

DOI: 10.11686/cyxb2024297

http://cyxb.magtech.com.cn

姜沛沛, 郭锦花, 肖慧淑, 等. 轮耕模式对旱地玉-麦两熟体系作物产量和品质的影响. 草业学报, 2025, 34(6): 181—192.

JIANG Pei-pei, GUO Jin-hua, XIAO Hui-shu, *et al.* Effect of rotational tillage patterns on the crop yield and quality in a maize-wheat (*Zea mays*—*Triticum aestivum*) double cropping system in dryland agriculture. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(6): 181—192.

## 轮耕模式对旱地玉-麦两熟体系作物产量和品质的影响

姜沛沛<sup>1</sup>, 郭锦花<sup>1</sup>, 肖慧淑<sup>1</sup>, 彭彦珉<sup>1</sup>, 张军<sup>1</sup>, 田文仲<sup>2,3</sup>, 吕军杰<sup>2,3</sup>, 吴金芝<sup>1</sup>, 王贺正<sup>1</sup>, 付国占<sup>1</sup>, 黄明<sup>1\*</sup>, 李友军<sup>1\*</sup>

(1. 河南科技大学农学院, 河南 洛阳 471023; 2. 洛阳农林科学院资源环境研究所, 河南 洛阳 471023; 3. 中国农业科学院洛阳旱农试验基地, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**为探明不同轮耕模式对旱地夏玉米—冬小麦(简称玉—麦)两熟体系作物产量和品质的影响,利用始于2004年设置在中国农业科学院洛阳旱农试验基地的玉米季免耕+麦季免耕(MNWN)、玉米季深松+麦季免耕(MSWN)、玉米季免耕+麦季3年免耕1年翻耕(MNW3N1P)、玉米季深松+麦季3年免耕1年翻耕(MSW3N1P)和传统的两季均翻耕(CK)5个处理的定位试验,分析了2015—2021年度作物产量以及2020—2021年度作物籽粒氮、磷、钾含量,蛋白质产量和冬小麦籽粒蛋白质组分含量。结果表明:MNWN、MSWN、MNW3N1P和MSW3N1P下夏玉米和冬小麦籽粒产量的差异均不显著,但与CK相比均表现出不同程度的提升,且效应因降水年型而异,其与CK相比在干旱年使小麦和周年产量分别显著提高56.2%~65.2%和28.2%~32.6%,在平水年使夏玉米产量和周年产量分别显著提高47.5%~57.7%和25.7%~29.8%,在丰水年仅使冬小麦产量显著提高18.9%~31.2%。MSW3N1P提高夏玉米、冬小麦籽粒氮磷钾含量和蛋白质产量以及小麦籽粒蛋白组分含量的效果最优,与CK相比使夏玉米籽粒氮钾含量和蛋白质产量分别显著提高4.5%、15.6%和25.8%,冬小麦籽粒氮磷含量、蛋白质产量、谷蛋白含量、谷醇比和贮藏蛋白含量分别显著提高7.7%、15.2%、109.8%、16.1%、9.6%和11.9%,周年蛋白质产量显著提高38.5%。虽然MNW3N1P较CK也能使冬小麦籽粒谷蛋白含量、谷醇比和贮藏蛋白含量分别显著提高15.9%、14.4%和9.2%,但MSW3N1P较MNW3N1P可使冬小麦籽粒醇溶蛋白和贮藏蛋白含量分别显著提高5.4%和2.5%。综合来看,玉米季深松+麦季3年免耕1年翻耕是旱地玉—麦两熟体系高产优质栽培的适宜轮耕模式。

**关键词:**轮耕;旱地;玉-麦两熟体系;产量;蛋白质及其组分含量

## Effect of rotational tillage patterns on the crop yield and quality in a maize-wheat (*Zea mays*—*Triticum aestivum*) double cropping system in dryland agriculture

JIANG Pei-pei<sup>1</sup>, GUO Jin-hua<sup>1</sup>, XIAO Hui-shu<sup>1</sup>, PENG Yan-min<sup>1</sup>, ZHANG Jun<sup>1</sup>, TIAN Wen-zhong<sup>2,3</sup>, Lyu Jun-jie<sup>2,3</sup>, WU Jin-zhi<sup>1</sup>, WANG He-zheng<sup>1</sup>, FU Guo-zhan<sup>1</sup>, HUANG Ming<sup>1\*</sup>, LI You-jun<sup>1\*</sup>

1. Agricultural College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China; 2. Luoyang Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Institute of Natural Resources Research, Luoyang 471023, China; 3. Luoyang Dryland Agriculture Test Site, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Luoyang 471023, China

**Abstract:** The objectives of this study were to investigate the effect of different rotational tillage patterns (i. e. rotation of tillage and no-tillage cropping in different years) on crop yield and quality in a dryland summer maize (*Zea*

收稿日期:2024-07-24;改回日期:2024-09-25

基金项目:河南省科技攻关项目(232102111009,222102110087)和国家重点研发计划(2021YFD1900700,2022YFD2300800)资助。

作者简介:姜沛沛(1998—),女,宁夏银川人,在读硕士。E-mail: jiangpeipei202406@163.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: huangming\_2003@126.com; lyj@haust.edu.cn

*mays*)-winter wheat (*Triticum aestivum*) double cropping system (hereafter referred to as the maize-wheat double cropping system). A field experiment was conducted with five treatments: no tillage in both the maize and wheat seasons (MNWN), subsoiling in the maize season and no tillage in the wheat season (MSWN), no tillage in the maize season plus 3 consecutive years of no-tillage and 1 year of ploughing in the wheat season (MNW3N1P), subsoiling in maize season plus 3 consecutive years of no-tillage and 1 year of ploughing in the wheat season (MSW3N1P), and conventional consecutive ploughing in the maize and wheat seasons (CK). These treatments were established in 2004 at the Luoyang Arid Farming Experimental Station of the Chinese Academy of Agricultural Sciences. The crop yields in 2015–2021, the grain nitrogen, phosphorus, and potassium contents, the protein yield of maize and wheat, and the contents of grain protein components of wheat in 2020–2021 were determined. The results showed that the differences in the grain yields of summer maize and winter wheat were not significant between MNWN and the rotational tillage treatments (MSWN, MNW3N1P, and MSW3N1P). However, the grain yields of summer maize and winter wheat were higher in all of these patterns than in CK, and the extent of the improvement varied depending on the annual precipitation. The use of rotational tillage resulted in a considerable yield enhancement compared with CK, with increases of 56.2%–65.2% for wheat (increases of 28.2%–32.6% for annual yield in the dry year) and 47.5%–57.7% for maize (increases of 25.7%–29.8% for annual yield in a normal year), and 18.9%–31.2% for wheat yield in a rainy year. Among the three rotational tillage patterns, MSW3N1P showed the best effect in terms of enhancing the grain nitrogen, phosphorus, and potassium contents and the protein yield for maize and wheat, and to improve the contents of grain protein components in wheat. Compared with CK, MSW3N1P resulted in significantly increased nitrogen and potassium contents and protein yield in maize grains (by 4.5%, 15.6%, and 25.8%, respectively), and increased nitrogen and phosphorus contents, protein yield, gluten content, glutenin:gliadin ratio, and storage protein content in winter wheat grains (by 7.7%, 15.2%, 109.8%, 16.1%, 9.6%, and 11.9%, respectively), ultimately leading to a 38.5% increase in annual protein yield. While the MNW3N1P treatment also significantly increased wheat grain gluten content, the glutenin:gliadin ratio, and storage protein content (by 15.9%, 14.4%, and 9.2%, respectively, compared with CK), the MSW3N1P treatment further significantly increased the gliadin and storage protein contents in wheat grain by 5.4% and 2.5%, respectively, compared with MNW3N1P. Therefore, MSW3N1P is recommended as the optimal rotational tillage pattern for high-yield and high-quality crops in dryland maize-wheat double cropping systems.

**Key words:** rotational tillage pattern; dryland; maize-wheat double cropping system; grain yield; protein and protein components

玉米(*Zea mays*)和小麦(*Triticum aestivum*)分别是我国第二、三大粮食作物,是我国居民能量、蛋白质及矿物质营养的重要膳食来源<sup>[1]</sup>,因而其产量高低和品质优劣直接关系国家粮食安全和人们膳食健康。河南作为我国粮食主产区之一,其玉米和小麦种植面积分别占全国的8.9%和20.0%,总产分别占全国的8.5%和27.0%<sup>[2–3]</sup>。玉米和小麦种植主要采用夏玉米—冬小麦(简称玉—麦)一年两熟复种轮作模式,这种高集约化的模式可以较好地利用光温和耕地资源,但也对耕作栽培管理提出了更高的要求,特别是在占我国总耕地面积55%且干旱频发和土壤瘠薄并存的旱地更为突出。此外,在旱地玉—麦两熟体系中,人们多采用连年玉米、小麦两季均翻耕的耕作模式,这种模式过度消耗土壤,已对作物产量和品质的提升产生了不利影响<sup>[3]</sup>。因此,探究如何通过优化耕作以提高旱地玉—麦两熟体系作物产量和品质具有重要意义。

前人研究表明,长期采用免耕、翻耕和深松任何单一土壤耕作方法均会产生不利于作物生长发育的土壤环境,影响作物水分与养分吸收和利用,从而导致作物产量和品质的降低<sup>[4–5]</sup>。将翻耕、深松和免耕等组合为不同的土壤轮耕模式,可避免或减轻长期采用同种耕作方式带来的危害,利于作物产量和效率的提升,实现农田可持续

生产<sup>[6]</sup>。王玉玲等<sup>[7]</sup>在渭北旱塬旱地的研究表明,轮耕可显著提高春玉米、冬小麦一年一熟轮作体系作物产量,其中免耕/深松较连年免耕显著增产12.1%,而深松/翻耕较连年深松显著增产4.6%。孙凯等<sup>[8]</sup>对华北灌区玉—麦两熟体系的研究表明,玉米季免耕麦季深松较连年翻耕可使玉米产量显著提高12.0%。Izumi等<sup>[9]</sup>在日本灌区的研究表明,长期免耕在小麦—大豆(*Glycine max*)两熟体系下的增产效果不明显,引入深松有利于改善作物根系分布,促进地上部生长,从而使小麦显著增产11.7%。土壤耕作在影响作物产量的同时也会影响品质,实施轮耕有利于解决长期免耕所引起的容重增加、养分表层富集等问题,构建适宜的耕层土壤特性并提高土壤肥力,从而改善作物根系分布和养分吸收利用能力,进而同时提高作物产量和品质<sup>[10]</sup>。聂良鹏等<sup>[11]</sup>在华北灌区的研究也表明,不同轮耕模式小麦—玉米轮作体系对产量和品质的提升效应不同,与两季均免耕下的周年产量和小麦籽粒蛋白质含量相比,麦季免耕、玉米季深松分别显著提高13.3%~19.4%和2.1%~2.6%,玉米季免耕、麦季深松分别提高27.7%~30.3%和3.9%~4.3%,玉米季免耕、麦季翻耕下分别提高13.5%~14.0%和2.9%~3.3%,玉米季免耕、麦季深松处理的增幅明显下降。在黄土高原旱地小麦一年一熟区,夏闲季深翻和深松较免耕均能提高小麦播前土壤蓄水量和小麦籽粒产量,优化小麦蛋白品质形成,但其效果受降水年型的影响<sup>[12]</sup>。综合来看,轮耕对作物产量和品质均有影响,但相关研究多围绕旱地小麦或玉米一年一熟体系,以及灌区玉—麦两熟或其他作物一年两熟体系展开,研究结果也不一致,从不同降水年型角度分析轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系中作物产量影响效应的研究较少,且有关长期定位轮耕模式调控作物品质,尤其是作物籽粒氮磷钾营养、蛋白质组分特征的报道尚不多见。因此,本研究依托始于2004年设置在典型旱地玉—麦两熟区的长期定位轮作模式试验,研究了不同轮耕模式对作物籽粒产量、籽粒氮磷钾含量、籽粒蛋白质含量和产量以及冬小麦籽粒蛋白质组分特征的影响,旨在为旱作玉—麦两熟区作物高产优质栽培提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于2015—2021年在河南省洛阳市洛龙区赵村(34°37' N;112°27' E)进行。该地区属典型的温带半湿润偏旱季风气候,年平均降水量为549 mm,春季少雨干旱多风,玉米季降水多以大雨形式出现、阶段性干旱频发,年平均蒸发量1870 mm。玉—麦两熟轮作为当地玉米和小麦的主要种植制度。2015—2021年逐月降水量以及2000—2021年平均月降水量见图1。依据干燥指数(drought index, DI)对夏玉米季、冬小麦季和周年降水年型进行划分,如表1所示。 $DI = (P - M) / \sigma$ ,式中: $DI$ 为干燥指数, $P$ 为当季或当年降水量(mm), $M$ 为当季或当年平均降水量(mm), $\sigma$ 为当季或当年平均降水量的标准误差<sup>[13]</sup>。干旱年  $DI < -0.35$ , 平水年  $-0.35 < DI < 0.35$ , 丰水年  $DI > 0.35$ <sup>[14]</sup>。2004年10月试验开始时耕层土壤容重为 $1.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;0~20 cm土层土壤有机质和全氮含量分别为 $15.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷和速效钾含量分别为 $10.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $166.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2020年玉米成熟期,0~20 cm土层土壤容重和养分含量在不同处理间的差异显著,详见已发表文献<sup>[15]</sup>。

### 1.2 试验设计

试验采用池栽方法,设5个处理,分别为:1)玉米季免耕+麦季免耕(MNWN):玉米季、麦季均免耕播种,即人工模仿施肥播种一体机将肥料均匀条施于两行小麦中间并压实,施肥深度15~20 cm,人工播种;玉米季将前茬小麦0~40 cm高秸秆贴地收割并均匀覆盖玉米行间,麦季将前茬玉米秸秆整秆收割并将其50%量均匀覆盖于小麦行间;2)玉米季深松+麦季免耕(MSWN):玉米季间隔深松,深度35~40 cm、带宽20 cm,两个深松带间隔60

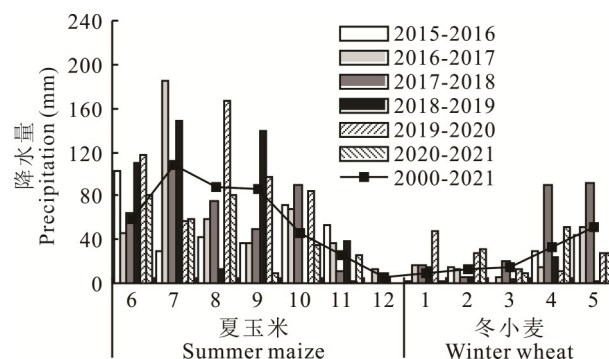


图1 2015—2021年逐月降水量和近21年的平均月降水量

Fig. 1 2015–2021 and latest 21-year average monthly precipitation

2000—2021代表2000年6月至2021年5月的平均月降水量。2000—2021 represents the average monthly precipitation from June 2000 to May 2021.

cm,麦季免耕播种,深松和免耕作业时人工模仿施肥播种一体机将肥料均匀条施于两行小麦中间并压实,施肥深度15~20 cm,人工播种,秸秆管理同MNWN;3)玉米季免耕+麦季3年免耕1年翻耕(MNW3N1P):麦季每隔3年翻耕一次(25~30 cm),翻耕年份在翻耕前人工均匀撒施肥料后立即翻耕作业,其他同MNWN;4)玉米季深松+麦季3年免耕1年翻耕(MSW3N1P):麦季每隔3年翻耕一次(25~30 cm),翻耕年份在翻耕前人工均匀撒施肥料后立即翻耕作业,其他同MSWN;5)传统两季均翻耕(CK):玉米季和麦季均翻耕(25~30 cm),在翻耕前人工均匀撒施肥料后立即翻耕,秸秆不还田。深松和翻耕作业都是人工用改良铁锹完成,且所有耕作均在作物播种前2~3 d进行。小区面积16 m<sup>2</sup>,3次重复,随机区组排列。从2015年开始,玉米品种一直为‘洛玉114’,小麦品种除2020—2021年度为‘洛旱22’外,一直为‘洛旱7号’。玉米种植密度45000株·hm<sup>-2</sup>,每年6月上旬播种,9月下旬收获。小麦播量为135 kg·hm<sup>-2</sup>,行距20 cm,每年10月上中旬人工播种、次年5月下旬或6月初收获。玉米季拔节期前后遇降水施N 138 kg·hm<sup>-2</sup>,麦季施N 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>和K<sub>2</sub>O 112.5 kg·hm<sup>-2</sup>,其肥料分别为尿素(含N 46%)和复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O=15:15:15)。全年不进行灌溉,病虫害防治等其他管理同当地丰产田。

表1 2015—2021年试验区降水年型

Table 1 Precipitation year type in the experiment area from 2015 to 2021

| 年度 Year          | 夏玉米 Summer maize |                         | 冬小麦 Winter wheat |                         | 周年 Annual |                         |
|------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|
|                  | DI               | 降水年型 Precipitation type | DI               | 降水年型 Precipitation type | DI        | 降水年型 Precipitation type |
| 2015 (2015—2016) | -1.10            | 干旱年 Dry year            | 0.31             | 平水年 Normal year         | -0.72     | 干旱年 Dry year            |
| 2016 (2016—2017) | -0.16            | 平水年 Normal year         | 0.32             | 平水年 Normal year         | 0.02      | 平水年 Normal year         |
| 2017 (2017—2018) | -0.42            | 干旱年 Dry year            | 1.98             | 丰水年 Rainy year          | 0.48      | 丰水年 Rainy year          |
| 2018 (2018—2019) | 0.52             | 丰水年 Rainy year          | -1.67            | 干旱年 Dry year            | -0.24     | 平水年 Normal year         |
| 2019 (2019—2020) | 0.74             | 丰水年 Rainy year          | 0.21             | 平水年 Normal year         | 0.68      | 丰水年 Rainy year          |
| 2020 (2020—2021) | -0.96            | 干旱年 Dry year            | -0.30            | 平水年 Normal year         | -0.85     | 干旱年 Dry year            |

DI代表干燥指数。DI represents drought index.

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 籽粒产量** 在玉米、小麦成熟期,人工采集每个小区的全部收获物,自然风干后脱粒测定质量,然后按面积换算成每hm<sup>2</sup>籽粒产量(grain yield, GY, kg·hm<sup>-2</sup>),换算公式为:每hm<sup>2</sup>籽粒产量(grain yield, GY, kg·hm<sup>-2</sup>)=小区籽粒质量(kg)/小区面积(m<sup>2</sup>)×10000。

**1.3.2 籽粒氮磷钾含量** 在2020—2021年度,从每个小区取测产样品50 g,烘干并粉碎待测。氮磷钾含量参照何刚等<sup>[16]</sup>的方法,采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>法消解,消解液冷却至室温加2 mL蒸馏水放热,再冷却至室温,定容至100 mL作为待测液。用连续流动分析仪(AA3, SEAL, 德国)和火焰光度计(M410, SHERWOOD, 英国)分别测定待测液中的氮、磷和钾浓度,然后换算出籽粒氮磷钾含量。其中,籽粒氮、磷含量(g·kg<sup>-1</sup>)= $\rho \times V \times ts \times 10^{-3} / m$ ;式中: $\rho$ 为待测液中NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、全磷、全钾的质量浓度(μg·mL<sup>-1</sup>);V为测定液体积(mL);ts为分取倍数,消煮液定容体积(mL)/吸取消煮液体积(mL);m为样品质量(g)。

**1.3.3 籽粒蛋白质产量** 蛋白质含量(protein content, PC, %)=籽粒全氮含量×谷物转换系数,小麦转换系数为5.7<sup>[17]</sup>,玉米转换系数为6.25<sup>[18]</sup>。蛋白质产量(protein yield, PY, kg·hm<sup>-2</sup>)=籽粒干物质质量(kg·hm<sup>-2</sup>)×蛋白质含量(%)<sup>[17]</sup>。

**1.3.4 小麦籽粒蛋白质组分含量的测定** 在2020—2021年度测定,具体方法是:取0.5 g样品按照清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白的顺序提取<sup>[19]</sup>,其中清蛋白的提取方法为:加2 mL去离子水充分研磨提取,移入离心管振荡30 min后4000 r·min<sup>-1</sup>离心15 min取上清液加入到50 mL容量瓶,连续提取3次并将所有上清液合并,定

容待测;球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白分别用 10% 的 NaCl、70% 的乙醇和 0.2% 的 NaOH 进行提取<sup>[19]</sup>,提取过程同清蛋白。用凯氏定氮法<sup>[12]</sup>测定各提取液中的全氮含量,乘以 5.7 即得到各蛋白组分含量。谷醇比为麦谷蛋白与醇溶蛋白含量的比值,贮藏蛋白为醇溶蛋白和麦谷蛋白之和<sup>[20]</sup>。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 整理数据,用 SPSS 17.0 进行方差分析和差异显著性检验(LSD 法),用 Origin 2022 制图。

2 结果与分析

2.1 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒产量的影响

由表 2 可知,降水年型和耕作处理对夏玉米、冬小麦和周年产量均有显著影响,但仅冬小麦与周年二者互作效应达到显著水平( $P<0.05$ )。干旱年夏玉米、冬小麦、周年产量均最低,较平水年和丰水年分别降低 21.9%、40.1%、15.3% 和 45.8%、43.8%、25.2%,除较平水年周年产量无显著差异外,其余均表现为显著降低( $P<0.05$ )。不同降水年型下各轮耕处理间夏玉米、冬小麦和周年产量均无显著差异,但其与 CK 的差异因降水年型和作物而异。MNWN、MSWN、MNW3N1P 和 MSW3N1P 与 CK 相比,在干旱年夏玉米产量无显著变化( $P>0.05$ ),而冬小麦和周年产量分别显著提高 61.3% 和 31.4%、56.2% 和 28.2%、57.4% 和 32.6%、65.2% 和 31.0%;在平水年冬小麦产量无显著变化( $P>0.05$ ),而夏玉米和周年产量分别显著提高 57.7% 和 29.8%、47.5% 和 26.6%、47.5% 和 25.7%、48.0% 和 29.1%;在丰水年仅冬小麦产量分别显著提高 22.6%、18.9%、31.2% 和 21.9%(图 2)。

表 2 不同降水年型籽粒产量均值及变异来源

Table 2 Annual average yield under different precipitation types and source of variation

| 项目<br>Item                                             | 夏玉米 Summer maize |             |            | 冬小麦 Winter wheat |             |            | 周年 Annual |             |            |
|--------------------------------------------------------|------------------|-------------|------------|------------------|-------------|------------|-----------|-------------|------------|
|                                                        | 干旱年              | 平水年         | 丰水年        | 干旱年              | 平水年         | 丰水年        | 干旱年       | 平水年         | 丰水年        |
|                                                        | Dry year         | Normal year | Rainy year | Dry year         | Normal year | Rainy year | Dry year  | Normal year | Rainy year |
| 籽粒产重 Grain yield<br>( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) | 4414c            | 5649b       | 8140a      | 2193b            | 3660a       | 3900a      | 7948b     | 9380ab      | 10625a     |
| F 值 F value                                            |                  |             |            |                  |             |            |           |             |            |
| 年型 Year (Y)                                            |                  | 724.84**    |            |                  | 272.95**    |            |           | 228.97**    |            |
| 处理 Treatment (T)                                       |                  | 44.46**     |            |                  | 33.73**     |            |           | 71.83**     |            |
| 年型×处理 Y×T                                              |                  | 0.07        |            |                  | 0.02        |            |           | 0.03        |            |

注:不同小写字母表示处理间差异在  $P<0.05$  水平显著。\*和\*\*分别表示方差分析在  $P<0.05$  和  $P<0.01$  水平差异显著。下同。  
Note: The different lowercase letters indicate the difference among treatments is significant at the  $P<0.05$  level. \* and \*\* indicate that the variance analysis was significant at the  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels. The same below.

2.2 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒氮磷钾含量的影响

长期定位轮耕模式对夏玉米和冬小麦籽粒氮磷钾含量的影响因作物而异(表 3)。对夏玉米而言,各轮耕模式较 CK 均可在一定程度上提高籽粒氮、磷、钾含量,特别是 MSW3N1P 的籽粒氮含量显著提高 4.5%, MNW3N1P 的籽粒钾含量显著提高 15.6%。对冬小麦而言,与 CK 相比, MNW3N1P 和 MSW3N1P 的籽粒氮含量分别显著提高 4.5% 和 7.7%, MSW3N1P 的籽粒磷含量显著提高 15.2%, 但 MNWN、MSWN 和 MSW3N1P 的籽粒钾含量分别显著降低 32.8%、24.2% 和 17.2%。

轮耕模式不显著影响夏玉米籽粒磷含量,但可显著影响冬小麦籽粒氮磷钾含量( $P<0.05$ ),其中,除 MNW3N1P 和 MSW3N1P 的小麦籽粒钾含量差异显著外, MS(玉米季深松,下同)和 MN(玉米季免耕,下同)间的差异不显著,但 W3N1P 较 WN 的效应因研究指标而异。与 MNWN 相比, MNW3N1P 使冬小麦籽粒氮钾含量分别显著提高 4.5% 和 41.1%, 磷含量提高 4.3%, 但差异均不显著( $P>0.05$ ); 与 MSWN 相比, MSW3N1P 使冬

小麦籽粒氮含量显著提高 8.2%，磷钾含量分别提高 8.9% 和 9.3%，但差异均不显著 ( $P>0.05$ )。可见，在麦季连续免耕条件下，玉米季深松较免耕并不影响作物籽粒氮磷钾含量，但麦季 3 年免耕 1 年翻耕较麦季免耕有提高冬小麦籽粒氮磷钾含量的趋势，且氮含量表现为显著提高 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒蛋白质产量的影响

免耕及其与深松、翻耕轮耕有利于提高旱地玉—麦两熟体系作物籽粒蛋白质产量 (图 3)。与 CK 相比，MNWN、MSWN、MNW3N1P 和 MSW3N1P 下夏玉米籽粒蛋白质产量分别提高 13.1%、11.6%、21.7% 和 25.8%，但仅 MSW3N1P 处理达到显著水平。冬小麦籽粒蛋白质产量分别显著提高 135.5%、129.6%、121.5% 和 109.8%；周年蛋白质产量分别显著提高 33.6%、29.4%、36.8% 和 38.5%。对夏玉米而言，虽各轮耕处理间差异均未达到显著水平 ( $P>0.05$ )，但 W3N1P 下的 MS 较 MN，W3N1P 较 WN 的籽粒蛋白质产量呈提高趋势。对冬小麦而言，MNWN、MSWN、MNW3N1P 和 MSW3N1P 处理的籽粒蛋白质产量显著高于 CK，但各轮耕处理间差异不显著 ( $P>0.05$ )。从周年蛋白质产量来看，MSW3N1P>MNW3N1P>MNWN>MSWN，W3N1P 较 WN 的籽粒蛋白质产量呈提高趋势。综合可见，MSW3N1P 与其他轮耕模式相比有利于夏玉米、冬小麦及周年蛋白质产量的提升。

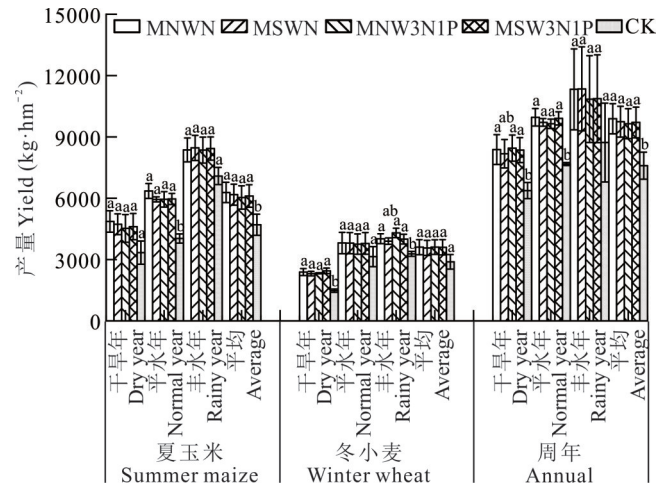


图 2 不同降水年型下不同处理对夏玉米、冬小麦及周年产量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on grain yield of summer maize, winter wheat and annual under different precipitation types

MNWN 代表玉米季免耕+麦季免耕；MSWN 代表玉米季深松+麦季免耕；MNW3N1P 代表玉米季免耕+麦季 3 年免耕 1 年翻耕；MSW3N1P 代表玉米季深松+麦季 3 年免耕 1 年翻耕；CK 代表传统两季均翻耕。下同。误差线表示标准误，柱上不同小写字母表示同一降水年型下不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。MNWN represents no tillage in both maize season and wheat season; MSWN represents subsoiling in maize season and no tillage in wheat season; MNW3N1P represents no tillage in maize season plus consecutive 3-year no-tillage and 1-year plough in wheat season; MSW3N1P represents subsoiling in maize season plus consecutive 3-year no-tillage and 1-year plough in wheat season; CK represents conventional plough after wheat and maize harvest. The same below. The error line represents the standard error. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments within the same precipitation year types ( $P<0.05$ ).

表 3 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒氮磷钾含量的影响

Table 3 Effects of different rotational tillage modes on nitrogen, phosphorus and potassium contents in grains in dryland maize-wheat double cropping system (%)

| 处理<br>Treatment | 夏玉米 Summer maize |                    |                   | 冬小麦 Winter wheat |                    |                   |
|-----------------|------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|
|                 | 氮含量              | 磷含量                | 钾含量               | 氮含量              | 磷含量                | 钾含量               |
|                 | Nitrogen content | Phosphorus content | Potassium content | Nitrogen content | Phosphorus content | Potassium content |
| MNWN            | 1.33ab           | 0.26a              | 0.35ab            | 2.21b            | 2.76b              | 2.19c             |
| MSWN            | 1.34ab           | 0.25a              | 0.34ab            | 2.20b            | 2.92ab             | 2.47bc            |
| MNW3N1P         | 1.36ab           | 0.27a              | 0.37a             | 2.31a            | 2.88ab             | 3.09a             |
| MSW3N1P         | 1.38a            | 0.25a              | 0.34ab            | 2.38a            | 3.18a              | 2.70b             |
| CK              | 1.32b            | 0.24a              | 0.32b             | 2.21b            | 2.76b              | 3.26a             |

注：同列数据不同小写字母表示处理间差异在  $P<0.05$  水平显著。下同。

Note: The different lowercase letters in the same column indicate the difference among treatments is significant at the  $P<0.05$  level. The same below.

2.4 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系冬小麦籽粒蛋白质组分的影响

从表 4 可以看出,MNWN 和 MSWN 的冬小麦籽粒蛋白质组分含量与 CK 相比均无显著差异( $P>0.05$ )。MNW3N1P 较 CK 冬小麦籽粒清蛋白、球蛋白、谷蛋白、贮藏蛋白含量和谷醇比分别显著提高 9.5%、11.4%、15.9%、9.2% 和 14.4%;较 MNWN 使冬小麦籽粒清蛋白、谷蛋白、贮藏蛋白含量和谷醇比分别显著提高 9.0%、16.2%、9.4% 和 15.3%。MSW3N1P 的冬小麦籽粒醇溶蛋白、谷蛋白、贮藏蛋白含量和谷醇比较 CK 分别显著提高 6.6%、16.1%、11.9% 和 9.6%,较 MSWN 分别显著提高 5.4%、18.4%、12.5% 和 13.2%。MSW3N1P 较 MNW3N1P 使冬小麦籽粒醇溶蛋白和贮藏蛋白含量分别显著提高 5.4% 和 2.5%。说明,MSW3N1P 有利于提高冬小麦籽粒各蛋白组分含量。

表 4 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系冬小麦籽粒蛋白质组分特征的影响

Table 4 Effects of different rotational tillage patterns on the properties of protein components in winter wheat grains in dryland maize-wheat double cropping system (%)

| 处理<br>Treatment | 清蛋白<br>Albumin | 球蛋白<br>Globulin | 醇溶蛋白<br>Gliadin | 谷蛋白<br>Glutelin | 谷醇比<br>Glutelin/gliadin | 贮藏蛋白<br>Storage protein |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| MNWN            | 2.33b          | 1.71ab          | 3.33b           | 4.14b           | 1.24c                   | 7.46c                   |
| MSWN            | 2.36b          | 1.76ab          | 3.36b           | 4.07b           | 1.21c                   | 7.43c                   |
| MNW3N1P         | 2.54a          | 1.85a           | 3.36b           | 4.81a           | 1.43a                   | 8.16b                   |
| MSW3N1P         | 2.36b          | 1.78ab          | 3.54a           | 4.82a           | 1.37b                   | 8.36a                   |
| CK              | 2.32b          | 1.66b           | 3.32b           | 4.15b           | 1.25c                   | 7.47c                   |

注:谷醇比为谷蛋白与醇溶蛋白比值。

Note: Glutelin/gliadin is the ratio of glutelin to gliadin.

3 讨论

3.1 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒产量和蛋白质产量的影响

提高作物产量仍是当前旱地作物生产的最重要目标。合理的耕作有利于形成良好的土壤环境,改善农田土壤的水肥状况,从而提升作物籽粒产量<sup>[15,21]</sup>。本研究中,不同降水年型下各轮耕模式间夏玉米、冬小麦和周年产量的差异均不显著(图 2),这与不同保护性耕作均有保水改土增产作用有关<sup>[15]</sup>。丁晋利等<sup>[22]</sup>的研究也表明,与传统耕作相比,保护性耕作显著提高冬小麦关键期 0~100 cm 土层土壤储水量,从而使产量显著提高 6.4%~11.3%。然而,MNWN 及 3 种轮耕模式较 CK 均可提高作物产量,但其增幅是否显著因降水年型和作物而异。前人研究表明,不同降水年型下作物产量表现及其对耕作的响应不同,其效应与耕作模式、种植熟制以及降水年型有关<sup>[23-25]</sup>。郭星宇等<sup>[26]</sup>在渭北旱塬玉米小麦一年一熟轮作体系的研究表明,不同年型下耕作对作物产量的提升效果不同,与传统翻耕相比,免耕在平水年使玉米籽粒产量提高 1.9%,在欠水年提高 4.7%,但在丰水年增产效果不显著;免耕在丰水年可使冬小麦籽粒产量提高 18.0%,但在欠水年增产效果不显著。于琦等<sup>[27]</sup>在陕西合阳

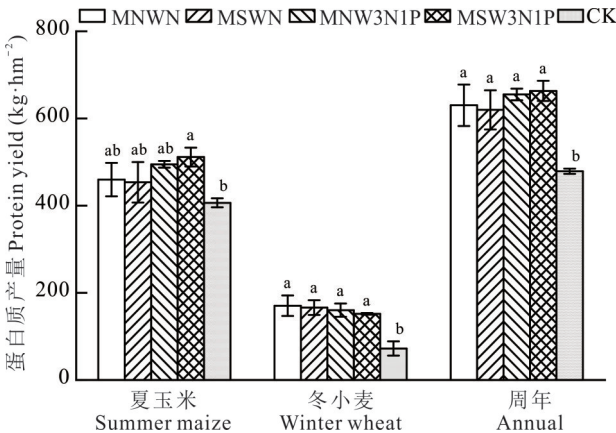


图 3 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒蛋白质产量的影响

Fig. 3 Effects of different rotational tillage patterns on grain protein yield in dryland maize-wheat double cropping system

误差线表示标准误,柱上不同小写字母表示相同作物或周年下不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。The error line represents the standard error. Different lowercase letters indicate significant difference among treatments within the same crop or annual ( $P<0.05$ ).

旱地的研究表明,免耕/免耕/深松较连年免耕,旱地一年一熟体系冬小麦籽粒产量在干旱年显著提高8.0%,在丰水年显著提高10.2%。在晋南旱地,相较夏闲期免耕,夏闲期深松在丰水年和欠水年可显著提高冬小麦产量<sup>[25]</sup>,但该地区也有研究表明夏闲期深松仅丰水年使冬小麦增产,而干旱年和平水年夏闲期深翻作用优于深松<sup>[28]</sup>。本研究中,虽然MNWN及3种轮耕模式间的作物产量差异不显著,但采用保护性耕作深松和免耕及其与传统翻耕轮耕均有利于提高旱地雨养玉—麦两熟体系中的作物产量,在干旱年和丰水年显著增加冬小麦产量,特别是在干旱年的增产幅度大;在平水年份增加夏玉米产量,从而实现周年增产。究其原因,一方面是保护性耕作处理改善了土壤特性,增加了土壤养分含量和酶活性,从而增加作物生产力<sup>[15]</sup>。另一方面,MNWN及3种轮耕模式中均采用了秸秆还田,从而改善土壤特性,提高降水入渗率,增加土壤肥力,进而促进植株养分吸收、生长发育、群体构建和干物质积累,最终较秸秆不还田的CK表现出增产<sup>[29-31]</sup>。前人的研究也表明,秸秆覆盖较秸秆不还田,在山西寿阳旱地使夏玉米产量提高6.4%<sup>[32]</sup>,在甘肃通渭旱地冬小麦产量提高23.7%<sup>[33]</sup>。

提高作物蛋白质产量有利于改善人们膳食蛋白的供应。合理的轮耕处理可以通过改善土壤结构,提高作物氮素吸收利用率,进而影响产量和蛋白质含量。方保停等<sup>[34]</sup>在洛阳旱作区的研究表明,3年中深松较翻耕蛋白质产量提高了8.0%~13.0%。熊淑萍等<sup>[35]</sup>在河南南部灌区拔节期浇1水下的研究表明,深松较翻耕和旋耕使冬小麦籽粒蛋白质含量分别提高3.6%和12.4%。本研究中,各轮耕处理均有利于提高籽粒蛋白质产量,MSW3N1P对于籽粒蛋白质产量的提升效果最突出,这可能与玉米季深松和小麦季翻耕可以改善土壤结构,降低土壤容重,增加根际层土壤含水率和土壤孔隙度,有利于根系扩张有关<sup>[27,31]</sup>,但其机理还有待进一步研究。此外,本研究仅在豫西典型旱地玉—麦两熟轮作体系开展,虽然与前人研究结果多表现为一致,但耕作或轮耕对产量和品质的影响效果还因土壤肥力、气候条件、养分管理等环境和栽培因素而产生差异<sup>[23-25,36]</sup>,因而今后需要开展多点试验验证MSW3N1P的效果。

### 3.2 不同轮耕模式对旱地玉—麦两熟体系作物籽粒品质的影响

籽粒养分含量的高低不仅反映作物的生长状况和对养分吸收利用的强度,也可表征作物的膳食营养价值。本研究中,与CK相比,MNWN及3种轮耕模式均有提高夏玉米籽粒氮磷钾和冬小麦籽粒氮磷含量的趋势,这与这些处理均有秸秆还田有关。张冬霞等<sup>[37]</sup>在河南洛阳雨养旱地的研究也发现,翻耕条件下秸秆还田较无秸秆还田可使冬小麦籽粒氮磷钾含量分别提高10.3%、18.6%和21.4%。温美娟等<sup>[38]</sup>在甘肃引黄灌区的研究也表明,深松秸秆还田对玉米氮磷钾含量较旋耕不还田分别增加49.6%、51.5%和37.6%。此外,本研究中MSW3N1P处理对夏玉米籽粒氮含量和冬小麦籽粒氮磷含量的提升效果优于其他处理。前人的研究也表明,休闲期深松可提高花前氮素转运率,促进花后氮素积累,进而有利于籽粒氮素积累<sup>[39]</sup>。这可能与MSW3N1P处理的土壤特性整体优于其他处理有关<sup>[15]</sup>。王庆源等<sup>[40]</sup>的研究认为,深松通过改善土壤结构,提高土壤对水分和氮素的吸收能力,增加影响氮代谢酶的活性,进一步提高氮素的同化能力,从而提高籽粒氮素积累量。综合来看,目前有关轮耕如何影响作物籽粒养分含量的研究还较少,未来需要加强关注并探究轮耕影响作物籽粒养分含量的机理。

籽粒蛋白质组分含量及其比例不仅可用于评价小麦籽粒营养品质,也决定着加工品质<sup>[41]</sup>。前人研究已证实,合理的土壤耕作具有保墒培肥作用,从而影响小麦籽粒蛋白质形成,但影响效应并无定论。如张礼军等<sup>[42]</sup>在陇东旱地的研究认为免耕处理的小麦籽粒蛋白质总量、球蛋白、麦谷蛋白、谷醇比均显著低于传统翻耕。孙敏等<sup>[43]</sup>在晋南旱地的研究表明,深松虽然降低了小麦籽粒部分蛋白组分含量,但其籽粒球蛋白含量提高8%~14%。其原因与上述耕作影响籽粒氮含量的机理一致<sup>[36,39-40]</sup>,也与轮耕调控小麦氮代谢酶活性进而影响籽粒蛋白质组分含量有关<sup>[44]</sup>。本研究中,MSW3N1P下冬小麦籽粒醇溶蛋白和贮藏蛋白含量显著高于其他轮耕处理,表明玉米季深松结合麦季3年免耕1年翻耕可在稳定产量的同时改善冬小麦籽粒蛋白特性,但其机理还有待进一步研究。

## 4 结论

MNWN、MSWN、MNW3N1P和MSW3N1P间夏玉米和冬小麦籽粒产量、氮磷钾含量以及冬小麦籽粒蛋白

质组分含量的差异多不显著,但与CK相比均表现出不同程度的提升,其中,麦季3年免耕1年翻耕处理(MNW3N1P和MSW3N1P)的提高效果优于麦季不翻耕处理(MNWN和MSWN)。玉米季深松麦季3年免耕1年翻耕(MSW3N1P)不仅可在稳定产量的同时提高作物籽粒氮磷钾含量和蛋白产量,而且其冬小麦籽粒蛋白组分特性最优,是可提高旱地玉—麦两熟体系下作物产量和品质的耕作模式。

## 参考文献 References:

- [1] Jia M Y, Huang L M, Li Q C, *et al.* Effects of tillage methods on physico-chemical and microbial characteristics of farmland soil and nutritional quality of wheat. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(11): 1964—1976.  
贾梦圆, 黄兰媚, 李琦聪, 等. 耕作方式对农田土壤理化性质、微生物学特性及小麦营养品质的影响. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(11): 1964—1976.
- [2] Yan W, Sun J B, Lyu H G, *et al.* Effects of foliar applications of fertilizers containing different zinc sources on grain yield and grain nutritional quality of winter wheat and summer maize. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 504—515.  
颜为, 孙金鞭, 吕洪国, 等. 不同锌源叶面喷施对冬小麦和夏玉米产量及籽粒营养品质的影响. *农业环境科学学报*, 2024, 43(3): 504—515.
- [3] Liu J, Liu J, Su R G, *et al.* Current status, problems and countermeasures of wheat and maize production in Henan province. *Journal of Agriculture*, 2015, 5(1): 5—9.  
刘娇, 刘举, 苏瑞光, 等. 河南省小麦、玉米生产现状、问题与对策. *农学学报*, 2015, 5(1): 5—9.
- [4] Zhang J J, Wang Y, Fan T L, *et al.* Effects of different tillage and fertilization modes on the soil physical and chemical properties and crop yield under winter wheat/spring corn rotation on dryland of east Gansu, Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(4): 1001—1008.  
张建军, 王勇, 樊廷录, 等. 耕作方式与施肥对陇东旱塬冬小麦—春玉米轮作农田土壤理化性质及产量的影响. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 1001—1008.
- [5] Wang Q L, Yu F X, Gao L, *et al.* Regulation of tillage on grain matter accumulation in maize. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: 1373624. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1373624>.
- [6] Zhang Y J, Wang R, Wang H, *et al.* Soil water use and crop yield increase under different long-term fertilization practices incorporated with two-year tillage rotations. *Agricultural Water Management*, 2019, 221(11): 362—370.
- [7] Wang Y L, Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1139—1150.  
王玉玲, 李军. 利于小麦—玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1139—1150.
- [8] Sun K, Liu Z, Hu H Y, *et al.* Effect of organic fertilizer and rotational tillage practices on soil carbon and nitrogen and maize yield in wheat-maize cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(3): 401—410.  
孙凯, 刘振, 胡恒宇, 等. 有机培肥与轮耕方式对夏玉米田土壤碳氮和产量的影响. *作物学报*, 2019, 45(3): 401—410.
- [9] Izumi Y, Yoshida T, Iijima M. Effects of subsoiling to the non-tilled field of wheat-soybean rotation on the root system development, water uptake, and yield. *Plant Production Science*, 2009, 12(3): 327—335.
- [10] Yan L, Jiang X X, Ji X N, *et al.* Distribution of water-stable aggregates under soil tillage practices in a black soil hillslope cropland in Northeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 24—31.
- [11] Nie L P, Guo L W, Niu H Y, *et al.* Effects of rotational tillage on till soil structure and crop yield and quality in maize-wheat cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(3): 468—478.  
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(3): 468—478.
- [12] Sun M, Ge X M, Gao Z Q, *et al.* Relationship between water storage conservation in fallow period and grains protein formation in dryland wheat in different precipitation years. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1692—1704.  
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. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1692—1704.
- [13] Guo S L, Zhu H H, Dang T H, *et al.* Winter wheat grain yield associated with precipitation distribution under long-term

- nitrogen fertilization in the semiarid Loess Plateau in China. *Geoderma*, 2012, 189(20): 442—450.
- [14] Xin N Q, Zhang Y Q, Wang L X. The study on dryland agriculture in North China. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2002.  
信乃谄, 张燕卿, 王立祥. 中国北方旱区农业研究. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [15] 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. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(4): 614—627.  
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(4): 614—627.
- [16] He G, Wang Z H, Li F C, *et al.* Nitrogen, phosphorus and potassium requirement and their physiological efficiency for winter wheat affected by soil surface managements in dryland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9): 1657—1671.  
何刚, 王朝辉, 李富翠, 等. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1657—1671.
- [17] 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 Prataculturae Sinica*, 2018, 27(9): 34—44.  
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.
- [18] Yao X Y, Qiu W, Lu H H, *et al.* Optimum combination of planting density and fertilization mode for high yield, quality and nitrogen utilization of spring-sown fresh waxy maize. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(12): 2258—2271.  
姚霄宇, 邱纹, 陆虎华, 等. 种植密度和施肥方式对春播鲜食糯玉米产量、品质及氮素吸收利用的影响. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(12): 2258—2271.
- [19] He Z F. Quality and analysis techniques of grain and oilseeds. Beijing: China Agriculture Press, 1985: 87—92.  
何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术. 北京: 中国农业出版社, 1985: 87—92.
- [20] Shi Y, Chen M X, Yu Z W, *et al.* Effects of shading at different phases of grain-filling on wheat grain protein components contents and processing quality. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2504—2510.  
石玉, 陈茂学, 于振文, 等. 灌浆期不同阶段遮光对小麦籽粒蛋白质组分含量和加工品质的影响. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2504—2510.
- [21] Yimer T, Abera G, Beyene S, *et al.* Optimizing fertilization schemes to narrow the maize yield gap in smallholder farming systems in southern Ethiopia. *Heliyon*, 2024, 10(13): e33926.
- [22] Ding J L, Wei H Y, Yang Y H, *et al.* Effects of conservation tillage on soil water condition and winter wheat yield in farmland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2501—2508.  
丁晋利, 魏红义, 杨永辉, 等. 保护性耕作对农田土壤水分和冬小麦产量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2501—2508.
- [23] Li N, Zhou C, Sun X, *et al.* Effects of ridge tillage and mulching on water availability, grain yield, and water use efficiency in rain-fed winter wheat under different rainfall and nitrogen conditions. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179(9): 86—95.
- [24] 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 Research*, 2023, 295(6): 108898.
- [25] Li N N, Sun M, Gao Z Q, *et al.* A study on the relationship between water consumption and nitrogen absorption, utilization under sub-soiling during the fallow period plus mulched-sowing in humid and dry years of dryland wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(18): 3455—3469.  
李念念, 孙敏, 高志强, 等. 极端年型旱地麦田深松和覆盖播种水分消耗与植株氮素吸收、利用关系的研究. *中国农业科学*, 2018, 51(18): 3455—3469.
- [26] Guo X Y, Wang H, Yu Q, *et al.* Effects of tillage on soil moisture and yield of wheat-maize rotation field in Weibei upland plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 2977—2990.  
郭星宇, 王浩, 于琦, 等. 耕作对渭北旱塬小麦—玉米轮作田土壤水分和产量的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 2977—2990.
- [27] Yu Q, Li J, Zhou D, *et al.* Effects of no-tillage/subsoiling rotational tillage system on increasing soil water storage and crop yield under different precipitation patterns of winter wheat in the Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11):

- 1870—1882.
- 于琦, 李军, 周栋, 等. 不同降水年型黄土旱塬冬小麦免耕与深松轮耕蓄墒增收效应. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1870—1882.
- [28] Sun M, Wen F F, Gao Z Q, *et al.* Effects of farming practice during fallow period on soil water storage and yield of dryland wheat in different rainfall years. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1459—1469.
- 孙敏, 温斐斐, 高志强, 等. 不同降水年型旱地小麦休闲期耕作的蓄水增产效应. 作物学报, 2014, 40(8): 1459—1469.
- [29] Xin Y, Xie Y, Liu Y X, *et al.* Residue cover effects on soil erosion and the infiltration in black soil under simulated rainfall experiments. *Journal of Hydrology*, 2016, 543(12): 651—658.
- [30] Zhao Z X, Wang X Y, Tian Y J, *et al.* Effects of straw returning and nitrogen fertilizer types on summer maize yield and soil ammonia volatilization under future climate change. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(1): 104—117.
- 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 等. 未来气候条件下秸秆还田和氮肥种类对夏玉米产量及土壤氨挥发的影响. 中国农业科学, 2023, 56(1): 104—117.
- [31] Zhang X T, Wang J, Feng X Y, *et al.* Effects of tillage on soil organic carbon and crop yield under straw return. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2023, 354(14): 108543.
- [32] Zhao Y H, Yin H K, Hu X C, *et al.* Effects of long-term straw returning on soil organic carbon and nitrogen components and maize yield in brown soil farmland. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(3): 80—88.
- 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 等. 长期秸秆还田对褐土农田土壤有机碳、氮组分及玉米产量的影响. 干旱地区农业研究, 2024, 42(3): 80—88.
- [33] Chen Y Z, Chai S X, Cheng H B, *et al.* Effects of straw-incorporation combined with autumn plastic mulching on soil water consumption characteristics and winter wheat yield in arid farming areas. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(2): 256—266.
- 陈玉章, 柴守玺, 程宏波, 等. 秸秆还田结合秋覆膜对旱地冬小麦耗水特性和产量的影响. 作物学报, 2019, 45(2): 256—266.
- [34] Fang B T, Li Y J, Yan G X, *et al.* Effects of tillage methods on wheat yield, nutilization and soil nitrate-N residue in dryland wheat-maize rotation system. *Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(5): 1—9.
- 方保停, 李友军, 闫广轩, 等. 耕作方式对旱作区麦—玉轮作体系小麦产量、氮素利用和土壤硝态氮残留的影响. 河南师范大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 1—9.
- [35] 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(7): 767—775.
- 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(7): 767—775.
- [36] 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. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(14): 1—12.
- 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.
- [37] Zhang D X, Ma S K, Zhang J, *et al.* Influences of different tillage methods on soil nutrient evolution, grain nutrient and yield of dryland wheat after anthesis. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(24): 73—78.
- 张冬霞, 马嵩科, 张静, 等. 不同耕作方式对旱作小麦花后土壤养分演变与籽粒养分和产量的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(24): 73—78.
- [38] Wen M J, Wang C B, Huo L, *et al.* Effects of subsoiling and straw returning on soil physical properties and maize production in Yellow River irrigation area of Gansu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 224—232.
- 温美娟, 王成宝, 霍琳, 等. 深松和秸秆还田对甘肃引黄灌区土壤物理性状和玉米生产的影响. 应用生态学报, 2019, 30(1): 224—232.
- [39] Wang X Z, Fu Z L, Zhang Q K, *et al.* Short-term subsoiling effects with different wing mounting heights before winter wheat on soil properties and wheat growth in Northwest China. *Soil and Tillage Research*, 2021, 213(9): 105151.
- [40] 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. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(5): 863—872.
- 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(5): 863—872.

- [41] Li W Y, Yan S H, Wang Z L. Comparison of grain protein components and processing quality in responses to dim light during grain filling between strong and weak gluten wheat cultivars. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(1): 265—273.  
李文阳, 闫素辉, 王振林. 强筋与弱筋小麦籽粒蛋白质组分与加工品质对灌浆期弱光的响应. *生态学报*, 2012, 32(1): 265—273.
- [42] Zhang L J, Zhang Y H, Lu Q L, *et al.* Effect of tillage model and nitrogen rate on grain quality of dryland winter wheat. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(8): 1567—1575.  
张礼军, 张耀辉, 鲁清林, 等. 耕作方式和氮肥水平对旱地冬小麦籽粒品质的影响. *核农学报*, 2017, 31(8): 1567—1575.
- [43] 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 Agronomica Sinica*, 2014, 40(7): 1286—1295.  
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(7): 1286—1295.
- [44] Zhao H M, Gao Z Q, Zhao W F, *et al.* Effect of tillage in fallow period on grain protein and its related enzyme activity in dryland wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(2): 331—338.  
赵红梅, 高志强, 赵维峰, 等. 休闲期耕作对旱地小麦籽粒蛋白质形成及其相关酶活性的影响. *麦类作物学报*, 2013, 33(2): 331—338.