36±0.38c	67.16±3.33c	35.07±2.88e	44.50±1.39c	0.673±0.05c
2-W ₃₀	16.62±0.24e	59.70±5.34d	24.27±2.60f	32.59±2.64e	0.485±0.06d

不同小写字母表示差异在 $P<0.05$ 水平显著。0-W₀: 不增温、正常降雨量; 0-W₃₀: 不增温、降雨量减少 30%; 1-W₀: 增温 1、正常降雨量; 1-W₃₀: 增温 1、降雨量减少 30%; 2-W₀: 增温 2、正常降雨量; 2-W₃₀: 增温 2、降雨量减少 30%。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). 0-W₀: normal temperature and precipitation; 0-W₃₀: normal temperature and precipitation reduced by 30%; 1-W₀: temperature increased by 1 and normal precipitation; 1-W₃₀: temperature increased by 1 and precipitation reduced by 30%; 2-W₀: temperature increased by 2 and normal precipitation; 2-W₃₀: temperature increased by 2 and precipitation reduced by 30%.

3 讨论

高温和干旱是限制农作物生长发育的重要因子,自然界中这2种非生物逆境胁迫常常同时发生^[22-23], 对大田作物造成非常大的甚至是致命的影响^[24-25], 尤其在雨养农业区^[26]。一些学者也就高温和干旱对小麦生长发育及产量的协同影响进行了研究, 但研究结果并不一致。有研究认为, 昼/夜温度从18 /13 增加到24 /19 时, 小麦粒重的降低在轻度干旱胁迫和重度干旱胁迫下表现一致, 因此认为高温和干旱无明显协同效应^[27]。大部分研究则认为高温伴随干旱对小麦的伤害远远大于高温、干旱单因子分别对小麦造成的伤害, 具有明显的累加效应^[28-29]。

就高温和干旱协同作用对小麦产量的影响方面, 本研究表明在温度升高和降水减少协同作用下春小麦的籽粒产量降低, 降低幅度因不同增温和降水减少量而不同, 以增温2.0 下降水减少30%的产量最低。分析还发现增温1.0 条件下的降水减产与不增温和增温2.0 条件下的减产相差较多, 这可能是试验误差造成的。生物产量与籽粒产量的变化一致, 也是增温2.0 下降水减少30%处理最低。温度升高和降水减少在春小麦的籽粒产量和生物产量上均表现出显著的协同作用, 这与前人研究结果相似。Stone和Nicolas^[30]研究认为干旱和高温对小麦产量的影响具有叠加效应。Pradhan等^[23]认为春小麦从出苗到开花期遭遇干旱、高温及其协同胁迫可降低籽粒产量69%、81%和92%, 而从出苗到花后21 d遭遇干旱、高温及其协同胁迫可降低籽粒产量26%、37%和50%。只是在产量降低的幅度上有差异, 造成差异的原因可能是试验设计不同和研究区域的特殊性。

经济系数反映了“源”的光合产物向“库”转运和积累的能力。苏玮等^[31]研究表明, 与正常条件相比, 在高温(35±2) 和干旱(田间持水量为40%±2%)协同作用下, 春小麦的经济系数下降39.1%。本研究表明, 温度升高和降水减少的协同作用使春小麦经济系数呈现减小的趋势, 主要是温度升高和降水减少抑制了春小麦穗的形成, 使籽粒体积减小, 库容缩小, 引起库积累干物质的能力降低, 进而对产量造成明显的影响, 经济系数也随之降低。但经济系数降低的幅度远低于苏玮等^[31]的结果, 这可能与增温和水分胁迫的程度有关。

小麦的穗部性状直接关系到产量的高低, 小麦的产量主要由穗数、穗粒数和千粒重三要素构成。高温和干旱协同作用对小麦穗部影响明显。Vikender等^[32]研究认为, 小麦开花后的高温干旱缩短了籽粒

灌浆期, 降低了平均籽粒重、籽粒数和千粒重。苏玮等^[31]研究表明, 高温干旱叠加胁迫加剧了穗粒数、穗粒重和千粒重下降, 导致不结实小穗增加, 造成秕粒。胡吉帮^[33]研究认为, 小麦在灌浆期土壤干旱条件下同时遭遇高温危害, 对穗粒重影响明显。本研究表明, 温度升高和降水减少的协同作用导致穗长变短, 穗粒数减少, 穗重和穗粒重降低, 无效小穗数和不孕率增加, 使春小麦穗部性状发生了显著变化, 这与前人的研究结果有所相似。

光合作用是作物产量形成的基础^[34]。高温和干旱对小麦光合作用最直接的影响是显著降低了净光合速率(P_n), 以二者胁迫兼有时降低最多^[31,35]。本研究也得出相同的结论, 发现小麦叶片 P_n 对高温干旱响应敏感, 温度升高和降水减少的协同作用对春小麦叶片 P_n 影响达极显著水平, 温度升高和降水减少对春小麦叶片 P_n 均起负作用。高温干旱对小麦生长发育过程影响显著。本研究表明, 温度升高和降水减少的协同作用导致春小麦株高、叶面积和叶绿素含量降低, 其中对叶面积和叶绿素含量的影响达显著水平, 而对株高的影响不显著, 这与张蓓蓓等^[35]研究认为高温和干旱导致小麦株高明显降低有所差异, 这可能与供试小麦品种和试验环境有关。

本研究与前人研究结果具有一致性, 也有特殊性。相关要素在趋势变化上有所相似, 但在量值变化上有所差异, 可能原因主要是由于试验设计不同造成的。前人研究多采用阶段性的高温 and 干旱, 并且是全天性的胁迫, 而本研究采用整个生育期持续增温和水分控制, 但只是选择在白天增温。由于气候变化引起的升温在不同的地区有不同的表现, 同一地区在一年四季、昼夜间的增温效应不同。为此, 在后续的试验中将对试验设计进一步完善。在分析历史气象观测资料基础上, 结合试验地的实际情况, 设计不同生育阶段、昼夜间不同增温幅度的试验开展研究, 其结果和结论将更具实际意义。

4 结论

本研究基于温度和水分的的大田模拟试验, 研究了大气增温和降水减少协同作用对半干旱区春小麦生长发育及产量的影响, 获得的主要结论有: 1) 温度升高和降水减少的协同作用对春小麦的籽粒产量和生物产量有显著影响。在不增温、增温1.0 、增温2.0 条件下降水减少30%比正常降水籽粒产量分别减少24.41%、12.93%和27.38%, 生物量分别减少19.25%、10.31%和22.11%, 经济系数分别减少

6.60%、2.75%和7.40%。2)在各增温处理中,穗长、穗重、总小穗数、穗粒数、穗粒重、千粒重均表现为降水减少30%低于正常降水处理,且除千粒重外,均表现为差异显著,无效小穗数和不孕率表现为降水减少30%处理高于正常降水处理,其中不孕率差异显著。3)在不增温、增温1.0、增温2.0条件下降水减少30%较正常降水叶片 P_n 分别降低9.54%、16.45%和22.19%,差异均达显著水平;株高、叶面积、叶绿素含量和茎秆重也呈减小趋势,其中叶面积和叶绿素含量达显著水平。总之,温度升高和降水减少对半干旱区春小麦生长发育及产量的协同效应显著。

参考文献 References

- [1] 秦大河, STOCKER T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6
QIN D H, STOCKER T. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 1-6
- [2] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 701-716
REN G Y, CHU Z Y, ZHOU Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(2): 701-716
- [3] 马柱国, 符淙斌. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439
MA Z G, FU C B. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(20): 2429-2439
- [4] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(2): 277-284
LI X Z, MA Z G, LIU X D. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 30(2): 277-284
- [5] 李广, 李玥, 黄高宝, 等. 基于 APSIM 模型旱地春小麦产量对温度和 CO_2 浓度升高的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1088-1095
LI G, LI Y, HUANG G B, et al. Response of dryland spring wheat yield to elevated CO_2 concentration and temperature by APSIM model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1088-1095
- [6] 吴宏亮, 康建宏, 姚珊, 等. 花后高温干旱对春小麦淀粉形成的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(11): 1974-1984
WU H L, KANG J H, YAO S, et al. Effect of high temperature and drought on the formation of starch after flowering of spring wheat[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(11): 1974-1984
- [7] 秦鹏, 刘秉焱, 韩翠英, 等. 水分胁迫下不同抗旱性小麦品种叶片转录因子表达差异研究[J]. 西北植物学报, 2016, 36(11): 2267-2272
QIN P, LIU B Y, HAN C Y, et al. Comparative expression of two function-known transcription genes in different drought tolerance wheat cultivars under water deficit stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(11): 2267-2272
- [8] 刘丹, 张佳华, 孟凡超, 等. 不同水分和增温处理对东北玉米生长和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2904-2910
LIU D, ZHANG J H, MENG F C, et al. Effects of different soil moisture and air temperature regimes on the growth characteristics and grain yield of maize in Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 2904-2910
- [9] 田云录, 郑建初, 张彬, 等. 麦田开放式昼夜不同增温系统的设计及增温效果[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3724-3731
TIAN Y L, ZHENG J C, ZHANG B, et al. Design of free air temperature increasing (FATI) system for upland with three diurnal warming scenarios and their effects[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3724-3731
- [10] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 模拟增温对半干旱雨养区春小麦物质生产与分配的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 223-232
ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, et al. Effects of simulated warming on dry matter production and distribution of rainfed spring wheat in semi-arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 223-232
- [11] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 田间增温对半干旱区春小麦生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2681-2688
ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, et al. Effects of increasing field temperature on growth, development and yield of spring wheat in semi-arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(9): 2681-2688
- [12] 房世波, 谭凯炎, 任三学. 夜间增温对冬小麦生长和产量影响的实验研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3251-3258
FANG S B, TAN K Y, REN S X. Winter wheat yields decline with spring higher night temperature by controlled experiments[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(15): 3251-3258
- [13] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 等. 花后开放式增温对小麦产量及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1489-1498
BIAN X B, CHEN D D, WANG Q S, et al. Effects of different day and night temperature enhancements on wheat grain yield and quality after anthesis under free air controlled condition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1489-1498
- [14] 张凯, 王润元, 冯起, 等. 模拟增温和降水变化对半干旱区春小麦生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S1): 161-170
ZHANG K, WANG R Y, FENG Q, et al. Effects of simulated warming and precipitation change on growth characteristics and grain yield of spring wheat in semi-arid area[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(S1): 161-170
- [15] 曹彩云, 党红凯, 郑春莲, 等. 灌浆期高温胁迫对小麦灌浆的影响及叶面喷剂的缓解作用[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1103-1113

- CAO C Y, DANG H K, ZHENG C L, et al. Impact of high temperature stress on grain-filling and the relief effect of foliage sprays during grain-filling stage of wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1103–1113
- [16] 张雅倩, 林琪, 刘家斌, 等. 干旱胁迫对不同肥水类型小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(4): 724–730
- ZHANG Y Q, LIN Q, LIU J B, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and yield of different fertilizer and water types of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2011, 31(4): 724–730
- [17] 胡吉帮, 王晨阳, 郭天财, 等. 灌浆期高温和干旱对小麦灌浆特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(6): 597–601
- HU J B, WANG C Y, GUO T C, et al. Effects of high temperature and drought stress on grain filling characteristics in wheat during grain filling period[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(6): 597–601
- [18] 张军, 刘红, 李晓萍, 等. 干旱对小麦孕穗期叶片生理特性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(3): 1–8
- ZHANG J, LIU H, LI X P, et al. Effect of drought on leaf physiological parameters and yield of wheat at booting stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(3): 1–8
- [19] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 增温对半干旱区春小麦田间水分特征的影响[J]. 干旱气象, 2015, 33(6): 52–58
- ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, et al. Effect of warming on field water characteristics of spring wheat in semi-arid area[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(6): 52–58
- [20] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993
- China Meteorological Administration. China Agricultural Meteorological Observation Guidelines[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993
- [21] 张强, 邹旭恺, 肖风劲. GB/T 20481–2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
- ZHANG Q, ZOU X K, XIAO F J. GB/T 20481–2006 Classification of meteorological drought category[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006
- [22] SAVIN R, NICOLAS M E. Effects of short periods of drought and high temperature on grain growth and starch accumulation of two malting barley cultivars[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1996, 23(2): 201–210
- [23] PRADHAN G P, PRASAD P V V, FRITZ A K, et al. Effects of drought and high temperature stress on synthetic hexaploid wheat[J]. Functional Plant Biology, 2012, 39(3): 190–198
- [24] SHAH N H, PAULSEN G M. Interaction of drought and high temperature on photosynthesis and grain-filling of wheat[J]. Plant and Soil, 2003, 257(1): 219–226
- [25] HOSSAIN A, DA SILVA J A T, LOZOVSKAYA M V, et al. High temperature combined with drought affect rainfed spring wheat and barley in South-Eastern Russia: . Phenology and growth[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2012, 19(4): 473–487
- [26] 赵鸿, 王润元, 尚艳, 等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34(1): 1–12
- ZHAO H, WANG R Y, SHANG Y, et al. Progress and perspectives in studies on responses and thresholds of major food crops to high temperature and drought stress[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(1): 1–12
- [27] DAVIDSON J L, BIRCH J W. Responses of a standard Australian and a Mexican wheat to temperature and water stress[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1978, 29(6): 1091–1106
- [28] 卢红芳, 王晨阳, 郭天财, 等. 灌浆前期高温和干旱胁迫对小麦籽粒蛋白质含量和氮代谢关键酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3612–3619
- LU H F, WANG C Y, GUO T C, et al. Effects of high-temperature and drought stress on protein concentration and key enzyme activities in relation to nitrogen metabolism in wheat grains during the early stage of grain filling[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3612–3619
- [29] WANG G P, ZHANG X Y, LI F, et al. Overaccumulation of glycine betaine enhances tolerance to drought and heat stress in wheat leaves in the protection of photosynthesis[J]. Photosynthetica, 2010, 48(1): 117–126
- [30] STONE P J, NICOLAS M E. Wheat cultivars vary widely in their responses of grain yield and quality to short periods of post-anthesis heat stress[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21(6): 887–900
- [31] 苏玮, 孙立影, 康建宏, 等. 高温干旱对春小麦光合特性及产量的影响[J]. 农业科学研究, 2015, 36(1): 49–53
- SU W, SUN L Y, KANG J H, et al. Effect of high temperature and drought treatment on photosynthetic characteristics and yield of different varieties of spring wheat[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2015, 36(1): 49–53
- [32] VIKENDER K, BEHL R K. Grain yield in wheat as affected by short periods of high temperature, drought and their interaction during pre- and post-anthesis stages[J]. Cereal Research Communications, 2010, 38(4): 514–520
- [33] 胡吉帮. 小麦灌浆期高温、干旱及其互作对籽粒蛋白质形成、品质性状及产量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009
- HU J B. Effects of high temperature and drought and their interactions during grain filling on protein formation and protein traits in grains and yield of winter wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2009
- [34] 杨泽粟, 张强, 郝小翠. 自然条件下半干旱雨养春小麦生育后期旗叶光合的气孔和非气孔限制[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(2): 174–182
- YANG Z S, ZHANG Q, HAO X C. Stomatal or non-stomatal limitation of photosynthesis of spring wheat flag leaf at late growth stages under natural conditions in semiarid rainfed regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(2): 174–182
- [35] 张蓓蓓, 张辉, 甘卓亭, 等. 干旱高温胁迫对小麦生长及木聚糖含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 186–192
- ZHANG B B, ZHANG H, GAN Z T, et al. Effects of water deficit and high temperature on growth and arabinoxylan concentrations in two different spring wheat varieties[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1): 186–192