

增温对保护性耕作下冬小麦籽粒蛋白质含量的影响

杨 广¹, 孔祥飞^{1,2}, 侯瑞星^{2,3*}, 欧阳竹^{2,3}

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 现代节水灌溉兵团重点实验室, 石河子 832000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 冬小麦是世界主要粮食作物之一, 气候变暖可能显著影响冬小麦籽粒蛋白质含量, 但其影响机制还不明确。针对该问题, 该研究在中国冬小麦主产区华北平原开展连续 3 a(2017—2019)免耕(No Tillage, NT)和常规耕作(Conventional Tillage, CT)下的田间增温试验。结果表明, 增温提前了冬小麦返青期, 延长了冬小麦营养生长期, 提高了冬小麦叶面积指数和群体净光合速率。2019 年增温处理下冬小麦开花期茎叶氮素积累量提升了 20.17% (CT)、99.21% (NT), 花后茎叶氮素转移量提升了 24.62% (CT)、134.21% (NT), 茎叶氮素对籽粒的贡献率提升了 2.43% (CT)、46.10% (NT)。增温影响了冬小麦产量构成, 增温下冬小麦有效小穗数略减, 部分年限千粒质量略增。NT 处理增温增产, CT 处理增温增产不明显, 总的趋势为 NT 处理连续 3 a 平均产量低于 CT 处理。增温还显著提升了冬小麦籽粒蛋白质含量 ($P<0.05$), 连续 3 a 平均籽粒蛋白质含量提升了 14.28% (CT)、17.39% (NT)。综上, 研究表明增温会通过改变冬小麦生理特征显著促进氮素向籽粒转化, 并且增温下冬小麦有效小穗数减少使得原本将进入更多籽粒中去的氮素都进入到最终有效籽粒中去, 进而显著增加籽粒蛋白质含量。研究结果可为气候变化对冬小麦籽粒蛋白质含量的影响提供科学依据。

关键词: 土壤; 产量; 增温; 蛋白质; 保护性耕作; 冬小麦

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.009

中图分类号: S512.1⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-06-0080-09

杨广, 孔祥飞, 侯瑞星, 等. 增温对保护性耕作下冬小麦籽粒蛋白质含量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 80-88. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.009 http://www.tcsae.org

Yang Guang, Kong Xiangfei, Hou Ruixing, et al. Effects of warming on the protein content of winter wheat grains under the conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 80-88. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.009 http://www.tcsae.org

0 引 言

受人类活动影响, 联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)预测到 21 世纪末全球平均气温将增加 1.5~2.0 °C, 最高可达 4 °C^[1], 将持续影响全球农业生态系统。在全球范围内, 小麦为全球提供约 20% 的蛋白质来源^[2], 对粮食安全、蛋白质供应发挥着重要作用。中国冬小麦播种面积超过小麦播种面积的 90%, 供应了中国近 30% 的粮食产量。蛋白质含量是影响小麦粉营养品质的重要特征之一, 也是小麦粉最终使用价值和烘焙特性的重要特征^[3], 是评价冬小麦品质的重要依据。冬小麦生长过程和产量形成过程均受到增温的显著影响, 可能会影响到冬小麦籽粒蛋白质的形成和含量, 但相关研究还非常有限。

冬小麦植株吸收和同化各种形式的氮以产生人类可食用的蛋白质, 籽粒氮素一部分来源于来自花后直接吸

收同化, 另一部分来源于花前植株贮存氮素的再转运^[4], 花前较多的氮积累是花后氮素向籽粒中转运的物质基础。小麦籽粒氮素的形成过程受其营养生长期和产量构成期小麦的氮吸收和运移共同决定, 两个过程均对温度升高响应敏感。增温能够明显改变冬小麦的生长过程和光合作用, 其中包括小麦叶面积发育、生物量积累等重要过程。目前研究多表明, 冬小麦的营养生长对增温的响应以正面影响为主, 气候变暖提前了冬小麦植物叶面积指数最大值^[5], 增强了光合作用^[6], 增加了小麦的生物量^[7]和生物量中的氮含量^[8]。早期研究发现, 增温可以通过增加土壤氮的有效性来增强植物对氮的吸收^[9-10]。冬小麦生产系统对气候变暖的响应存在区域差异, 由于区域差异导致增温对小麦生育期的影响不同, 从而导致增温对小麦产量形成的影响也不同。干旱半干旱地区冬小麦的生育期缩短, 穗粒数和单粒质量降低, 产量降低 0.5%~45.5%, 并且增温幅度与减产幅度呈线性相关^[11]。增温下北部地区冬小麦生育进程加快, 地上部干物质积累增加, 产量提高 12%^[12]。增温下华东地区冬小麦的无效分蘖减少, 有效分蘖增加, 营养生长期的绝对生长速率显著提高, 千粒质量和产量显著提高^[13]。对处于有稳定冬眠区的华北地区而言, 气候变暖后冬小麦有效生育期延长, 相应可利用光能与积温会增加, 所延长的有效生育期大部处于小麦适宜温度范围内, 从而导致气候变暖对华北冬小麦增产有利。对于无越冬休眠期的小麦产区, 气候

收稿日期: 2021-12-14 修订日期: 2022-03-12

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23050102); 国家自然科学基金资助项目(32071607, U1803244, 51769030); 兵团科技攻关计划项目(2021AB021); 石河子大学科技项目(CXRC201801, RCZK2018C22)

作者简介: 杨广, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为干旱区水资源高效利用技术研究。Email: mikeyork@163.com

*通信作者: 侯瑞星, 博士, 副研究员, 研究方向为农田生态系统对气候变化的响应与适应机制、盐碱地改良。Email: hourx@igsrr.ac.cn

变暖导致生育期缩短和可利用光能减少, 导致减产。增温下产量形成的变化可能会导致冬小麦籽粒蛋白质含量的变化, 但目前对其影响尚不清楚。有关气候变暖对冬小麦籽粒蛋白质含量影响的研究正日益受到关注^[14]。王大成等^[15]基于神经网络对冬小麦蛋白质含量关键生态影响因子分析中发现, 温度和降雨对籽粒蛋白质含量的影响起到重要作用。Benzian 等^[16]通过对历史数据结果进行分析, 发现小麦籽粒蛋白质含量与气温上升存在相关关系。Spiertz 等^[17]利用盆栽试验和温室增温方式研究发现, 短时间热胁迫(灌浆前期进行热激处理)可以显著影响小麦籽粒蛋白质含量。以往研究大多集中在室内控制试验, 并且主要研究短时间内的增温对冬小麦籽粒蛋白质含量的影响, 缺乏全生育期增温的田间模拟试验。因此, 开展野外尺度试验来研究冬小麦籽粒蛋白质含量对气候变暖的响应是十分必要的。

保护性耕作(免耕)是中国小麦种植区广泛使用的一种耕作模式。与常规耕作相比, 免耕在增温背景下会减少土壤水分的波动并促进冬小麦对土壤硝态氮的吸收^[8]。同时先前的研究发现, 免耕小麦旗叶在蜡熟期可溶性蛋白含量显著高于常规耕作, 表现出明显的贪青晚熟的特点^[18]。免耕相较于常规耕作可以提高冬小麦籽粒蛋白质含量, 但未达到显著水平^[19]。与常规耕作相比, 免耕下籽粒蛋白含量可能对增温存在差异反映。并且, 目前研究中缺乏气候变暖和耕作处理对冬小麦发育、谷物产量和蛋白质含量的交互影响。因此, 本研究在中国小麦主产区华北平原展开田间增温试验, 旨在揭示不同耕作处理下全生育期增温对小麦籽粒蛋白质含量影响, 为明晰气候变暖对冬小麦籽粒蛋白质含量的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地及气候条件

田间试验在中国科学院禹城综合试验站(36°40'~37°12' N, 116°22'~116°45' E, 海拔 23.4 m)进行, 属于温带半干旱气候。1985—2016 年年平均气温和降水量为 13.1 °C 和 561 mm, 70%的降雨量发生在 6 月—9 月, 年无霜期为 180~230 d。种植作物是华北平原主要的粮食作物冬小麦—夏玉米。依靠灌溉以补充作物所需水量, 依照地面气象观测规范在试验点所在气象站开展相关气象要素的观测工作。

1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计, 增温试验包括温度及耕作方式两个因素。以免耕(No Tillage, NT)和常规耕作(Conventional Tillage, CT)共 2 个耕作处理为主样地, 其对应增温处理为副样地。在 12 个 2 m×2 m 的地块开展试验, 即 4 个处理重复 3 次。

4 个处理分别为: A: 免耕增温(No-Tillage Warmed, NTW); B: 免耕常温(No-Tillage Unwarmed, NTN); C: 常规耕作增温(Conventional Tillage Warmed, CTW); D: 常规耕作常温(Conventional Tillage Unwarmed, CTN), 其中 CTN 和 NTN 作为对照组。免耕处理全年无耕作活动, 只是在播种时对土壤表面由免耕播种机造成轻微扰

动。常规耕作处理每年在种植小麦前进行翻耕, 深度约为 15 cm。常规耕作处理每年无秸秆覆盖, 作物秸秆全部移除。各耕作方式投入总纯氮素相同, 每年除前茬外的总氮投入为 492 kg/hm²。试验地平整、土壤质地、土壤肥力、灌溉等田间管理措施等由实验员统一管理, 确保其一致性, 开花前定量喷洒农药防治蚜虫, 生长季内未受气象灾害以及病虫害影响。试验品种为济麦 22。2017—2019 年冬小麦播种和收获期见表 1。

表 1 2017—2019 年不同处理下冬小麦播种和收获期
Table 1 Sowing and harvesting dates of winter wheat under different treatments from 2017 to 2019

处理 Treatments	播种日期 Sowing date			收获日期 Harvesting date		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019
CTN	2016-10-12	2017-10-21	2018-10-15	2017-06-06	2018-06-05	2019-06-11
CTW	2016-10-12	2017-10-21	2018-10-15	2017-06-05	2018-05-29	2018-05-30
NTN	2016-10-12	2017-10-21	2018-10-15	2017-06-08	2018-06-05	2019-06-11
NTW	2016-10-12	2017-10-21	2018-10-15	2017-06-07	2018-06-05	2019-06-08

注: CTN 为常规耕作常温处理, CTW 为常规耕作增温处理, NTN 为免耕常温处理, NTW 为免耕增温处理。下同。

Note: CTN is conventional tillage unwarmed treatment, CTW is conventional tillage warmed treatment; NTN is no-tillage unwarmed treatment, NTW is no-till warmed treatment. The same below.

增温方式采用全年热红外开放式增温, 装置采用 MSR-2420 红外增温器(ralglo Electronics Inc, Bethlehem, PA, USA)来模拟气候变暖。该装置通过红外辐射来提高土壤和冠层温度, 该设备大小约为 165 cm×15 cm, 悬挂于加热的小区正上方 3 m 处, 每天 24 h 持续加热, 增温设备的增温效率保持不变, 红外加热器的平均辐射输出约为 92 W/m², 对冠层增温效果稳定。红外增温装置不产生任何影响作物物候的可见光^[20]。利用 PT 100 热电偶和 FDS 100 传感器(Unism Technologies Incorporated, Beijing, China)监测 5 cm 深度的土壤温度和 0~10 cm 的土壤含水率。冠层温度用热成像仪(SC2000 Thermo CAM, Flir Systems, Danderyd, Sweden)测定, 关于测定的详细信息见文献[7]。在相对应的不增温小区, 架设外形与增温设备一致的支架和防雨板, 抵消由于设备带来的光照或雨水的差异。

1.3 指标与测定

植物叶面积指数(LAI): 用尺子测量每片叶子的最大长度(L , cm)和最大宽度(W , cm)。叶面积指数(LAI, m²/m²)基于如下公式计算:

$$LA=0.77 \cdot L \cdot W \quad (1)$$

$$TLA = \sum_{i=1}^n (0.77 \cdot L_i \cdot W_i) \quad (2)$$

$$LAI=ATLA \cdot D \quad (3)$$

式中 LA 为叶片面积, m²; TLA 为每株植物总叶面积, m²; ATLA 为平均每株植物总叶面积, m²; n 为每株植物的叶片总数, D 为种植密度, 株/m²。

冬小麦群体光合作用速率测定: 使用便携式光合作用仪(LI-6400XT, LI Cor, Lincoln, NE, USA)和透明同化箱对冬小麦群体净光合速率进行测定。生育期时长: 冬小麦生育期的观测是从返青到收获, 在 50%的植株达到相应的生长阶段时进行记录。地上部生物量测定: 在每个小区内随机选取 20 株小麦, 将小麦地

上生物量剪成茎、叶和穗三部分,然后在烘箱中 70 ℃干燥 48 h 至恒质量后,对相应的生物量进行称量。冬小麦的有效小穗数、不孕小穗数、穗粒数、千粒质量均通过人工考种获得。产量均通过每个小区 1 m×1 m 范围内的小麦(去除采样剩余的,按其面积)产量获得。品质测定:将成熟收获的小麦籽粒正常晾晒风干,统一进行品质测定。采用 CN 元素分析仪(LECO Truspec CN, Cebas-Csic, Spain)测定冬小麦茎、叶、籽粒中总氮含量。籽粒蛋白质含量(g/kg)通过籽粒含氮量×5.7 计算(GB 5009.5—2016);各时期茎叶氮素积累量(kg/hm²)通过茎叶氮素含量×干物质质量计算;营养器官氮素转移量(kg/hm²)通过开花期茎叶氮素积累量减去成熟期氮素积累量计算;茎叶氮素贡献率是茎叶氮素转移量占成熟期籽粒氮素积累量的百分比。有关冬小麦叶面积指数、生育期、地上部干质量、产量及其构成、籽粒蛋白质含量数据时间范围为 2017—2019 年;冬小麦各生育期的光合速率、植株不同部位氮素含量数据为 2019 年。

1.4 数据分析

对不同处理下的数据,采用 Microsoft Excel 2019 软件进行处理。利用 IBM SPSS Statistics 25 统计软件,采用双因素方差分析检验耕作、温度以及耕作×温度交互效应显著性,利用 t 检验分析组间显著性。利用 IBM SPSS Amos 26 进行结构方程模拟。

2 结果与分析

2.1 试验期气象与增温效果

2017—2019 年试验地的降雨和气温情况见图 1,数据来自于距试验地 100 m 的人工气象站。结果表明,2019 年(10.73 ℃)小麦季(2018 年 10 月—2019 年 6 月中旬)日平均气温高于 2017 年(9.78 ℃)和 2018 年(9.46 ℃)小麦季。2018 年(450.1 mm)小麦季降水量明显多于 2017 年(169.9 mm)和 2019 年(115.7 mm)小麦季。

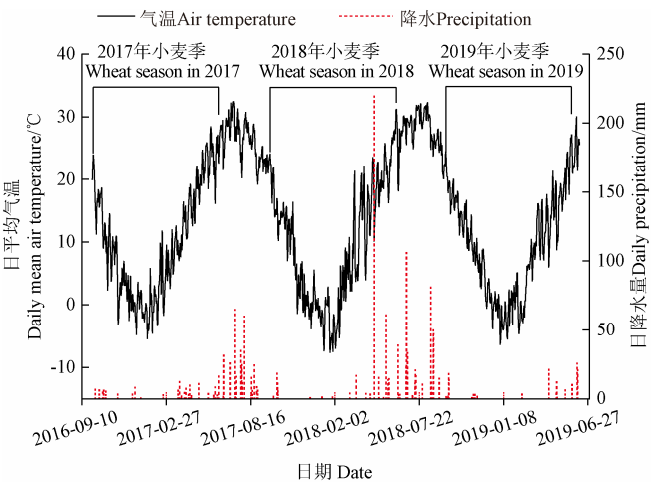


图 1 2017—2019 年小麦季试验地日降水量和日平均气温
Fig.1 Daily precipitation and mean daily air temperature of test site in wheat season from 2017 to 2019

关于红外加热装置的增温效果已在之前的研究中测

定^[7],本研究中设备增温效率保持不变(92 W/M²)。具体增温效果见表 2。NT 和 CT 处理的昼夜温差使 5 cm 深处的日平均土壤温度分别升高了 1.09 和 1.60℃。对于白天和夜间的平均土壤温度,CT 处理下的土壤温度升高(1.51 和 1.68 ℃),高于 NT 处理(0.73 和 1.34 ℃)。两种耕作制度下,增温对冠层温度的影响是相同的,由于白天受大风等气象因素影响,日间平均冠层温度提升小于夜间,夜间冠层温度提升 1.62 ℃,日间提升 0.95 ℃。在不同耕作制度之间,增温对土壤含水率也存在显著影响,使 0~10 cm 深度的土壤含水率减少了 3.84 个百分点,但在 NT 下只减少了 1.87 个百分点。

表 2 增温下不同耕作处理的土壤和冠层温度变化值
Table 2 Soil and canopy temperature variation values for different tillage treatments under warming

指标 Index	NT	CT
日均土壤温度 Diurnal mean soil temperature /℃	1.09 ± 0.14	1.60 ± 0.30
日间平均土壤温度 Daytime mean soil temperature /℃	0.73 ± 0.17	1.51 ± 0.19
夜间平均土壤温度 Nighttime mean soil temperature /℃	1.34 ± 0.11	1.68 ± 0.20
最高土壤温度 Maximum soil temperature /℃	1.46 ± 0.23	1.01 ± 0.14
最低土壤温度 Minimum soil temperature /℃	1.66 ± 0.23	1.50 ± 0.19
日间平均冠层温度 Daytime mean canopy temperature /℃	0.95 ± 0.19	
夜间平均冠层温度 Nighttime mean canopy temperature /℃	1.62 ± 0.13	
土壤体积含水率 Soil volume moisture percentage points	-1.87	-3.84

注:表中所有数据 P<0.05,减号表示减少。NT 为免耕,CT 为常规耕作。
Note: P<0.05 for all data in the table, and the minus sign indicates a decrease. NT means no tillage, and CT means conventional tillage.

本研究监测了 2017—2019 年增温下不同耕作处理的土壤平均温度、土壤含水率变化,结果见表 3。增温使 2017—2019 年 CT 处理 5 cm 深度的平均土壤温度分别提升了 1.87、1.81、1.99 ℃;NT 处理分别提升了 1.45、1.58、1.37 ℃。2017—2019 年增温使 CT 和 NT 处理土壤含水率下降,2017—2019 年增温使 CT 处理 0~10 cm 深度的土壤含水率分别降低了 2.27、1.80、1.67 个百分点,NT 处理分别降低了 1.40、1.80、1.60 个百分点。值得注意的是,土壤温度 NTN 处理低于 CTN 处理,NTW 处理低于 CTW 处理;土壤含水率 NTN 处理高于 CTN 处理,NTW 处理高于 CTW 处理。

表 3 2017—2019 年不同处理下平均土壤温度和土壤含水率
Table 3 Average soil temperature and soil moisture content under different treatments from 2017 to 2019

处理 Treatments	土壤温度 Soil temperature/℃			土壤体积含水率 Soil volume moisture content/%		
	2017	2018	2019	2017	2018	2019
CTN	13.46	14.36	13.44	17.97	17.90	17.47
CTW	15.33	16.17	15.43	15.70	16.10	15.80
NTN	12.87	14.11	12.88	18.70	18.60	18.30
NTW	14.32	15.69	14.25	17.30	16.80	16.70

2.2 不同耕作下增温对冬小麦各生长发育指标的影响

2.2.1 叶面积指数

不同耕作处理下增温对冬小麦各生育期叶面积指数的影响见表4。2017—2019年各处理下增温对冬小麦叶面积指数影响趋势相同,均在开花期达到最大值,随后叶面积指数下降。增温提升了2017—2019年CT处理冬小麦返青—开花期叶面积指数,降低了成熟期叶面积指数。增温提升了2017—2019年NT处理返青—成熟期叶面积指数。CT处理和NT处理增温下叶面积指数均在返青期增幅最为明显。

表4 2017—2019年不同耕作处理下增温对冬小麦叶面积指数的影响

Table 4 Effects of warming on Leaf Area Index (LAI) of winter wheat under different tillage treatments from 2017 to 2019 ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)

年份 Year	处理 Treatments	返青期 Regreening period	拔节期 Jointing period	开花期 Anthesis period	成熟期 Maturity period
2017	CTN	0.20±0.03b	1.86±0.02c	2.64±0.06b	1.80±0.03a
	CTW	0.53±0.03a	2.32±0.04a	2.86±0.04a	1.63±0.03b
	NTN	0.16±0.04b	1.60±0.04d	1.48±0.05c	0.92±0.05d
	NTW	0.52±0.04a	2.15±0.02b	2.66±0.02b	1.17±0.10c
2018	CTN	0.19±0.14c	1.87±0.05b	2.60±0.59b	1.79±0.06a
	CTW	0.69±0.05a	2.17±0.13a	2.91±0.02a	1.64±0.03b
	NTN	0.16±0.02c	1.27±0.10c	1.66±0.07c	0.93±0.06d
	NTW	0.49±0.03b	2.23±0.07a	2.69±0.05b	1.21±0.07c
2019	CTN	0.27±0.02b	1.88±0.06b	2.66±0.06b	1.78±0.05a
	CTW	0.48±0.03a	2.39±0.09a	2.99±0.07a	1.66±0.02b
	NTN	0.16±0.02c	1.51±0.06c	1.54±0.07c	0.95±0.08d
	NTW	0.46±0.02a	2.26±0.10a	2.74±0.07b	1.23±0.08c

注:表中数字后不同小写字母表示组间差异显著, $P<0.05$ 。表6、9、10、12同。

Note: Different lowercase letters in the same column in the same year indicate significant differences between groups, $P<0.05$. Table 6, 9, 10, 12 are the same.

不同生育期下耕作处理和温度对冬小麦植物叶面积指数主体间效应检验结果见表5。结果表明,各生育期耕作处理和温度对冬小麦叶面积指数的主效应具有显著意义($P<0.001$)。除返青期外,耕作处理和温度对冬小麦叶面积指数的交互效应均有显著意义($P<0.001$)。

2.2.2 群体净光合速率

不同耕作处理下增温对冬小麦群体净光合速率影响见表6。结果表明:除CT处理开花期外,增温均显著增加了冬小麦群体净光合速率($P<0.05$)。增温下CT处理冬小麦返青期提升最为明显,相比于对照组提升了约 $2.02 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; NT处理开花期提升最为明显,相较于对照组提升了约 $3.16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

利用结构方程模型描述冬小麦在不同处理下温度、叶面积指数、群体净光合速率之间复杂动态变化过程,综合评价各项指标之间的相关性,探讨不同耕作处理中,不同温度水平对同一过程直接与间接的影响,从而判别不同处理下温度对小麦光合的相对重要性。模拟结果见表7,结果表明,增温下冬小麦植株叶面积指数增加,进而群体净光合速率提升,且增温对冬小麦群体净光合速率有直接促进作用。温度间接(温度→LAI→净光合)影

响群体净光合速率的路径系数明显大于温度直接影响群体净光合作用效率路径系数。常规耕作处理下,增温对冬小麦群体净光合作用效率在返青期、拔节期最为明显(增温下路径系数变化分为:0.15→0.87; 0.22→0.64),免耕处理下扩大了增温对群体净光合作用效率的影响(路径系数变化分为:0.12→0.92; 0.22→0.83)。

表5 2017—2019年不同生育期耕作处理和温度对冬小麦叶面积指数主体间效应检验

Table 5 Intersubject effect test of tillage treatments and temperature on winter wheat LAI in different growth period from 2017 to 2019

时期 Period	变异源 Source of variation	SS	df	MS	F值 F value	P值 P value
返青期 Regreening period	耕作	0.070	1	0.070	19.534	<0.001
	温度	1.731	1	1.731	482.638	<0.001
	耕作×温度	0.001	1	0.001	0.291	0.592
	误差	0.201	56	0.004		
	总变异	9.800	60			
拔节期 Jointing period	耕作	0.893	1	0.893	66.498	<0.001
	温度	5.186	1	5.186	386.176	<0.001
	耕作×温度	0.403	1	0.403	30.041	<0.001
	误差	0.752	56	0.013		
	总变异	237.417	60			
开花期 Anthesis period	耕作	6.286	1	6.286	990.751	<0.001
	温度	7.590	1	7.590	1 196.341	<0.001
	耕作×温度	2.748	1	2.748	433.108	<0.001
	误差	0.355	56	0.006		
	总变异	337.913	60			
成熟期 Maturity period	耕作	6.396	1	6.396	1 494.092	<0.001
	温度	0.052	1	0.052	12.197	<0.001
	耕作×温度	0.643	1	0.643	150.138	<0.001
	误差	0.240	56	0.004		
	总变异	123.730	60			

注:表中SS、df、MS分别为III类平方和,自由度,均方;表11、13、14同。

Note: SS, df, and MS in the table are class III sum of squares, degrees of freedom, and mean square, respectively. Table 11, 13, 14 are the same.

表6 2019年不同耕作处理下增温对冬小麦群体净光合速率的影响

Table 6 Effects of warming on group net photosynthetic rate of winter wheat under different tillage treatments in 2019 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

处理 Treatments	返青期 Regreening period	拔节期 Jointing period	开花期 Anthesis period	成熟期 Maturity period
CTN	0.31±0.01c	2.28±0.09c	3.43±0.11bc	4.01±0.08d
CTW	2.33±0.28b	3.09±0.37b	3.39±0.66ab	5.41±0.09a
NTN	0.46±0.06c	2.39±0.14c	1.63±0.06c	4.38±0.86c
NTW	2.74±0.01a	5.11±0.09a	4.79±0.97a	4.76±0.13b

2.2.3 生育期时长

不同耕作处理下增温对冬小麦生育期的影响见表8。结果表明,增温下冬小麦延长了扣除休眠期后的有效生育期,延长了冬小麦营养生长阶段时长。增温处理下冬小麦各生育期提前,其中返青期提前最为明显,增温下CT处理提前了16~29 d; NT处理提前了11~34 d。值

得注意的是, 增温下冬小麦 CT 处理总体上各生育期提前天数比 NT 处理更多。

表 7 增温和耕作影响下温度、LAI、群体净光合速率三者相互关系

Table 7 Interrelationships among temperature, LAI, and group net photosynthetic rate under the influence of warming and tillage

处理 Treatments	时期 Period	路径系数/解释的方差比例 Path coefficient/Proportion of variance explained			模型参数 Model parameters
		温度→LAI Temperature → LAI	LAI→群体净 光合速率 LAI→ Group net photosynthetic rate	温度→群体净光 合速率 Temperature → Group net photosynthetic rate	
CTN	返青期	0.89/82%	0.80/57%	0.15/57%	$\chi^2/\text{df}=3.21$ $P=0.01$ RMSEA=0.46
	拔节期	0.90/96%	0.59/76%	0.22/76%	
	开花期	0.78/61%	0.40/61%	0.55/61%	
	成熟期	0.89/79%	1.36/92%	0.48/92%	
CTW	返青期	0.91/82%	0.84/57%	0.87/57%	$\chi^2/\text{df}=3.224$ $P=0.02$ RMSEA=0.49
	拔节期	0.98/96%	0.78/76%	0.64/76%	
	开花期	0.79/61%	0.48/61%	0.54/61%	
	成熟期	0.87/79%	0.92/92%	0.44/92%	
NTN	返青期	0.76/82%	0.82/57%	0.12/57%	$\chi^2/\text{df}=3.36$ $P=0.04$ RMSEA=0.49
	拔节期	0.68/96%	0.78/76%	0.22/76%	
	开花期	0.58/61%	0.48/61%	0.37/61%	
	成熟期	0.89/79%	0.92/92%	0.43/92%	
NTW	返青期	0.94/82%	0.84/57%	0.92/57%	$\chi^2/\text{df}=3.28$ $P=0.03$ RMSEA=0.51
	拔节期	0.89/96%	0.78/76%	0.83/76%	
	开花期	0.78/61%	0.48/61%	0.55/61%	
	成熟期	0.97/79%	0.92/92%	0.48/92%	

注: 表中 χ^2/df 为模型卡方自由度比, RMSEA 为近似误差均方根。
Note: χ^2/df is the model chi-squared degrees of freedom ratio; RMSEA is the root mean squared error of approximation.

表 8 不同耕作处理下增温对冬小麦生育期的影响

Table 8 Effects of warming on the growth period of winter wheat under different tillage treatments

年份 Year	处理 Treatments	生育期起始日期 Start date of growth period			
		返青期 Regreening period	拔节期 Jointing period	开花期 Anthesis period	成熟期 Maturity period
2017	CTN	2017-03-07	2017-04-05	2017-05-01	2017-06-06
	CTW	2017-02-17	2017-03-28	2017-04-22	2017-05-31
	NTN	2017-03-07	2017-04-08	2017-05-04	2017-06-08
	NTW	2017-02-17	2017-04-02	2017-05-02	2017-06-07
2018	CTN	2018-03-04	2018-03-31	2018-04-30	2018-06-05
	CTW	2018-02-16	2018-03-21	2018-04-22	2018-05-29
	NTN	2018-03-04	2018-04-05	2018-05-02	2018-06-05
	NTW	2018-02-21	2018-04-01	2018-05-01	2018-06-04
2019	CTN	2019-03-03	2019-04-04	2019-05-04	2019-06-11
	CTW	2019-02-02	2019-03-12	2019-04-19	2019-05-30
	NTN	2019-03-03	2019-04-05	2019-05-04	2019-06-11
	NTW	2019-01-28	2019-03-24	2019-04-27	2019-06-08

2.3 不同耕作处理下增温对冬小麦地上部干质量、花后茎叶氮素积累、转移量以及对籽粒贡献率的影响

不同耕作处理下增温对冬小麦地上部干质量的影响见表 9。结果表明, 除 2017 年 CT 处理外, 其余处理下增温使得冬小麦地上部干质量增加, 在 2018 和 2019 年增温下 NT 处理达到显著水平 ($P<0.05$)。

表 9 2017—2019 年不同耕作处理下增温对冬小麦地上部干质量的影响

Table 9 Effects of warming on aboveground dry mass of winter wheat under different tillage treatments from 2017 to 2019 kg

处理 Treatments	2017	2018	2019
CTN	1.55±0.08a	0.97±0.05a	1.24±0.06ab
CTW	1.47±0.07a	1.01±0.05a	1.32±0.66a
NTN	1.10±0.06b	0.74±0.37b	0.84±0.04c
NTW	1.13±0.57b	0.96±0.05a	1.17±0.06b

不同耕作处理下增温对冬小麦开花期、成熟期茎叶氮素积累量、花后茎叶氮素转移量影响见表 10。结果表明, 增温下冬小麦开花期茎叶氮素积累量提升了 20.17% (CT)、99.21% (NT); 增温下冬小麦成熟期茎叶氮素积累量提升了 10.19% (CT)、24.87% (NT); 增温下冬小麦花后茎叶氮素转移量提升了 24.62% (CT)、134.21% (NT); 增温下冬小麦茎叶氮素对籽粒的贡献率提升了 2.43% (CT)、46.10% (NT)。

表 10 2019 年不同处理对冬小麦氮代谢及对籽粒贡献率影响
Table 10 Effects of different treatments on nitrogen metabolism and contribution to seeds of winter wheat in 2019

处理 Treatments	开花期茎叶氮素 积累量 Nitrogen accumulation amount in stems and leaves at anthesis period (kg·hm ⁻²)	成熟期茎叶氮素 积累量 Nitrogen accumulation amount in stems and leaves at maturity period (kg·hm ⁻²)	花后茎叶氮素 转移量 Nitrogen transport amount in stems and leaves after anthesis period (kg·hm ⁻²)	对籽粒的贡 献率 Contribution rate to grain /%
CTN	108.01±2.19b	33.37±1.51b	74.65±0.68c	70.64±0.64b
CTW	129.80±1.14a	36.77±1.24a	93.03±0.11a	72.36±0.08b
NTN	54.39±2.20c	17.41±1.62d	36.98±0.63d	51.19±0.88c
NTW	108.35±2.09b	21.74±0.39c	86.61±1.70b	74.79±1.47a

耕作和温度对冬小麦花后茎叶氮素转移量和对籽粒贡献率的主体间效应检验结果见表 11。结果表明, 耕作处理和温度对冬小麦花后茎叶氮素转移量以及对籽粒的贡献率的影响的主效应和交互效应均有显著意义 ($P<0.001$)。

2.4 不同耕作处理下增温对冬小麦产量、产量构成和籽粒蛋白质含量的影响

不同耕作处理下增温对冬小麦产量、产量构成、籽粒蛋白质含量影响见表 12。结果表明: NT 处理增温增产, CT 处理增温增产不明显 (3 a 中只 1 a 略增, 2 a 略减); 总的趋势 NT 平均产量低于 CT。CT 处理下 2017、2018 年增温冬小麦产量分别下降 2.14%、4.62%, 2019 年增加 7.05%。NT 处理下增温冬小麦产量分别提升 5.54% (2017)、34.44% (2018)、42.25% (2019)。增温下 CT 和 NT 有效小穗数减少, 但仅有 2017 年 CT 达到显著水平 ($P<0.05$)。增温显著降低了 2017 和 2019 年 NT 冬小麦不孕小穗数 ($P<0.05$), 提高了 2017、2018 年 CT 处理不孕小穗数, 但未达到显著水平。增温下 2018 年 CT 冬小麦穗粒数显著降低 ($P<0.05$), 其他年份及耕作处理下增温均未对冬小麦穗粒数产生显著影响。2019 年增温下 CT 和 NT 处理千粒质量均上升, 并在 CT 处理下达到显著水平。其他年份及耕作处理下增温均未对冬小麦千粒质量产生显著影响。

增温对冬小麦籽粒蛋白质含量有显著影响($P<0.05$), 结果见表 12。2017—2019 年份之间的差异较小, 增温下冬小麦籽粒蛋白质含量较对照组 3 a 平均提升约 14.28% (CT)、17.39% (NT)。试验地所在区域土壤属于改良之后的盐碱地, 所得指标略低于禹城市(小麦高产区)平均水平, 但其数值均在合理范围内, 并不影响本研究分析增温对冬小麦籽粒蛋白质的影响。

2017—2019 年耕作和温度对冬小麦产量的主体间效应检验结果见表 13, 结果表明, 除 2017 年温度和 2018 年耕作对冬小麦籽粒产量的主效应不具显著意义外, 其他年份处理的主效应以及相互效应均有显著意义($P<0.05$)。综合 2017—2019 年数据, 耕作和温度对冬小麦籽粒蛋白质含量主体间效应检验结果见表 14, 结果表明, 增温和耕作对冬小麦籽粒蛋白质含量的主效应有显著意义($P<0.05$), 但交互效应不显著。

表 12 2017—2019 年不同耕作处理下增温对冬小麦产量、产量构成和籽粒蛋白质含量的影响
Table 12 Effects of warming on yield, yield components, and grain protein content of winter wheat under different tillage treatments from 2017 to 2019

年份 Year	处理 Treatments	有效小穗数 Effective spikelets	不孕小穗数 Infertile spikelets	穗粒数 Grain per ear	千粒质量 Thousand grain mass/g	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	籽粒蛋白质含量 Grain protein content/(g·kg ⁻¹)
2017	CTN	19.20±1.86a	2.00±1.22b	51.20±11.79a	43.28±0.85a	7 429.49±218.06a	99.25±1.63b
	CTW	16.10±2.83b	2.70±1.98ab	44.25±12.49ab	43.05±0.86a	7 273.82±97.55a	116.46±4.52a
	NTN	17.25±2.72b	3.50±1.63a	41.45±12.63b	41.32±0.88b	5 384.75±110.41b	103.41±4.23b
	NTW	17.00±3.99ab	1.90±1.04b	45.00±9.82ab	41.92±0.89b	5 683.15±92.21b	122.21±1.75a
2018	CTN	14.55±2.11a	2.35±1.15ab	29.80±7.33a	33.51±0.88a	3 930.38±99.52ab	102.69±1.44b
	CTW	14.30±2.05a	2.60±1.74a	27.80±7.82c	33.43±0.89a	3 756.77±160.46b	115.27±3.53a
	NTN	15.15±2.19a	1.60±1.36bc	33.85±7.65b	34.19±0.64a	3 133.07±160.09c	103.55±4.19b
	NTW	14.95±2.06a	1.00±1.22c	34.10±5.77b	34.04±0.49a	4 212.10±90.67a	120.24±1.12a
2019	CTN	17.60±2.13a	1.45±1.12b	44.45±8.66a	40.74±0.91b	6 047.48±132.15b	103.07±4.71b
	CTW	16.70±3.32a	1.25±1.09b	42.40±12.69a	42.66±0.91a	6 474.05±74.23a	116.73±4.99a
	NTN	17.95±2.73a	2.80±2.11a	41.75±13.33a	42.05±0.88a	3 953.83±67.84d	102.09±5.74b
	NTW	17.20±2.44a	1.70±0.78b	40.80±8.15a	42.35±0.88a	5 624.29±139.43c	120.36±0.86a

表 13 2017—2019 年耕作和温度对冬小麦产量主体间效应检验
Table 13 Intersubject effect test of tillage and temperature on winter wheat yield from 2017 to 2019

年份 Year	变异源 Source of variation	SS	df	MS	F 值 F value	P 值 P value
2017	耕作	9 912 220.812	1	9 915 550.912	339.922	<0.001
	温度	15 279.121	1	15 279.145	0.524	0.490
	耕作×温度	154 627.145	1	154 627.123	5.303	0.050
	误差	233 282.345	8	29 160.352		
	总变异	508 432 065.945	12			
2018	耕作	87 715.321	1	87 715.445	3.365	0.104
	温度	614 835.613	1	614 835.652	23.590	<0.001
	耕作×温度	1 176 856.231	1	1 176 856.212	45.153	<0.001
	误差	208 510.412	8	26 063.846		
	总变异	171 566 027.221	12			
2019	耕作	6 497 725.612	1	6 497 725.778	368.540	<0.001
	温度	3 298 181.945	1	3 298 181.987	187.067	<0.001
	耕作×温度	1 160 458.175	1	1 160 458.214	65.819	<0.001
	误差	141 047.884	8	17 630.912		
	总变异	377 393 384.545	12			

表 11 耕作和温度对冬小麦花后茎叶氮素转移量和对籽粒贡献率的主体间效应检验

Table 11 Intersubject effect test of tillage and temperature on nitrogen transfer from stem and leaf and contribution rate to grain of winter wheat after anthesis period

指标 Index	变异源 Source of variation	SS	df	MS	F 值 F value	P 值 P value
花后茎叶氮素 转运量 Nitrogen transport amount in stems and leaves after anthesis period	耕作	1 457.901	1	1 457.912	1 031.512	<0.001
	温度	3 469.702	1	3 469.742	2 454.821	<0.001
	耕作×温度	732.745	1	732.731	518.442	<0.001
	误差	11.312	8			
	总变异	69 300.321	12			
对籽粒的 贡献率 Contribution rate to grain	耕作	217.101	1	217.145	173.595	<0.001
	温度	481.141	1	481.154	384.575	<0.001
	耕作×温度	358.812	1	358.842	286.912	<0.001
	误差	10.145	8			
	总变异	55 332.313	12			

表 14 试验期耕作和温度对冬小麦籽粒蛋白质含量主体间效应检验

Table 14 Intersubject effect test of tillage and temperature on the protein content of winter wheat grains in experimental period

变异源 Source of variation	SS	df	MS	F 值 F value	P 值 P value
耕作	4.143	1	4.143	9.176	0.004
温度	115.817	1	115.817	256.542	<0.001
耕作×温度	1.303	1	1.303	2.886	0.095
误差	25.281	56	0.451		
总变异	21 679.817	60			

3 讨 论

3.1 增温下营养生长期对小麦籽粒蛋白质含量的影响

营养生长期是影响冬小麦籽粒蛋白质含量的一个关键时期, 冬小麦籽粒蛋白质 80%左右为花前植株贮存氮素的再转运^[4], 增温对冬小麦物候期的影响是花前植株贮存氮素多少的关键因素。冬小麦物候期对气候变暖的响应在以往研究中存在差异^[21-24]。部分以往的试验和作物模型认为气候变暖会加快冬小麦的生长发育

进程, 缩短作物的生长时间^[25-27]。相反, 本研究发现田间开放增温导致冬小麦越冬期缩短, 返青期明显前移, 增加了冬小麦营养生长阶段时长 (表 8)。这是由于处于华北平原的禹城有稳定冬眠区, 冬季平均变暖幅度大于其他季节, 气候变暖后小麦播种推迟, 成熟则由于光周期效应提前较少, 虽然全生育期有所缩短, 但由于越冬休眠期往往缩短更多, 扣除休眠期后的有效生育期 (扣除越冬休眠期外, 冬小麦从播种到成熟的时期) 反而是延长的, 相应可利用光能与积温会增加, 所延长的有效生育期大部处于小麦适宜温度范围内, 有利于冬小麦的生长发育。本研究发现 2019 年各发育期提前天数多于 2017 和 2018 年, 其原因与所在年份全生育期气温有关, 2018 年 10 月—2019 年 6 月日平均气温高于其他两年同期日平均温度 (图 1), 相应的积温增加, 促进冬小麦的生长发育, 从而更明显地提前各生育期; 并且本研究还发现, 2017—2019 年 CT 处理各时期发育提前天数明显大于 NT 处理, 其原因与不同耕作处理下土壤温度增幅有关, 增温下 CT 处理土壤的增温效果明显高于 NT 处理 (表 3)。两种耕作处理下增温对冬小麦物候期的这种调整均使得营养生长期延长, 从而提升了冬小麦植株营养生长期茎、叶氮素积累量 (表 10), 为花后氮素向籽粒中转运提供了更好的物质基础。可见, 冬小麦植株本身会在一定程度对气候变化的适应调整生育期长度来抵消部分气候变暖带来的负面影响。增温对小麦营养生长期的影响是最终决定小麦籽粒蛋白质含量的一个重要因素。

3.2 增温对冬小麦产量和籽粒蛋白质含量之间的影响

籽粒碳素物质 80%以上来自于花后光合生产, 籽粒氮素物质 80%左右来自于花前贮藏氮运转, 而叶片氮运转造成的“自我破坏”会影响花后光合生产, 往往使得冬小麦籽粒产量和籽粒蛋白质含量之间存在负相关关系^[28]。但本试验发现增温条件下这种负相关关系可以被打破, 在连续 3 a 的田间模拟增温试验中观察到, 增温使得籽粒蛋白质含量提升的同时, 大部分年份冬小麦产量不减反增。这是由于增温下冬小麦有效生育期延长, 相应可利用光能与积温增加, 提高了花后净冬小麦群体光合速率, 保证花后物质生产, 有利于华北冬小麦增产; 并且增温提升了茎叶花后氮素积累量, 提高了茎叶氮素向籽粒转运量以及对籽粒的贡献率 (表 10), 既保证花后物质生产又能增加籽粒氮素积累, 协同提高了冬小麦籽粒产量和蛋白质含量。此外, 籽粒产量与蛋白质含量之间的正相关关系也可能是由于氮再利用率较高和叶片衰老较早所致^[3], 需要通过有针对性的田间模拟试验来提高对产量与蛋白质含量之间生理关系的理解。此外, 本研究发现, 2018 年冬小麦产量明显低于 2017 和 2019 年, 其可能与 2018 年春季降水有关, 2018 年春季降水量明显高于 2017 年和 2019 年 (图 1), 过多的降水抑制冬小麦生长发育, 进而对产量产生不利影响。并且还发现, 冬小麦 NT 处理增温增产, 而 CT 处理增产不明显, 总的趋势 NT 处理平均产量低于 CT 处理, 其原因是 NT 处理因秸秆还田, 导致常温下 NT 处理土壤温度低于 CT 处理, NT 处理土壤

含水率高于 CT 处理 (表 3)。这些关于小麦产量形成对气候变暖的响应的发现, 对于改进作物模型和未来气候影响预测具有重要意义。

3.3 增温下耕作方式对冬小麦籽粒蛋白质含量的影响

本研究发现田间开放增温显著增加了两种耕作处理下籽粒蛋白质含量 ($P<0.05$), 其原因是增温延长了冬小麦营养生长阶段时长, 提高了冬小麦群体净光合速率和叶面积指数等生理特性, 增加了植株花后茎叶氮素积累量、花后茎叶氮素转移量以及对籽粒的贡献率。并且增温下冬小麦有效小穗数减少使得原本将进入更多籽粒中去的氮素都进入到最终有效籽粒中去, 最终导致籽粒蛋白质含量增加。此外, 增温下蛋白质含量的提高除了与氮的吸收和转运有关外, 还可能受其他生理过程如淀粉合成以及蛋白质合成关键酶活性的调控^[29]。耕作方式可以影响植物对氮素的吸收, CT 处理可以提高土壤氮矿化和氮吸收^[30], 而 NT 处理可以有效避免扰动表层土壤, 改善土壤结构和表面残留物覆盖, 增强水分渗透, 减少土壤蒸发水分损失, 并增加土壤有机质含量^[31]。在本研究中发现, CT 处理下的叶面积指数、光合作用速率高于 NT 处理 (表 4、表 6), 这导致在前一条件下作物获得更多的氮。造成这一结果是由于 NT 处理导致土壤低温 (表 3), 早春土壤温度回升较慢, 影响到小麦的返青和早期生长, 这在一定程度上会延缓作物生长, 导致 NT 处理冬小麦各项生理指标初始值较低; 但值得注意的是, 在增温条件下, CT 处理与 NT 处理小麦籽粒蛋白质含量并无显著差异 (表 12); 原因是增温处理下保持了免耕土壤原有在土壤含水率以及土壤结构方面的优势, 同时增温处理弥补了免耕土壤导致越冬期土壤低温的劣势, 保证小麦安全越冬并促进冬小麦营养生长期各项生理指标的增长; 与 CT 处理相比, 增温下 NT 处理可以降低土壤温度, 增加土壤含水率 (表 3), 这有利于花后高温环境下的小麦生长^[32]。并且有研究数据表明, 无论气候变暖与否, NT 与 CT 相比 CO_2 排放量均有所降低。此外, CT 处理可能导致土壤有机碳大幅下降, 采用免耕管理已成为土壤碳存储的关键途径^[31,33]。在未来气候变暖影响下, NT 处理下冬小麦可以根据自身优势使得免耕土壤对气温变化具有一定的缓冲性, 对于本试验品种来说是一种可行的保护耕作措施。

4 结 论

本研究通过对冬小麦全生育期露地红外增温试验, 研究不同耕作处理下增温对冬小麦生理生长过程、产量、籽粒蛋白质含量的影响。结果表明, 增温冬小麦返青期提前, 延长了营养生长阶段时长, 提高了叶面积指数和冬小麦群体净光合速率等生理特性, 进而增加了植株开花期茎叶氮素积累量、花后茎叶氮素转移量以及对籽粒的贡献率。增温下免耕冬小麦产量提升, 但常规耕作增温增产不明显, 总的趋势免耕平均产量低于常规耕作。增温显著增加了冬小麦籽粒蛋白质含量 ($P<0.05$), 在免耕处理下效果更为明显, 常规耕作下增温对籽粒蛋白质含量提升了约 14.28%, 免耕提升了约 17.39%。推断免耕

可以减轻气候变暖对作物生产系统的影响。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Computational Geometry 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Tilman D, Balzer C, Hill J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [3] Asseng S, Martre P, Maïorano A, et al. Climate change impact and adaptation for wheat protein[J]. Global change biology, 2019, 25(1): 155-173.
- [4] 姚素梅, 康跃虎, 茹振钢, 等. 喷灌对冬小麦植株氮素积累和运转的影响[C]. 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 北京: 中国学术期刊电子出版社, 2011. Yao Sumei, Kang Yuehu, Ru Zhengang, et al. Effects of sprinkler irrigation on Nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[C]. Proceedings of the 2011 Annual Academic Conference of the Chinese Society of Agricultural Engineering. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [5] Lazauskas S, Povilaitis V, Antanaitis Š, et al. Winter wheat leaf area index under low and moderate input management and climate change[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2012, 10(1): 588-593.
- [6] Wan S, Xia J, Liu W, et al. Photosynthetic overcompensation under nocturnal warming enhances grassland carbon sequestration[J]. Ecology, 2009, 90(10): 2700-2710.
- [7] Hou R, Ouyang Z, Li Y, et al. Is the change of winter wheat yield under warming caused by shortened reproductive period?[J]. Ecology & Evolution, 2012, 2(12): 2999-3008.
- [8] Hou R, Xu X, Ouyang Z. Effect of experimental warming on nitrogen uptake by winter wheat under conventional tillage versus no-till systems[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 116-125.
- [9] Bai E, Li S, Xu W, et al. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics[J]. New Phytologist, 2013, 199(2): 441-451.
- [10] Rustad L, Campbell J, Marion G, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. Oecologia, 2001, 126(4): 543-562.
- [11] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1179-1184. Zhang Jianping, Zhao Yanxia, Wang Chunyi, et al. Impacts of climate change on the development and yield of winter wheat in northern China[J]. Journal of Applied Ecology, 2006, 17(7): 1179-1184. (in Chinese with English abstract)
- [12] Vogel E, Donat M G, Alexander L V, et al. The effects of climate extremes on global agricultural yields[J]. Environmental Research Letters, 2019, 14(5): 54010.
- [13] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 681-686. Tian Yunlu, Chen Jin, Deng Aixing, et al. Effects of asymmetric warming on growth characteristics and yield components of winter wheat under open warming[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 681-686. (in Chinese with English abstract)
- [14] Wang J, Hasegawa T, Li L, et al. Changes in grain protein and amino acids composition of wheat and rice under short-term increased [CO₂] and temperature of canopy air in a paddy from East China[J]. New Phytologist, 2019, 222(2): 726-734.
- [15] 王大成, 李存军, 宋晓宇, 等. 基于神经网络的冬小麦蛋白质含量关键生态影响因子分析[J]. 农业工程学报, 2010(7): 220-226. Wang Dacheng, Li Cunjun, Song Xiaoyu, et al. Analysis of key ecological influences on protein content of winter wheat based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010(7): 220-226. (in Chinese with English abstract)
- [16] Benizian B, Lane P W. Protein concentration of grain in relation to some weather and soil factors during 17 years of english winter-wheat experiments[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2010, 37(5): 435-444.
- [17] Spiertz J, Hamer R J, Xu H, et al. Heat stress in wheat (*Triticum aestivum* L.): Effects on grain growth and quality traits[J]. European Journal of Agronomy, 2006, 25(2): 89-95.
- [18] 江晓东, 迟淑筠, 李增嘉, 等. 少免耕模式对冬小麦花后旗叶衰老和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 55-58. Jiang Xiaodong, Chi Shuyun, Li Zengjia, et al. Effect of less no-till pattern on post-flowering flag leaf senescence and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 55-58. (in Chinese with English abstract)
- [19] 江晓东, 迟淑筠, 李增嘉, 等. 不同土壤耕作模式对冬小麦籽粒品质的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 54-57. Jiang Xiaodong, Chi Shuyun, Li Zengjia, et al. Effect of different soil tillage patterns on grain quality of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(7): 54-57. (in Chinese with English abstract)
- [20] Sherry R, Zhou X, Gu S, et al. Divergence of reproductive phenology under climate warming[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(1): 198-202.
- [21] Ortiz R, Sayre K D, Govaerts B, et al. Climate change: Can wheat beat the heat?[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 126(1-2): 46-58.
- [22] Sadras V O, Monzon J P. Modelled wheat phenology captures rising temperature trends: Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2-3): 136-146.
- [23] Xiao D, Tao F, Liu Y, et al. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981-2009[J]. International Journal of Biometeorology, 2013, 57(2): 275-285.
- [24] Challinor A J, Watson J, Lobell D B, et al. A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation[J]. Nature Climate Change, 2014, 4(4): 287-291.
- [25] Tian Y, Chen J, Chen C, et al. Warming impacts on winter wheat phenophase and grain yield under field conditions in Yangtze Delta Plain, China[J]. Field Crops Research, 2012, 134: 193-199.
- [26] Tao F, Zhang Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection[J]. Agricultural and forest meteorology, 2013, 170: 146-165.
- [27] Batts G R, Morison J, Ellis R H, et al. Effects of CO₂ and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons[J]. European Journal of Agronomy, 1997, 7(1-3): 43-52.
- [28] Bogard M, Allard V, Brancourt-Hulmel M, et al. Deviation

- from the grain protein concentration–grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat[J]. *Journal of experimental botany*, 2010, 61(15): 4303–4312.
- [29] 赵辉, 荆奇, 戴廷波, 等. 花后高温和水分逆境对小麦籽粒蛋白质形成及其关键酶活性的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(12): 2021–2027.
- Zhao Hui, Jing Qi, Dai Tingbo, et al. Effects of post-flowering heat and water adversity on protein formation and its key enzyme activities in wheat seeds[J]. *Journal of Crop Science*, 2007, 33(12): 2021–2027. (in Chinese with English abstract)
- [30] Thomsen I K, Sørensen P. Tillage-induced N mineralization and N uptake in winter wheat on a coarse sandy loam[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(1): 58–69.
- [31] Lal R. Soil quality impacts of residue removal for bioethanol production[J]. *Soil and tillage research*, 2009, 102(2): 233–241.
- [32] Busari M A, Kukal S S, Kaur A, et al. Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment[J]. *International soil and water conservation research*, 2015, 3(2): 119–129.
- [33] Ogle S M, Alsaker C, Baldock J, et al. Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions[J]. *Scientific reports*, 2019, 9(1): 1–8.

Effects of warming on the protein content of winter wheat grains under the conservation tillage

Yang Guang¹, Kong Xiangfei^{1,2}, Hou Ruixing^{2,3*}, Ouyang Zhu^{2,3}

(1. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Key Laboratory of Modern Water-Saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi 832000, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Winter wheat (*Triticum aestivum* L.) is one of the major food crops in the world. Climate warming has dominated the growth and yield of winter wheat, particularly the protein formation and content of grains. But, the effects of warming on the protein content still remain unclear so far. Taking “Ji Mai 22” as the test material, this study aims to determine the specific effects of climate warming on the winter wheat growth and development, yield, and grain protein content. Climate warming was also simulated with an infrared warming device. Field warming experiments were conducted under the No Tillage (NT), and Conventional Tillage (CT) in the North China Plain for three consecutive years (2017–2019). The results showed that the open field warming reduced the overwintering period, indicating a significant shift in the regreening period. The nutritional growth period was then prolonged for the nitrogen accumulation time in the pre-anthesis period of plants. There was an increase in the Leaf Area Index (LAI) at the regreening-anthesis period, the net photosynthetic rate at the regreening-maturity period, and the aboveground dry mass of winter wheat. 20.17% (CT) and 99.21% (NT) of nitrogen accumulation in the winter wheat stems and leaves at the anthesis period, respectively, whereas, 24.62% (CT) and 134.21% (NT) of nitrogen transfer in the stems and leaves after anthesis increased by the warming in 2019, and the contribution of nitrogen in the stems and leaves contribution to seeds increased by 2.43% (CT), and 46.10% (NT). The NT warming increased the yield, where the NT yield was on average lower than that of CT. The CT yield of warmed winter wheat decreased by 2.14% and 4.62% in 2017 and 2018, respectively, and increased by 7.05% in 2019, whereas, the NT yield increased by 5.54% (2017), 34.44% (2018), and 42.25% (2019), respectively. The winter wheat yield in 2018 was significantly lower than that in 2017 and 2019. The reason was that the excessive precipitation in spring inhibited the winter wheat growth and development, leading to less yield in 2018. The temperature greatly contributed to the protein content of winter wheat grains, with an average increase of 14.28% (CT) and 17.39% (NT) for three consecutive years, compared with the control group. Therefore, the temperature promoted the conversion of nitrogen to the grain via the physiological characteristics of winter wheat. The reduction in effective spikelets number allowed the nitrogen for more grains to enter the final effective grain number, thus significantly increasing the grain protein content at high temperatures. The soil temperature under the NT was lower than that under the CT. The soil temperature was slower to rise in early spring, which affected the greening and early growth of wheat, resulting in the lower initial values of LAI, and net photosynthetic rate of winter wheat under the NT. The NT under the warming treatment reduced the post-anthesis soil temperature, but increased the soil water content, indicating the better wheat growth under a high post-anthesis temperature environment, compared with the CT. There was no significant difference in the grain protein content between CT and NT. This finding can provide a strong reference for the effect of climate warming on the protein content of winter wheat seeds under conservation tillage.

Keywords: soils; yield; warming; protein; conservation tillage; winter wheat