作物学报 ACTA AGRONOMICA SINICA 2026, 52(6): 1830−1846 http://zwxb.chinacrops.org/
ISSN 0496-3490; CN 11-1809/S; CODEN TSHPA9 E-mail: zwxb301@caas.cn

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.51088

一次灌溉下耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量和品质的影响

胡 川[1] 赵凯男[2] 黄修利[1] 吴金芝[1] 任开明[1] 王贺正[1] 付国占[1]
黄 明[1,*] 李友军[1,*]

[1] 河南科技大学农学院, 河南洛阳 471023; [2] 山东省农业科学院作物研究所, 山东济南 250100

摘 要: 随着高标准农田建设项目的推进, 许多旱地麦田可以实现在生育期进行一次灌溉。为了研究一次灌溉下耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量和品质的影响, 于 2020—2022 年在河南省洛阳市孟津区小浪底镇、伊川县鸦岭镇和洛宁县小界乡设置了一次灌溉生产条件下的二因素裂区试验。试验以耕作方式为主处理, 分别为旋耕(RT)、深松+旋耕(SS)和翻耕+旋耕(PT); 氮肥用量为副处理, 分别为 0 (N0)、120 (N120)、180 (N180)和 240 kg hm^{-2} (N240), 测定了小麦籽粒产量、蛋白质及其组分含量、锌含量和主要加工品质指标。结果表明, 耕作方式和氮肥用量可显著影响小麦产量和品质, 且二者互作可显著影响产量、蛋白质产量以及除清蛋白外的蛋白质组分含量。与 PT 和 RT 相比, SS 使小麦产量显著增加 6.9%和 12.6%, 蛋白质产量显著增加 7.7%和 14.5%。除 2020—2021 年度鸦岭点清蛋白、小界点球蛋白以及 2021—2022 年度鸦岭点粗蛋白、球蛋白和小界点醇溶蛋白外, 小麦蛋白质含量及其组分含量、加工品质以及籽粒锌含量均表现为显著上升, 其中, 清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量平均分别增加 21.9%、19.0%、12.5%、8.0%和 22.0%、19.6%、19.7%、15.0%, 面团形成时间、稳定时间、湿面筋含量、沉降值、延伸性和最大阻力平均分别增加 18.6%、28.4%、8.2%、26.4%、10.1%、14.0%和 19.5%、32.8%、9.1%、27.8%、10.3%、22.6%, 锌含量平均分别增加 12.6%和 23.2%。随着氮肥用量的增加, 3 种耕作方式下的小麦产量和蛋白质产量、蛋白质组分含量、加工品质和籽粒锌含量均表现为先增加后稳定的趋势, N180 和 N240 无显著差异, 二者多显著高于 N120。除小浪底点的产量和 2021—2022 年度醇溶蛋白外, SSN180 的小麦产量、品质、经济效益和产投比与 SSN240 相比均无显著差异, 但多显著高于其他处理。因此, 一次灌溉下深松+旋耕配施 180 kg hm^{-2} 氮肥的组合能在提高产量的同时兼顾品质和效益, 适宜在旱作区满足一次灌溉条件的旱地小麦生产中推广应用。

关键词: 耕作方式; 氮肥用量; 旱地; 小麦; 产量; 品质

Effects of tillage methods and nitrogen rates on yield and quality of dryland wheat under one-off irrigation

Hu Chuan[1], Zhao Kai-Nan[2], Huang Xiu-Li[1], Wu Jin-Zhi[1], Ren Kai-Ming[1], Wang He-Zheng[1], Fu Guo-Zhan[1], Huang Ming[1,*], and Li You-Jun[1,*]

[1] College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; [2] Crop Research Institute, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong, China

Abstract: As China's High-Standard Farmland Construction Program advances, many dryland wheat fields can now receive a one-off irrigation during the growing season (hereafter, one-off irrigation). To evaluate the effects of tillage practices and nitrogen (N) rates on wheat yield and quality under one-off irrigation, we conducted a two-factor split-plot experiment from 2020 to 2022 at three sites in Luoyang, Henan province (Xiaolangdi town, Mengjin county; Yaling town, Yichuan county; and Xiaojie town,

本研究由国家重点研发计划项目(2021YFD1900700, 2022YFD2300800)和河南省科技攻关项目(252102111080, 232102111009)资助。
This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1900700, 2022YFD2300800) and the Science and Technology Research Project of Henan (252102111080, 232102111009).

* 通信作者(Corresponding authors): 黄明, E-mail: huangming_2003@126.com; 李友军, E-mail: lyj@haust.edu.cn
第一作者联系方式: huchuan23@163.com

Received (收稿日期): 2025-10-16; Accepted (接受日期): 2026-02-27; Published online (网络出版日期): 2026-03-09.
URL: https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20260309.0936.002

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Luoning county). Tillage practice was the main-plot factor—rotary tillage (RT), subsoiling (SS), and plough tillage (PT)—and N rate was the subplot factor at 0 (N0), 120 (N120), 180 (N180), and 240 (N240) kg hm^{-2}. We measured grain yield, protein content and protein fractions, grain Zn content, and key processing-quality traits. Tillage practice and N rate significantly affected wheat yield and quality; their interaction significantly influenced grain yield, protein yield, and the contents of all protein components except albumin. Compared with PT and RT, SS increased grain yield by 6.9% and 12.6%, respectively, and increased protein yield by 7.7% and 14.5%, while generally improving protein content, most protein fractions, processing quality, and grain Zn content (with a few site-year exceptions). Relative to PT, SS increased albumin, globulin, gliadin, and glutenin contents as well as dough development time, stability time, wet gluten content, sedimentation value, extensibility, maximum resistance, and grain Zn content by 21.9%, 19.0%, 12.5%, 8.0%, 18.6%, 28.4%, 8.2%, 26.4%, 10.1%, 14.0%, and 12.6%, respectively; compared with RT, the corresponding increases were 22.0%, 19.6%, 19.7%, 15.0%, 19.5%, 32.8%, 9.1%, 27.8%, 10.3%, 22.6%, and 23.2%, respectively. Across all tillage practices, increasing N rate led to an initial increase followed by a plateau in yield, protein yield, protein fractions, processing-quality traits, and grain Zn content. In most cases, N180 and N240 did not differ significantly, and both outperformed N120. Except for grain yield at the Xiaolangdi site and gliadin content in 2021–2022, SSN180 achieved similar yield, quality, economic returns, and input–output ratio to SSN240, while outperforming the other treatments in most comparisons. Overall, subsoiling combined with 180 kg hm^{-2} N is recommended for dryland regions where one-off irrigation is available, as it can simultaneously improve wheat yield, quality, and economic benefits.

Keywords: tillage methods; nitrogen rates; dryland; wheat; yield; quality

旱地小麦占全球小麦种植面积的 75%, 其产区普遍存在干旱缺水、土壤肥力不足、土壤有效锌含量低等问题, 不仅导致产量低而不稳, 高产年份品质变劣, 还会使小麦面粉中锌等营养成分含量低造成隐性饥饿。大量研究证实, 适宜的耕作方式可有效提高旱地小麦产量, 如深松能有效打破犁底层, 降低土壤容重, 增加孔隙度, 从而增强土壤蓄水保墒能力, 在半干旱地区能显著提高作物生育期土壤含水量, 促进根系发育, 最终实现增产[1-2]。在淮北砂姜黑土地区的研究表明, 翻耕与旋耕相比可以提高小麦籽粒产量 15.4% [3], 翻耕较免耕有利于改善土壤碳库和增产, 且增产效应随试验年限的增加而增加[4]。在黄淮海东部的研究表明, 小麦季深松能促进小麦生育后期对土壤水分的吸收, 深松较翻耕的小麦产量显著升高[5], 深松+条旋耕可改善土壤耗水特性[6]、地上部生理特性[7]、干物质生产[8]和氮素吸收利用能力[9], 进而提高产量。耕作方式还可通过影响土壤微环境及植株氮代谢调控籽粒品质, 如张娟等[10]和 Sun 等[11]均发现, 深松有助于提高小麦籽粒蛋白质和湿面筋含量。氮肥对品质的改善作用尤为突出, 适宜的氮肥用量可显著提高籽粒蛋白质含量、湿面筋含量、沉降值以及面团稳定时间等关键指标[12]。然而氮肥用量超过一定范围后, 对蛋白质含量的提升效应减弱, 可能因产量的大幅提高而产生稀释效应[13], 甚至会产生因贪青晚熟、病害加重、倒伏等导致品质变劣的问题[14]。在山东灌区的研究表明, 适量增加氮肥用量会显著提高小麦蛋白质含量、湿面筋含量、沉淀值和稳定时间, 但超过一定阈值后再增加氮肥用量, 除蛋白质含量先降低后升高外均呈降低趋势[15]。此外, 耕作方式与氮肥用量对小麦产量和品质的影响存在互作效应, 且与水分供应有关[16]。孙敏等[17]的研究发现, 在雨养条件下, 丰水年采取深松并配施 225 kg hm^{-2} 氮肥有利于提高小麦籽粒蛋白质含量; 黄明等[18]研究表明, 深松配施氮肥 240 kg hm^{-2} 可提高旱地小麦产量和蛋白质含量。熊淑萍等[19]研究表明, 在灌溉条件下, 深松配施氮肥 330 kg hm^{-2} 获得最高产量, 而配施氮肥用量 225 kg hm^{-2} 能协同提高小麦产量和蛋白质含量。王福玉等[20]的研究也发现, 耕作方式和氮肥用量对小麦籽粒蛋白质含量、湿面筋含量均存在极显著的互作效应, 且耕作效应随着氮肥用量的增加而增加。

近年来, 随着高标准农田建设的推进, 部分旱地小麦产区在生育期内可实现一次灌溉(此后简称一次灌溉), 改变了旱地小麦的水分供给条件。王彬[21]研究表明, 在播前灌溉造足底墒的情况下, 春季灌一水可以协同保证小麦产量和品质, 特别是在晚播的条件下效果突出。本课题组的前期研究表明, 在播前无灌溉条件下, 生育期一次灌溉较不灌溉的小麦籽粒产量显著提高 56.0%, 且其与耕作方式和氮肥运筹互作可以显著调控小麦水氮利用效率和氮素积累转运特性[22], 但其对品质的影响效应尚未明确。而且, 当前旱地一次灌溉生产条件下, 仍多采用传统的翻耕或旋耕方式, 这些耕作每年进行且作业深度较浅, 不仅易破坏土壤团粒结构, 而且造成耕层变浅、犁底层紧实度增加, 保水能力降低且水分难以向深层土壤渗透等问题, 最终导致小麦生育后期出现干旱胁迫[23]。因此, 如何在一次灌溉条件下

创新耕作方式以最大化利用有限水分，是实现旱地小麦高产优质需要解决的关键问题。综合来看，前人关于耕作方式和氮肥用量及其互作影响小麦品质的研究多在雨养或充分灌溉或充足底墒+春季一次灌溉条件下开展，关于一次灌溉下耕作方式、氮肥用量及其互作如何调控旱地小麦产量和品质的研究鲜有报道。此外，小麦是人类膳食锌的重要来源，而目前尚无耕作方式及其与氮肥用量互作影响小麦籽粒锌含量的报道。基于此，本研究在黄土高原与黄淮海平原交汇处典型旱地麦区开展 2 年 3 点定位试验，探究一次灌溉下耕作方式和氮肥用量及二者互作对小麦籽粒产量、蛋白质及其组分含量、加工品质和锌含量的调控效应，以期为一次灌溉下旱地小麦高产优质栽培提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄土高原与黄淮海平原交汇处的典型旱地小麦产区——河南省洛阳市孟津区小浪底镇(N34.85°，E112.34°)、伊川县鸦岭镇(N34.44°，E112.39°)和洛宁县小界乡(N34.43°, E111.67°) 3 个试验点，分别用小浪底、鸦岭和小界表示。3 个试验点东西横跨 100 km，南北距离 50 km，海拔跨度 120~300 m，年均气温介于 13.7~14.5℃，种植制度包括冬小麦-夏玉米一年两熟(小浪底和鸦岭)和一年一作冬小麦(小界)。3 个试验点土壤均为壤土，试验开始前耕层 0~20 cm 土层的基础理化特性见表 1。试验期间各点的逐月降水量和温度见图 1。同一年度不同试验点的降水差异小于试验年度间的降水差异，2020—2021 年属于夏季(6—9 月)降水偏少但生育期降水偏多的年份，小麦生育期(10 月至次年 5 月)降水量为 238.1~278.4 mm，2021—2022 年属于夏季降水丰富但生育期降水偏少的年份，小麦生育期降水仅 81.6~108.8 mm。与 2021—2022 年度相比，2020—2021 年度越冬返青期(1—2 月)温度较高而孕穗至灌浆期(4 月)温度较低。

1.2 试验设计与田间管理

试验始于 2019 年 9 月，采用二因素裂区设计。主区设置旋耕(rotary tillage，RT)、深松+旋耕(subsoiling, SS)、翻耕+旋耕(plowing tillage, PT) 3 种耕作方式。其中旋耕，每年采用旋耕机作业 2 遍，整地深度为 10~15 cm；深松+旋耕是隔 1 年采用深松机耕作(30~40 cm) 1 次，作业后使用旋耕机旋耕 1 遍，非深松年份旋耕 2 遍，即 2019—2020 年度和 2021—2022 年度采用深松，2020—2021 年度采用旋耕；翻耕+旋耕每年采用铧式犁翻耕(30~35 cm)后，使用旋

表 1 试验起始时 0–20 cm 土层土壤基本理化特性

Table 1 Soil physical and chemical properties in the 0–20 cm soil layer at the start of the experiment

试验地点 Experimental site	有机质含量 Organic matter content (g kg^{-1})	全氮含量 Total N content (mg kg^{-1})	硝态氮含量 Nitrate N content (mg kg^{-1})	有效磷含量 Available P content (mg kg^{-1})	速效钾含量 Available K content (mg kg^{-1})	pH	土壤容重 Soil bulk density (g cm^{-3})	田间持水量 Field capacity (%)
小浪底 Xiaolangdi	14.7	1.11	19.36	9.0	139.6	7.57	1.35	27.4
鸦岭 Yaling	12.4	1.08	8.46	12.7	177.1	7.97	1.40	26.0
小界 Xiaojie	13.2	0.83	6.63	5.9	91.5	7.98	1.26	25.3

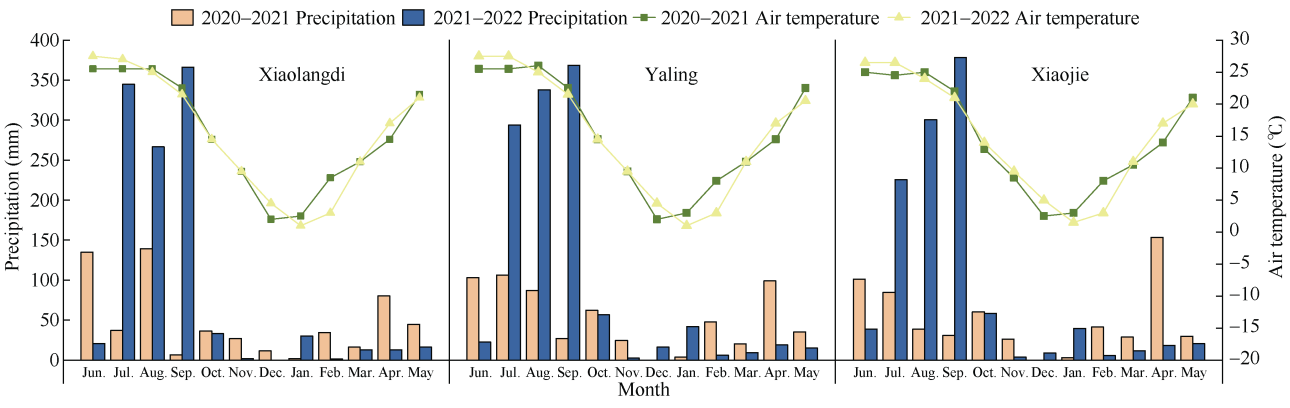


图 1 试验地 2020 年 6 月至 2022 年 5 月的逐月降水量和平均温度

Fig. 1 Monthly precipitation and mean temperature at the experimental sites from June 2020 to May 2022

耕机旋耕 1 遍。耕作时间和秸秆管理根据当地习惯执行。鸦岭和小浪底试验点耕作在小麦播种前进行, 小界试验点深松耕作在前茬小麦收获后 2 周左右进行, 翻耕在 7 月底 8 月初进行, 旋耕在播种前进行。小浪底试验点的前茬玉米秸秆被机械灭茬(3~5 cm)全量还田, 鸦岭试验点的前茬玉米秸秆作为饲料被人工收集送出试验小区, 小界试验点前茬小麦秸秆机械粉碎(3~5 cm)全量还田。副区设置 4 种氮肥用量, 依次为 0 (N0)、120 (N120)、180 (N180)和 240 kg hm^{-2} (N240)。小麦生育期仅灌溉 1 次, 即小麦返青后 0~40 cm 土层土壤含水量第 1 次低于田间持水量的 60%时, 补灌至田间持水量的 85%, 具体是在小麦返青后每 3 d 测定一次土壤含水量, 当土壤含水量低于目标值时进行灌溉, 采用水分平衡法计算补灌量(mm)。补灌量计算公式为 $m = 10 \times \rho b \times H \times (\beta_i - \beta_j)$, 式中, H 为计划湿润土层深度(cm); β_i 为 0~40 cm 土层目标土壤含水量的平均值(%, 田间持水量乘以目标土壤相对含水量); β_j 为补灌前 0~40 cm 土层土壤含水量的平均值, ρb 为计划湿润层内土壤平均容重(g cm^{-3})。小浪底、鸦岭和小界点, 2020—2021 年度的灌溉时间分别为 2021 年 2 月 23 日、2021 年 2 月 23 日和 2021 年 2 月 21 日, 灌溉量分别为 46.3、42.1 和 41.3 mm; 2021—2022 年度的灌溉时间分别为 2022 年 3 月 1 日、2022 年 3 月 4 日和 2022 年 3 月 5 日, 灌溉量分别为 41.4、38.3 和 38.1 mm。磷、钾肥用量分别为 P_2O_5 90 kg hm^{-2} 和 K_2O 60 kg hm^{-2}。所用氮、磷、钾肥分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和硫酸钾(含 K_2O 52%)。所有处理旋耕前将 50%氮肥以及全部磷、钾肥基施, 剩下 50%氮肥灌溉时人工均匀撒施。供试小麦品种为洛旱 22, 2020—2021 年度播种量为 187.5 kg hm^{-2}, 2021—2022 年度, 由于高量降雨整地和播种时间推迟至 10 月底至 11 月初进行, 且播种量增加至 225 kg hm^{-2}。所有试验地块均在次年 5 月底至 6 月初收获。病虫草害防治等田间管理措施按照当地农民生产习惯进行。

1.3　测定项目与方法

1.3.1　籽粒产量的测定　　于 2020—2021 年度和 2021—2022 年度小麦收获期, 在各小区随机选择 4 个 1 m×1 m 样方, 风干后脱粒并称重, 然后取(50 ± 5) g, 70℃烘至恒重, 测定含水量。籽粒产量以 12.5%的含水量折算。

1.3.2　小麦品质性状的测定　　在小麦产量样品中随机取 50 g, 烘干后用球磨仪(MM400, Retsch, 德国)粉碎待测。采用 AA3 连续流动分析仪(AA3, Seal, 德国)测定籽粒含氮量。籽粒粗蛋白质含量按其含氮量的 5.7 倍换算, 蛋白质产量为粗蛋白质含量与公顷籽粒干物质量的乘积[24]。籽粒中蛋白质组分含量参照《粮油籽粒品质及其分析技术》用连续提取法进行提取[25]。具体方法为称取 0.5 g 样品, 依次使用蒸馏水、10% NaCl、70%乙醇和 0.2% NaOH 溶液提取籽粒中的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白。其中, 清蛋白提取步骤为: 将盛入离心管中的样品加蒸馏水 5 mL, 振荡 30 min, 离心 15 min 取上清液, 连续提取 3 次后并入 50 mL 容量瓶中待测; 根据上述方法将清蛋白提取干净后, 分别再向离心管中加入 10% NaCl、70%乙醇和 0.2% NaOH 依次提取球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白, 提取过程同清蛋白, 提取液中的氮含量用半微量凯氏定氮法测定[25]。采用浓 HNO_3-H_2O_2 消解小麦样品, 用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Agilent Technologies Inc., 美国)测定籽粒锌含量。将用于测产的小麦后熟 1 个月, 使用 DA7250 型近红外谷物分析仪(Perten, Perten Instruments, 瑞典)测定面团形成时间、面团稳定时间、湿面筋含量、沉降值、延伸性和最大阻力。

1.3.3　经济效益分析　　参考李盼等[26]描述的方法, 根据试验过程中各处理的机械和农资投入, 计算分析经济效益和产投比。各项费用、农产品价格等按当时市场价格计算。计算公式如下: 经济效益=总产值−总投入; 产投比=总产值/总投入。

1.4　数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据分析, 采用 DPS9.50 软件进行多重比较(Duncan 新复极差法), 采用 OriginPro 2024 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　一次灌溉下不同处理对旱地小麦产量和蛋白质产量的影响

除鸦岭点蛋白质产量外, 试验年度、耕作方式、氮肥用量、试验年度与氮肥用量互作以及耕作方式与氮肥用量互作对旱地小麦产量与蛋白质产量均有显著或极显著的影响(表 2 和图 2)。3 点各处理平均产量, 2021—2022 年度较 2020—2021 年度增加 12.3%。SS 较 PT 和 RT, 2 年 3 点均值产量分别显著提高 6.9%和 12.6%, 蛋白质产量分别显著提高 7.7%和 14.5%。除 RT 下 2020—2021 年度鸦岭点产量、2021—2022 年度小浪底点产量和鸦岭点蛋白质产

量、两年度小界点产量和蛋白质产量 N180 高于 N240 外，小麦产量与蛋白质产量均随氮肥用量的增加而提高，且 PT 下 N240 和 N180 间除小浪底和鸦岭点的蛋白质产量外无显著差异，SS 下小浪底点产量以及 2020—2021 年度 3 点的蛋白质产量均表现为 N240 显著高于 N180。从 3 点均值看，除 2021—2022 年度 SS 和 PT 外，N180 的产量和蛋白质产量与 N240 相比在 3 种耕作方式下均无显著差异，这说明一次灌溉下旱地小麦施用氮肥 180 kg hm^{-2} 可达到高产和高蛋白质产量。从互作效应看，两年度中产量和蛋白质产量均表现为 SSN240 最高，SSN180 次之，二者间除 2021—2022 年度蛋白质产量外，3 点平均产量和蛋白质产量的差异在 2 个试验年度均未达到显著水平，但二者均显著高于其他处理；与 RTN0 相比，SSN180 的产量分别显著增加 33.8%~111.3%和 30.5%~106.3%，蛋白质产量分别显著增加 63.8%~145.4%和 58.3%~136.0%。综上，SSN180 可在节氮 25%的基础上获得与 SSN240 相当的产量。

2.2 一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒蛋白质含量及其组分含量的影响

除小界点粗蛋白含量、清蛋白含量、醇溶蛋白、鸦岭点粗蛋白含量和小浪底点球蛋白含量、谷蛋白

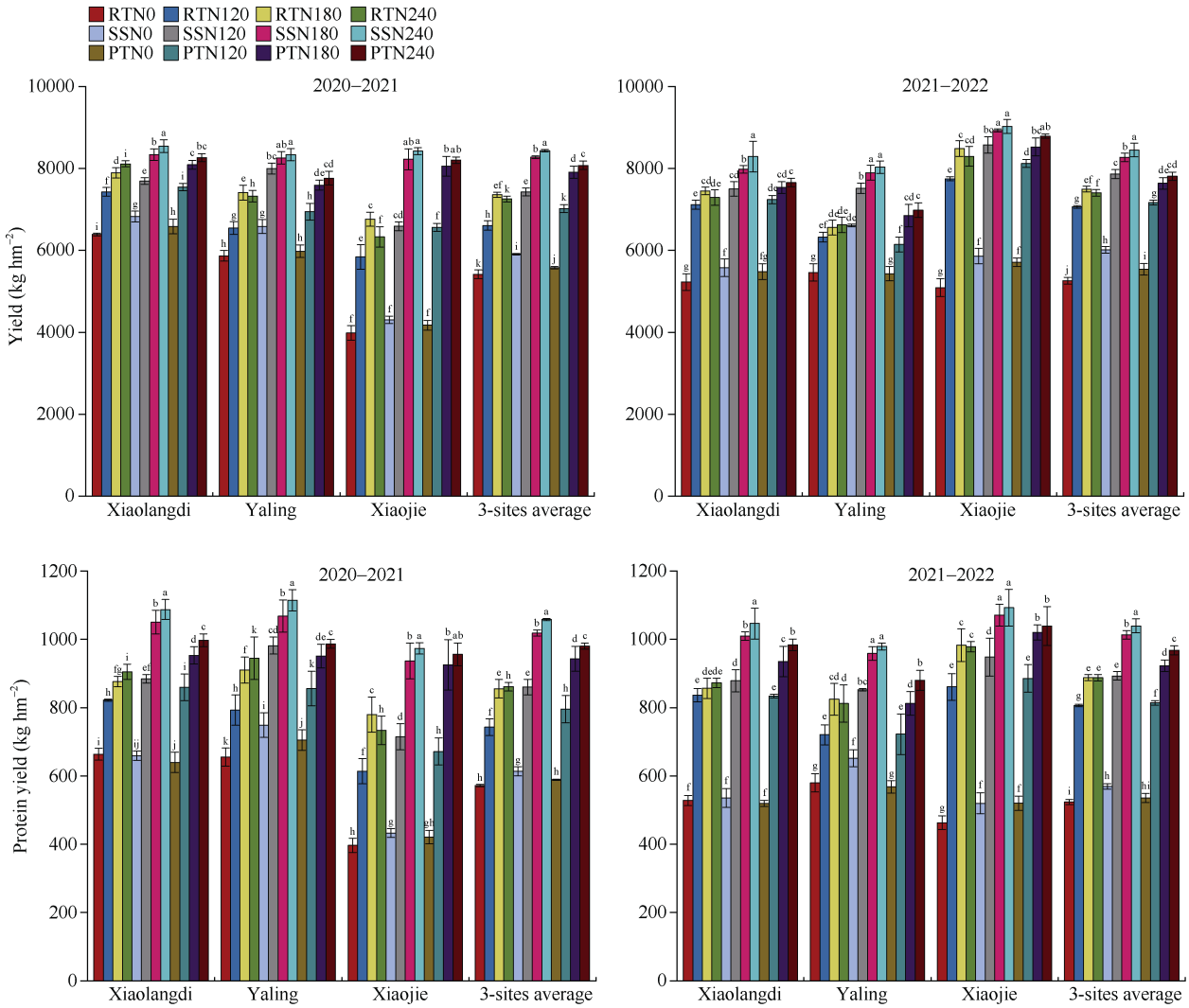


图 2 一次灌溉下不同处理对旱地小麦产量和蛋白质产量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on grain yield and protein yield of dryland wheat under one-off irrigation

RT、SS 和 PT 分别指旋耕、深松+旋耕和翻耕+旋耕。N0、N120、N180 和 N240 分别指氮肥用量为 0、120、180 和 240 kg hm^{-2}。误差线表示标准差。不同小写字母表示同一年份同一地点不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

RT, SS, and PT denote rotary tillage, subsoiling + rotary tillage, and plough tillage + rotary tillage, respectively. N0, N120, N180, and N240 denote N rates of 0, 120, 180, and 240 kg hm^{-2}, respectively. Error bars indicate standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same site in the same year ($P < 0.05$).

表 2　不同试验点小麦产量和蛋白质产量的方差分析

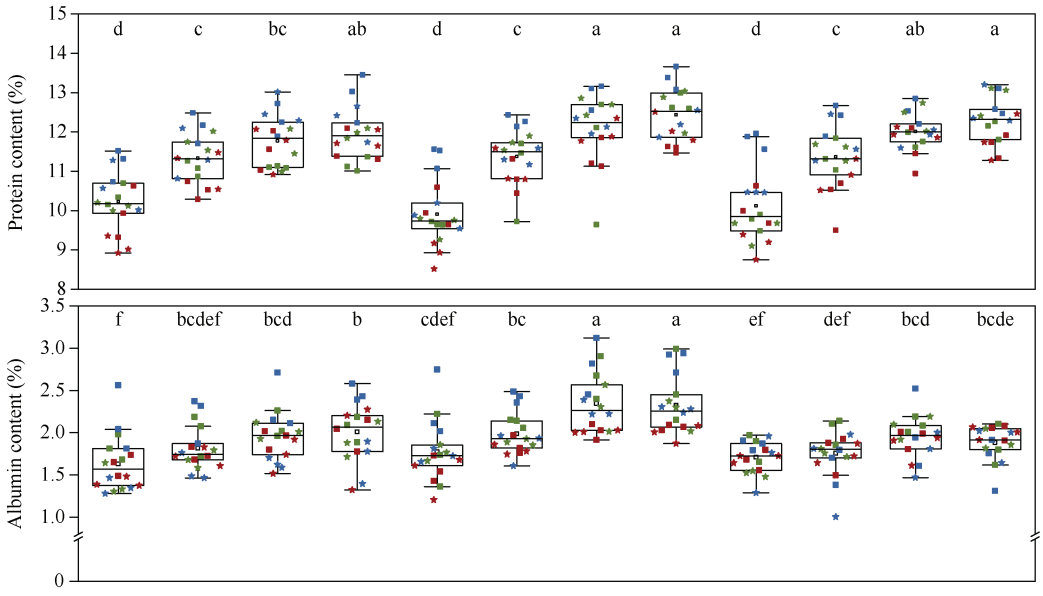
Table 2　The variance analysis of wheat yield and protein yield at different experimental sites

变异来源 Source of variance	产量 Yield				蛋白质产量 Protein yield			
	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	3 点均值 3-sites average	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	3 点均值 3-sites average
Y	232.8**	276.4**	3747.9**	0	130.1**	120.1**	5591.0**	1.9
T	40.8**	512.0**	172.9**	55.0**	174.0**	515.8**	25.0**	160.8**
N	750.0**	292.7**	1380.8**	277.3**	640.7**	240.6**	813.8**	3821.8**
Y×T	1.4	16.7**	20.2**	1.6	0.5	8.8**	2.3	4.1
Y×N	33.9**	3.4*	21.1**	2.3	15.1**	0.2	13.5**	36.3**
T×N	2.5*	2.9*	7.9**	1.0	17.7**	1.8	4.2**	17.4**
Y×T×N	1.7*	1.8	11.7**	0.4	0.6	0.5	2.2	0.9

Y、T 和 N 分别代表试验年份、耕作方式和氮肥用量。Y×T、Y×N、T×N 和 Y×T×N 分别代表试验年份与耕作方式互作、试验年份与氮肥用量互作、耕作方式与氮肥用量互作和试验年份、耕作方式与氮肥用量三者互作。数值为 *F* 值。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Y, T, and N denote trial year, tillage practice, and N application rate, respectively. Y×T, Y×N, T×N, and Y×T×N denote the interactions between year and tillage practice, year and N rate, tillage practice and N rate, and the three-way interaction among year, tillage practice, and N rate, respectively. The numerical value is the *F* value. * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

含量外, 试验年度、耕作方式和氮肥用量对旱地小麦粗蛋白含量及蛋白组分含量均具有显著或极显著影响, 且耕作方式和氮肥用量互作对醇溶蛋白含量、小浪底和小界点的球蛋白含量以及小浪底和鸦岭点的谷蛋白含量具有显著影响(附表 1 和图 3)。年度间差异分析显示, 2021—2022 年度由于降水充足、温度适宜, 各处理粗蛋白含量平均较 2020—2021 年度降低 3.2%, 主要因产量增加产生稀释效应。除 N0 外, 同一氮肥用量下, 两年度耕作方式对小麦籽粒粗蛋白含量的影响多表现为 SS > PT > RT。相较于 PT 和 RT, SS 处理下 2020—2021 年度 3 试验点均值分别平均增加 2.0%~3.3%和 2.7%~ 5.7%。SS 较 PT 和 RT, 小麦籽粒清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量平均分别增加 21.9%、19.0%、12.5%、8.0%和 22.0%、19.6%、19.7%、15.0%, 其增幅多达显著水平且随氮肥用量的增加而缩小。相同耕作方式下, 两年度中小麦籽粒粗蛋白含量及蛋白质组分含量均随氮肥用量的增加呈先增加后稳定的趋势, N180 和 N240 间无显著差异, 但较 N120 和 N0 均显著提高。从互作效应来看, 两年度各试验点的粗蛋白含量及其组分含量均表现为 SSN240 或 SSN180 最高, 但二者间无显著差异。



(图 3)

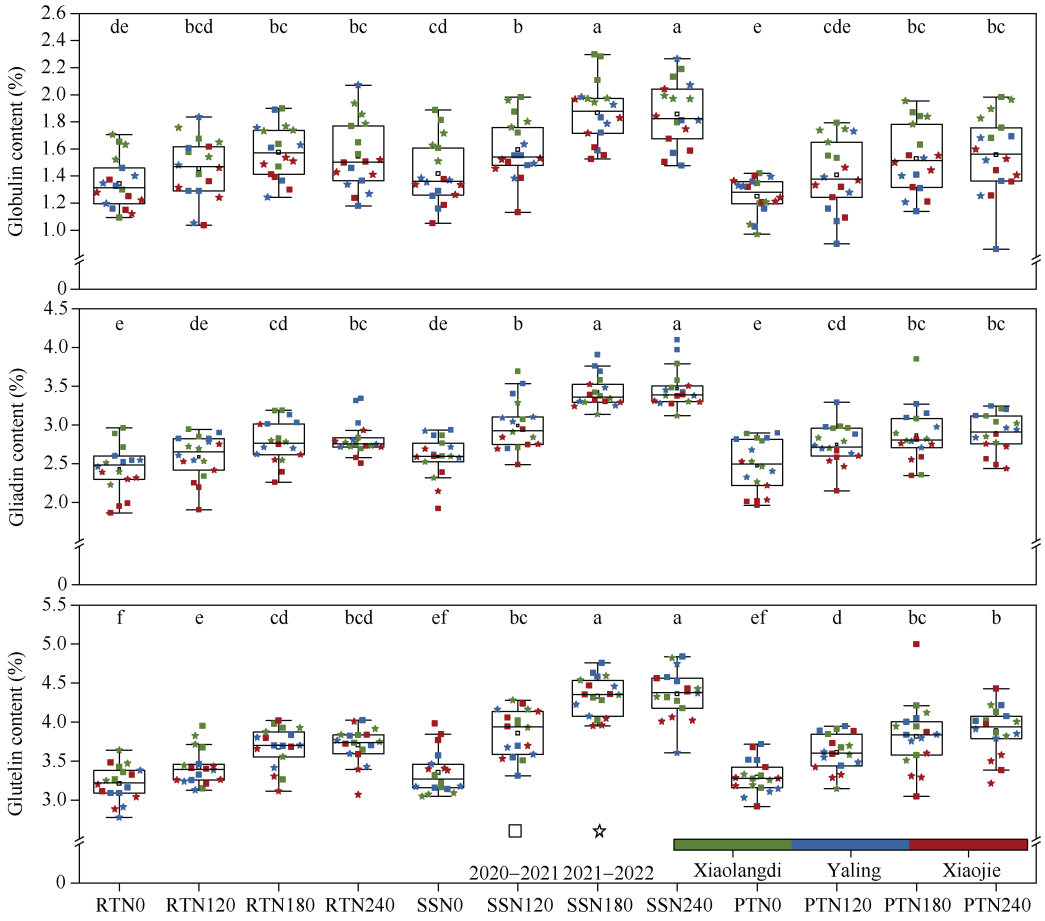


图 3 一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒粗蛋白含量及蛋白质组分含量的影响

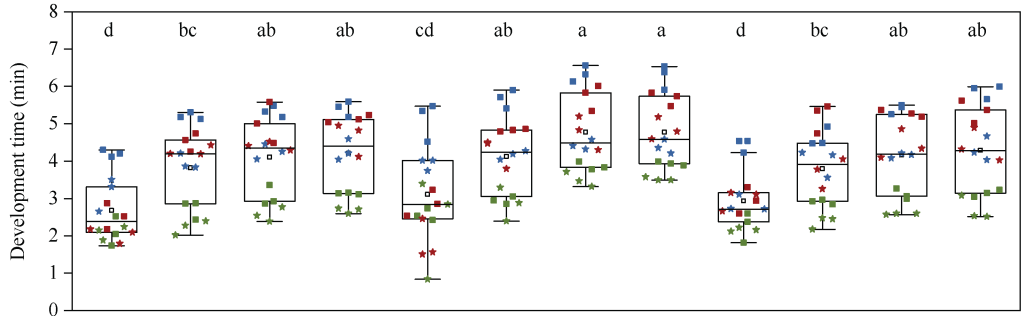
Fig. 3 Effects of different treatments on crude protein and protein fractions in dryland wheat grain under one-off irrigation

处理同图 2。方框的上、下分别为第三四分位数和第一四分位数，框内的线为中位数，框高为四分位距，框上方不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. In the boxplots, the upper and lower boundaries indicate the third and first quartiles, respectively; the line within the box indicates the median; and the box height represents the interquartile range. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

2.3 一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒加工品质的影响

除小界点面团形成时间、湿面筋含量和鸦岭点最大阻力外，试验年度、耕作方式、氮肥用量对小麦籽粒加工品质均具有显著或极显著影响，但各因素间的互作效应多不显著(附表 2，图 4)。两年度加工品质整体表现为 SS > PT > RT。SS 较 PT 和 RT，面团形成时间、稳定时间、湿面筋含量、沉降值、延伸性和最大阻力平均分别提高 18.6%、28.4%、8.2%、26.4%、10.1%、14.0%和 19.5%、32.8%、9.1%、27.8%、10.3%、22.6%。同一耕作方式下，除 2020—2021 年度小浪底点面团稳定时间、鸦岭点面团形成



(图 4)

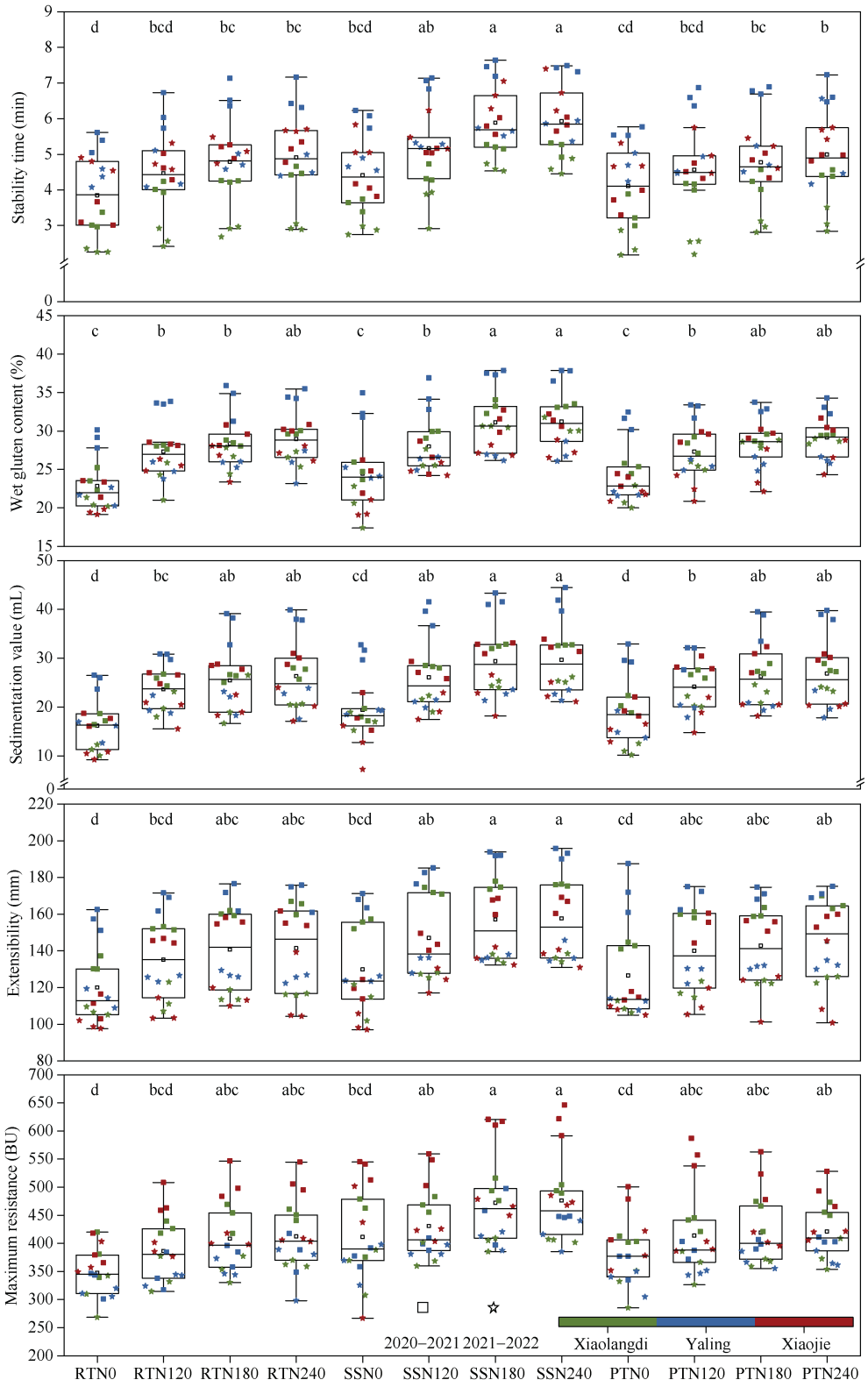


图 4　一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒加工品质的影响

Fig. 4　Effects of different treatments on grain processing-quality traits of dryland wheat under one-off irrigation

处理同图 2。方框的上、下分别为第三四分位数和第一四分位数，框内的线为中位数，框高为四分位距，框上方不同的小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. In the boxplots, the upper and lower boundaries indicate the third and first quartiles, respectively; the line within the box indicates the median; and the box height represents the interquartile range. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

时间、稳定时间、湿面筋含量、最大阻力和小界点面团形成时间、稳定时间、最大阻力以及 2021—2022 年度小浪底点沉降值、鸦岭点面团形成时间、稳定时间、沉降值、延伸性和小界点面团形成时间、延伸性表现为先升高后稳定的趋势外，一次灌溉下旱地小麦加工品质均随氮肥用量的增加而逐渐升高，N240 与 N180 间无显著差异，但均显著高于 N120 和 N0。从互作效应来看，两年度小麦籽粒加工品质均以 SSN240 或 SSN180 最高，两处理间无显著差异，但多显著高于其他处理。

2.4 一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒锌含量的影响

除试验年度对小界点籽粒锌含量无显著影响外，试验年度、耕作方式和氮肥用量对一次灌溉下旱地小麦籽粒锌含量均具有显著或极显著的调控作用，但耕作方式和氮肥用量互作对锌含量并无显著影响(表 3，图 5)。2021—2022 年度较 2020—2021 年度，小浪底、鸦岭和小界点的籽粒锌含量分别显著降低 9.1%~32.4%、36.9%~60.8%和 3.0%~22.9%。SS 三地平均籽粒锌含量与 RT 相比，2020—2021 年度和 2021—2022 年度分别显著提高 21.4%和 23.2%，与 PT 相比分别显著提高 12.6%和 12.3%，低产的 2020—2021 年度增加幅度高于高产的 2021—2022 年度。除 2020—2021 年度 3 点 SS 下、鸦岭点 PT 下以及 2021—2022 年度鸦岭点 RT 和 SS 下外，旱地小麦籽粒锌含量随着氮肥用量的增加均呈先升高后稳定的趋势，N240 和 N180 间无显著差异，但多显著高于 N120 和 N0。SSN180 与 SSN240 间小麦籽粒锌含量在两年度中均不显著，且二者多显著高于其他处理，较 SSN0 在 2020—2021 年度分别显著增加 37.0%和 51.2%，在 2021—2022 年度分别显著增加 34.3%和 58.8%。

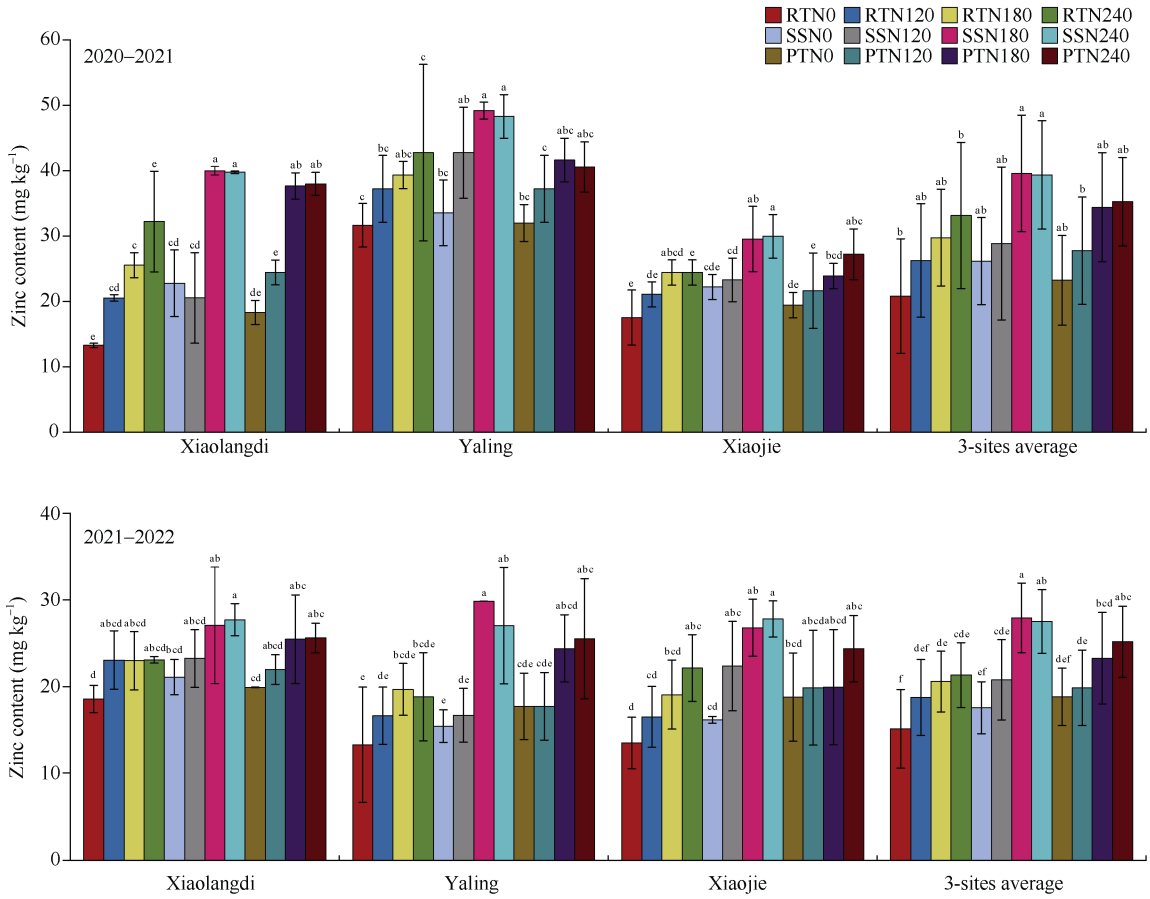


图 5 一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒锌含量的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on grain Zn content of dryland wheat under one-off irrigation

处理同图 2。不同小写字母表示同一年份同一地点不同处理间差异显著($P < 0.05$)。误差线表示标准差。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the same site in the same year ($P < 0.05$). Error bars indicate standard deviation.

表 3　不同试验点小麦籽粒锌含量的方差分析
Table 3　The variance analysis of zinc content in wheat grain at different experimental sites

变异来源 Source of variance	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	3 点均值 3-site average
Y	175.74**	282.75**	18.47	11.39**
T	15.17**	7.24*	10.23**	25.76**
N	50.75**	16.05**	14.21**	60.93**
Y×T	4.41	1.59	0.34	0.78
Y×N	16.81**	0.79	0.19	3.78*
T×N	2.00	0.91	0.66	1.86
Y×T×N	0.88	0.26	0.31	0.31

缩写同表 2。数值为 *F* 值。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。
Abbreviations are the same as those given in Table 2. The numerical value is the *F* value. * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2.5　一次灌溉下旱地小麦产量和品质指标间的相关分析

相关性分析结果(图 6)表明，籽粒产量与所测品质指标和籽粒锌含量均呈极显著正相关($P < 0.01$)，且与醇溶蛋白的相关系数最大。籽粒锌含量与所测品质指标均呈显著正相关，其与加工品质的相关性多大于其与总蛋白及蛋白质组分含量的相关性，说明提高籽粒锌含量有利于改善旱地小麦品质，特别是加工品质。除球蛋白含量外，各蛋白质组分含量与加工品质之间呈显著或极显著正相关，且加工品质中湿面筋含量与沉降值、湿面筋含量与延展性、沉降值与延展性间的相关系数大于或等于 0.90，表明湿面筋含量决定旱地小麦加工品质。加工品质指标之间的相关性大于锌含量与蛋白质含量以及蛋白质组分含量之间的相关性。

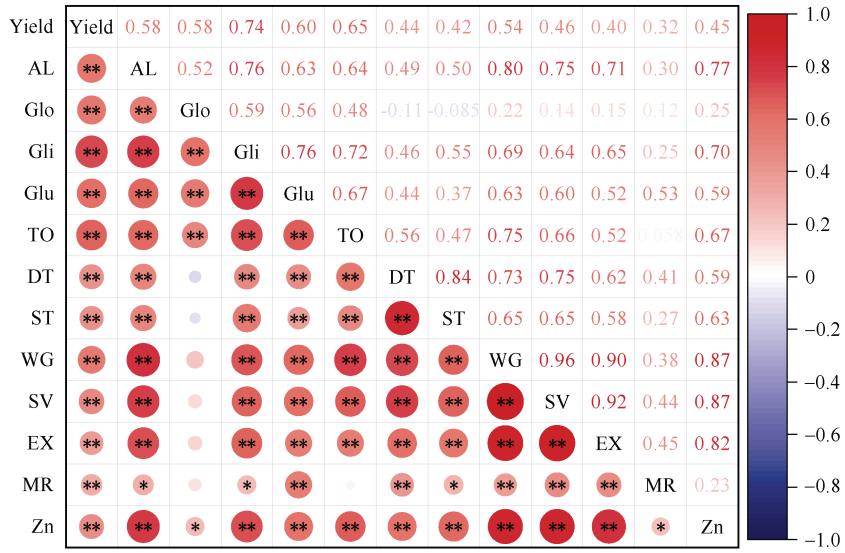


图 6　一次灌溉下旱地小麦产量、蛋白质含量、加工品质指标和锌含量间的相关性
Fig. 6　Correlations among grain yield, protein traits, processing-quality indicators, and Zn content in wheat under one-off irrigation
Yield、AL、Glo、Gli、Glu、TO、DT、ST、WG、SV、EX、MR 和 Zn 分别表示产量、清蛋白含量、球蛋白含量、醇溶蛋白含量、谷蛋白含量、粗蛋白含量、形成时间、稳定时间、湿面筋含量、沉降值、延展性、最大阻力和锌含量。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平相关性显著。
Yield, AL, Glo, Gli, Glu, TO, DT, ST, WG, SV, EX, MR, and Zn denote grain yield, albumin content, globulin content, gliadin content, glutenin content, crude protein content, dough development time, dough stability time, wet gluten content, sedimentation value, extensibility, maximum resistance, and Zn content, respectively. * and ** indicate significant correlations at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

2.6　一次灌溉下不同处理对旱地小麦经济效益的影响

除小浪底点产投比外，试验年度、耕作方式、氮肥用量和耕作方式与氮肥用量互作对一次灌溉下旱地小麦经济效益及产投比均具有显著或极显著影响(表 4)。同一施氮量下，SS 的经济效益和产投比高于 RT (除 2021—2022 年度小浪底点和小界点产投比外)和 PT，其中 N180 下 2 年 3 点经济效益平均分别提高 18.2%和 14.2%，产投比平均分别提高 13.6%和 9.9%。同一耕作方式下，经济效益和产投比均随氮肥用量的增加呈先升高后稳定的趋势，N180 与 N240 处理间无显著差异，但二者多显著高于 N0 和 N120 处理。从互作效应看，SSN180 处理 2 年 3 点的经济效益和产投比与 SSN240 均无显著差异，但二者多显著高于其

他处理。其中 SSN180 的 2 年 3 点经济效益和产投比均值相较于 SSN120 分别显著提高 10.0%和 4.2%, 相较于 RTN180 分别显著提高 14.5%和 7.1%, 相较于 PTN180 分别显著提高 10.3%和 9.4%。

表 4 一次灌溉下不同处理对旱地小麦经济效益的影响

Table 4 Effects of different treatments on the economic returns of dryland wheat under one-off irrigation

年度 Year	处理 Treatment	小浪底 Xiaolangdi		鸦岭 Yaling		小界 Xiaojie	
		经济效益 Economic benefits (Yuan hm^{-2})	产投比 Input-output ratio	经济效益 Economic benefits (Yuan hm^{-2})	产投比 Input-output ratio	经济效益 Economic benefits (Yuan hm^{-2})	产投比 Input-output ratio
2020–2021	RTN0	11,971 f	3.27 g	10,567 e	3.01 g	5491 g	2.04 f
	RTN120	14,315 d	3.49 cd	11,932 d	3.08 efg	10,027 f	2.75 d
	RTN180	15,334 bc	3.57 bc	14,034 bc	3.35 c	12,275 d	3.06 c
	RTN240	15,692 b	3.53 bc	13,562 c	3.18 de	10,882 e	2.75 d
	SSN0	13,158 e	3.50 cd	12,500 d	3.37 c	6354 g	2.21 e
	SSN120	15,023 c	3.62 b	15,853 a	3.76 a	12,042 d	3.10 c
	SSN180	16,532 a	3.77 a	16,324 a	3.73 ab	16,225 ab	3.72 a
	SSN240	16,858 a	3.72 a	16,299 a	3.63 b	16,524 a	3.66 a
	PTN0	12,089 f	3.13 h	10,457 e	2.84 h	5578 g	1.98 f
	PTN120	14,216 d	3.31 fg	12,599 d	3.05 fg	11,562 de	2.88 d
	PTN180	15,449 bc	3.42 de	14,113 bc	3.21 d	15,357 c	3.40 b
	PTN240	15,688 c	3.37 ef	14,336 b	3.17 def	15,519 bc	3.34 b
2021–2022	RTN0	8840 c	2.68 c	9476 e	2.80 de	8476 g	2.61 f
	RTN120	13,465 b	3.35 a	11,332 c	2.97 bc	15,179 e	3.65 bcd
	RTN180	14,141 b	3.37 a	11,722 c	2.96 bc	16,930 abc	3.83 a
	RTN240	13,470 b	3.17 b	11,671 c	2.88 cd	16,184 cd	3.61 bcd
	SSN0	9294 c	2.61 c	12,073 c	3.10 b	10,066 f	2.75 e
	SSN120	14,019 b	3.25 ab	14,059 b	3.26 a	16,917 abc	3.72 abc
	SSN180	15,082 a	3.33 a	14,858 a	3.30 a	17,641 a	3.73 ab
	SSN240	15,686 a	3.34 a	14,987 a	3.24 a	17,680 a	3.64 bcd
	PTN0	9110 c	2.60 c	8975 e	2.58 f	9729 f	2.71 ef
	PTN120	13,387 b	3.18 b	10,437 d	2.70 ef	15,768 de	3.56 d
	PTN180	13,955 b	3.19 b	12,106 c	2.90 cd	16,631 bc	3.60 bcd
	PTN240	14,043 b	3.12 b	12,223 c	2.85 cd	17,104 ab	3.58 cd
方差分析 ANOVA	年度 Year (Y)	281.3**	406.5**	344.4**	437.6**	3403.5**	2193.4**
	耕作方式 Tillage (T)	32.5**	51.6**	485.3**	476.8**	133.7**	72.7**
	氮肥用量 Nitrogen (N)	432.9**	153.1**	220.9**	51.5**	1527.7**	1054.8**
	Y×T	0.1	14.5**	5.9*	9.3**	25.4**	55.2**
	Y×N	27.5**	32.7**	4.1*	2.5	28.2**	36.0**
	T×N	2.9*	2.3	2.6*	2.8*	7.0**	4.9**
	Y×T×N	2.0	2.0	1.7	2.0	10.4**	10.2**

处理同图 2。同列数据后不同小写字母表示同一年份同一地点不同处理间差异显著($P < 0.05$)。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Treatments are the same as those given in Fig. 2. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among treatments at the same site in the same year ($P < 0.05$). * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

3　讨论

3.1　一次灌溉下耕作方式和氮肥用量对小麦产量和蛋白质产量的影响

本试验条件下, 一次灌溉下深松+旋耕(SS)在提高旱地小麦籽粒产量和蛋白质产量方面显著优于旋耕(RT)和翻耕+旋耕(PT)。究其原因, SS 能够打破犁底层、改善土壤物理结构[27], 显著增强了土壤的入渗能力和蓄水容量, 使有限的灌溉水和生长季自然降水能够更有效地储存在深层土壤中, 这会降低水分蒸发量, 从而在小麦关键生育时期保持较优的水分供应[16]。而传统耕作 PT 每年翻耕 30~35 cm, 长期实施易破坏土壤原有结构, 且形成犁底层, 而 RT 仅能疏松表层 10~15 cm 土壤, 犁底层更浅, 这均会使一次灌溉的有限供水多集中在表层, 易蒸发损失, 水肥利用效率低下。SS 则通过隔年进行深松作业, 既打破犁底层又避免了频繁翻耕对土壤结构的破坏, 显著增强了土壤入渗能力和蓄水容量, 使有限的灌溉水和自然降水能高效储存在深层土壤中, 实现了水分和养分的高效协同[16]。不仅如此, SS 还有利于根系下扎和拓展, 构建更深更广的根系系统[28], 这都有利于小麦更高效地吸收土壤水分和养分, 提高花后特别是灌浆中后期旗叶硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性, 延长高氮素同化能力的时间[9], 最终优化氮素积累利用特性和产量构成因素来实现产量和蛋白质产量协同提升[29]。

本研究还表明, 耕作方式与氮肥用量对小麦产量和蛋白质产量的影响多存在显著的互作效应。从 3 点均值看, 与 N240 相比, N180 小麦产量和蛋白质产量在 RT、PT 和 SS 处理下均无显著差异, 最终在深松配施氮肥 180 kg hm^{-2} 下达到理想的籽粒产量和蛋白质产量。现有研究表明, 在充分灌溉条件下深松获得高产和高蛋白质产量的最佳氮肥用量超过 225 kg hm^{-2} [19]; 在雨养条件下深松配施 225 kg hm^{-2} 氮肥, 产量较对照增加 8.3% [17], 而本研究中一次灌溉下深松配施氮肥 180 kg hm^{-2} 就可达到产量和蛋白质产量最优, 其产量较旋耕配施 240 kg hm^{-2} 氮肥在节氮 25%的同时增加 6.8%。这一差异源于水分条件对耕作方式和氮肥互作效应的影响, 在灌溉条件下小麦产量较高, 氮素需求量亦高, 旱地一次灌溉下深松后产量虽然增加, 但较灌区的产量依然较低, 对氮肥需求量也较低。Wang 等[30]在华北平原的研究也证实, 水分充足时需更高的氮肥用量来满足小麦产量和蛋白质产量的形成。

3.2　一次灌溉下耕作方式和氮肥用量对小麦蛋白质组分含量和加工品质的影响

籽粒蛋白质及其组分含量决定着小麦营养价值、加工品质和最终用途[31]。本研究发现, SS 显著提高了清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白含量, 以及面团形成时间、稳定时间、湿面筋含量、沉降值、延伸性和最大阻力。这种全面的提升可能源于深松促进的深层根系发育, 有助于保障花后氮素的持续吸收, 提高蛋白质合成相关酶的活性[17], 从而为蛋白质合成提供了充足底物和动力。这一机制在一次灌溉条件下尤为重要, 因为有限的水分供应易成为氮素吸收和蛋白质合成的限制因子, 而 SS 通过优化水分利用效率, 缓解了这一限制[10], 这也是 SS 技术相较于传统翻耕和旋耕的核心优势之一。本研究还表明, 随着氮肥用量的增加, 各蛋白质组分含量和所测加工品质指标也均增加, 但增幅随氮肥用量的增加而降低, 在超过 N180 水平后增幅不显著, 这说明一次灌溉下旱地小麦籽粒蛋白质含量和加工品质对氮肥用量的响应存在一个平台[32]。而且, 深松和增加氮肥对小麦籽粒各蛋白质组分含量和加工品质的提高作用在中低氮条件下具有协同效应, 从而使 SSN180 可达到与 SSN240 无显著差异的较高水平。这表明通过 SS 改善土壤水分利用环境, 施氮 180 kg hm^{-2} 可实现一次灌溉下旱地小麦蛋白质组分含量和加工品质的提升, 可能是因为深松配施氮肥可调控蛋白质积累特性[16], 也可能是因为氮肥用量达到阈值后, 蛋白质合成和加工品质形成的限制因子从氮素供应转向碳骨架供应、能量或酶活性等生物限制, 增施氮肥对品质改善的作用变小[33]。

本研究表明, 一次灌溉下旱地小麦达到较优品质的氮肥用量阈值较低, 为 180 kg hm^{-2}, 而充分灌溉下实现小麦优质的最佳氮肥用量多超过 240 kg hm^{-2}, 甚至超过 300 kg hm^{-2} [34-35]。此外, 董志强等[36]研究表明, 充分灌溉条件下氮肥用量是品质调控主导因子。Zörb 等[37]研究也发现, 高质量蛋白合成需要高氮投入。这一差异与旱地一次灌溉条件下的产量水平相关, 同时也体现了耕作方式优化小麦品质的重要性——SS 通过改善水分利用效率, 缓解了小麦生长发育过程中的水分限制[38], 促进了植株对氮素的吸收利用, 从而在较低氮肥用量下即可获得较优品质。这些结果表明, 耕作方式和氮肥用量对小麦产量品质的影响与生产条件特别是水分条件密切

相关, 需根据具体水分供应情况确定最适宜的氮肥用量。

协同提高各品质指标是当前小麦优质研究的重点。本研究表明, 耕作方式和氮肥用量对小麦籽粒球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量的影响具有较强的互作效应, 但对清蛋白含量和加工品质的影响多未表现出显著的互作效应, 这可能是因为耕作方式和氮肥用量对一次灌溉下旱地小麦球蛋白含量与加工品质的影响具有协同效应。相关性分析结果(图 6)也表明, 除球蛋白含量外, 各蛋白质组分含量与加工品质之间呈显著或极显著正相关, 且加工品质中湿面筋含量与沉降值、湿面筋含量与延展性、沉降值与延展性间的相关系数大于或等于 0.90。说明蛋白质组分含量和湿面筋含量共同决定着一次灌溉下旱地小麦的加工品质, 如何提高其含量应加强关注。

3.3 一次灌溉下耕作方式和氮肥用量对旱地冬小麦籽粒锌含量的影响

锌是植物、动物和人类生存所必需的微量元素, 缺锌特别是在发展中国家尤为严重[39]。目前关于耕作方式对小麦籽粒锌含量的调控效应的报道甚少。本试验条件下, SS 较 RT 和 PT 能显著提高一次灌溉下旱地小麦籽粒锌含量。其机制可能在于 SS 促进深层根系发育, 使小麦能够吸收利用较深层土壤中的锌[40], 也可能 SS 改善的土壤通气性改变了根际 pH 和微生物群落, 增强了锌的活化与吸收[41], 或是二者皆有, 但其真正机制还有待拓展试验进一步明确。本研究还表明, 小麦籽粒锌含量随氮肥用量的增加呈上升趋势, 但在氮肥用量超过 180 kg hm^{-2} 后增幅不再显著, 这可能与小麦籽粒中微量元素的积累对水分供应具有依赖性有关[40]。常旭虹等[42]在灌区的研究也证实, 实现小麦最佳籽粒锌含量的氮肥用量阈值超过 240 kg hm^{-2}, 其与本研究结果的差异再次证实了水分供应和氮肥用量对小麦微量元素积累的影响存在互作效应[43]。氮肥用量对籽粒锌含量的调控存在最适阈值, 可能是因为低分子量螯合物控制着锌在植物体内的长距离运输和向籽粒的分配, 而高氮肥用量下这些螯合物的合成作用被弱化[44]。本试验条件下, 耕作方式和氮肥用量对一次灌溉下旱地小麦籽粒锌含量的影响无显著互作效应, 但除 2020—2021 年度小浪底点 RT 外, 3 种耕作方式下 N180 和 N240 间均无显著差异, 最终使 SSN180 和 SSN240 获得最高籽粒锌含量, 二者多显著高于其他处理。这说明旱地一次灌溉条件下耕作方式和氮肥用量对小麦籽粒锌含量的调控效应均较强, 采用深松配施 180 kg hm^{-2} 氮肥, 可有效提升籽粒锌营养品质。本研究还发现, 低产年份(2020—2021 年度)小麦籽粒锌含量显著高于高产年份(2021—2022 年度), 且其对耕作方式和氮肥用量的响应也较大。这说明小麦籽粒锌含量存在稀释效应[13], 在高产年份, 快速积累的淀粉等碳水化合物稀释了籽粒中的锌浓度。这一现象警示, 在追求高产的同时, 须采取针对性措施(如叶面喷施锌肥)来抵消稀释效应, 确保小麦的锌营养品质。

4 结论

试验年度、耕作方式和氮肥用量显著调控一次灌溉下旱地小麦产量和品质, 耕作方式和氮肥用量互作也多显著调控产量、蛋白质产量和蛋白质组分含量, 但二者互作对加工品质和籽粒锌含量无显著影响。与旋耕、翻耕+旋耕相比, 深松+旋耕通过打破犁底层、优化水分和养分利用效率, 显著提高了籽粒产量与蛋白质产量、蛋白质及其组分含量、籽粒锌含量和多数加工品质指标。氮肥用量在 0~240 kg hm^{-2} 范围内, 随着氮肥用量的增加, 小麦产量和品质呈先增加后稳定的趋势, 拐点为 180 kg hm^{-2}。从互作效应看, 一次灌溉下深松+旋耕配合 180 kg hm^{-2} 氮肥的组合可在提高小麦产量的同时兼顾营养和加工品质, 且能获得较高的经济效益和产投比, 适宜在已经满足一次灌溉的旱地壤土麦区推广应用, 但在沙、黏土质地区应用时需要进一步验证。

References

[1] Liu Y G, Zhu L, Chen C L. The mechanisms and optimization strategies of tillage practices affecting soil pore structure. Geographical Res Bull, 2025, 4: 507–529.

[2] Zhang W L, Shao J H, Huang K, et al. Deep vertical rotary tillage: a sustainable agricultural practice to improve soil quality and crop yields in China. Agronomy, 2024, 14: 2060.

[3] 李金鹏, 黄敬尧, 李中蔚, 等. 不同耕作和施氮模式对淮北地区小麦干物质积累、产量及水分利用效率的影响. 麦类作物学报, 2024, 44: 195–205.
Li J P, Huang J Y, Li Z W, et al. Effects of different tillage and nitrogen application patterns on dry matter accumulation, yield and water use efficiency of wheat in Huaibei region. J Triticeae Crops, 2024, 44: 195–205 (in Chinese with English abstract).

[4] 叶新新, 王冰清, 刘少君, 等. 耕作方式和秸秆还田对砂姜黑土碳库及玉米小麦产量的影响. 农业工程学报, 2019, 35(14): 112–118.
Ye X X, Wang B Q, Liu S J, et al. Influence of tillage and straw

retention on soil carbon pool and maize-wheat yield in Shajiang black soil. Trans CSAE, 2019, 35(14): 112–118 (in Chinese with English abstract).

[5] 聂良鹏, 郭利伟, 牛海燕, 等. 轮耕对小麦-玉米两熟农田耕层构造及作物产量与品质的影响. 作物学报, 2015, 41: 468–478.
Nie L P, Guo L W, Niu H Y, et al. Effects of rotational tillage on tilth soil structure and crop yield and quality in maize-wheat cropping system. Acta Agron Sin, 2015, 41: 468–478 (in Chinese with English abstract).

[6] 王红光, 于振文, 张永丽, 等. 耕作方式对旱地小麦耗水特性和干物质积累的影响. 作物学报, 2012, 38: 675–682.
Wang H G, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Effects of tillage regimes on water consumption and dry matter accumulation in dryland wheat. Acta Agron Sin, 2012, 38: 675–682 (in Chinese with English abstract).

[7] 褚鹏飞, 于振文, 王东, 等. 耕作方式对小麦开花后旗叶水势与叶绿素荧光参数日变化和水分利用效率的影响. 作物学报, 2012, 38: 1051–1061.
Chu P F, Yu Z W, Wang D, et al. Effect of tillage mode on diurnal variations of water potential and chlorophyll fluorescence characteristics of flag leaf after anthesis and water use efficiency in wheat. Acta Agron Sin, 2012, 38: 1051–1061 (in Chinese with English abstract).

[8] 郑成岩, 崔世明, 王东, 等. 土壤耕作方式对小麦干物质生产和水分利用效率的影响. 作物学报, 2011, 37: 1432–1440.
Zheng C Y, Cui S M, Wang D, et al. Effects of soil tillage practice on dry matter production and water use efficiency in wheat. Acta Agron Sin, 2011, 37: 1432–1440 (in Chinese with English abstract).

[9] 王庆源, 于振文, 石玉, 等. 隔两年深松配合条旋耕显著提升冬小麦的氮素吸收利用效率和产量. 植物营养与肥料学报, 2024, 30: 863–872.
Wang Q Y, Yu Z W, Shi Y, et al. Strip rotary tillage combining with every two-year subsoiling increases the nitrogen use efficiency and yield of winter wheat. J Plant Nutr Fert, 2024, 30: 863–872 (in Chinese with English abstract).

[10] 张娟, 孙敏, 原亚琦, 等. 休闲期耕作对旱地小麦产量及品质的影响. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(12): 15–21.
Zhang J, Sun M, Yuan Y Q, et al. Effects of tillage during fallow period on grain yield and quality of dryland wheat. J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Edn), 2018, 38(12): 15–21 (in Chinese with English abstract).

[11] Sun M, Gao Z Q, Zhao W F, et al. Effect of subsoiling in fallow period on soil water storage and grain protein accumulation of dryland wheat and its regulatory effect by nitrogen application. PLoS One, 2013, 8: e75191.

[12] 刘霞, 李青常, 王振林, 等. 施氮水平对小麦籽粒蛋白质组分和加工品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13: 70–76.
Liu X, Li Q C, Wang Z L, et al. Effects of nitrogen rates on grain protein components and processing quality of wheat. Plant Nutr Fert Sci, 2007, 13: 70–76 (in Chinese with English abstract).

[13] Wang S N, Meckling K A, Marcone M F, et al. Synergistic, additive, and antagonistic effects of food mixtures on total antioxidant capacities. J Agric Food Chem, 2011, 59: 960–968.

[14] Yang R, Liang X, Torrion J A, et al. The influence of water and nitrogen availability on the expression of end-use quality parameters of spring wheat. Agronomy, 2018, 8: 257.

[15] 唐继伟, 孙文彦, 田昌玉, 等. 不同氮肥类型和用量对小麦产量和加工品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 728–740.
Tang J W, Sun W Y, Tian C Y, et al. Effects of different nitrogen sources and rates on the yield and processing quality of winter wheat. J Plant Nutr Fert, 2021, 27: 728–740 (in Chinese with English abstract).

[16] 吴金芝, 黄明, 李友军, 等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、水分利用效率和种植效益的影响. 水土保持学报, 2021, 35(5): 264–271.
Wu J Z, Huang M, Li Y J, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on grain yield, water use efficiency and planting profit in winter wheat in dryland. J Soil Water Conserv, 2021, 35(5): 264–271 (in Chinese with English abstract).

[17] 孙敏, 高志强, 赵维峰, 等. 休闲期深松配施氮肥对旱地土壤水分及小麦籽粒蛋白质积累的影响. 作物学报, 2014, 40: 1286–1295.
Sun M, Gao Z Q, Zhao W F, et al. Effect of subsoiling in fallow period and nitrogen application on soil moisture and grain protein accumulation in dryland wheat. Acta Agron Sin, 2014, 40: 1286–1295 (in Chinese with English abstract).

[18] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响. 草业学报, 2018, 27(9): 34–44.
Huang M, Wu J Z, Li Y J, et al. Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands. Acta Pratac Sin, 2018, 27(9): 34–44 (in Chinese with English abstract).

[19] 熊淑萍, 王静, 王小纯, 等. 耕作方式及施氮量对砂姜黑土区小麦氮代谢及籽粒产量和蛋白质含量的影响. 植物生态学报, 2014, 38: 767–775.
Xiong S P, Wang J, Wang X C, et al. Effects of tillage and nitrogen addition rate on nitrogen metabolism, grain yield and protein content in wheat in lime concretion black soil region. Chin J Plant Ecol, 2014, 38: 767–775 (in Chinese with English abstract).

[20] 王福玉, 陈贵菊, 孙雷明, 等. 耕作方式与施氮量互作对小麦生长、产量与品质的影响. 中国农学通报, 2022, 38(9): 20–26.
Wang F Y, Chen G J, Sun L M, et al. Interaction between tillage modes and nitrogen application rates: effects on the growth, yield and quality of wheat. Chin Agric Sci Bull, 2022, 38(9): 20–26 (in Chinese with English abstract).

[21] 王彬. 限水灌溉下极端晚播冬小麦的产量形成与水氮利用特征. 中国农业大学博士学位论文, 北京, 2016.
Wang B. Characteristics of Yield Formation and Water-nitrogen Use in Extremely-late Sown Winter Wheat with Increased Seeding Rate under Limited Irrigation. PhD Dissertation of China Agricultural University, Beijing, China, 2016 (in Chinese with English abstract).

[22] Zhao K N, Wang H T, Wu J Z, et al. One-off irrigation improves water and nitrogen use efficiency and productivity of wheat as mediated by nitrogen rate and tillage in drought-prone areas. Field Crops Res, 2023, 295: 108898.

[23] 祁小平, 李广, 闫丽娟, 等. 耕作和施肥方式对陇中旱作春小麦氮素利用与硝态氮残留的影响. 麦类作物学报, 2023, 43:

477–486.
Qi X P, Li G, Yan L J, et al. Effects of tillage and fertilization methods on nitrogen use efficiency and nitrate residue of spring wheat in dry farming of central Gansu province. J Triticeae Crops, 2023, 43: 477–486 (in Chinese with English abstract).

[24] 朱新开, 周君良, 封超年, 等. 不同类型专用小麦籽粒蛋白质及其组分含量变化动态差异分析. 作物学报, 2005, 31: 342–347.
Zhu X K, Zhou J L, Feng C N, et al. Differences of protein and its component accumulation in wheat for different end uses. Acta Agron Sin, 2005, 31: 342–347 (in Chinese with English abstract).

[25] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术. 北京: 农业出版社, 1985. pp 57–60.
He Z F. Grain Quality of Grain and Oil and Its Analysis Technology. Beijing: Agriculture Press, 1985. pp 57–60 (in Chinese).

[26] 李盼, 陈桂平, 苟志文, 等. 绿洲灌区春小麦光能利用与水分生产效益对秸秆还田方式的响应. 作物学报, 2023, 49: 1316–1326.
Li P, Chen G P, Gou Z W, et al. Response on light energy utilization and water production benefit of spring wheat to straw retention in an oasis irrigated area. Acta Agron Sin, 2023, 49: 1316–1326 (in Chinese with English abstract).

[27] 郑成岩, 于振文, 张永丽, 等. 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响. 生态学报, 2013, 33: 2260–2271.
Zheng C Y, Yu Z W, Zhang Y L, et al. Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat. Acta Ecol Sin, 2013, 33: 2260–2271 (in Chinese with English abstract).

[28] 梁海, 陈宝成, 韩惠芳, 等. 深松 35 cm 可改善潮棕壤理化性质并提高小麦和玉米产量. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 1879–1886.
Liang H, Chen B C, Han H F, et al. Subsoiling 35 cm in depth improve soil physicochemical properties and increase grain yields of wheat and maize in aquic brown soil. J Plant Nutr Fert, 2019, 25: 1879–1886 (in Chinese with English abstract).

[29] 李文倩, 韩明明, 张海军, 等. 耕作措施和施氮量对小麦籽粒产量、籽粒蛋白质含量和氮素利用率的影响. 中国农学通报, 2024, 40(14): 1–12.
Li W Q, Han M M, Zhang H J, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on grain yield, grain protein content and nitrogen use efficiency in wheat. Chin Agric Sci Bull, 2024, 40(14): 1–12 (in Chinese with English abstract).

[30] Wang D, Liu S, Guo M, et al. Optimizing nitrogen fertilization and irrigation practices for enhanced winter wheat productivity in the North China Plain: a meta-analysis. Plants, 2025, 14: 1686.

[31] 石玉, 谷淑波, 于振文, 等. 不同品质类型小麦籽粒贮藏蛋白组分含量及相关酶活性. 作物学报, 2011, 37: 2030–2038.
Shi Y, Gu S B, Yu Z W, et al. Contents of protein components stored in grains and activities of related enzymes in wheat cultivars in different quality types. Acta Agron Sin, 2011, 37: 2030–2038 (in Chinese with English abstract).

[32] 王荣荣, 徐宁璐, 黄修利, 等. 一次灌溉和氮肥运筹对旱地小麦籽粒产量和品质的影响. 中国农业科学, 2025, 58: 43–57.
Wang R R, Xu N L, Huang X L, et al. Effects of one-off irrigation and nitrogen fertilizer management on grain yield and quality in dryland wheat. Sci Agric Sin, 2025, 58: 43–57 (in Chinese with English abstract).

[33] 孟维伟, 王东, 于振文. 施氮量对小麦氮代谢相关酶活性和籽粒蛋白质品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 10–17.
Meng W W, Wang D, Yu Z W. Effects of nitrogen fertilization on activities of nitrogen metabolism related enzymes and grain protein quality of wheat. Plant Nutr Fert Sci, 2012, 18: 10–17 (in Chinese with English abstract).

[34] 徐凤娇, 赵广才, 田奇卓, 等. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 300–306.
Xu F J, Zhao G C, Tian Q Z, et al. Effects of nitrogen fertilization on grain yield and processing quality of different wheat genotypes. Plant Nutr Fert Sci, 2012, 18: 300–306 (in Chinese with English abstract).

[35] 李秋霞, 王晨阳, 马冬云, 等. 灌水及施氮对高产区小麦产量及品质性状的影响. 麦类作物学报, 2014, 34: 102–107.
Li Q X, Wang C Y, Ma D Y, et al. Effects of irrigation and nitrogen application on grain yield, protein content and quality traits of winter wheat in high-yielding area. J Triticeae Crops, 2014, 34: 102–107 (in Chinese with English abstract).

[36] 董志强, 吕丽华, 姚艳荣, 等. 水氮互作下强筋小麦师栾 02-1 产量和品质. 作物学报, 2023, 49: 1942–1953.
Dong Z Q, Lyu L H, Yao Y R, et al. Yield and quality of strong gluten wheat Shiluan 02-1 under water and nitrogen interaction. Acta Agron Sin, 2023, 49: 1942–1953 (in Chinese with English abstract).

[37] Zörb C, Ludewig U, Hawkesford M J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply. Trends Plant Sci, 2018, 23: 1029–1037.

[38] 吴金芝, 汪洪涛, 侯园泉, 等. 提升雨养夏玉米-冬小麦两熟体系生产力和土壤硝态氮累积的最优耕作模式. 植物营养与肥料学报, 2023, 29: 614–627.
Wu J Z, Wang H T, Hou Y Q, et al. Optimum tillage pattern with high crop productivity and soil nitrate-N accumulation in rain-fed summer maize and winter wheat double cropping system. J Plant Nutr Fert, 2023, 29: 614–627 (in Chinese with English abstract).

[39] Xia H Y, Xue Y F, Liu D Y, et al. Rational application of fertilizer nitrogen to soil in combination with foliar Zn spraying improved Zn nutritional quality of wheat grains. Front Plant Sci, 2018, 9: 677.

[40] 李孟华, 于荣, 杨月娥, 等. 低锌旱地土壤水分对小麦产量和锌利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 388–394.
Li M H, Yu R, Yang Y E, et al. Effects of soil moisture on wheat grain yield and zinc utilization in zinc-deficient dryland soil. J Plant Nutr Fert, 2016, 22: 388–394 (in Chinese with English abstract).

[41] Li M, Wang S X, Tian X H, et al. Zn distribution and bioavailability in whole grain and grain fractions of winter wheat as affected by applications of soil N and foliar Zn combined with N or P. J Cereal Sci, 2015, 61: 26–32.

[42] 常旭虹, 赵广才, 王德梅, 等. 生态环境与施氮量协同对小麦籽粒微量元素含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20: 885–895.
Chang X H, Zhao G C, Wang D M, et al. Effects of ecological environment and nitrogen application rate on microelement contents of wheat grain. J Plant Nutr Fert, 2014, 20: 885–895 (in

Chinese with English abstract).

[43] 郭双双, 张敏, 付陈陈, 等. 灌水量对强筋小麦上三叶氮素代谢和籽粒加工品质的影响. 麦类作物学报, 2023, 43: 205–214. Guo S S, Zhang M, Fu C C, et al. Effect of irrigation amount on nitrogen metabolism of top-three leaves and grain processing quality of strong gluten wheat. J Triticeae Crops, 2023, 43: 205–214 (in Chinese with English abstract).

[44] Xue Y F, Eagling T, He J B, et al. Effects of nitrogen on the distribution and chemical speciation of iron and zinc in pearling fractions of wheat grain. J Agric Food Chem, 2014, 62: 4738–4746.

附表 1　一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒粗蛋白及蛋白质组分含量的方差分析

Table S1　ANOVA of the effects of different treatments on crude protein and protein fractions in dryland wheat grain under one-off irrigation

变异来源 Source of variance	粗蛋白含量 Crude protein (%)			清蛋白含量 Albumin (%)			球蛋白含量 Globulin (%)		
	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie
Y	326.26**	44.48*	0.28	31.97*	393.92*	2.29	0.14	24.29*	23.54*
T	22.55**	1.61	0.13	18.40**	39.92**	1.04	22.64**	9.22**	9.89*
N	214.23**	60.85**	130.42**	20.33**	6.09**	24.68**	48.97**	7.11**	23.74**
Y×T	3.51	22.35**	0.02	0.48	14.42**	0.27	4.64*	0.77	2.09**
Y×N	4.22*	2.37	15.25**	0.50	0.22	0.20	1.22	0.86	2.11
T×N	13.67**	1.31	0.62	1.66	1.27	1.08	4.61**	1.78	3.16*
Y×T×N	1.54	1.19	0.70	1.74	0.40	0.33	1.99	0.78	0.30

变异来源 Source of variance	醇溶蛋白含量 Gliadin (%)			谷蛋白含量 Glutenin (%)		
	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie
Y	62.92*	31.36*	10.81	0.38	25.07*	50.26*
T	14.61**	103.06**	90.09**	27.64**	22.85**	11.71**
N	15.80**	43.66**	49.43**	50.79**	76.31**	14.24**
Y×T	0.06	0.60	5.56	4.06	0.61	0.23
Y×N	1.01	2.46	0.93	0.45	1.98	0.90
T×N	2.69*	3.65**	3.52**	5.43**	4.96**	0.34
Y×T×N	0.45	1.14	0.17	1.04	1.84	0.56

Y、T 和 N 分别代表试验年份、耕作方式和氮肥用量。Y×T、Y×N、T×N 和 Y×T×N 分别代表试验年份与耕作方式互作、试验年份与氮肥用量互作、耕作方式与氮肥用量互作和试验年份、耕作方式与氮肥用量三者互作。数值为 *F* 值。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Y, T, and N denote trial year, tillage practice, and N application rate, respectively. Y×T, Y×N, T×N, and Y×T×N denote the interactions between year and tillage practice, year and N rate, tillage practice and N rate, and the three-way interaction among year, tillage practice, and N rate, respectively. The numerical value is the *F* value. * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

附表 2　一次灌溉下不同处理对旱地小麦籽粒加工品质的方差分析

Table S2　ANOVA of the effects of different treatments on grain processing-quality traits of dryland wheat under one-off irrigation

变异来源 Source of variance	形成时间 Development time (min)			稳定时间 Stability time (min)			湿面筋含量 Wet gluten content (%)		
	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie
Y	20.39*	1280.8**	94.31*	459.85**	3002.07**	26.75*	130.6**	1178.35**	34.21*
T	22.58**	118.53**	2.52	122.25**	14.76**	93.89**	22.82**	25.42**	1.03
N	27.90**	64.80**	289.86**	92.97**	22.59**	51.01**	169.95**	43.11**	98.96**
Y×T	0.20	18.06**	1.21	14.87**	0.00	3.04	1.53	4.19	0.15
Y×N	1.00	1.77	1.03	3.34*	4.21*	6.87**	3.93*	0.23	0.25
T×N	1.51	2.14	4.39**	6.24**	0.65	2.28	6.00**	1.54	1.85
Y×T×N	0.25	2.31	3.59**	1.26	0.32	0.68	0.91	1.59	1.12

(续附表 2)

变异来源 Source of variance	沉降值 Sedimentation value (mL)			延伸性 Extensibility (mm)			最大阻力 Maximum resistance (BU)		
	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie	小浪底 Xiaolangdi	鸦岭 Yaling	小界 Xiaojie
Y	135.27**	646.95**	75.06*	1660.10**	1578.18**	102.94**	692.61**	15.37	168.59**
T	30.59**	24.49**	9.72**	440.44**	47.63**	6.80*	12.98**	56.51**	23.03**
N	183.39**	49.76**	76.33**	104.22**	27.09**	77.62**	19.60**	15.59**	13.70**
Y×T	0.01	6.20*	0.32	4.94*	4.26	1.23	0.11	0.81	3.00
Y×N	0.14	8.90**	2.06	5.15**	0.74	10.80**	0.18	0.34	2.05
T×N	2.08	1.32	1.42	0.63	1.33	1.99	0.15	0.31	2.48*
Y×T×N	5.04**	1.47	0.44	3.57**	3.61**	1.53	0.06	0.25	1.25

Y、T 和 N 分别代表试验年份、耕作方式和氮肥用量。Y×T、Y×N、T×N 和 Y×T×N 分别代表试验年份与耕作方式互作、试验年份与氮肥用量互作、耕作方式与氮肥用量互作和试验年份、耕作方式与氮肥用量三者互作。数值为 *F* 值。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平差异显著。

Y, T, and N denote trial year, tillage practice, and N application rate, respectively. Y×T, Y×N, T×N, and Y×T×N denote the interactions between year and tillage practice, year and N rate, tillage practice and N rate, and the three-way interaction among year, tillage practice, and N rate, respectively. The numerical value is the *F* value. * and ** indicate significant difference at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.