

# 基于 Meta 分析研究气候变化对中国小麦籽粒蛋白质含量的影响

孔祥飞<sup>1,3</sup>, 李超<sup>2</sup>, 杨广<sup>3</sup>, 侯冠群<sup>1,4</sup>, 柳为<sup>1,4</sup>,  
许新港<sup>3</sup>, 欧阳竹<sup>1,4</sup>, 侯瑞星<sup>1,4\*</sup>

(1. 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; 2. 中国气象局公共气象服务中心, 北京 100081; 3. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 气候变化相关的环境因素可能会影响谷物营养质量。气候变化引起的 CO<sub>2</sub> 浓度升高、温度升高、降水量变化对作物营养质量的影响, 特别是在中国范围内对谷物蛋白质含量的影响尚未量化。为此, 该研究对中国各试验站点的现有文献数据进行 Meta 分析, 并利用中国小麦籽粒蛋白质含量数据结合气象数据评估关键气候因素对中国主要小麦种植区小麦籽粒蛋白质含量的影响。Meta 分析结果表明, 增温显著提升了小麦籽粒蛋白质含量 ( $P < 0.05$ ), CO<sub>2</sub> 浓度上升显著降低了小麦籽粒蛋白质含量, 降水对小麦籽粒蛋白质含量影响较为复杂。温度升高可以部分抵消由于 CO<sub>2</sub> 升高和降水对小麦籽粒蛋白质产生的负面影响。2010—2018 年各省份小麦生育期内平均气温呈升高趋势, 在所有调查的研究区内, 小麦总生育期平均温度约上升了 1.27 °C, 不同小麦种植区内生育期平均气温变化趋势存在差异。中国不同小麦产区籽粒蛋白质含量对生育期平均温度的响应以正向为主, 并且生殖生长阶段的平均温度在小麦籽粒蛋白质含量变率中起主导作用。研究结果可为气候变化对小麦籽粒蛋白质含量的影响提供科学依据, 有助于区域决策, 制定适当的气候变化适应战略, 以促进中国的可持续农业和营养安全。

**关键词:** 气候变化; 营养品质; 蛋白质含量; Meta 分析; 小麦

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210081

中图分类号: S512+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0118-10

孔祥飞, 李超, 杨广, 等. 基于 Meta 分析研究气候变化对中国小麦籽粒蛋白质含量的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 118-127. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210081 <http://www.tcsae.org>  
KONG Xiangfei, LI Chao, YANG Guang, et al. Effects of climate change on the protein content of wheat grains in China using Meta-analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 118-127. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210081 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

粮食安全和营养质量被认为是目前全世界可持续发展的首要挑战<sup>[1]</sup>。由于气候暖化引起的高温、二氧化碳浓度升高和降雨变异的程度及发生率的放大, 预测气候暖化将对作物产量的数量和营养质量产生影响<sup>[2-4]</sup>。与主要谷类作物的蛋白质缺乏相关的营养不良导致人类健康下降<sup>[5]</sup>。气候暖化对农业在作物产量方面的影响已被广泛调查<sup>[6-8]</sup>, 然而关于气候暖化对营养质量的影响却知之甚少<sup>[9-10]</sup>。

作为世界上最重要的主要粮食作物之一, 小麦 (*Triticum aestivum* L.) 提供了全球 20 % 的蛋白质来源<sup>[11]</sup>, 在粮食安全和蛋白质供应方面发挥着重要作用。气候暖化可能

通过对光合作用、生育期、产量构成、养分利用效率、碳氮汇源转化的影响, 对小麦籽粒的蛋白质营养价值产生影响<sup>[12]</sup>。二氧化碳浓度、温度和降水由于对作物生长的影响, 被认为是谷物产量和蛋白质含量的主要气候限制。然而, 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) 预计在 21 世纪中期, 二氧化碳将达到 500  $\mu\text{mol/mol}$  以上, 地表空气温度上升约 2 °C, 降水模式的范围和强度波动会越来越大, 正成为农业生产的主要挑战<sup>[13]</sup>。因此, 深入分析气候暖化对小麦籽粒蛋白质的影响对于确保全球粮食和营养安全至关重要。

已有一些实地研究评估了气候暖化对小麦籽粒蛋白质的影响, 其作物类型<sup>[14]</sup>、地点<sup>[9]</sup>和试验方法<sup>[10]</sup>之间存在差异。世界范围内, 在生长室内和田间条件下进行的研究都报告了温度升高与小麦籽粒蛋白质之间的正相关关系<sup>[15-17]</sup>, 但也有研究表明它们之间的负相关关系<sup>[18-19]</sup>。CO<sub>2</sub> 浓度的增加会增强叶片光合作用和作物产量<sup>[20-21]</sup>, 同时降低籽粒蛋白质含量<sup>[22-22]</sup>。同样, 有研究表明整个小麦生育期的累计降水量与小麦籽粒蛋白质含量呈负相关, 花后生育期的总降水量与小麦籽粒蛋白质含量呈正相关<sup>[23-24]</sup>。在大田研究中, 小麦籽粒蛋白质含量与气候因子之间不一致性主要是由于年份和地点的不同, 先前

收稿日期: 2022-10-22 修订日期: 2023-03-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA28130301, XDA23050102); 国家自然科学基金项目 (32071607, U1803244, 51769030, 52269006); 中国气象局青年创新团队计划 (CMA2023QN02); 兵团科技攻关计划项目 (2021AB021); 兵团科技合作计划项目 (2022BC001); 石河子大学科技项目 (CXRC201801, RCZK2018C22)

作者简介: 孔祥飞, 研究方向为农田生态系统对气候变化的响应与适应机制。Email: [kxf116@163.com](mailto:kxf116@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@igsnr.ac.cn](mailto:hourx@igsnr.ac.cn)

的研究表明，相同的气候因素在不同地理区域对小麦籽粒蛋白质含量的影响并不一致<sup>[25]</sup>。到目前为止，气候暖化中国对小麦籽粒蛋白质变异的影响仍不清楚。为此，本研究利用 Meta 分析，量化在中国利用控制试验对影响籽粒蛋白质含量关键气候因子（温度、CO<sub>2</sub> 浓度和降水）的影响。并利用 2010—2018 年县级气象数据和小麦籽粒蛋白质含量数据，量化 2010—2018 年中国主要小麦种植地理区域小麦籽粒蛋白质含量对气候变暖的响应。以期气候变化对小麦籽粒蛋白质含量的影响提供科学依据，推动区域决策，制定适当的气候变化适应战略，促进中国的可持续农业和粮食营养安全。

1 材料与方法

1.1 数据集和预处理

分析中国主要小麦种植地理区域小麦籽粒蛋白质含量对关键气候变暖的响应的数据集中的小麦籽粒蛋白质含量数据集来源于中国农业农村部（[www.moa.gov.cn/](http://www.moa.gov.cn/)）发布的《中国小麦质量报告》，用半微量凯氏定氮法测得的氮含量乘以 5.7 的氮—蛋白质转换系数（NBSC（中国国家标准局）1982 年）来测量小麦籽粒蛋白质含量，共使用了 2010—2018 年中国 12 个主要小麦种植区的 2 807 条小麦籽粒蛋白质含量记录。2010—2018 年气温原始数据来源于国家气象科学数据共享服务平台-中国地面气候资料日值数据集（V3.0），先使用 IDW 法（inverse distance weighted）插值成格点数据，覆盖中国的 500×500 网格，

每个网格的大小是 0.123°×0.099°，再分区域平均计算得到 2010—2018 年各研究区域小麦生育期平均气温数据。将县级小麦籽粒蛋白质数据按省份进行整理，根据不同省份之间气候条件、初始土壤特性及小麦营养品质的相似性，将其划分小麦种植区域（表 1）。根据小麦生长发育特性，生育期按营养生长阶段（播种—抽穗）和生殖生长阶段（抽穗—成熟）进行划分，筛选出各省小麦种植区域营养生长阶段和生殖生长阶段平均气温。对小麦成熟期的籽粒蛋白质含量和两个生长阶段的气候数据进行线性混合模型拟合，分析 2010—2018 年各地理区域籽粒蛋白质含量对小麦关键生长阶段气温的平均敏感性。

Meta 分析的数据集通过数据库 Web of Science（<http://apps.webofknowledge.com/>）和中国知识基础设施（<http://www.cnki.net/>）对 2022 年 6 月前的论文进行了检索。结合具体的检索词：营养质量指标（如蛋白质、氮）、气候暖化类型（如气候暖化、全球变暖、温度上升、降雨量、二氧化碳浓度）和小麦类型（如小麦、冬小麦和春小麦）。并且纳入该分析的研究必须符合以下标准：

- 1) 本研究仅包括在中国进行研究的的数据。
- 2) 文章需要包含表 2 中的至少一个响应变量：小麦品质、谷物蛋白、氮素利用效率。
- 3) 文章需要研究至少一个气候控制变量的影响，包括二氧化碳浓度、温度或降水变化。
- 4) 本研究只包括气候变化引起的温度上升或二氧化碳浓度变化，短期热应力的影响被排除在外。

表 1 中国主要小麦种植省份地理区域基本信息

地区 Area	种植区域 Planting area	播种期 Sowing	抽穗期 Heading	成熟期 Maturity
河北 Hebei	北部平原强筋冬麦区	10 月	次年 5 月	次年 6 月
河南 Henan	北部平原强筋、中筋冬麦区	10 月	次年 5 月	次年 6 月
山东 Shandong	北部平原强筋、中筋冬麦区	10 月	次年 5 月	次年 6 月
山西 Shanxi	北部平原强筋、中筋冬麦区	10 月	次年 5 月	次年 6 月
陕西 Shaanxi	北部平原强筋、中筋冬麦区	10 月	次年 5 月	次年 6 月
江苏 Jiangsu	黄淮海平原中筋、弱筋冬麦区	10 月	次年 4 月	次年 6 月
湖北 Hubei	长江流域中筋、弱筋冬麦区	10 月	次年 4 月	次年 5 月
安徽 Anhui	长江流域中筋、弱筋冬麦区	10 月	次年 4 月	次年 5 月
四川 Sichuan	四川盆地中筋、弱筋冬麦区	11 月	次年 3 月	次年 5 月
内蒙古 Inner Mongolia	北部中筋春麦区	4 月	6 月	7 月
甘肃 Gansu	西北强筋、中筋春麦区	3 月	6 月	7 月
新疆 Xinjiang	西北强筋、中筋春麦区	3 月	6 月	7 月

注：表中小麦种植区域信息来源于《中国小麦质量报告》以及文献 [1]。  
Note: The information of wheat planting area in the table comes from China Wheat Quality Report and reference [1].

使用上述标准，本研究找到 27 篇文章，其中提取到 294 条数据适合进行 Meta 分析，表 2 列出了 Meta 分析所有数据引用文献。表 3 列出了 Meta 分析中 3 个气候控制变量的可用数据数量，每一篇选定的文章都报告了一个或多个地点的一种或多种小麦品种的蛋白质含量，以及几种气候情景，并且列出了每种控制变量下数据条数。在每篇文章中，对照组对应于过去或当前的气候条件，本研究中称为“基准情景”。“未来情景”描述了未来可能的气候条件并在许多情况下对应于 IPCC 定义的情景。平均蛋白质含量的相对百分比变化（relative percentage change in average protein content,

RCP 通过（未来平均蛋白质含量-基准平均蛋白质含量）/ 基准平均蛋白质含量×100% 来计算。其中，“基准平均蛋白质含量”和“未来平均蛋白质含量”对应于基准和未来气候情景的多年平均值，并从文章中提取与基准相比的年平均温度变化、与基线比较的年平均降水量变化以及大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化。在许多情况下，文章中模拟了多幅度增温、CO<sub>2</sub> 浓度和灌溉量，本研究把不同幅度的控制条件展开为单独数据条进行分析。并且大多数情况这些气候控制变量中至少有一个缺失。使用数据集计算了试验的 RCP 最小值、最大值和平均值（表 3）。

表 2 不同环境因素数据分析的论文信息及物种列表  
Table 2 List of papers and species used for the data analysis of each environmental factor

控制变量 Control variables	年份 Year	试验地点 Experimental site	小麦品种 Wheat varieties
增温 Warming	2007—2009	32°02' N, 118°52' E	扬麦 11 号 <sup>[26]</sup>
	2006—2009	32°02' N, 118°52' E	扬麦 11 号 <sup>[27]</sup>
	2011—2012	29.64°N, 91.22°E	山冬 6 号 <sup>[28]</sup>
	2017—2019	36°50' N, 116°34' E	济麦 22 号 <sup>[29]</sup>
	2017—2018	31°30' N, 120°33' E	苏麦 188、镇麦 9 号、 新农 518、扬麦 16 <sup>[30]</sup>
	2012—2017	36.38° N, 106.58° E	庄浪 8 号 <sup>[31]</sup>
	2010—2017	39°08' N, 115°40' E	郑麦 98 号 <sup>[32]</sup>
	2018—2019	36°50' N, 116°34' E	济麦 22 号 <sup>[33]</sup>
	2011—2012	35°35' N, 104°37' E	春小麦 <sup>[34]</sup>
	2013—2015	31°30' N, 120°33' E	扬麦 14 号 <sup>[5]</sup>
	2013—2015	36.38° N, 106.58° E	冬小麦 <sup>[35]</sup>
	2003—2004	39.96° N, 116.33° E	辽春 10 号 <sup>[36]</sup>
CO <sub>2</sub> 升高 Elevated CO <sub>2</sub>	2017—2018	31°30' N, 120°33' E	苏麦 188、镇麦 9 号、 新农 518、扬麦 16 <sup>[30]</sup>
	2010—2017	39°08' N, 115°40' E	郑麦 98 号 <sup>[32]</sup>
	2013—2015	31°30' N, 120°33' E	扬麦 14 号 <sup>[5]</sup>
	2003—2004	39.96° N, 116.33° E	辽春 10 号 <sup>[36]</sup>
	2008—2009	40°10' N, 116°14' E	中麦 175 号 <sup>[37]</sup>
	2010—2012	40°10' N, 116°14' E	CA0493 <sup>[38]</sup>
	2003—2004	36°04' N, 103°85' E	甘麦 8 139 <sup>[39]</sup>
	2007—2008	32°35' N, 119°42' E	扬麦 14 号 <sup>[40]</sup>
	2003—2004	31°86' N, 117°25' E	皖麦 33 号 <sup>[41]</sup>
	2001—2002	39.96° N, 116.33° E	中裕 5 号、北京 9 701 <sup>[42]</sup>
降水 Precipitation	1999—2000	36°16' N, 117°15' E	济南 17、鲁麦 21 号 <sup>[43]</sup>
	1999—2001	36°16' N, 117°15' E	济南 17、鲁麦 21 号 <sup>[44]</sup>
	2005—2006	陕西岐山, 河南新乡, 江苏丰县, 山东兖州, 山西盐湖, 安徽涡阳, 河北任丘	豫麦 34、烟农 19、济 麦 20、皖麦 38、陕 253、 临优 145 <sup>[45]</sup>
	2005—2006	38°2' N, 116°12' E	8 901-11、豫麦 34、烟 农 19、济麦 20、皖麦 38、陕 253、临优 145 <sup>[46]</sup>
	2011—2012	35°35' N, 104°37' E	春小麦 <sup>[34]</sup>
	2004—2005	36°16' N, 117°15' E	济麦 20、泰山 23 <sup>[47]</sup>
	2006—2007	36°16' N, 117°15' E	藁城 8 901、济麦 20 <sup>[48]</sup>
	2009—2012	35°09' N, 110°59' E	运早 20 410 <sup>[49]</sup>
	2004—2006	36°32' N, 120°39' E	济麦 20 <sup>[50]</sup>

表 3 不同控制变量平均蛋白质含量的相对百分比变化 RCP 值  
及 Meta 分析数据条数

Table 3 RCP (relative percentage change in average protein content) values of different variables and the number of data for Meta-analysis					
控制变量 Control variables	区域 Region	最小值 Min/%	均值 Mean/%	最大值 Max/%	数据条数 Number of data
增温 Warming	江苏南京	-11.54	-8.29	-6.17	12
	江苏常熟	-8.82	8.56	18.75	22
	宁夏固原	12.76	12.98	13.19	6
	山东德州	2.38	12.16	18.18	33
	甘肃兰州	6.50	13.18	19.59	9
	北京	-0.21	1.04	2.91	9
CO <sub>2</sub> 升高 Elevated CO <sub>2</sub>	西藏拉萨	8.88	8.89	8.89	3
	北京	-5.88	-2.03	4.64	22
	江苏常熟	-22.17	-11.82	-6.00	22
	甘肃兰州	-15.31	-15.27	-15.23	6
	江苏江都	-8.73	-6.22	-3.70	6
	安徽合肥	-4.05	-2.70	-1.35	30
降水 Precipitation	山东泰安	-15.11	1.34	13.59	90
	甘肃兰州	-1.03	0.41	1.83	3
	山西太原	-12.23	-12.21	-12.19	3
	山东青岛	-10.73	-5.65	-1.84	18

## 1.2 分析方法

### 1.2.1 敏感性分析

利用 Origin 对 2010—2018 年不同省份的气温数据进行趋势分析, 研究各小麦种植区气候变暖趋势。通过线性混合模型, 使用固定回归项和随机残差分析各种影响因素, 随后在每个区域使用包含随机截距和斜率的线性混合模型来计算籽粒蛋白质含量不同阶段气温的平均敏感性来最大的程度上减少因为不同年份每个地区的技术、作物管理和品种的进步。其中混合线性模型分析利用统计软件 R (R Core Team 2019) 的 “lme4” 包, 对小麦成熟期的籽粒蛋白质含量和两个关键生长阶段的气候数据进行线性混合模型拟合, 分析 2010—2018 年各地理区域籽粒蛋白质含量对关键生育期气温的平均敏感性。模型的一般形式如下:

$$P_{ij} = (\beta_0 + \gamma_{0j}) + (\beta_1 + \gamma_{1j})C_{1ij} \quad (1)$$

$$P_{ij} = (\beta_0 + \gamma_{0j}) + (\beta_2 + \gamma_{2j})C_{2ij} \quad (2)$$

$$P_{ij} = (\beta_0 + \gamma_{0j}) + (\beta_3 + \gamma_{3j})C_{3ij} \quad (3)$$

其中  $P_{ij}$  为  $i$  省  $j$  市的籽粒蛋白质含量值 (%),  $C_{1ij}$  为  $i$  省  $j$  市的小麦总生育期内平均气温 (°C),  $C_{2ij}$  为  $i$  省  $j$  市的小麦营养生长期平均温度 (°C),  $C_{3ij}$  为  $i$  省  $j$  市的小麦生殖生长期平均温度 (°C),  $\beta_0$  为固定效应系数,  $\gamma_{0j}$  和  $\gamma_{1j}$  分别为  $j$  市的随机截距和斜率。估算系数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  分别代表 2010—2018 年小麦总生育期内平均气温、小麦营养生长期平均温度、小麦生殖生长期平均气温对籽粒蛋白质含量的平均敏感性。采用 R 的 “lmerTest” 包的似然比检验  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  的统计学意义。

### 1.2.2 Meta 分析

利用 Origin 对不同省份之间差异性进行可视化处理。利用每个气候控制变量的可用数据, 通过绘制平均温度变化、平均降水量变化和 CO<sub>2</sub> 浓度与籽粒蛋白质含量关系图, 采用 Origin 对数据拟合, 分析籽粒蛋白质含量与 3 个气候控制变量之间的关系。Meta 分析采用 Review Manager 5.4 (Revman 5.4) 软件完成。由于籽粒蛋白质含量测得值为计量型数据, 在分析中选择 Continuous 类型 (适用于连续型变量的计量数据, 数据录入时需要输入各组的例数结果指标的均数及标准差) 分析统计分析设定置信区间为 95%, 统计方法为标准均数差, 分析模型为随机效应模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 2010—2018 年中国各省份小麦生育期内气温暖化趋势及小麦籽粒蛋白质含量对气温的敏感性

#### 2.1.1 中国各省份小麦生育期内气温暖化趋势

2010—2018 年中国小麦主要种植区各省份小麦生育期内平均气温变化趋势如图 1 所示。结果表明, 2010—2018 年各省份小麦生育期内平均气温呈升高趋势。在所有调查的研究区内, 小麦总生育期平均温度约上升了 1.27 °C。不同小麦种植区内生育期平均气温变化趋势存



在差异, 在陕西、湖北、安徽和江苏地区, 生育期内气温变化范围为 0.73~1.1 °C; 在河南、四川、山东、内蒙古

和山西地区气温变化范围为 1.17~1.42 °C; 在河北、甘肃和新疆地区小麦总生育期气温变化范围为 1.56~2.16 °C。

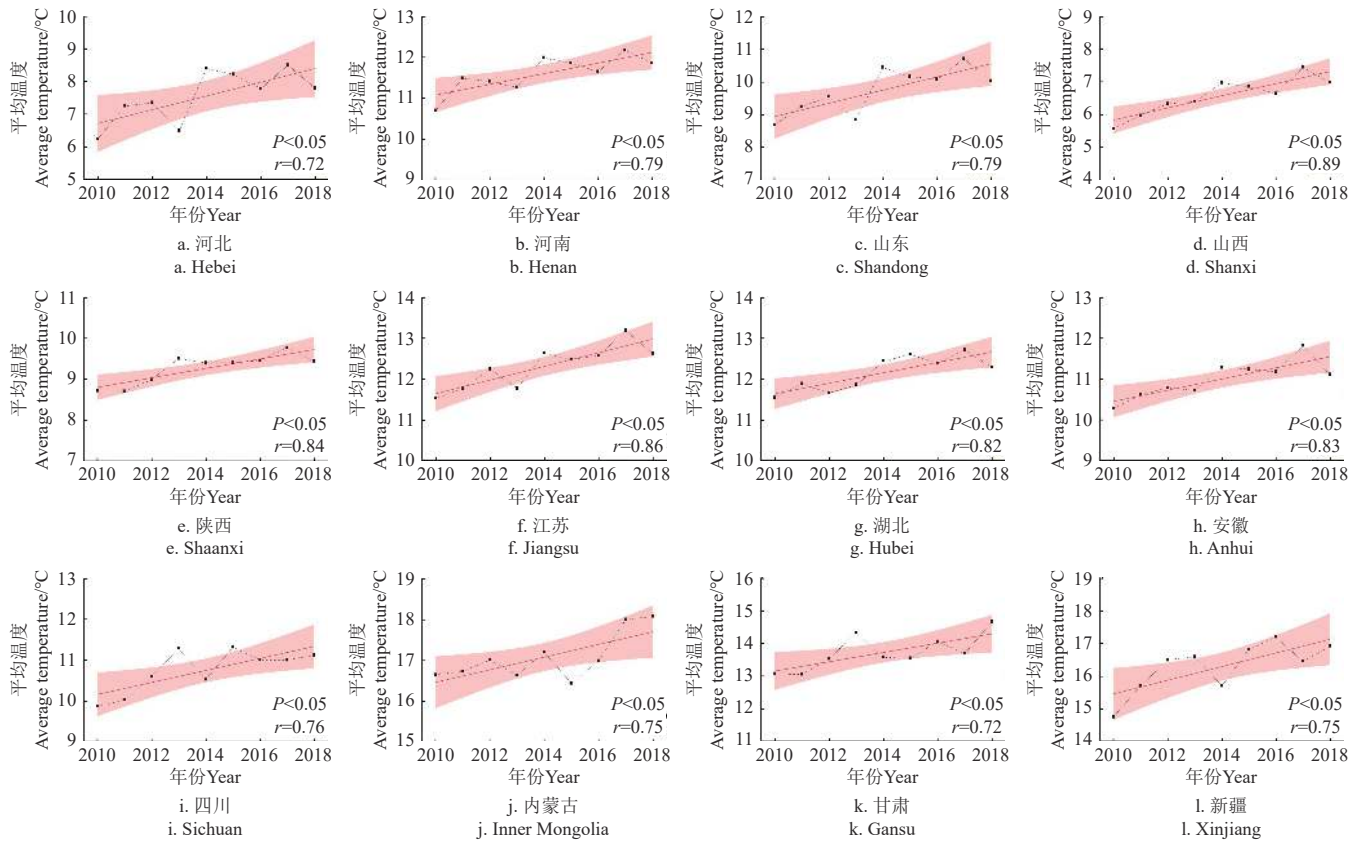


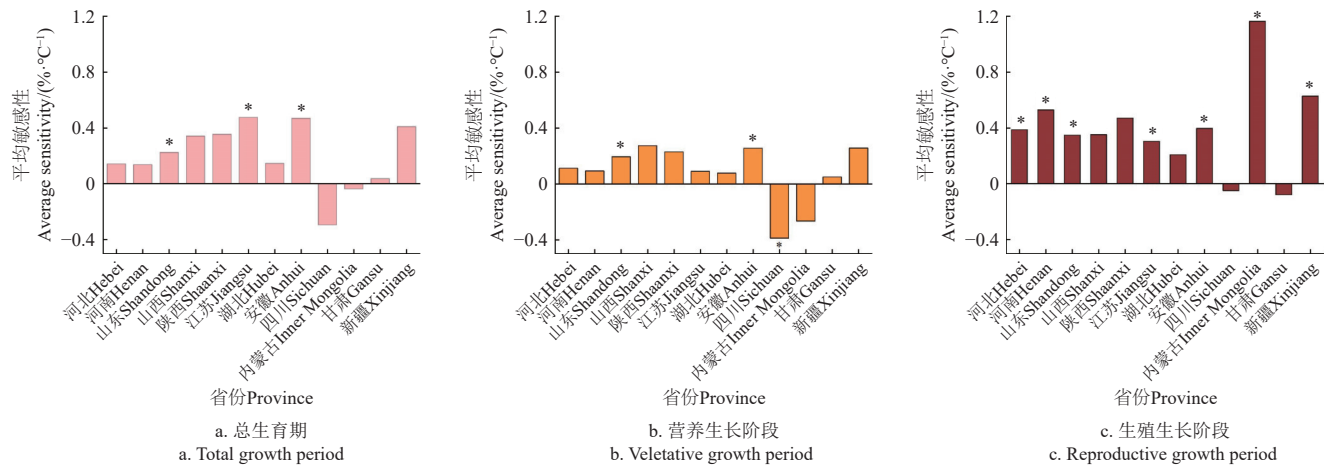
图 1 2010—2018 年小麦生育期内中国种植区各省份气温变化趋势

Fig.1 Variation trend of temperature in wheat growing areas in provinces of China during growth period from 2010 to 2018

### 2.1.2 中国小麦籽粒蛋白质对气温的敏感性

2010—2018 年中国小麦籽粒蛋白质含量对小麦总生育期、营养生长阶段以及生殖生长阶段平均温度的平均敏感性见图 2。结果表明, 对于总生育期而言, 除四川和内蒙古外, 其余省份小麦籽粒蛋白质含量对总生育期平均温度表现出正敏感性 (图 2a), 并且小麦籽粒蛋白质含量对总生育期温度的敏感性在山东、江苏和安徽均显

著 ( $P < 0.05$ ); 对于营养生长阶段而言, 除四川和内蒙古外, 其余省份表现出正敏感性 (图 2b), 并且在山东、安徽和四川均显著 ( $P < 0.05$ ); 对于生殖生长期而言, 除四川和甘肃外, 其余省份均表现出正敏感性 (图 2c), 并且在河北、河南、山东、江苏、安徽、内蒙古和新疆均显著 ( $P < 0.05$ )。值得注意的是, 中国小麦籽粒蛋白质含量对生殖生长阶段温度的平均敏感性显著高于营养生长阶段。



注: \*表示  $P < 0.05$ 。

Note: \* indicates  $P < 0.05$ .

图 2 中国小麦籽粒蛋白质含量对气温的敏感性

Fig.2 Sensitivity of wheat grain protein content to temperature in China

## 2.2 中国各试验站点气候变化对小麦籽粒蛋白质含量影响

### 2.2.1 整体性分析

使用 27 篇文献中完整数据集, 研究中国不同试验站点未来气候情景下小麦籽粒蛋白质含量的情况, 不同情景下小麦籽粒蛋白质含量的综合效应值见图 3。结果表明, 增温处理、增温+CO<sub>2</sub> 处理、增温+降水处理均显著提高了小麦籽粒蛋白质含量 ( $P < 0.05$ )。其中, 增温处理相较于环境温度, 小麦籽粒蛋白质含量增加 6.93%, 增温+CO<sub>2</sub> 处理相较于环境处理增加 2.65%, 增温+降水处理相较于环境处理增加 4.26%。单独增加 CO<sub>2</sub> 浓度显著降低了小麦籽粒蛋白质含量 (-7.61%), 降雨量增加减少了小麦籽粒蛋白质含量, 但不显著 ( $P > 0.05$ )。

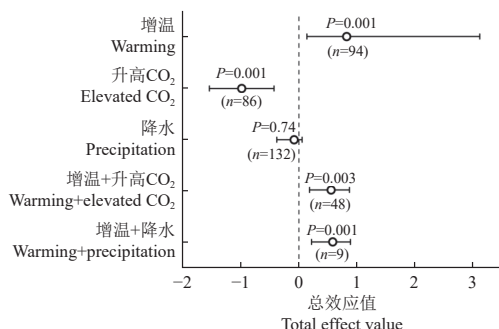


图 3 环境因素对小麦籽粒蛋白质含量总效应

Fig.3 Total effect of environmental factors on wheat grain protein content

### 2.2.2 亚组分析

根据部分数据集, 不同区域作为不同亚组进行 Meta 分析, 增温小麦籽粒蛋白质含量影响的总效应值见图 4。结果表明, 在甘肃兰州、宁夏固原、山东德州、江苏常熟试验站点, 增温显著增加了小麦籽粒蛋白质含量 ( $P < 0.05$ ), 分别较对照组 (环境温度) 增加了 13.18%、12.98%、12.16%、8.56%; 在西藏拉萨、北京试验站点, 增温下小麦籽粒蛋白质含量也有所增加, 其中, 北京试验站点增幅不显著 ( $P > 0.05$ )。值得注意的是, 在江苏南京, 增温下小麦籽粒蛋白质含量显著下降 ( $P < 0.05$ ), 相较于对照组下降了 8.29%。

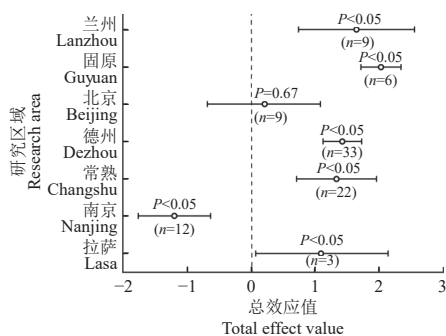


图 4 增温对不同区域小麦籽粒蛋白质含量总效应

Fig.4 Total effect of warming on wheat grain protein content in different regions

根据不同研究区域对单独增加 CO<sub>2</sub> 浓度对籽粒蛋白质含量总效应见图 5, 增加 CO<sub>2</sub> 浓度显著降低了小麦籽粒蛋白质含量, 其中, 甘肃兰州下降最为明显, 相较于

环境处理下降 15.27% ( $P < 0.05$ ); 根据不同研究区域对单独增加降水对籽粒蛋白质含量总效应见图 6, 降水对小麦籽粒蛋白质含量的影响较复杂, 其中降水对小麦籽粒蛋白质影响除山西太原外, 其余影响均不显著。 ( $P > 0.05$ )

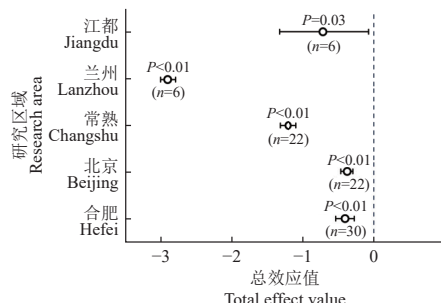


图 5 CO<sub>2</sub> 升高对不同区域小麦籽粒蛋白质含量总效应

Fig.5 Total effect of elevated CO<sub>2</sub> on wheat grain protein content in different regions

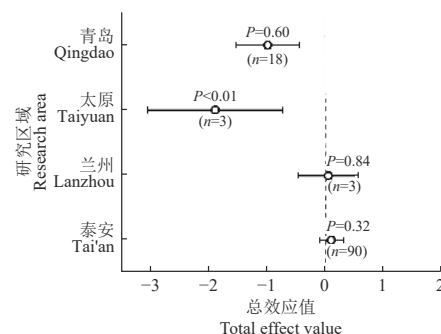


图 6 降水对不同区域小麦籽粒蛋白质含量总效应

Fig.6 Total effect of precipitation on wheat grain protein content in different regions

## 3 讨论

### 3.1 中国各试验站点气候变化对小麦籽粒蛋白质含量影响

前人研究表明, 环境因素对小麦籽粒蛋白质含量的影响大于基因型<sup>[51-52]</sup>, 并且王大成等<sup>[53]</sup>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。本研究利用文献数据, 对环境因素 (CO<sub>2</sub>、温度、降水) 影响小麦籽粒蛋白质含量进行 Meta 回归发现, CO<sub>2</sub> 升高显著降低了小麦籽粒蛋白质含量, 这与 TAUB 等<sup>[22, 54-55]</sup>的研究结果一致, CO<sub>2</sub> 升高会降低谷物蛋白质含量。这种减少与 CO<sub>2</sub> 升高的条件下光合作用的增加和谷物碳水化合物的积累有关<sup>[56-57]</sup>, CO<sub>2</sub> 浓度升高会导致小麦植株生物量 C/N 比增大, 进而导致谷物蛋白质量的减少, 这一结果在 LAM 等<sup>[37]</sup>的研究中给予证实: 该研究表明, 在两种施氮水平下升高 CO<sub>2</sub> 均显著提高了小麦成熟期茎 C/N 比值 (低 N: 23.9%; 高 N: 35%;  $P < 0.01$ ), 但在低 N 水平下, CO<sub>2</sub> 升高显著降低了籽粒蛋白质含量, 而在高 N 水平下升高 CO<sub>2</sub> 对籽粒蛋白质含量无显著影响。因此, 未来 CO<sub>2</sub> 浓度增高情景下应适当增加小麦前期氮肥供应以保持植株正常 C/N 比, 来缓解 CO<sub>2</sub> 升高对籽粒蛋白质含量带来的负面影响, 但与此同时应注意, 生育后期氮

肥过多易贪青不利于叶蛋白降解转移。此外,小麦籽粒蛋白质浓度的下降也可能与田间小麦硝态氮同化受到了 $\text{CO}_2$ 升高的抑制有关<sup>[58]</sup>。

本研究 Meta 结果表明,增温显著提升了小麦籽粒蛋白质含量。事实上小麦籽粒蛋白质一部分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,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生殖生长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<sup>[29]</sup>。增温能够明显影响小麦的生长发育过程,增加植株叶面积指数和光合作用效率<sup>[59-60]</sup>,增加小麦的干物质质量<sup>[61]</sup>。增温提高了花前期植株体内氮素积累量,为灌浆期氮素向籽粒的转运提供更好的物质基础,在花后期相对的高温干燥有利于增大蒸腾促进茎叶蛋白质向籽粒的转移,增加了花后植株体内氮向籽粒的输送率,进而提高小麦籽粒蛋白质含量。Meta 分析的结果也证实了这一结论,结果表明,增温显著促进冬小麦生物量以及氮向籽粒的输送效率进而促进小麦籽粒蛋白质含量提升。另一方面,增温下花后期光合作用速率降低、呼吸作用增加、叶片衰老加速以及温度升高导致的蒸散作用的增强都会导致小麦籽粒中氮和碳水化合物积累的减少<sup>[62]</sup>。然而,与碳水化合物积累相比,高温下小麦籽粒中氮积累的减少量更低,从而导致较高的籽粒蛋白质含量<sup>[63]</sup>。在 Meta 分析的亚组分析中,本研究发现田云录等<sup>[26-27]</sup>在江苏南京进行的全生育期开放式增温试验研究中的研究结果与中国其他试验站点结果相反,在变暖地块发现小麦籽粒氮含量是降低的,其结果令人费解,作者对此也进行了进一步解释:在其试验地点,小麦营养部位的氮浓度显著升高,成熟时地上总氮含量显著升高,表明 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的增温确实刺激而不是限制了小麦植株对氮的吸收,并且变暖导致的较高的根系生物量和活性进一步表明,小麦植株氮的获取不受限制。因此,增温导致的籽粒蛋白质含量下降可能是由于增温导致碳水化合物和氮素从营养部位向籽粒转运和积累的不平衡,这可以从增温样地表面氮再活化效率的显著降低中得到证明。氮再动员效率较低可能是由于变暖导致籽粒氮沉积相对于籽粒淀粉沉积减少,从而导致试验中观察到的稀释效应;另一方面,小麦品种类型的不同也可能带来研究结果的差异,该试验品种为扬麦 11,其春性较强,抗寒性稍差,这种品种之间的差异可能导致小麦籽粒蛋白质对增温的响应不同。此外,研究气候变化下小麦籽粒产量与蛋白质含量之间的协同作用具有重要意义。小麦生产系统对气候变暖的响应存在区域差异,从而导致增温对小麦产量的影响也存在差异。在中国干旱半干旱地区小麦的生育期缩短,穗粒数和单粒质量降低,产量降低 $0.5\%\sim 45.5\%$ ,并且增温幅度与减产幅度呈线性相关<sup>[64]</sup>。北部地区升温下冬小麦生育进程加快,地上部干物质积累增加,产量提高 $12\%$ <sup>[65]</sup>。华东地区升温下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<sup>[26]</sup>。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,但目前对其生理机制影响的研究甚少,因此今后需要通过有针对性的田间增温试验来提高对小麦产量与蛋白质含量之间生理关系的认识。

本研究发现降水对小麦籽粒蛋白含量的影响结果并不显著。可能是因籽粒蛋白质含量对降水的反应更为多样所致<sup>[1]</sup>。降水对小麦籽粒蛋白质含量的影响较复杂,受旱影响小麦生长不良进而生物量积累少,但籽粒蛋白质含量不一定低;但干旱严重提前枯死,茎叶蛋白质来不及降解和转移则会严重影响小麦籽粒蛋白质含量。灌浆后期适宜土壤水分有利于蒸腾旺盛促进茎叶蛋白质降解转移,但水分过多生物量虽较大,但往往茎叶贪青落黄不好,不利于叶蛋白降解和转移。在先前的研究中,降水对小麦籽粒蛋白含量的影响并不一致,王书吉等<sup>[66]</sup>研究发现,缺水处理没有改变蛋白质形成的基本趋势,但缺水程度不同,冬小麦籽粒蛋白质含量及产量不同,在拔节期、抽穗扬花期和灌浆成熟期,随着缺水程度加重,蛋白质含量升高;申孝军等<sup>[67]</sup>研究发现,拔节—抽穗前期水分胁迫对冬小麦生长的抑制作用最明显,使籽粒蛋白质质量分数显著降低,产量降低 $6.56\%\sim 9.08\%$ ,灌浆成熟期水分胁迫对冬小麦生长影响最小,籽粒蛋白质质量分数显著提高,但大幅度降低了产量;BAI 等<sup>[68]</sup>研究发现,在灌浆期干旱胁迫会阻碍蔗糖向淀粉的转化,但对蛋白质生物合成的影响较弱;而 RUSTAD 等<sup>[69]</sup>研究发现灌水量加大,氮淋到下层土壤中会降低蛋白质合成所需的氮的有效性,进而降低小麦籽粒蛋白质含量。在增温和降水两者共同作用下,籽粒蛋白质含量仍显著上升。

### 3.2 2010—2018 年中国各省份小麦籽粒蛋白质含量对气温的敏感性

本研究通过线性混合模型,量化了中国各省份小麦籽粒蛋白质含量对小麦总生育期内平均温度、营养生长期平均温度和生殖生长期平均温度的平均敏感性。敏感性分析显示,小麦籽粒蛋白质含量对温度的正向响应(图 2)与以往的研究结果一致<sup>[1]</sup>。然而,如四川和内蒙古所示,小麦籽粒蛋白质并不总是随着温度的升高而增加。在四川地区,其土壤肥力较低,增温下土壤对氮的吸收不足导致较低的籽粒蛋白质含量。对于内蒙古地区,研究发现在 2010—2018 年间,小麦总生育期和营养生长期平均温度呈上升趋势,而生殖生长期呈下降趋势,其生殖生长期又是籽粒蛋白质形成的关键期,气温的降低可能导致较低的籽粒蛋白质含量;另外,内蒙古地区春小麦经济效益远不如玉米,传统优质小麦产地巴彦淖尔市种植面积大幅下降,主产区移到呼伦贝尔市,那里小麦生长后期气温比巴彦淖尔市低得多,降水偏多日照偏少昼夜温差小,蛋白质含量势必降低。值得注意的是,敏感性分析中,小麦籽粒蛋白质含量对生殖



生长阶段的敏感性高于总生育期和营养生长期, 其表明影响小麦籽粒蛋白质含量的关键期在生殖生长阶段(抽穗到成熟期)。

结合本研究结果, 可对中国不同区域提出适应气候变化建议。在山东、江苏和安徽地区的籽粒蛋白质含量对温度具有正敏感性且显著 ( $P < 0.05$ ) 的地区, 在气候变化下可发展为籽粒蛋白质含量高的小麦产区。在河北、河南、山西、陕西、湖北和新疆地区气候对作物籽粒蛋白质含量具有正敏感性影响但不显著 ( $P > 0.05$ ), 这些地区可根据当地情况制定适当的作物管理策略以适应环境变暖。在长江中下游地区因小麦灌浆期间温度偏低, 日照偏少蛋白质含量较低, 不适合种植强筋小麦品种, 但可种植蛋白质含量较低的弱筋品种。在四川盆地地区由于籽粒蛋白质含量对气候因素的解释较低, 可开发长期种植低蛋白质含量小麦。

本研究通过对国内不同试验站点的文献数据进行 Meta 回归发现增温可以促进小麦籽粒蛋白质提升, 但国内模拟增温对小麦籽粒蛋白质含量的试验站点较少, 代表性欠佳, 故本研究通过对历史气候和小麦籽粒蛋白质含量数据的分析, 加深了对气候变暖对中国小麦籽粒蛋白质含量影响的空间差异的认识, 进而证实了本文 Meta 分析对气候变暖下小麦籽粒蛋白质含量的影响是有意义的。然而, 本研究也存在一些限制。内蒙古、新疆地区的小麦籽粒蛋白质含量抽检样本量小, 并且不同品种小麦对气候暖化可能存在一定差异, 可能降低分析的准确性, 今后应收集更多田间数据, 以减少该区域小麦营养品质对气候响应的不确定性。

## 4 结 论

本研究通过 Meta 分析, 量化了在中国利用控制试验对影响籽粒蛋白质含量关键气候因子的影响, 并利用 2010—2018 年气象数据和小麦籽粒蛋白质含量数据, 分析了 2010—2018 年中国主要小麦种植地理区域小麦籽粒蛋白质含量对关键气候变暖的响应。Meta 分析结果表明, 增温显著提升了小麦籽粒蛋白质含量 ( $P < 0.05$ ),  $\text{CO}_2$  升高显著降低了小麦籽粒蛋白质含量 ( $P < 0.05$ ), 降雨量对小麦籽粒蛋白质含量的影响不显著, 温度升高可以部分抵消由于  $\text{CO}_2$  升高和降水对小麦籽粒蛋白质产生的负面影响。在中国主要小麦种植区域范围内, 气候变暖可以提升增加小麦籽粒蛋白质含量, 不同区域间存在差异, 并且小麦籽粒蛋白质含量对生殖生长阶段平均温度的敏感性显著高于营养生长阶段和总生育期的平均温度。适当的增温有利于小麦籽粒蛋白质含量的提升, 但在不同种植区域应注重小麦品种的选择。在未来二氧化碳浓度增高的情景下应适当增加小麦前期氮肥供应以保持正常 C/N 比, 同时应注意生育后期氮肥过多不利于叶蛋白降解转移。今后需要更多地有针对性的田间增温试验来提高不同品种类型小麦对蛋白质含量影响机制的生理关系的理解。研究结果将有助于区域决策, 制定适当的气候变化适应战略, 以促进中国的可持续农业和营养安全。

## [参 考 文 献]

- [1] ZHOU W B, LIU Y J, ATA-UL-KARIM S T, et al. Spatial difference of climate change effects on wheat protein concentration in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(12): 124011.
- [2] MYERS S S, ZANOBBETTI A, KLOOG I, et al. Increasing  $\text{CO}_2$  threatens human nutrition[J]. *Nature*, 2014, 510(7503): 139-142.
- [3] LESK C, ROWHANI P, RAMANKUTTY N. Influence of extreme weather disasters on global crop production[J]. *Nature*, 2016, 529(7584): 84-87.
- [4] ARIEL O B, TOBY R A, CARLOS M C, et al. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth[J]. *Nature Climate Change*, 2021, 11(4): 306-312.
- [5] WANG J Q, TOSHIHIRO H, LI L Q, et al. Changes in grain protein and amino acids composition of wheat and rice under short-term increased  $\text{CO}_2$  and temperature of canopy air in a paddy from East China[J]. *New Phytologist*, 2019, 222(2): 726-734.
- [6] DEEPAK K R, JAMES S G, GRAHAM K M, et al. Climate variation explains a third of global crop yield variability[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-9.
- [7] ZAMPIERI M, CEGLAR A, DENTENER F, et al. Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales[J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(6): 64008.
- [8] ZHAO C, LIU B, PIAO S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [9] SENTHOLD A, PIERRE M, ANDREA M, et al. Climate change impact and adaptation for wheat protein[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(1): 155-173.
- [10] LIU L L, SONG H, SHI K J, et al. Response of wheat grain quality to low temperature during jointing and booting stages-On the importance of considering canopy temperature[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107658.
- [11] DAVID T, CHRISTIAN B, JASON H, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [12] JOSE C S, CARLA S S, SUSANA MP C, et al. Preserving the nutritional quality of crop plants under a changing climate: Importance and strategies[J]. *Plant and Soil*, 2019, 443(1): 1-26.
- [13] 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.
- [14] ZHANG B, JIA D, GAO Z Q, et al. Physiological responses to low temperature in spring and winter wheat varieties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(6): 1967-1973.
- [15] FRANCES M D, WILLIAM J H, WILLIAM H V, et al. Protein accumulation and composition in wheat grains: Effects of mineral nutrients and high temperature[J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 25(2): 96-107.
- [16] LIU L, MA J, TIAN L, et al. Effect of postanthesis high temperature on grain quality formation for wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(5): 1970-1980.
- [17] JAMES G N, KIRSTEN M B, AUDREY J D, et al. Acute high temperature response in wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2018, 110(4): 1296-1308.
- [18] CASAGRANDE M, DAVID C, VALANTIN M M et al. Factors limiting the grain protein content of organic winter

- wheat in south-eastern France: A mixed-model approach[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, 29(4): 565-574.
- [19] WILLIAM J H, WILLIAM H V, CHARLENNE K T, et al. Effect of high temperature on albumin and globulin accumulation in the endosperm proteome of the developing wheat grain[J]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 49(1): 12-23.
- [20] ELIZABETH A A, ALISTAIR R. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO<sub>2</sub>: Mechanisms and environmental interactions[J]. *Plant Cell & Environment*, 2010, 30(3): 258-270.
- [21] WANG J Q, LIU X Y, ZHANG X H, et al. Size and variability of crop productivity both impacted by CO<sub>2</sub> enrichment and warming-a case study of 4 year field experiment in a Chinese paddy[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 40-49.
- [22] TAUB D R, MILLER B, ALLEN H. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the protein concentration of food crops: A meta - analysis[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(3): 565-575.
- [23] PAN J, ZHU Y, CAO W X, et al. Predicting the protein content of grain in winter wheat with meteorological and genotypic factors[J]. *Plant Production Science*, 2006, 9(3): 323-333.
- [24] ANNA D M, GRIFONI D, MANCINI M, et al. The influence of climate on durum wheat quality in Tuscany, Central Italy[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2011, 55(1): 87-96.
- [25] NADEW B B. Effects of climatic and agronomic factors on yield and quality of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seed: A review on selected factors[J]. *Advances in Crop Science and Technology*, 2018, 6(2): 356.
- [26] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 非对称性增温对冬小麦籽粒淀粉和蛋白质含量及其组分的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(2): 302-308.
- TIAN Yunlu, CHEN Jin, DENG Aixing, et al. Effects of asymmetric warming on starch and protein contents and their components in winter wheat grains[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 302-308. (in Chinese with English abstract)
- [27] TIAN Y, ZHNEG C, CHEN J, et al. Climatic warming increases winter wheat yield but reduces grain nitrogen concentration in East China[J]. *Plos One*, 2014, 9(4): e95108.
- [28] 郑成岩, 邓艾兴, 宋振伟, 等. 增温对青藏高原冬小麦干物质积累转运及氮吸收利用的影响[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(10): 1060-1068.
- ZHNEG Chengyan, DENG Aixing, SONG Zhenwei, et al. Effects of warming on dry matter accumulation, transportation and nitrogen absorption and utilization of winter wheat in Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(10): 1060-1068. (in Chinese with English abstract)
- [29] 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.
- YANG Guang, KONG Xiangfei, HOU Ruixing, et al. Effect of warming on protein content of winter wheat grain under 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)
- [30] GUO X H, HUANG B W, ZHANG H, et al. T - FACE studies reveal that increased temperature exerts an effect opposite to that of elevated CO<sub>2</sub> on nutrient concentration and bioavailability in rice and wheat grains[J]. *Food and Energy Security*, 2022, 11(1): e336.
- [31] XIAO G J, GUO Z Q, ZHANG Q, et al. Warming affects water use, yield and crop quality of a potato-broad bean-winter wheat rotation system in semi-arid regions of China[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2020, 158(7): 543-557.
- [32] 谭凯炎, 周广胜, 任三学, 等. 气候变化可能不会引起我国北方冬小麦营养品质下降[J]. *气候变化研究进展*, 2019, 15(3): 282-289.
- TAN Kaiyan, ZHOU Guangsheng, REN Sanxue, et al. Climate change may not cause the decline of nutritional quality of winter wheat in northern China[J]. *Research Progress of Climate Change*, 2019, 15(3): 282-289. (in Chinese with English abstract)
- [33] Li Y B, Hou R X, Tao F L. Interactive effects of different warming levels and tillage managements on winter wheat growth, physiological processes, grain yield and quality in the North China Plain[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 295: 106923.
- [34] 王鹤龄, 张强, 王润元, 等. 增温和降水变化对西北半干旱区春小麦产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 67-75.
- WANG Heling, ZHANG Qiang, WANG Runyuan, et al. Effects of warming and precipitation changes on yield and quality of spring wheat in semi-arid areas of northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 67-75. (in Chinese with English abstract)
- [35] XIAO G J, ZHANG Q, ZHANG F J, et al. Warming influences the yield and water use efficiency of winter wheat in the semiarid regions of Northwest China[J]. *Field Crops Research*, 2016, 199: 129-135.
- [36] 白莉萍, 全乘风, 林而达, 等. 基于 CTGC 试验系统下面包小麦主要品质性状的研究[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(5): 814-818.
- BAI Liping, TONG Chengfeng, LIN Erda, et al. Study on main quality characters of bread wheat based on CTGC test system[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(5): 814-818. (in Chinese with English abstract)
- [37] LAM S K, HAN X, LIN E, et al. Does elevated atmospheric carbon dioxide concentration increase wheat nitrogen demand and recovery of nitrogen applied at stem elongation?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 155(1): 142-146.
- [38] LI Y C, LIN E, HAN X, et al. Effects of elevated carbon dioxide concentration on nitrous oxide emissions and nitrogen dynamics in a winter-wheat cropping system in northern China[J]. *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 2015, 20(7): 1027-1040.
- [39] WU D, WANG G, BAI Y F, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth, water use, yield and grain quality of wheat under two soil water levels[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(3): 493-507.
- [40] 崔昊, 石祖梁, 蔡剑, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度和氮肥水平对小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 979-984.
- CUI Hao, SHI Zuliang, CAI Jian, et al. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen fertilizer level on wheat grain yield and quality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 979-984. (in Chinese with English abstract)
- [41] 蒋跃林, 张庆国, 张仕定, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 含量增加对小麦籽粒营养品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(1): 21-25.
- JIANG Yuelin, ZHANG Qingguo, ZHANG Shiding, et al. Effect of increasing atmospheric CO<sub>2</sub> content on nutritional quality of wheat grain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(1): 21-25. (in Chinese with English abstract)



- abstract)
- [42] LIN E, XIONG W, HUI J, et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO<sub>2</sub> fertilization in China[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 2149-2154.
  - [43] XU Z Z, YU Z W. Nitrogen metabolism in flag leaf and grain of wheat in response to irrigation regimes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, 169(1): 118-126.
  - [44] 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组分积累及其品质的影响[J]. *作物学报*, 2003, 29(5): 682-687.  
XU Zhenzhu, YU Zhenwen, WANG Dong, et al. Effects of irrigation conditions on the accumulation and quality of protein components in wheat grains[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 682-687. (in Chinese with English abstract)
  - [45] 赵广才, 万富世, 常旭虹, 等. 灌水对强筋小麦籽粒产量和蛋白质含量及其稳定性的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(7): 1247-1252.  
ZHAO Guangcai, WAN Fushi, CHANG Xuhong, et al. Effects of irrigation on grain yield, protein content and stability of strong gluten wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(7): 1247-1252. (in Chinese with English abstract)
  - [46] 赵广才, 常旭虹, 刘利华, 等. 不同灌水处理对强筋小麦籽粒产量和蛋白质组分含量的影响[J]. *作物学报*, 2007, 33(11): 1828-1833.  
ZHAO Guangcai, CHANG Xuhong, LIU Lihua, et al. Effects of Different irrigation treatments on Grain Yield and protein content of strong gluten Wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(11): 1828-1833. (in Chinese with English abstract)
  - [47] 张永丽, 于振文. 灌水量对小麦氮素吸收, 分配, 利用及产量与品质的影响[J]. *作物学报*, 2008, 34(5): 870-878.  
ZHANG Yongli, YU Zhenwen. Effects of irrigation amount on Nitrogen uptake, allocation, utilization, yield and quality of wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 870-878. (in Chinese with English abstract)
  - [48] 姚凤娟, 贺明荣, 李飞, 等. 花后灌水次数对强筋小麦籽粒产量和品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2627-2631.  
YAO Fengjuan, HE Mingrong, LI Fei, et al. Effects of irrigation Times after anthesis on Grain Yield and Quality of strong gluten Wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2627-2631. (in Chinese with English abstract)
  - [49] 孙敏, 葛晓敏, 高志强, 等. 不同降水年型休闲期耕作蓄水与旱地小麦籽粒蛋白质形成的关系[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1692-1704.  
SUN Min, GE Xiaomin, GAO Zhiqiang, et al. Relationship between tillage water storage in fallow period of different precipitation years and grain protein formation in dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1692-1704. (in Chinese with English abstract)
  - [50] 赵长星, 马东辉, 王月福, 等. 施氮量和花后土壤含水量对优质强筋小麦产量和品质的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(9): 4396-4404.  
ZHAO Zhangxing, MA Donghui, WANG Yuefu, et al. Effects of nitrogen application rate and soil moisture content after anthesis on yield and quality of high quality strong gluten wheat[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4396-4404. (in Chinese with English abstract)
  - [51] GUO T C, ZHANG X L, FAN S P, et al. Effects of different environments on qualitative characters of three gluten wheat cultivars[J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(6): 917-920.
  - [52] TANG Y L, WU Y Q, ZHU H Z, et al. Quality performance and stability of main wheat cultivars in Sichuan Province[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1910-1920.
  - [53] 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, 26(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, 26(7): 220-226. (in Chinese with English abstract)
  - [54] LOLADZE I. Rising atmospheric CO<sub>2</sub> and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry?[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17(10): 457-461.
  - [55] DANIELLE E M, JOEL S, SAMUEL S M. Estimated effects of future atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on protein intake and the risk of protein deficiency by country and region[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(8): 087002.
  - [56] HOGY P, WIESER H, KOHIER P, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> on grain yield and quality of wheat: results from a 3 - year free - air CO<sub>2</sub> enrichment experiment[J]. *Plant Biology*, 2009, 11(1): 60-69.
  - [57] CHATURVEDI A K, BAHUGUNA R N, PAL M, et al. Elevated CO<sub>2</sub> and heat stress interactions affect grain yield, quality and mineral nutrient composition in rice under field conditions[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206: 149-157.
  - [58] Bloom A J, Burger M, Kimball B A, et al. Nitrate assimilation is inhibited by elevated CO<sub>2</sub> in field-grown wheat[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(6): 477-480.
  - [59] AITOR A, PILAR P, RAFAEL M C. Growth in elevated CO<sub>2</sub> enhances temperature response of photosynthesis in wheat[J]. *Physiologia Plantarum*, 2009, 135(2): 109-120.
  - [60] CHEN J, TIAN Y L, ZHANG X, et al. Nighttime warming will increase winter wheat yield through improving plant development and grain growth in North China[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2014, 33(2): 397-407.
  - [61] 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 Kai, WANG Runyuan, WANG Heling, et al. Effects of simulated warming on dry matter production and distribution of rainfed spring wheat in semi-arid area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(16): 223-232. (in Chinese with English abstract)
  - [62] REYER C P O, LEUZINGER S, RAMMIG A, et al. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 75-89.
  - [63] GOODING M J, ELLIS R H, SHEWRY P R, et al. Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2003, 37(3): 295-309.
  - [64] 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. Effects of climate change on growth and yield of winter wheat in North China[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1179-1184. (in Chinese with English abstract)
  - [65] 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.
- [66] 王书吉, 康绍忠, 李涛. 基于节水高产优质目标的冬小麦适宜水分亏缺模式[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 111-118.
- WANG Shuji, KANG Shaozhong, LI Tao. Suitable water deficit mode for winter wheat basing objective of water saving as well as high yield and quality[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 111-118. (in Chinese with English abstract)
- [67] 申孝军, 孙景生, 刘祖贵, 等. 水控制下限对冬小麦产量和品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 58-65.
- SHEN Xiaojun, SUN Jingsheng, LIU Zugui, et al. Effects of low irrigation limits on yield and grain quality of winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (Transactions of the CSAE), 2010, 26(12): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [68] BAI E, LI S L, XU W H, et al. A meta-analysis of experimental warming effects on terrestrial nitrogen pools and dynamics[J]. *New Phytologist*, 2013, 199(2): 441-451.
- [69] RUSTAD L E, CAMPBELL J L, MARION G M, 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.

## Effects of climate change on the protein content of wheat grains in China using Meta-analysis

KONG Xiangfei<sup>1,3</sup>, LI Chao<sup>2</sup>, YANG Guang<sup>3</sup>, HOU Guanqun<sup>1,4</sup>, LIU Wei<sup>1,4</sup>, XU Xingang<sup>3</sup>,  
OUYANG Zhu<sup>1,4</sup>, HOU Ruixing<sup>1,4\*</sup>

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Public Meteorological Service Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Nutritional quality of cereals can depend mainly on the environmental factors subjected to climate warming in recent years. It is still lacking on the effects of the increase of CO<sub>2</sub> concentration, temperature, and precipitation caused by climate change on the nutritional quality of crops. In this study, a meta-analysis was performed on the existing literature data of various experimental sites. The protein content of wheat grains was combined with the meteorological parameters using a mixed linear model, fixed regression, and random residual analysis. A systematic evaluation was then made on the influence of key growth temperature on the protein content of wheat grains in the main wheat growing areas in China. A linear mixed model was used with the random intercept and slope in each region. The average sensitivity of grain protein content was calculated at the different stages of temperature (wheat total growth period temperature, vegetative growth period mean temperature and reproductive growth period mean temperature). The meta-analysis showed that the protein content in the wheat grain was significantly enhanced by warming ( $P < 0.05$ ), whereas, there was a significant decrease with the increasing CO<sub>2</sub> concentration. A complex variation was found in the precipitation of the protein content in the wheat grain. The increase in temperature partially offset the negative effects of CO<sub>2</sub> increase and precipitation on the wheat grain protein. Meanwhile, an upward trend was found in the average temperature in all provinces during the growth period of wheat from 2010 to 2018. Specifically, the average temperature increased by about 1.27 °C in the total growth period of wheat, indicating the different change trend of the average temperature in different wheat growing areas. The grain protein content in the different wheat-producing areas also responded positively to the average temperature in the growth period. The average temperature in the reproductive growth stage also dominated the variation in the protein content in the wheat grains. Some suggestions were proposed to fully meet the climate change in the different regions. The protein content of grains was significantly positively sensitive to the temperature ( $P < 0.05$ ) in Shandong, Jiangsu, and Anhui Provinces. A wheat-producing area can be expected to develop with a high protein content in grains under climate change. The climate shared a positively sensitive effect on the protein content of crops in Hebei, Henan, Shanxi, Shaanxi, Hubei, and Xinjiang, but there was no significant ( $P > 0.05$ ). The appropriate strategies of crop management were also formulated, according to the local conditions under environmental warming. The low protein content failed to plant the strong gluten wheat varieties in the middle and lower reaches of the Yangtze River, due to the low temperature and less sunshine during wheat filling. But the weak gluten varieties were planted with low protein content. The wheat with the low protein content was planted in Sichuan Basin for a long time, because of the low explanation of climate factors by grain protein content. The findings can provide the scientific basis for the influence of climate change on the protein content in wheat grains. A great contribution was also made to the regional decision-making and adaptation strategies for climate warming, in order to promote sustainable agriculture and nutritional security in China.

**Keywords:** climate change; nutritional quality; protein content; Meta analysis; wheat