

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2024.03.007

金丽惠,杨海超,王校益,等.增温背景下不同土壤对冬小麦产量品质影响评价[J].中国农业气象,2024,45(3):293-307

增温背景下不同土壤对冬小麦产量品质影响评价*

金丽惠, 杨海超, 王校益, 苗淑杰, 乔云发**

(南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 利用冬小麦品种‘镇麦 168’, 以黄棕壤、砂礓黑土、风沙土、红壤、潮土、黑土、黄土、灰钙土、紫色土、砖红壤、盐碱土和棕壤共 12 种典型农田土壤为基质, 在开放式增温系统开展模拟大气增温框栽试验。试验设置常温对照 (CK) 和增温 1.5℃ (eT) 两个处理, 增温处理为冬小麦全生育期增温。以成熟期冬小麦单穗粒数、千粒重等表征产量变化, 籽粒淀粉、蛋白质及其组分等营养指标体现品质构成。结果表明: (1) 全生育期增温分别使黄棕壤、风沙土、黑土、黄土、灰钙土和紫色土冬小麦较常温对照减产 33.82%、20.96%、16.60%、55.92%、28.45%和 21.19%, 但潮土冬小麦增产 16.13% ($P<0.05$), 其他土壤条件下冬小麦产量无明显变化。(2) 就冬小麦营养品质, 直链淀粉和支链淀粉含量在增温作用下较常温对照存在不同程度下降, 且直链淀粉降幅大于支链淀粉, 在红壤、黑土、黄土、灰钙土、紫色土、盐碱土和棕壤条件下冬小麦总淀粉含量显著降低 ($P<0.05$)。籽粒蛋白质及其组分, 清蛋白和球蛋白呈显著增加趋势, 而醇溶蛋白和谷蛋白显著下降, 且降幅大于前两者增幅, 除红壤冬小麦总蛋白含量无显著变化以外, 其他 11 种土壤条件下冬小麦总蛋白含量均较常温对照显著降低 ($P<0.05$)。冬小麦可溶性总糖仅在潮土、灰钙土和紫色土条件下显示出显著增加趋势 ($P<0.05$)。(3) 利用隶属函数对常温对照和增温各处理进行综合品质排名, 表现最好的为常温组黑土冬小麦 ($U=0.707$), 常温组中棕壤 ($U=0.691$)、灰钙土 ($U=0.647$)、紫色土 ($U=0.644$) 和黄土冬小麦 ($U=0.644$) 次之, 品质最差的是常温下红壤冬小麦 ($U=0.364$) 和增温下红壤冬小麦 ($U=0.368$)。除潮土冬小麦以外, 其他 11 种土壤冬小麦品质均表现为增温劣于对照。(4) 常温条件下冬小麦产量最大影响因素为单穗粒数, 直接途径系数为 0.630, 其次为有效穗数和球蛋白, 均体现为直接作用, 直接途径系数分别为 0.538 和 -0.118; 增温条件下冬小麦产量最大影响因素也是单穗粒数, 直接途径系数为 0.603, 其次为有效穗数、千粒重和总淀粉, 有效穗数和总淀粉通过与单穗粒数的间接作用对冬小麦产量产生影响, 间接途径系数分别为 0.322 和 0.381。综合而言, 增温通过对冬小麦产量构成和籽粒营养成分的综合作用影响品质, 12 种典型农田土壤中, 潮土冬小麦对增温表现为正效应, 其他土壤为负效应, 冬小麦产量品质形成对气候变暖响应受到土壤类型的调控。

关键词: 冬小麦; 全生育期增温; 土壤类型; 产量; 品质评价

Evaluation of the Effects of Winter Wheat Yield and Quality in Different Soils under the Background of Warming

JIN Li-hui, YANG Hai-chao, WANG Xiao-yi, MIAO Shu-jie, QIAO Yun-fa

(School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To explore the changes in winter wheat yield and quality under global warming. The winter wheat variety

* 收稿日期: 2023-05-11

基金项目: 2022 年度江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金 (BE2022312; BE2022425); 农业农村领域重大关键技术攻关 (BE2022425); 国家自然科学基金重点项目 (42130506)

** 通讯作者: 乔云发, 研究员, 主要从事土壤碳氮循环、气候变化影响及适应研究, E-mail: qiaoyunfa@nuist.edu.cn
第一作者联系方式: 金丽惠, E-mail: jinlihui554@163.com

‘Zhenmai 168’ and twelve typical farmland soils, including yellow brown soil, sandy black soil, aeolian sandy soil, red soil, fluvo-aquic soil, black soil, loess, sierozem, purple soil, latosol, saline-alkali soil and brown soil were used as test materials. An open temperature increase system was carried out a simulated atmospheric warming frame experiment. The experiment established normal temperature control (CK) and warming of 1.5°C (eT) treatment, and the warming treatment throughout the whole growth period. The changes in production during the ripening stage was reflected by indicators such as the number of kernels per panicle and the weight of 1000 grains, and nutritional indicators such as the grain starch, protein and its components reflect the quality composition. The results showed as follows: (1) the open warming during the whole growth period decreased the yield of winter wheat grown in yellow-brown soil, sandy soil, black soil, loess, sierozem and purple soil by 33.82%, 20.96%, 16.60%, 55.92%, 28.45% and 21.19%, respectively. While the winter wheat yield in fluvo-aquic soil increased by 16.13% ($P < 0.05$), and had no significant effect in other soils. (2) In terms of nutritional quality of winter wheat, for starch and its components, the contents of amylose and amylopectin decreased to varying degrees under the effect of warming, and the decrease in amylose was greater than that of amylopectin. The total starch content of winter wheat in red soil, black soil, loess, sierozem, purple soil, saline-alkali soil and brown soil decreased significantly ($P < 0.05$). For grain protein and its components, albumin and globulin showed a significant increase trend, while gliadin and glutenin decreased significantly, and the decrease was greater than the increase of the first two. Except for the total protein content of winter wheat in red soil, which had no significant change, the winter wheat under other eleven types of soil all decreased significantly ($P < 0.05$). The total soluble sugar of winter wheat showed a significant increasing trend only under fluvo-aquic soil, sierozem and purple soil conditions ($P < 0.05$). (3) The membership function was used to comprehensively rank the quality of the normal temperature control and warming treatments. The best performers were black soil winter wheat in the normal temperature group ($U = 0.707$), followed by the brown soil ($U = 0.691$), sierozem ($U = 0.647$), purple soil ($U = 0.644$) and loess ($U = 0.644$) winter wheat in the normal temperature control group, and the worst quality is the red soil in the normal temperature group ($U = 0.364$) and warming group ($U = 0.368$). Except for the fluvo-aquic soil, the quality of winter wheat in the other eleven types of soils showed that warming was worse than the control. (4) The path analysis results show that under normal temperature conditions, the biggest influencing factor on winter wheat yield is the number of kernels per panicle, with a direct path coefficient of 0.630, followed by the effective number of panicles and globulin, both of which have direct effects, with path coefficients of 0.538 and -0.118 , respectively. Under warming conditions, the largest influence on factor of winter wheat is the number of kernels per panicle, with a direct path coefficient of 0.603, followed by the effective panicle number, the weight of 1000 grains and total starch. The effective panicle number and total starch have an indirect effects through the number of kernels per panicle, with path coefficients of 0.322 and 0.381, respectively. In summary, warming affected the quality of winter wheat through the combined effects of yield composition and grain nutritional composition. Among the twelve typical farmland soils, winter wheat in fluvo-aquic soil had a positive effect on warming, while in other soils had a negative effect, suggesting that the response of winter wheat yield and quality formation to climate warming was regulated by soil types.

Key words: Winter wheat; Warming throughout the growth period; Soil types; Yield; Quality evaluation

未来气候持续变暖, 全球尺度极端高温事件趋于频发、多发^[1], 到 2030 年升温很可能超过 1.5°C^[2]。不同排放路径 (Representative concentration pathway, RCP) 情景下预估, 中国升温速率将高于全球平均水平^[3], 势必会影响作物生长发育和品质形成^[4], 进而

影响粮食安全^[5]。冬小麦作为三大谷类作物之一, 在中国的粮食生产中占据重要地位^[6]。由此, 开展冬小麦产量和品质对增温响应的研究, 对指导气候变暖环境下冬小麦安全生产具有重要意义。

中国冬小麦分为 5 个主要种植区^[7], 在 RCP2.6

情景下，气候变暖对不同种植区冬小麦产量的影响既有增产正效应，又有减产负效应^[8]。气候变暖导致北方冬麦区冬小麦抽穗期提前、成熟期推迟，降低了越冬期死亡率^[9-11]；增温可正向调控黄淮海冬麦区冬小麦产量^[12-13]；长江中下游冬麦区，冬小麦产量随增温而增加^[14]；对于西南冬麦区和华南冬麦区而言，生长季内热量资源增加对冬小麦产量的正面影响和负面影响均有体现^[15-16]。温度是影响冬小麦籽粒品质的主要气象因子^[17]，冬小麦籽粒中最主要的营养成分淀粉和蛋白质，增温对其影响也各有差异，如增温降低了黄淮海地区冬小麦籽粒总淀粉含量和蛋白质产量^[18-19]；但长江中下游地区冬小麦籽粒淀粉含量受温度影响不显著^[20]，总蛋白含量增加明显^[21]。产生差异的主要原因是区域农业气候资源、农田土壤类型、冬小麦品种以及栽培管理措施等不同^[22-23]。土壤作为冬小麦重要的生长环境之一，其理化性质直接或间接影响作物产量和品质^[24-25]。当前气候变化背景下，冬小麦产量对土壤质地较为敏感^[26]，同时土壤中速效养分含量对产量亦具有显著正向调控作用^[27]，Ludwig 等^[28]认为增温背景下土壤性质差异是影响冬小麦蛋白质浓度的重要因素。

然而，不同地区农田土壤因所在地区气候、农业资源差异，土壤理化特性对变暖响应存在差异，对作物产量和品质也将产生差异。因此，在相同气候条件下开展增温背景下不同类型土壤对冬小麦产量和品质影响的试验具有一定意义。本研究采用土壤空间移位法^[29]，将中国 11 种不同地区的典型农田土壤移至江苏南京，与南京本地的黄棕壤一同进行试验，利用开放式增温装置模拟大气增温 1.5℃，分析成熟期冬小麦产量构成及籽粒营养品质的差异，

以期综合评价冬小麦品质对增温响应的主控因素，致力于为气候变暖背景下冬小麦生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 11 月 11 日布设在南京信息工程大学农业气象试验站长期定位模拟增温平台（32.16°N，118.86°E）。该地属亚热带季风气候区，雨水充沛，四季分明，年平均气温 15.5℃，年平均降水量 1019.5mm，无霜期 237d。

1.2 试验设计

采用裂区试验设计，包括温度及土壤类型两个因素，设置常温对照（CK）和 1.5℃增温（eT）2 个空气温度处理，每个处理重复 3 次，共 6 个 1.5m×1.5m 小区，小区间设置 5m 保护行，保护行上无种植。每个小区有 12 个装有不同土壤的 PVC 圆形框栽，规格为直径 33cm，深度 50cm，框栽顶部高出地面 5cm，以防止土壤间交叉污染。12 种土壤分别为南京黄棕壤（32°13′N，118°43′E）、安徽砂礓黑土（33°18′N，116°51′E）、内蒙古风沙土（42°13′N，118°42′E）、江西红壤（28°10′N，116°37′E）、河南潮土（35°07′N，114°19′E）、黑龙江黑土（47°26′N，126°38′E）、陕西黄土（34°48′N，109°24′E）、新疆灰钙土（43°18′N，82°56′E）、四川紫色土（31°22′N，103°52′E）、海南砖红壤（19°10′N，108°57′E）、吉林盐碱土（44°03′N，123°97′E）和辽宁棕壤（41°49′N，123°37′E），12 种土壤于 2017 年 6 月在原位区取土深 50cm 原状土，运至南京信息工程大学农业气象试验站，过筛处理后，用于冬小麦-大豆轮作长期定位框栽试验。各土壤基础理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基础理化性质
Table 1 The physical and chemical properties of soil

土壤类型 Soil type	碱解氮 Available N(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter(g·kg ⁻¹)	pH
黄棕壤 Yellow brown soil (Ybs)	63.02	16.30	88.5	15.42	5.85
砂礓黑土 Sand black soil (Sbs)	95.09	41.25	141.29	22.62	5.54
风沙土 Aeolian sandy soil (Aes)	51.24	23.33	97.28	18.05	6.75
红壤 Red soil (Res)	17.71	25.78	51.60	11.54	4.58
潮土 Fluvo-aquic soil (Fas)	27.58	27.11	121.65	9.43	8.12
黑土 Black soil (BlS)	204.84	45.62	211.28	55.21	6.22
黄土 Loess (Loe)	52.85	13.30	133.89	15.41	7.21
灰钙土 Sierozem (Sie)	68.78	19.90	157.63	20.38	8.03
紫色土 Purple soil (Pus)	69.24	16.57	219.91	21.41	8.93
砖红壤 Latosol (Las)	107.21	23.74	92.10	33.36	4.60
盐碱土 Saline-alkali soil (Sas)	67.74	44.21	132.05	22.62	7.77
棕壤 Brown soil (Brs)	45.58	21.02	93.01	16.66	7.13

增温处理区, 采用开放式增温系统 (Free air temperature increase, FATI), 于露天环境对冬小麦全生育期增温。开放式增温系统由红外辐射加热器和温湿度记录仪组成, 红外辐射加热器 (165cm×15cm, MR-2420, USA) 高度保持在冬小麦冠层上方 50cm 处, 随株高的变化随时调整装置高度, 增温效率保持不变, 增温效果稳定, 不产生任何影响作物物候的可见光^[30]。温湿度记录仪 (L92-1⁺型) 监测两种增温处理下冬小麦冠层逐小时空气温度, 以全天记录数据的平均值作为当日温度, 生育期内冬小麦冠层日均气温变化如图 1 所示。

供试冬小麦品种为‘镇麦 168’, 于 2021 年 11 月 11 日播种, 按江苏南京冬小麦常规施肥管理, 播种基肥用量为每框尿素 (N, 46%) 0.35g, 磷酸氢二铵 (N, 18%; P₂O₅, 46%) 3.50g, 硫酸钾 (K₂O, 51%) 1.00g, 生育期内无追肥。播种密度为每框 5 穴, 每穴 3 粒, 在苗期每框选定长势一致的 5 株挂牌保留, 田间杂草用手拔除, 正常田间管理, 冬小麦生育期间无灌溉。2022 年 5 月 9 日增温小区成熟收获, 5 月 14 日常温对照小区成熟收获, 每框内选取非挂牌 5 株冬小麦破坏性取样, 带回实验室考种测产和营养指标测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及构成因素

每个处理下自框栽取出冬小麦后带回实验室, 调查单穗粒数、有效穗数、千粒重以及每盆产量。

共计 24 个样本, 每个样本取 3 次重复的平均值。

1.3.2 籽粒品质

冬小麦完成脱粒、测产后, 采用 FW100 型高速粉碎机将籽粒磨粉, 进行营养品质测定。采用刘希伟等^[31]研究方法测定籽粒淀粉及组分含量, 组分包括直链淀粉和支链淀粉; 籽粒可溶性总糖测定采用苯酚法^[32]; 籽粒蛋白质及其组分含量提取与测定参考孔祥生等^[33]的连续累进提取法和考马斯亮蓝 G-250 法, 组分包括清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。每个指标共计 24 个样本, 每个样本取 3 次重复的平均值。

1.4 数据分析

采用 Excel2019 软件进行数据处理, Origin2023 软件进行方差分析, 使用 Tukey 法比较不同处理间各参数在 0.05 水平的显著性差异。

用 13 个冬小麦籽粒的产量构成和营养品质指标, 即单穗粒数 (X_1)、有效穗数 (X_2)、千粒重 (X_3)、产量 (X_4)、可溶性总糖 (X_5)、直链淀粉 (X_6)、支链淀粉 (X_7)、总淀粉 (X_8)、清蛋白 (X_9)、球蛋白 (X_{10})、醇溶蛋白 (X_{11})、谷蛋白 (X_{12}) 和总蛋白 (X_{13}), 计算各自的隶属函数值, 即

$$U_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j\min}}{x_{j\max} - x_{j\min}} \quad (1)$$

式中, U_{ij} 为指标 j 的 i 样本隶属函数值, x_{ij} 为 i 样本指标 j 的测量数值; $x_{j\min}$ 为所有样本中指标 j 的最小值; $x_{j\max}$ 为所有样本中指标 j 的最大值^[34]。

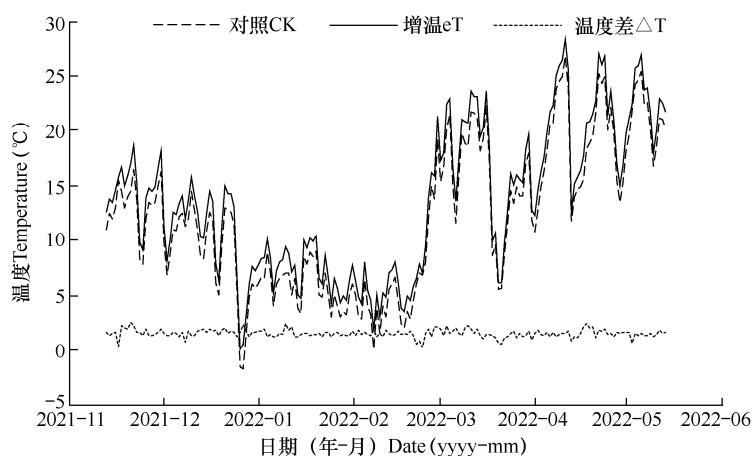


图 1 冬小麦全生育期内冠层日平均气温、增温和温差的变化趋势

Fig. 1 Variation of daily average temperature, warming and temperature difference in the canopy during the whole growth period of winter wheat

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{ij} \tag{2}$$

式中， U_i 为 i 样本 13 个指标隶属函数值的平均值，用于冬小麦综合品质排名，值越大表明综合品质越好^[35]。

用 Origin2023 软件对测定的 13 个指标和计算得出的隶属函数值共同进行 Pearson 相关性分析。用 SPSS25.0 软件线性回归对不同温度处理下冬小麦产量与其他 12 个产量构成要素和品质指标进行通径分析。

2 结果与分析

2.1 增温下不同土壤对冬小麦产量的影响

增温对不同土壤上的冬小麦产量构成影响存在

差异。由表 2 可知，常温处理（CK 处理）12 种土壤条件下，对于冬小麦单穗粒数，黑土冬小麦单穗粒数显著高于除砖红壤以外的 10 种土壤（ $P<0.05$ ）；冬小麦有效穗数仅在黄棕壤、红壤和砖红壤 3 者间存在显著差异（ $P<0.05$ ）；紫色土冬小麦千粒重最大且显著高于黑土和红壤（ $P<0.05$ ），其他土壤条件下冬小麦千粒重未见显著差异；黑土冬小麦产量最高，黄棕壤条件下次之，二者之间无显著差异，但均显著高于其他 10 种土壤（ $P<0.05$ ），红壤产量最低。

与各类型土壤对照相比，eT 处理 12 种土壤下冬小麦除有效穗数无显著变化以外，单穗粒数、千粒重和产量都存在不同程度的增减。对于冬小麦单穗

表 2 不同土壤类型增温处理下冬小麦产量构成及产量的比较
Table2 Comparison on yield and its composition and final yield of winter wheat in different soil types

土壤类型	处理	单穗粒数	有效穗数	千粒重	产量
Soil type	Treatment	Grain number per spike	Ear number per pot	1000-grain weight (g)	Yield (g·pot ⁻¹)
Ybs	CK	30.22±0.63BCa	19.33±1.15Aa	48.00±0.62ABa	28.00±0.47Aa
	eT	25.09±0.74BCb	18.67±0.58ABa	39.63±0.55Eb	18.53±0.76BCb
Sbs	CK	25.47±0.77Ea	17.67±0.58ABa	47.20±1.93ABb	21.22±0.91CDa
	eT	24.2±0.33Ca	15.00±1.73CDa	55.13±1.46Aa	20.04±2.67BCa
Aes	CK	28.14±0.59CDa	18.33±1.53ABa	47.50±1.04ABa	24.48±1.71Ba
	eT	27.45±1.16Ba	16.67±0.58ABCa	42.33±1.42DEb	19.35±0.60BCb
Res	CK	13.00±0.25Ha	6.67±0.58Da	31.47±1.03Ca	2.73±0.32Fa
	eT	7.52±2.41Fb	7.00±1.73Ea	26.33±1.53Fb	1.43±0.76Ea
Fas	CK	20.25±0.55Gb	18.67±1.15ABa	48.07±0.95ABa	18.20±1.87DEb
	eT	27.22±1.02Ba	19.00±1.00ABa	42.00±0.20DEb	21.70±0.31ABa
Bls	CK	33.66±0.11Aa	19.00±1.00ABa	45.43±0.58Ba	29.04±1.17Aa
	eT	30.51±0.31Ab	18.00±1.00ABCa	44.10±0.96CDa	24.22±0.71Ab
Loe	CK	22.78±0.74Fa	18.67±0.58ABa	49.10±1.55Aa	20.87±0.62CDa
	eT	13.01±0.3Eb	16.00±0.00BCDb	44.20±1.11CDb	9.20±0.46Db
Sie	CK	20.15±0.83Ga	16.33±0.58Ba	45.93±1.68ABa	15.15±1.53Ea
	eT	15.76±0.45Eb	15.00±1.00CDa	45.77±1.31Ca	10.81±0.68Db
Pus	CK	27.21±0.48DEa	16.67±0.58ABa	49.33±0.55Aa	22.37±0.72BCa
	eT	23.60±0.75Cb	18.00±1.00ABCa	41.47±0.64DEb	17.63±1.37Cb
Las	CK	31.75±1.28ABa	12.67±0.58Ca	47.27±0.47ABa	19.02±0.63Da
	eT	31.70±0.45Aa	13.33±1.53Da	45.52±0.28Cb	19.27±0.67BCa
Sas	CK	21.46±1.10FGb	17.67±1.53ABa	48.67±1.66ABa	18.39±0.41Db
	eT	23.77±0.50Ca	18.67±1.15ABa	48.73±0.68Ba	21.60±0.68ABa
Brs	CK	22.96±0.79Fa	18.33±0.58ABa	46.73±0.84ABb	19.67±1.06CDa
	eT	19.59±0.69Db	19.33±0.58Aa	49.37±0.45Ba	18.71±1.28BCa

注：不同大写字母表示同一温度条件下不同土壤间差异达 0.05 显著水平；不同小写字母表示同一土壤条件下不同温度处理间差异达 0.05 显著水平。下同。
Note: Different capital letters indicate significant differences with 0.05 level among different soil types under the same temperature condition. Different lowercase letters indicate significant differences with 0.05 level among different temperature treatments under the same soil type. The same as below.

粒数,在黄棕壤、红壤、黑土、黄土、灰钙土、紫色土、棕壤条件下比其对照处理分别降低了 16.98%、42.15%、9.36%、42.89%、21.79%、13.27%和 14.68%,而潮土增加了 25.61% ($P<0.05$);对于冬小麦千粒重,黄棕壤条件下降低了 17.44%、风沙土降低了 10.88%、红壤降低了 16.33%、潮土降低了 12.62%、黄土降低了 9.98%、紫色土降低了 15.93%,但砂礓黑土增加了 14.38% ($P<0.05$);对于冬小麦产量,黄棕壤、风沙土、黑土、黄土、灰钙土和紫色土条件下分别减产了 33.82%、20.96%、16.60%、55.92%、28.45%和 21.19%,而潮土增产了 16.13% ($P<0.05$),其他土壤无明显变化。总体而言,黄土冬小麦产量构成对增温的响应程度最大,潮土冬小麦是唯一在增温处理下增产的土壤条件。

2.2 增温下不同土壤对冬小麦籽粒品质的影响

2.2.1 可溶性总糖

由图 2 可知,增温处理增加了冬小麦籽粒的可溶性总糖含量,但仅在潮土、灰钙土和紫色土上显示出了显著差异 ($P<0.05$)。常温对照下 (CK 处理),12 种土壤冬小麦籽粒可溶性总糖含量无显著差异。eT 增温处理下,潮土、灰钙土和紫色土冬小麦籽粒可溶性总糖含量分别比其对照处理显著增加了 27.33%、26.12%和 22.57% ($P<0.05$)。12 种土壤条件下冬小麦籽粒可溶性总糖变化对增温响应在潮土上最为明显。

2.2.2 淀粉及其组分

增温处理对不同土壤上冬小麦籽粒淀粉及其组分的影响如图 3 所示。由图可见,对于冬小麦籽粒的直链淀粉,常温对照中 (CK 处理) 12 种土壤条件下,红壤冬小麦显著高于其他 11 种土壤 ($P<0.05$),最低的是砂礓黑土冬小麦;相比于对照 (eT 处理),黄棕壤、风沙土、潮土、黑土、黄土、灰钙土和紫色土冬小麦直链淀粉含量均表现显著下降趋势 ($P<0.05$),降幅分别为 33.09%、20.26%、20.13%、49.24%、34.18%、26.85%和 33.72%。对于冬小麦支链淀粉,常温对照中 12 种土壤条件下,黑土冬小麦的含量最高,显著高于除棕壤、盐碱土和紫色土外的其他 8 种土壤冬小麦 ($P<0.05$),红壤冬小麦支链淀粉含量均显著低于其他 11 种土壤冬小麦 ($P<0.05$); eT 处理中黄土、紫色土和棕壤上冬小麦支链淀粉分别降低 26.96%、23.20%和 24.73% ($P<0.05$)。对于总淀粉含量,常温处理中 12 种土壤条件下,黑土冬小麦总淀粉含量最高,显著高于除棕壤、紫色土和盐碱土以外的其他 8 种土壤冬小麦 ($P<0.05$),红壤冬小麦总淀粉含量最低; eT 增温处理中红壤、黑土、黄土、灰钙土、紫色土、盐碱土和棕壤冬小麦总淀粉显著下降 ($P<0.05$),下降程度最高的为黄土冬小麦,降幅 30.06%,其他 5 种土壤冬小麦无显著变化。综上所述,增温通过降低冬小麦籽粒的直链淀粉和支链淀粉含量进而降低总淀粉含量。

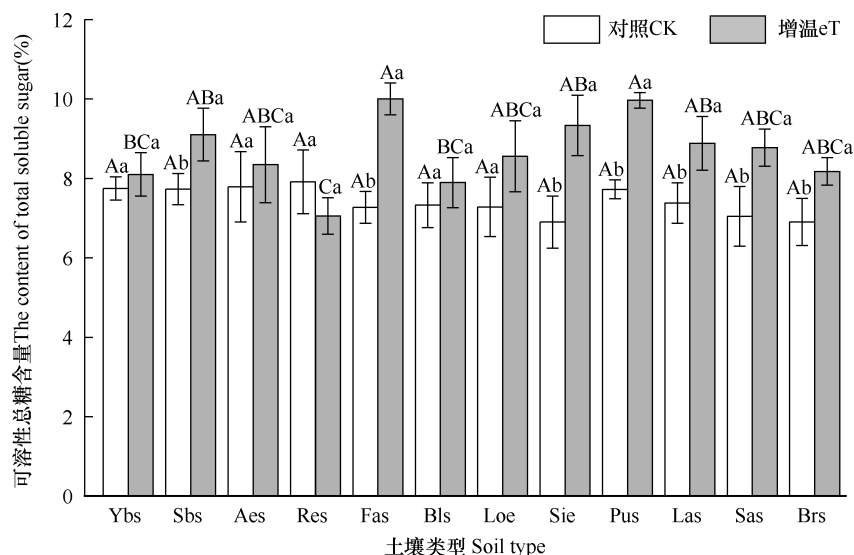


图 2 不同土壤类型增温处理下冬小麦籽粒可溶性总糖的变化

Fig. 2 Changes on total soluble sugars of winter wheat grain in different soil types under warming

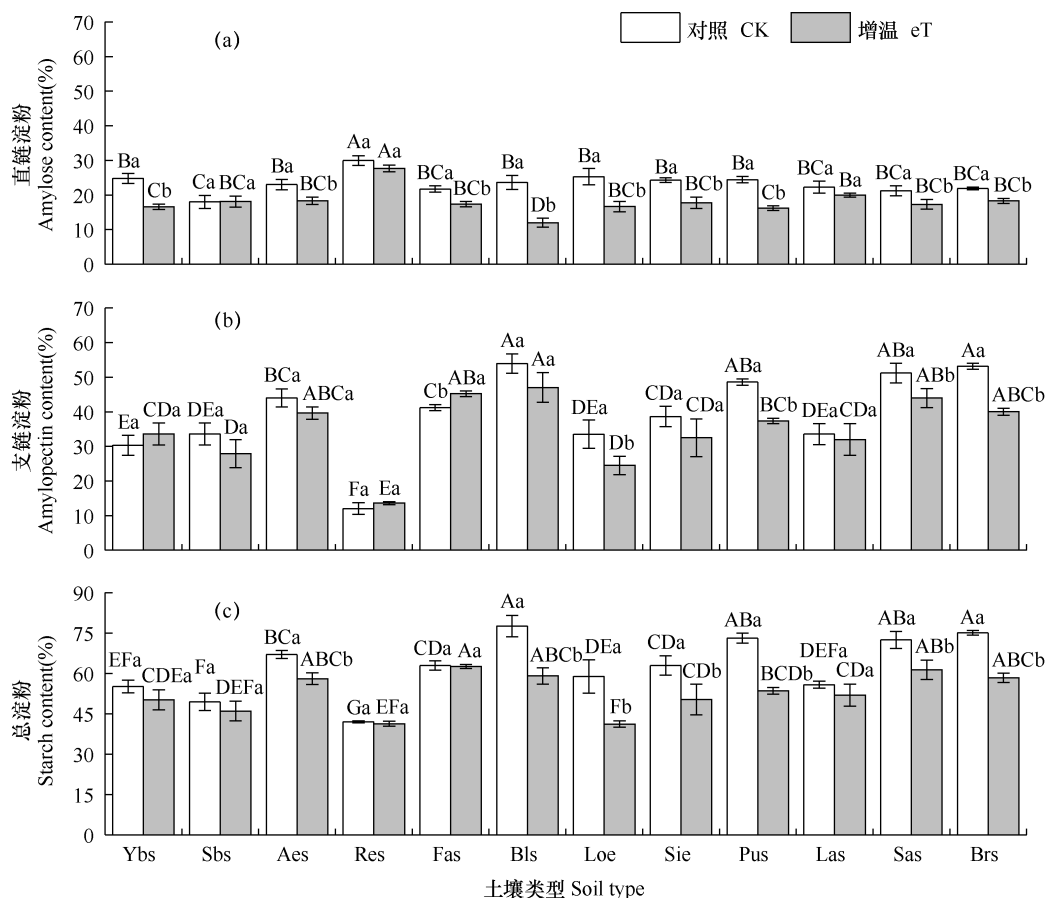


图3 不同土壤类型增温处理下冬小麦籽粒淀粉及其组分含量的变化

Fig. 3 Changes on starch and component contents of winter wheat grains in different soil types under warming treatment

2.2.3 蛋白质及其组分

由表3可知, 增温处理对不同土壤上冬小麦籽粒蛋白质及其组分含量变化影响不同。对于冬小麦的清蛋白, 常温处理中 (CK 处理) 12 种土壤条件下, 棕壤冬小麦含量最高, 显著高于除黄土和灰钙土的其他 9 种土壤冬小麦 ($P<0.05$); 增温处理 (eT 处理) 后除黄土、灰钙土、盐碱土和棕壤冬小麦, 其他 8 种土壤冬小麦均较对照显著增加 ($P<0.05$), 其中风沙土增幅最大 (48.10%), 黑土增幅最小 (24.70%)。对于球蛋白, 常温对照中 12 种土壤条件下, 砖红壤冬小麦含量最高, 且显著高于除灰钙土以外的 10 种土壤冬小麦 ($P<0.05$); eT 增温后, 黄棕壤、砂礓黑土、风沙土、红壤、黑土、黄土和盐碱土冬小麦较对照显著增加 ($P<0.05$), 其中红壤冬小麦增加 40.58%, 增幅最大, 黑土冬小麦增加 29.49%, 增幅最小。对于醇溶蛋白, 常温处理 12 种土壤条件下, 红壤冬小麦的含量最高, 显著高于除黄棕壤以外的 10 种土壤冬小麦 ($P<0.05$); 相对

于常温 (eT 处理), 12 种土壤冬小麦醇溶蛋白含量均显著下降 ($P<0.05$), 降幅在 22.43%~57.72%, 其中黑土冬小麦降幅最大, 红壤冬小麦降幅最小。对于谷蛋白, 常温处理 12 种土壤条件下, 黄土冬小麦含量最高, 且显著高于除红壤、灰钙土、紫色土和棕壤外的 7 种土壤冬小麦 ($P<0.05$); 增温处理中, 仅有黑土、灰钙土和盐碱土三种土壤冬小麦存在显著下降趋势 ($P<0.05$), 且黑土冬小麦降幅最大 (23.73%), 盐碱土冬小麦降幅最小 (13.08%)。对于总蛋白, 常温对照中, 灰钙土冬小麦的含量最高, 显著高于除红壤和棕壤以外的 9 种土壤冬小麦 ($P<0.05$), 黄棕壤冬小麦的含量最低; eT 增温处理后, 除红壤冬小麦, 其他 11 种土壤冬小麦总蛋白含量均显著下降 ($P<0.05$), 其中, 黑土冬小麦降幅最大 (26.71%), 风沙土冬小麦降幅最低 (7.62%)。由此可见, 增温主要通过影响冬小麦醇溶蛋白含量进而影响总蛋白含量变化, 这种影响对黑土最为显著。

表 3 不同土壤类型增温处理下冬小麦籽粒蛋白质及其组分含量的变化 (%)

Table 3 Changes on protein and component contents of winter wheat grains in different soil types under warming treatment(%)

土壤类型	处理	总蛋白	清蛋白	球蛋白	醇溶蛋白	谷蛋白
Soil type	Treatment	Total protein	Albumin	Globin	Gliadin	Glutelin
Ybs	CK	10.31±0.23Ga	0.92±0.06CDb	0.62±0.02Eb	4.15±0.20ABa	3.67±0.18CDa
	eT	8.57±0.26Gb	1.32±0.03DEa	0.92±0.05Da	2.13±0.03BCb	3.41±0.25Da
Sbs	CK	11.65±0.34ABCa	0.96±0.12CDb	0.85±0.13CDb	3.95±0.11BCa	3.75±0.26CDa
	eT	9.66±0.20CDEb	1.40±0.05CDEa	1.30±0.15BCa	1.86±0.10DEFb	3.90±0.14BCa
Aes	CK	10.70±0.29EFGa	0.82±0.06Db	0.81±0.09CDEb	3.80±0.18BCa	4.08±0.11BCa
	eT	9.94±0.20BCDb	1.58±0.09ABCa	1.27±0.20BCa	2.03±0.07BCDb	4.12±0.05ABa
Res	CK	11.78±0.12ABa	0.98±0.06CDb	0.82±0.07CDEb	4.47±0.04Aa	4.43±0.19ABa
	eT	11.27±0.19Ab	1.40±0.10CDEa	1.38±0.05Ba	3.47±0.11Ab	4.43±0.08Aa
Fas	CK	10.53±0.32FGa	1.07±0.08CDb	0.96±0.06BCa	3.65±0.08Ca	3.50±0.07Db
	eT	9.27±0.29EFb	1.54±0.09BCa	0.87±0.05Da	1.72±0.06EFb	3.87±0.12BCa
Bls	CK	11.37±0.18BCDa	1.25±0.07BCb	0.92±0.12CDb	3.78±0.22BCa	4.14±0.15BCa
	eT	8.97±0.15FGb	1.66±0.13ABa	1.30±0.12BCa	1.60±0.15Fb	3.34±0.15Db
Loe	CK	11.64±0.19ABCa	1.55±0.14ABa	0.71±0.06DEb	3.87±0.14BCa	4.80±0.10Aa
	eT	9.87±0.05BCDb	1.49±0.04BCDa	1.03±0.07CDa	2.25±0.10Bb	4.44±0.11Ab
Sie	CK	12.27±0.14Aa	1.50±0.37ABa	1.59±0.05Aa	3.74±0.32BCa	4.46±0.26ABa
	eT	10.10±0.09BCb	1.23±0.03Ea	1.77±0.11Aa	1.91±0.07CDEb	3.64±0.13CDb
Pus	CK	10.76±0.18DEFGa	0.94±0.07CDb	0.97±0.08BCa	3.78±0.05BCa	4.49±0.16ABa
	eT	9.62±0.14CDEb	1.37±0.05CDEa	0.86±0.05Da	2.13±0.10BCb	4.23±0.13ABa
Las	CK	11.28±0.11BCDEa	0.98±0.05CDb	1.61±0.06Aa	3.56±0.06Ca	4.09±0.11BCb
	eT	9.99±0.14BCDb	1.45±0.06CDa	1.51±0.06ABa	2.10±0.06BCDb	4.34±0.10Aa
Sas	CK	11.11±0.16CDEFa	0.92±0.04CDb	1.02±0.04BCb	3.95±0.10BCa	4.12±0.10BCa
	eT	9.52±0.12DEb	1.23±0.05Ea	1.45±0.04Ba	2.21±0.11Bb	3.64±0.10CDb
Brs	CK	11.68±0.17ABCa	1.70±0.06Aa	1.17±0.04Bb	3.56±0.13Ca	4.37±0.09ABa
	eT	10.26±0.15Bb	1.76±0.08Aa	1.28±0.03BCa	1.85±0.08DEFb	4.30±0.09Aa

2.3 冬小麦产量品质隶属函数综合评价、相关性分析和通径分析

2.3.1 隶属函数综合评价

对冬小麦产量构成和营养品质共 13 个指标的隶属函数值排名。由表 4 可知, 24 个样本中综合品质排名靠前 5 个样本依次为常温黑土冬小麦、常温棕壤冬小麦、常温灰钙土冬小麦、常温紫色土冬小麦, 其隶属函数值均 >0.6 ; 综合品质较劣排名靠后的 5 个样本依次为增温灰钙土冬小麦、增温黄土冬小麦、增温黄棕壤冬小麦、常温红壤冬小麦、增温红壤冬小麦, 其隶属函数值均 <0.5 。常温对照与增温处理比较可看出, 除潮土冬小麦以外, 其他 11 种土壤冬小麦品质均为常温组优于增温组, 且增温处理下的黑土、棕壤、灰钙土、紫色土、黄土、风沙土和黄棕壤冬小麦品质排名较常温对照下降程度较大, 说

明对增温处理较为敏感。由此可见, 增温使得冬小麦品质总体呈下降趋势, 而潮土冬小麦对增温响应为正效应。

2.3.2 相关性分析

相关性分析表明, 冬小麦的隶属函数值与冬小麦单穗粒数、有效穗数、千粒重、产量、支链淀粉、总淀粉、醇溶蛋白、谷蛋白和总蛋白含量存在显著正相关关系(图 4)。由图可知, 冬小麦隶属函数值与各指标的相关性从强到弱依次为总淀粉($r=0.84$)、支链淀粉($r=0.76$)、产量($r=0.70$)、千粒重($r=0.62$)、单穗粒数($r=0.59$)、有效穗数($r=0.57$)、总蛋白($r=0.35$)、谷蛋白($r=0.26$)和醇溶蛋白($r=0.25$), 其中, 总淀粉、支链淀粉、产量、千粒重、单穗粒数和有效穗数为强相关。此外, 冬小麦产量与单穗粒数、有效穗数、千粒重、支链淀粉和总淀粉呈现

表 4 冬小麦产量构成和营养品质指标的隶属函数值排名

Table 4 Ranking of the membership function values of winter wheat yield composition and nutritional quality indicators

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	U	排名 Ranking
Ybs	CK	0.868	1.000	0.752	0.962	0.273	0.712	0.436	0.383	0.107	0.000	0.888	0.222	0.469	0.544	14
	eT	0.672	0.947	0.462	0.619	0.387	0.255	0.515	0.248	0.536	0.257	0.186	0.043	0.000	0.394	22
Sbs	CK	0.687	0.868	0.725	0.717	0.268	0.335	0.462	0.227	0.147	0.195	0.818	0.277	0.832	0.504	17
	eT	0.638	0.658	1.000	0.674	0.710	0.339	0.379	0.133	0.621	0.592	0.090	0.380	0.295	0.501	18
Aes	CK	0.789	0.921	0.735	0.835	0.286	0.613	0.763	0.709	0.000	0.168	0.765	0.506	0.575	0.590	6
	eT	0.763	0.789	0.556	0.649	0.466	0.353	0.659	0.462	0.807	0.567	0.151	0.533	0.371	0.548	12
Res	CK	0.210	0.000	0.178	0.047	0.326	1.000	0.000	0.023	0.170	0.171	1.000	0.746	0.866	0.364	23
	eT	0.000	0.026	0.000	0.000	0.049	0.873	0.038	0.004	0.614	0.659	0.651	0.746	0.729	0.338	24
Fas	CK	0.487	0.947	0.755	0.608	0.119	0.541	0.696	0.597	0.267	0.294	0.713	0.105	0.530	0.512	15
	eT	0.754	0.974	0.544	0.734	1.000	0.298	0.791	0.587	0.771	0.216	0.043	0.362	0.189	0.559	11
Blis	CK	1.000	0.974	0.663	1.000	0.138	0.649	1.000	1.000	0.457	0.257	0.758	0.545	0.756	0.707	1
	eT	0.880	0.895	0.617	0.825	0.320	0.000	0.835	0.491	0.900	0.589	0.000	0.000	0.109	0.497	19
Loc	CK	0.584	0.947	0.791	0.704	0.123	0.742	0.513	0.485	0.782	0.077	0.790	1.000	0.830	0.644	4
	eT	0.210	0.737	0.620	0.281	0.535	0.260	0.297	0.000	0.714	0.352	0.228	0.755	0.351	0.411	21
Sie	CK	0.483	0.763	0.681	0.497	0.000	0.685	0.635	0.697	0.721	0.841	0.745	0.767	1.000	0.647	3
	eT	0.315	0.658	0.675	0.340	0.785	0.321	0.488	0.250	0.432	1.000	0.109	0.204	0.413	0.461	20
Pus	CK	0.753	0.789	0.799	0.758	0.265	0.693	0.873	0.876	0.128	0.303	0.759	0.787	0.590	0.644	4
	eT	0.615	0.895	0.525	0.587	0.988	0.234	0.604	0.340	0.582	0.210	0.187	0.606	0.284	0.512	15
Las	CK	0.927	0.474	0.727	0.587	0.155	0.571	0.513	0.402	0.168	0.858	0.682	0.510	0.732	0.562	9
	eT	0.925	0.526	0.666	0.646	0.640	0.444	0.476	0.296	0.668	0.771	0.176	0.682	0.383	0.561	10
Sas	CK	0.533	0.868	0.775	0.614	0.046	0.514	0.934	0.858	0.100	0.346	0.819	0.533	0.686	0.587	7
	eT	0.622	0.947	0.778	0.730	0.604	0.296	0.762	0.553	0.436	0.719	0.213	0.206	0.257	0.548	12
Brs	CK	0.591	0.921	0.708	0.661	0.001	0.550	0.982	0.930	0.939	0.476	0.684	0.705	0.840	0.691	2
	eT	0.462	1.000	0.800	0.626	0.411	0.351	0.668	0.471	1.000	0.572	0.087	0.654	0.455	0.581	8

注：X₁、X₂、X₃、X₄、X₅、X₆、X₇、X₈、X₉、X₁₀、X₁₁、X₁₂和X₁₃分别表示单穗粒数、有效穗数、千粒重、产量、可溶性总糖、直链淀粉、支链淀粉、总淀粉、清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白和总蛋白。U表示隶属函数值的平均值。下同。
Note: X₁, X₂, X₃, X₄, X₅, X₆, X₇, X₈, X₉, X₁₀, X₁₁, X₁₂ and X₁₃ represent grain number per spike, ear number per pot, 1000-grain weight, yield, soluble sugar, amylose, amylopectin, total starch, albumin, globulin, gliadin, glutelin and total protein. U represent the average value of the membership function value. The same as below.

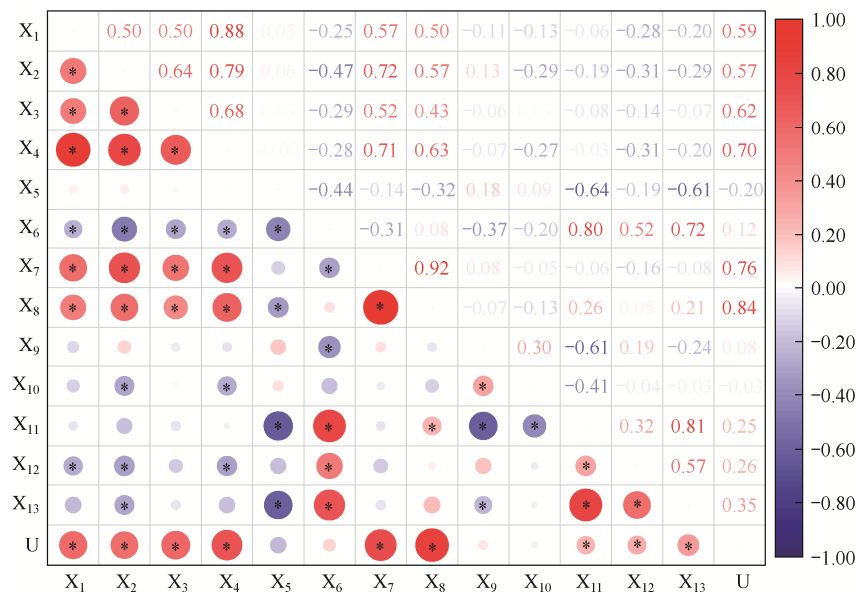


图 4 产量构成、营养品质与隶属函数值的相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of yield composition, nutrient quality and membership function values

显著正相关,但与球蛋白和谷蛋白为显著负相关;冬小麦总淀粉与支链淀粉存在显著正相关,相关系数 r 高达 0.92;冬小麦可溶性总糖与直链淀粉、总淀粉、醇溶蛋白和总蛋白存在显著负相关。由此可知,冬小麦产量构成、支链淀粉、总淀粉、醇溶蛋白、谷蛋白和总蛋白含量对冬小麦品质存在正效应。

2.3.3 通径分析

各因子的直接和间接共同作用影响冬小麦产量,通径分析结果如表 5 所示。由表可知,在常温对照组,通径分析排除了 8 个因素,保留对冬小麦产量影响效应较强的单穗粒数(X_1)、有效穗数(X_2)、球蛋白(X_{10})和直链淀粉(X_6) 4 个因素;在增温组,通径分析排除了 8 个因素,保留对产量影响较强的单穗粒数(X_1)、有效穗数(X_2)、千粒重(X_3)和总淀粉(X_8) 4 个因素。由表可知,常温条件下单穗粒数(X_1)、有效穗数(X_2)和直链淀粉(X_6)与冬小麦产量存在极显著正相关关系($P<0.01$),且单

穗粒数和有效穗数具有直接促进作用,直接通径系数分别 0.630 和 0.538;而球蛋白(X_{10})对于冬小麦产量具有抑制作用,直接通径系数为-0.118。4 个因子中,单穗粒数、有效穗数和球蛋白的直接通径系数大于间接通径系数之和,表明这 3 个因子对冬小麦产量的影响主要体现在直接作用上,直链淀粉则主要体现为间接影响。增温处理对冬小麦产量影响较大的四个指标为单穗粒数(X_1)、有效穗数(X_2)、千粒重(X_3)和总淀粉(X_8),均对冬小麦产量具有促进作用($P<0.01$)。其中,单穗粒数对冬小麦产量影响最大,直接通径系数为 0.603,有效穗数和总淀粉通过与单穗粒数的间接作用对冬小麦产量产生影响,间接通径系数分别为 0.322 和 0.381。4 个因子中,仅有单穗粒数的直接通径系数大于间接通径系数之和,表明增温条件下单穗粒数对冬小麦产量的影响主要体现在直接作用上,其余三个因子主要体现为间接作用。

表 5 冬小麦产量品质的通径分析
Table 5 Path coefficients of winter wheat yield and quality

处理 Treatment	因子 Factor	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficients				
				间接通径系数和 Total indirect path coefficients	X_1	X_2	X_6	X_{10}
CK	X_1	0.862**	0.630**	0.231	0	0.252	-0.018	-0.003
	X_2	0.830**	0.538**	0.293	0.296	0	-0.029	0.026
	X_6	-0.425**	0.054**	-0.479	-0.212	-0.286	0	0.019
	X_{10}	-0.228	-0.118**	-0.110	0.015	0.116	-0.009	0
eT	X_1	0.904**	0.603**	0.302	X_1	X_2	X_3	X_8
	X_2	0.766**	0.255**	0.511	0	0.136	0.080	0.085
	X_3	0.621**	0.186**	0.435	0.322	0	0.101	0.089
	X_8	0.734**	0.135*	0.600	0.260	0.138	0	0.037
					0.381	0.167	0.051	0

注: *和**分别表示相关系数通过 0.05、0.01 水平的(双尾)显著性检验。

Note: * and ** indicate that the correlation coefficient is significant at the 0.05, 0.01 level (two-tailed), respectively.

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 增温对不同土壤冬小麦产量的影响

不同土壤冬小麦产量对增温的响应存在差异。本试验 12 种土壤条件中,增温组潮土上的冬小麦产量显著高于常温对照,表现为增产正效应,与早前研究结果一致^[36]。潮土质地黏重,具有较好的持水能力,这是影响冬小麦产量和收获指数的重要因素^[25],同时,潮土对气候变化的响应较为敏感^[37],增温后土

壤中的微生物活性增强^[38],加速潮土有机质的转化分解,为冬小麦生长供应更多养分,冬小麦因此增产。然而增温后黄棕壤、风沙土、黑土、黄土、灰钙土和紫色土上的冬小麦产量显著低于常温对照,表现出减产负效应。由于本试验在同一气候条件下进行,风沙土、黄土和灰钙土原位于干旱和半干旱地区,土壤颗粒孔隙大,质地疏松,保水性差,增温处理后土壤水分散失更快,进一步减少了水分供给,从而影响养分在作物体内运移与分配^[39],导致

冬小麦单穗粒数和千粒重降低, 直接和间接地影响冬小麦产量。对于紫色土而言, 由于紫色土中的铵态氮含量与温度间的负相关关系^[40], 温度越高, 铵态氮含量越低, 土壤有机氮矿化作用减弱^[41], 土壤供给冬小麦氮素养分的能力下降, 由此减产。黑土原位于寒温带地区的黑龙江省, 移至江苏南京后, 环境温度上升, 加速土壤呼吸底物的消耗, 从而降低土壤呼吸敏感性^[42], 同时, 黑土中的全氮、铵态氮、微生物量氮以及全磷浓度均会在增温作用下受到不同程度的降低^[43], 因此冬小麦减产。黄棕壤作为江苏南京本地土壤, 增温使冬小麦减产的结果与前人相似^[44-45], 通径分析结果表明, 增温处理下, 单穗粒数和千粒重是对冬小麦产量产生直接影响的2个重要因子, 增温使黄棕壤冬小麦单穗粒数和千粒重显著降低, 由此直接导致减产。砂礓黑土、红壤、砖红壤、盐碱土和棕壤上的冬小麦产量无显著变化, 是产量三因素即单穗粒数、有效穗数和千粒重的直接作用和间接作用的共同影响结果。

3.1.2 增温对不同土壤冬小麦籽粒营养品质的影响

本研究结果表明, 增温不利于冬小麦籽粒品质形成, 且由隶属函数综合评价可以证实, 增温处理下的冬小麦品质普遍劣于常温对照, 表现为冬小麦总淀粉、总蛋白质含量下降。卢红芳等^[19]认为灌浆期高温导致小麦籽粒淀粉含量下降; 王晨阳等^[46]表明花后高温导致小麦淀粉产量显著下降; 张艳菲等^[47]研究认为花后高温处理使小麦蛋白质及其组分含量增加; 田云录等^[20]研究结果显示非对称增温对冬小麦总淀粉含量差异不显著, 但冬小麦籽粒蛋白质含量显著降低。这些结果表明, 增温对冬小麦籽粒营养品质的影响因增温方式有所区别。本研究中, 全生育期增温显著降低了冬小麦籽粒总淀粉含量, 与曹敏旭^[48]的结果一致, 这是因为增温改变了冬小麦籽粒淀粉合成酶活性及其相关基因的表达, 使淀粉积累受抑^[19]。对于冬小麦籽粒蛋白质及其组分含量, 虽然清蛋白和球蛋白在增温处理下存在显著上升趋势, 但大幅度显著下降的醇溶蛋白, 抵消了前两者的上升趋势, 使得冬小麦总蛋白含量最终展现出显著降低趋势, 由于全生育期增温使冬小麦营养生长期缩短, 生殖生长期延长^[49], 吸收运输氮素供蛋白质形成的时间缩短, 因此冬小麦总蛋白含量减少。对于冬小麦籽粒可溶性总糖, 在增温处理后均上升, 是因为籽粒糖类合成的阶段在灌浆期^[50], 延长的生

殖生长期为冬小麦籽粒可溶性总糖的合成增加了时间, 从而含量显著增加, 但冬小麦可溶性总糖含量与总淀粉和总蛋白含量存在显著负相关关系, 由此, 增加的可溶性总糖含量对冬小麦品质形成为负效应。根据隶属函数评价冬小麦品质, 除潮土外, 其他11种土壤上的冬小麦品质均呈现为增温劣于常温对照。研究认为, 同一气候条件下, 对冬小麦籽粒品质影响较大的是土壤质地^[51], 而非土壤类型^[52], 尤其是在黏性土上种植冬小麦有利于籽粒蛋白质的积累^[25]。潮土较为黏重, 有较强的持水性, 冬小麦籽粒产量会随土质黏重程度的提高而增加^[53], 结合产量、籽粒总淀粉和总蛋白含量可证实这一点。这些结果表明, 增温通过增加冬小麦可溶性总糖含量、降低淀粉和蛋白质含量从而使冬小麦籽粒品质下降。

3.1.3 常温和增温条件下产量构成和品质指标对冬小麦产量的贡献

常温和增温条件下, 对冬小麦产量产生贡献的指标不同。通径分析结果表明, 常温条件下, 单穗粒数是影响冬小麦产量的直接主控因素, 有效穗数和球蛋白次之, 直链淀粉体现在间接作用上。增温条件下, 单穗粒数也是影响冬小麦产量的直接主控因素, 有效穗数、千粒重和总淀粉体现在间接作用上。可见, 无关温度处理, 冬小麦单穗粒数是产量的主要贡献因子, 作为产量三因素之一, 对冬小麦产量形成具有至关重要的作用。虽然有效穗数在温度处理间并未显示出显著差异, 但通过与单穗粒数间的相互作用对产量产生间接影响。增温条件下, 虽然单穗粒数是主控因素, 但总淀粉对产量的间接作用不容忽视, 增温影响冬小麦淀粉积累, 过高的温度可能会使淀粉合成酶失活^[54], 因此, 在气候变暖环境下, 应注重冬小麦淀粉合成酶的活性变化, 进而提高冬小麦产量, 减轻增温对冬小麦生产的不利影响。

3.2 结论

冬小麦全生育期增温后, 12种土壤条件下, 其产量表现为潮土冬小麦显著增加, 黄棕壤、风沙土、黑土、黄土、灰钙土和紫色土冬小麦显著减小, 其他土壤冬小麦无显著变化。冬小麦单穗粒数是冬小麦产量形成的主控因子。增温增加了冬小麦籽粒可溶性总糖含量, 但对冬小麦品质形成存在负效应; 直链淀粉和支链淀粉共同受到增温影响, 使冬小麦总淀粉含量降低; 增温处理通过降低冬小麦蛋白质

组分中的醇溶蛋白含量从而使总蛋白含量显著下降。隶属函数综合评价结果表明,除潮土冬小麦外,其他11种土壤条件冬小麦品质均表现为增温劣于常温,不同土壤间表现为黑土冬小麦品质最好,红壤冬小麦品质最差。

参考文献 References

- [1] 周波涛,钱进. IPCC AR6 报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展,2021,17(6):713-718.
Zhou B T, Qian J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718. (in Chinese)
- [2] 王卓妮,袁佳双,庞博,等. IPCC AR6 WGIII 报告减缓主要结论、亮点和启示[J]. 气候变化研究进展,2022,18(5):531-537.
Wang Z N, Yuan J S, Pang B, et al. The interpretation and highlights on mitigation of climate change in IPCC AR6 WGIII report[J]. Climate Change Research, 2022, 18(5): 531-537. (in Chinese)
- [3] Fu Y H, Lu R Y, Guo D. Changes in surface air temperature over China under the 1.5 and 2.0 °C global warming targets[J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 9(2): 112-119.
- [4] Rezaei E E, Rojas L V, Zhu W X, et al. The potential of crop models in simulation of barley quality traits under changing climates: a review[J]. Field Crops Research, 2022, 286: 108624.
- [5] 苏芳,刘钰,汪三贵,等. 气候变化对中国不同粮食产区粮食安全的影响[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(8):140-152.
Su F, Liu Y, Wang S G, et al. Impact of climate change on food security in different grain producing areas in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(8): 140-152. (in Chinese)
- [6] Huang N, Song Y, Wang J L, et al. Climatic threshold of crop production and climate change adaptation: a case of winter wheat production in China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10: 1019436.
- [7] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895.
Zhao G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (I)[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(5): 886-895. (in Chinese)
- [8] 孙茹,韩雪,潘婕,等. 全球 1.5 °C 和 2.0 °C 升温对中国小麦产量的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 573-582.
Sun R, Han X, Pan J, et al. The impact of 1.5 °C and 2.0 °C global warming on wheat production in China[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 573-582. (in Chinese)
- [9] Zhang H Q, Tang Y S, Chandio A A, et al. Measuring the effects of climate change on wheat production: evidence from northern China[J]. Int. J. Environ. Res. Public Health, 2022, 19(19): 12341.
- [10] Tang X P, Liu H J. Spatial-temporal distribution of climate suitability of winter wheat in North China plain for current and future climate scenarios[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 143: 915-930.
- [11] 吴乾慧,张勃,马彬,等. 气候变暖对黄土高原冬小麦种植区的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 429-436.
Wu Q H, Zhang B, Ma B, et al. Impact of climate warming on winter wheat planting in the Loess Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(3): 429-436. (in Chinese)
- [12] 柏军兵,常旭红,王德梅,等. 黄淮冬麦区南片气象因子对不同品种小麦籽粒特性的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(6): 474-486.
Bai J B, Chang X H, Wang D M, et al. Effects of meteorological factors on grain characteristics in different wheat varieties in the southern of Huang-Huai planting[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(6): 474-486. (in Chinese)
- [13] He D, Fang S B, Liang H Y, et al. Contrasting yield responses of winter and spring wheat to temperature rise in China [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15: 124038.
- [14] 刘文茹,陈国庆,刘恩科,等. 基于 DSSAT 模型的长江中下游冬小麦潜在产量模拟研究[J]. 生态学报, 2018, 38(9): 3219-3229.
Liu W R, Chen G Q, Liu E K, et al. The variations in winter wheat potential yields in the middle and lower reaches of the Yangtze River under the RCP scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(9): 3219-3229. (in Chinese)
- [15] 陈超,庞艳梅,张玉芳,等. 四川冬小麦产量对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(1): 127-136.
Chen C, Pang Y M, Zhang Y F, et al. Study on the sensitivity and vulnerability of winter wheat yield to climate change

- in Sichuan province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 127-136. (in Chinese)
- [16] 王斌, 顾蕴倩, 刘雪, 等. 中国冬小麦种植区光热资源及其配比的时空演变特征分析[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(2): 228-238.
- Wang B, Gu Y Q, Liu X, et al. Analysis of the temporal and spatial changes of photothermal resources in winter wheat growing regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 228-238. (in Chinese)
- [17] 信志红, 郭建平, 谭凯炎, 等. 冬小麦籽粒品质评价及其对气象因子的响应研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(8): 1205-1217.
- Xin Z H, Guo J P, Tan K Y, et al. Evaluation of grain quality of winter wheat and its response to meteorological factors [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(8): 1205-1217. (in Chinese)
- [18] 岳鹏莉, 王晨阳, 卢红芳, 等. 灌浆期高温干旱胁迫对小麦籽粒淀粉积累的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(11): 1489-1496.
- Yue P L, Wang C Y, Lu H F, et al. Effect of heat and drought stress on starch accumulation during grain filling stage[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(11): 1489-1496. (in Chinese)
- [19] 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. (in Chinese)
- [20] 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 Y L, Chen J, Deng A X, et al. Effects of asymmetric warming on contents and components of starch and protein in grains of winter wheat under FATI facility[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(2): 302-308. (in Chinese)
- [21] 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. (in Chinese)
- [22] 韩天富, 李亚贞, 曲潇林, 等. 中国农田小麦和玉米产量时空演变及驱动因素[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 100-108.
- Han T F, Li Y Z, Qu X L, et al. Spatio-temporal evolutions and driving factors of wheat and maize yields in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1): 100-108. (in Chinese)
- [23] Leszczyńska D, Klimek-Kopyra A, Patkowski K. Evaluation of productivity of new spring cereal mixture to optimize cultivation under different soil conditions[J]. *Agriculture*, 2020, 10(8): 344.
- [24] Pan J X, Miao Q, Zhang W J, et al. Increasing soil organic carbon for higher wheat yield and nitrogen productivity [J]. *Agronomy*, 2023, 13(1): 198.
- [25] Wang X Z, Christensen S, Svendsgaard J, et al. The effects of cultivar, nitrogen supply and soil type on radiation use efficiency and harvest index in spring wheat[J]. *Agronomy*, 2020, 10(9): 1391.
- [26] Nouri M, Homaei M, Bannayan M, et al. Towards modeling soil texture-specific sensitivity of wheat yield and water balance to climate changes[J]. *Agricultural Water Management* 2016, 177: 248-263.
- [27] 魏鑫, 常旭红, 王德梅, 等. 不同类型土壤对小麦籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(12): 1494-1498.
- Wei X, Chang X H, Wang D M, et al. Effect of different types of soil on wheat grain yield and protein content[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(12): 1494-1498. (in Chinese)
- [28] Ludwig F, Asseng S. Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in western Australia[J]. *Agricultural Systems*, 2006, 90: 159-179.
- [29] 王帘里, 孙波, 隋跃宇, 等. 不同气候和土壤条件下玉米叶片叶绿素相对含量对土壤氮素供应和玉米产量的预测[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 327-335.
- Wang L L, Sun B, Sui Y Y, et al. Prediction of soil nitrogen supply and maize yields with the relative chlorophyll contents of leaves under different climates and soil conditions [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 327-335. (in Chinese)
- [30] 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 G,Kong X F,Hou R X,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,2022,38(6):80-88.(in Chinese)
- [31] 刘希伟,张敏,张玉春,等.灌浆期遮光对糯小麦和非糯小麦淀粉组分及理化特性的影响[J].中国农业科学,2017,50(9):1582-1593.
- Liu X W,Zhang M,Zhang Y C,et al.Effects of Shading at grain filling stages on starch components and physicochemical properties of the waxy wheat and non-waxy wheat[J].Scientia Agricultura Sinica,2017,50(9):1582-1593.(in Chinese)
- [32] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000,199-200.
- Li H S.Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M].Beijing:Higher Education Press,2000,199-200.(in Chinese)
- [33] 孔祥生,易现峰.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2008:160-166.
- Kong X S,Yi X F.Plant physiology experiment techniques [M].Beijing:China Agriculture Press,2008:160-166.(in Chinese)
- [34] 韩艳红,于沐,石彦召,等.基于隶属函数法对 13 个花生品种品质的综合评价[J].中国农学通报,2022,38(2):7-11.
- Han Y H,Yu M,Shi Y Z,et al. Comprehensive evaluation of the quality of 13 peanut varieties by membership function method[J].Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(2):7-11.(in Chinese)
- [35] Chen X J,Min D H,Yasir T A,et al.Evaluation of 14 morphological, yield-related and physiological traits as indicators of drought tolerance in Chinese winter bread wheat revealed by analysis of the membership function value of drought tolerance (MFVD)[J].Field Crops Research, 2012,137:195-201.
- [36] 赵红飞,潘仕球,乔云发,等.增温对冬小麦产量的影响因土壤类型而不同[J].中国农学通报,2021,37(2):74-79.
- Zhao H F,Pan S Q,Qiao Y F,et al.The responses of winter-wheat yield to elevated temperature varied with soil types[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2021,37(2): 74-79.(in Chinese)
- [37] 汪峰,蒋瑞霖,李昌明,等.不同气候条件下潮土微生物群落的变化[J].土壤,2014,46(2):290-296.
- Wang F,Jiang Y J,Li C M,et al.Changes of soil microbial communities in Chao soil under different climate conditions [J].Soils,2014,46(2):290-296.(in Chinese)
- [38] Zhao M X,Xue K,Wang F,et al.Microbial mediation of biogeochemical cycles revealed by simulation of global changes with soil transplant and cropping[J].The ISME Journal,2014,8:2045-2055.
- [39] 蒲敬轩,樊雅琼,冯许钰,等.分根区交替灌溉对土壤水分养分条件及作物生长的影响[J].中国土壤与肥料,2022(9): 209-215.
- Pu J X,Fan Y Q,Feng X Y,et al.Effects of alternate partial root-zone irrigation on soil moisture and nutrient conditions and crop growth[J].Soil and Fertilizer Sciences in China,2022(9):209-215.(in Chinese)
- [40] Yu Z J,He X H,Li Z T,et al.Anammox bacterial abundance and diversity in different temperatures of purple paddy soil by ^{13}C -DNA stable-isotope probing combined with high-throughput sequencing[J].Frontiers in Microbiology,2023, 14:1098681.
- [41] 聂兆君,秦世玉,刘红恩,等.氮锌配施对冬小麦产量及土壤氮素转化相关酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报, 2020,26(3):431-441.
- Nie Z J,Qin S Y,Liu H E,et al.Effects of combined application of nitrogen and zinc on winter wheat yield and soil enzyme activities related to nitrogen transformation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2020,26(3):431-441.(in Chinese)
- [42] 付微,张兴义,赵军,等.模拟增温对东北黑土农田作物生长季土壤呼吸的影响[J].生态学杂志,2017,36(3):601-608.
- Fu W,Zhang X Y,Zhao J,et al. Effects of experimental warming on soil respiration during growing period in cropland in the black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(3):601-608.(in Chinese)
- [43] 王子龙,孙秋雨,姜秋香,等.冬季增温对东北农田黑土氮磷有效性的影响[J].农业工程学报,2023,39(9):91-101.
- Wang Z L,Sun Q Y,Jiang Q X,et al.Effects of winter warming on the nitrogen and phosphorus availability of black soil in Northeast farmland[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023, 39(9): 91-101.(in Chinese)
- [44] 冯茜,苗淑杰,乔云发.不同类型土壤下增温对小麦养分吸收和分配的影响[J].麦类作物学报,2023,43(4):496-504.
- Feng Q,Miao S J,Qiao Y F.Effects of warming on the absorption and distribution of nutrients in wheat grown on

- various soils[J].*Journal of Triticeae Crops*, 2023,43(4): 496-504.(in Chinese)
- [45] 苏海报,陈昆,江晓东,等.夜间增温对南京地区冬小麦生产的影响[J].*江苏农业科学*,2019,47(21):144-147.
Su H B,Chen K,Jiang X D,et al.Influence of night temperature increase on winter wheat production in Nanjing city[J].*Jiangsu Agricultural Sciences*,2019,47(21): 144-147.(in Chinese)
- [46] 王晨阳,张艳菲,卢红芳,等.花后渍水、高温及其复合胁迫对小麦籽粒淀粉组成与糊化特性的影响[J].*中国农业科学*,2015,48(4):813-820.
Wang C Y,Zhang Y F,Lu H F,et al.Effects of post-anthesis waterlogging,high temperature and their combination on starch compositions and pasting properties in wheat grains [J].*Scientia Agricultural Sinica*, 2015,48(4):813-820.(in Chinese)
- [47] 张艳菲,王晨阳,马冬云,等.花后渍水、高温及其复合胁迫对小麦籽粒蛋白质含量和面粉白度的影响[J].*作物学报*,2014,40(6):1102-1108.
Zhang Y F,Wang C Y,Ma D Y,et al.Effects of waterlogging, high temperature and their interaction after anthesis on grain protein components and flour color in wheat[J].*Acta Agronomica Sinica*,2014,40(6):1102-1108.(in Chinese)
- [48] 曹敏旭.全生育期增温下施氮量对小麦产量和品质形成的影响及其生理机制[D].南京:南京农业大学,2012:31-32.
Cao M X.Effects of different nitrogen rates on grain yield and quality formation under temperature increase scenario in wheat and its physiological mechanism[D].Nanjing: Nanjing Agricultural University,2012:31-32.(in Chinese)
- [49] Liu Y J,Chen Q M,Ge Q S,et al.Spatiotemporal differentiation of changes in wheat phenology in China under climate change from 1981 to 2010[J].*Science China Earth Sciences*, 2018,61:1088-1097.
- [50] 麦博儒,郑有飞,吴荣军,等.不同 pH 模拟酸雨对冬小麦籽粒营养品质的影响[J].*生态学报*,2010,30(14):3883-3891.
Mai B R,Zheng Y F,Wu R J,et al.Effect of different pH simulated acid rains on nutrition quality of winter wheat grains[J].*Acta Ecologica Sinica*,2010,30(14):3883-3891.(in Chinese)
- [51] 韩巧霞,郭天财,王化岑,等.不同土壤质地条件下小麦旗叶全氮和籽粒蛋白质含量的变化[J].*麦类作物学报*,2007, 27(4):677-681.
Han Q X,Guo T C,Wang H C,et al.Changes of total nitrogen in flag leaves and protein in kernels during grain filling of winter wheat in different texture soils[J].*Journal of Triticeae Crops*,2007,27(4):677-681.(in Chinese)
- [52] 赵淑章,季书勤,王绍中,等.不同类型土壤与强筋小麦品质和产量的关系[J].*河南农业科学*,2004(7):52-53.
Zhao S Z,Ji S Q,Wang S Z,et al.Relationship between different type soils with quality and yield of strong gluten wheat[J].*Journal of Henan Agricultural Sciences*,2004(7): 52-53.(in Chinese)
- [53] 杨阳,熊淑萍,刘娟,等.土壤质地对强筋型小麦郑麦 366 氮代谢及氮利用效率的影响[J].*麦类作物学报*,2013,33(3): 466-471.
Yang Y,Xiong S P,Liu J,et al.Effects of soil texture on nitrogen metabolism nitrogen efficiency of strong-gluten wheat cultivar Zhengmai 336[J].*Journal of Triticeae Crops*, 2013,33(3):466-471.(in Chinese)
- [54] 陈丹丹.花后开放式增温对小麦品质的影响及其生理机制[D].南京:南京农业大学,2012:62.
Chen D D.Effect of different day and night temperature enhancement after anthesis on quality and physiological mechanism of wheat under free air controlled condition [D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2012:62.(in Chinese)