

·作物水肥高效利用·

文章编号: 1672-3317(2024)06-0001-10

# 不同耕作方式和前茬作物对冬小麦 水肥利用效率及产量影响

邵云<sup>1</sup>, 王鹏飞<sup>1,2</sup>, 安佳慧<sup>1,2</sup>, 孟晔<sup>2</sup>, 陈海情<sup>2</sup>, 刘栩辰<sup>2</sup>, 刘战东<sup>2</sup>, 高阳<sup>2</sup>, 马守田<sup>2\*</sup>

(1.河南师范大学生命科学学院, 河南 新乡 453000;

2.中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002)

**摘要:**【目的】探讨不同耕作方式和前茬作物对冬小麦土壤养分、产量及水肥利用效率的影响。【方法】设置2个主处理: 旋耕(RT)和免耕(NT), 2个副处理: 玉米前茬(MW)和大豆前茬(SW), 共4个处理, 分别记为RTMW、RTSW、NTMW、NTSW, 研究不同耕作方式和前茬作物对冬小麦土壤养分、水肥利用效率及产量的影响。【结果】同一前茬作物下, 免耕处理土壤含水率高于旋耕处理; 同一耕作方式下, 玉米前茬处理土壤含水率高于大豆前茬; 冬小麦季各处理有机碳量、全氮量、速效磷量、速效钾量、铵态氮量、硝态氮量均随土层深度增加而降低。0~50 cm 土层, NTSW 处理均有利于冬小麦麦田土壤有机碳、全氮、硝态氮量的积累, 较 RTMW 处理分别提高了 4.14%~13.54%、35.51%~54.44%、55.75%~112%; 10~50 cm 土层, RTMW 处理后茬麦田速效磷、速效钾量较高; 0~50 cm 土层, RTSW 处理后茬麦田铵态氮量最高, 较 RTMW 处理高 13.39%~20.64%; NTSW 处理穗数、穗粒数、千粒质量显著高于其他处理, 且冬小麦产量也高于其他处理, 较 RTMW 处理增产 16.62%; NTSW 处理水分利用效率及氮磷钾利用效率均最高。【结论】NTSW 处理有利于冬小麦田的养分积累, 且水肥利用效率最高, 增产效果较好。

**关键词:** 旋耕; 免耕; 前茬作物; 土壤养分; 水肥利用效率; 产量

中图分类号: S512.1; S344.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023584

邵云, 王鹏飞, 安佳慧, 等. 不同耕作方式和前茬作物对冬小麦水肥利用效率及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(6): 1-9, 17.

SHAO Yun, WANG Pengfei, AN Jiahui, et al. Effect of tillage and preceding crops on yield, water and fertilizer use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(6): 1-9, 17.

## 0 引言

【研究意义】冬小麦是重要的粮食作物, 提高单产、增加总产是我国冬小麦生产发展的长期战略需求, 但随着农业供给侧改革的深入, 冬小麦需求由数量型向质量型转变, 优质高效成为我国冬小麦产业发展的必然趋势<sup>[1-2]</sup>。传统翻耕虽然对农业发展做出了巨大的贡献, 但频繁的翻耕也会破坏生态环境, 破坏土壤结构, 使得土壤耕层变浅、体积质量增大、养分失衡、保墒保肥能力减弱、抗逆缓冲能力变差等<sup>[3-4]</sup>。同时, 会抑制作物生长发育, 降低作物产量。旋耕、免耕均为农业生产上保护性耕作方式, 有增产效果, 目前已经在全国大面积推广<sup>[5]</sup>。“茬口效应”是指前茬作物以及其茬地在种植系统

中给予后茬作物多种不同影响, 可指导制订合理的轮作换茬方案, 且后茬作物生长及农田土壤耕性、养分状况受茬口效应影响显著<sup>[6]</sup>。采取合理的农耕措施, 保护农田生态环境, 提高作物产量, 对于农业可持续发展具有重要意义。【研究进展】耕作方式是影响土壤生态环境最直接的途径, 对土壤水、肥、气、热起到了调控作用, 从而影响作物最终产量。朱敏等<sup>[7]</sup>研究发现, 在麦秆还田条件下, 旋耕可改善土壤物理性状、提高土壤综合素质、改善玉米出苗率, 并可提高产量。褚鹏飞等<sup>[8]</sup>研究发现, 旋耕处理的冬小麦籽粒产量低于常规翻耕处理, 经济效益较低。但也有研究<sup>[9]</sup>表明, 冬小麦播前旋耕处理的籽粒产量高于常规翻耕和免耕处理。合理的茬口搭配不仅可以改善土壤微生态环境和养分条件并且增加农田生态系统中生物多样性, 从而协调作物与土壤关系, 促进作物高产稳产<sup>[10]</sup>。李春喜等<sup>[11]</sup>研究发现, 玉米前茬和花生前茬处理下, 冬小麦产量和籽粒中氮、磷、钾的积累量显著高于大豆前茬和甘薯前茬处理, 冬小麦产量较甘薯前茬处理分别提高 38.15%和 31.13%。杨佳等<sup>[12]</sup>研究发现, 与高粱茬、谷子茬相比, 玉米茬更有利于冬小麦产量的增加。

收稿日期: 2023-12-15 修回日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(32101856); 山东省重点研发计划(2023TZXD011); 河南省重点研发与推广专项(222102110163); 中央级公益性科研院所基本业务费项目(IF12024-04)

作者简介: 邵云(1973-), 女, 教授, 主要从事小麦生理生态研究。

E-mail: shaoyun73@126.com

通信作者: 马守田(1987-), 男, 副研究员, 主要从事作物高效用水与农田生态效应研究。E-mail: mashoutian@caas.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

【切入点】目前，关于农田耕作制度的研究很多，不同前茬作物的研究也有大量报道，但不同耕作方式与不同前茬作物的二因素研究以及有关豆禾作物作为前茬作物对后茬作物影响的研究却鲜有报道。

【拟解决的关键问题】为此，在华北平原地区种植的冬小麦-夏玉米和冬小麦-夏大豆复种模式下，研究耕作方式与前茬作物交互作用对冬小麦土壤养分、产量及水分利用效率影响，旨在为提高华北平原地区冬小麦产量提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2021 年 6 月在中国农业科学院新乡综合试验基地试验田 (35°14' N, 113°76' E, 海拔 74 m) 进行，本研究为 2022 年 10 月—2023 年 6 月冬小麦季。基地位于河南省新乡市新乡县七里营镇，地处黄淮海中部偏西的人民胜利渠引黄灌区内，属暖温带大陆性季风气候，日照时间 2 339 h，年平均气温 14 °C，年平均降水量 582 mm，是典型的冬小麦-夏玉米一年两熟区。试验期间温度和降水量见图 1。

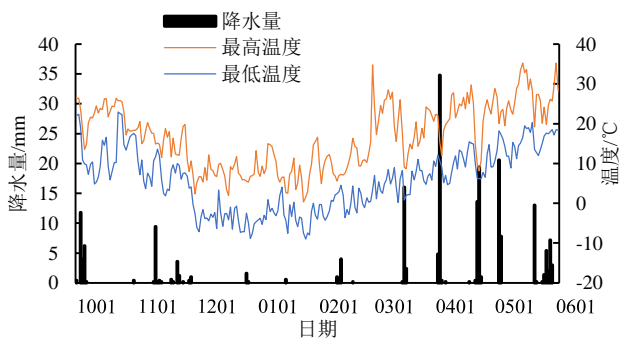


图 1 试验期间温度和降水量

Fig.1 Temperature and precipitation during the experiment

### 1.2 试验设计

以冬小麦品种周麦 22 为研究对象，采用二因素裂区设计，主因素为耕作方式，设旋耕 (RT)、免耕 (NT) 2 个处理；副因素为前茬夏作物茬口，设玉米茬 (MW)、大豆茬 (SW) 2 个茬口，共 4 个处理，其中以旋耕玉米前茬 (RTMW) 作为对照。具体耕作处理见表 1。试验小区面积 10 m×50 m，3 次重复。

于苗期和拔节期利用微喷带分别灌水 750、450 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。冬小麦和夏玉米播种量与施肥情况见表 2。

表 1 不同耕作方式及前茬作物试验的土壤耕作处理

Tab.1 Soil tillage arrangements for different tillage methods and previous crop tests

耕作方式	前茬作物安排	耕作方式及前茬作物安排
RT	MW	夏玉米免耕播种，冬小麦播前旋耕 2 遍，耕深 10~15 cm。
	SW	夏大豆免耕播种，冬小麦播前旋耕 2 遍，耕深 10~15 cm。
NT	MW	夏玉米免耕播种，冬小麦免耕播种。
	SW	夏大豆免耕播种，冬小麦免耕播种。

表 2 播种量与施肥情况

Tab.2 Sowing amount and fertilizer application

作物	品种	N/ (kg hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O/ (kg hm <sup>-2</sup> )	播种量/ (万株 hm <sup>-2</sup> )
夏玉米	登海 605	360	120	120	6
夏大豆	中黄 301	216	120	120	18.75
冬小麦	周麦 22	300	750	600	300

### 1.3 取样与测定方法

#### 1.3.1 土壤理化指标及测定

于冬小麦播种前和收获后，按“五点取样法”采集 0~10、10~20、20~30、30~50 cm 土层土壤样品。鲜土样除去肉眼可见植物残体和石块，置于冰箱中保存用于测定硝态氮和铵态氮量。风干土样进行全氮、有机碳量的测定。常规化学指标测定参考鲍士旦《土壤农化分析》：有机碳量采用重铬酸钾氧化法测定；全氮量采用凯氏定氮法测定；硝态氮和铵态氮量采用连续流动分析仪法测定；有效磷量采用钒钼蓝比色法测定；速效钾量采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提火焰光度计法测定；采用烘干法测定土壤含水率。

#### 1.3.2 冬小麦产量测定

在冬小麦成熟期，选取有代表性的样方 1 m<sup>2</sup>，将样方内的作物全部从茎基部割掉，放入网袋中。统计样方内作物有效穗数，自然风干后称质量，并进行脱粒、称质量，折算成作物产量。同时，每个样方选取有代表性的 20 穗作物带回实验室考种，统计作物穗粒数和千粒质量，每个处理选取 3 个样方测定。

#### 1.3.3 水分利用效率相关计算

土壤体积质量 (g/cm<sup>3</sup>) = 土壤干质量 / (土壤体积 × (1 - 土壤容积含水率))；

土壤贮水量 (mm) = 土壤体积质量 × 土层深度 × 土壤含水率 × 10；

土壤贮水消耗量 (mm) = 播前 100 cm 土层贮水量 - 成熟后 100 cm 土层贮水量；

生育期总耗水量 (mm) = 土壤贮水消耗量 + 冬小麦生育期总降水量 + 总灌水量；

水分利用效率 (WUE, kg / (mm·hm<sup>2</sup>)) = 冬小麦籽粒产量 / 生育期总耗水量。

#### 1.3.4 养分利用效率相关计算

植株总元素积累量 (TNAA, kg/hm<sup>2</sup>) = 成熟期单株干质量 (g) × 成熟期单株元素量 (%) × 密度 (10<sup>4</sup>/hm<sup>2</sup>) / 1 000；

元素利用效率 (kg/kg) = 籽粒产量 (kg/hm<sup>2</sup>) / TNAA (kg/hm<sup>2</sup>)。

### 1.4 数据统计

采用 Microsoft Excel 2019 整理数据与作图，使用软件 SPSS 20 软件的最小显著极差法 (LSD) 进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 耕作方式和前茬作物对土壤含水率的影响

图 2 为不同耕作方式和前茬作物对土壤含水率影响。由图 2 可知，不同种植模式下土壤含水率差异显著 ( $P<0.05$ )，且随着土层深度增加和生育期后移差异逐渐变大，各生育期 0~100 cm 土层土壤水分分布趋势基本一致，土壤含水率随土层深度增加呈先增加后减小再增大的趋势。冬小麦播前，0~20 cm 土层，RTMW 处理土壤含水率最高为 21.26%，而

20~80 cm 土层，NTMW 处理土壤含水率均高于其他处理。拔节期，RTSW、NTMW 处理土壤含水率显著高于其他处理。灌浆期，免耕处理土壤含水率显著高于旋耕处理。成熟期，RTMW、RTSW、NTSW 处理土壤含水率均随土层深度的增加呈先增加后减小再增大的趋势，而 NTMW 处理土壤含水率随着土层深度增加而增加。总体而言，免耕处理土壤含水率高于旋耕处理，玉米茬口的土壤含水率高于大豆茬口。

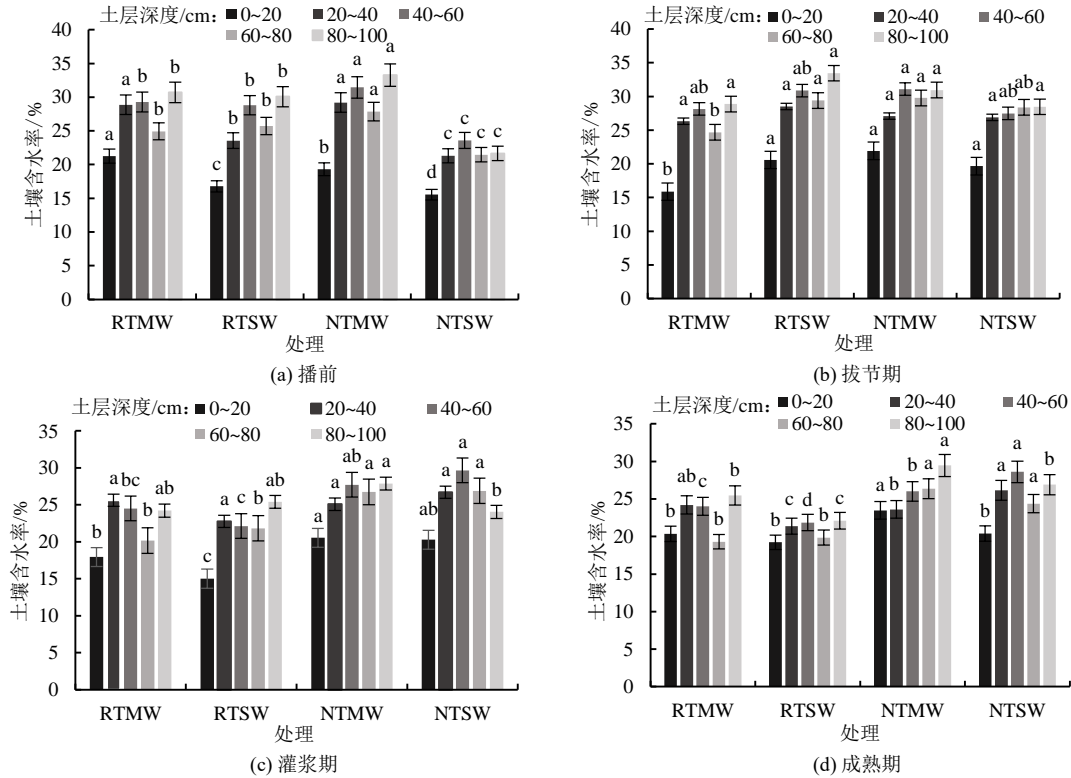


图 2 不同耕作方式和前茬作物对土壤含水率的影响

Fig.2 Effects of different tillage and previous crops on soil water content

### 2.2 耕作方式和前茬作物对土壤有机碳量的影响

图 3 为不同耕作方式和前茬作物对土壤有机碳量的影响。由图 3 可知，各处理土壤有机碳量均随土层深度的增加而降低。播前（图 3 (a)）0~10 cm 土层，RTSW、NTMW、NTSW 处理土壤有机碳量均显著高于 RTMW 处理，分别较 RTMW 处理提高了 6.25%、7.72%、15.21%。10~20 cm 土层，RTSW、NTMW 处理土壤有机碳量显著高于 RTMW 处理，分别较 RTMW 处理提高了 61.38%、24.32%。20~30 cm 土层，RTSW、NTSW 处理有机碳量显著高于 RTMW 处理，分别较 RTMW 处理提高了 51.24%、42.54%。30~50 cm 土层，RTSW 处理有机碳量最高。

成熟期（图 3 (b)）0~10 cm 土层，NTSW 处理土壤有机碳量最高，其次是 NTMW 处理，二者分别达到了 17.15、16.19 g/kg，显著高于 RTMW 处理，NTSW、NTMW 处理分别较 RTMW 处理高 13.54%、7.10%。而 RTSW 处理土壤有机碳量较 RTMW 处理

低 13.23%。10~20、20~30 cm 土层，NTSW 处理土壤有机碳量依旧显著高于其他处理。而 30~50 cm 土层，RTMW、NTSW 处理土壤有机碳量无显著差异，且二者显著高于其他处理。总体而言，与玉米前茬相比，大豆前茬能够提高播前土壤有机碳量，NTSW 处理有利于农田土壤有机碳量的积累。

### 2.3 耕作方式和前茬作物对土壤全氮量的影响

图 4 为不同耕作方式和前茬作物对土壤全氮量的影响。由图 4 可知，随着土层深度增加，土壤全氮量逐渐降低。播前（图 4 (a)），各处理 0~10 cm 土层土壤全氮量无显著差异。10~20 cm 土层，RTSW、NTMW 处理土壤全氮量显著高于其他处理，分别达到了 1.228、1.042 mg/kg。20~30 cm 土层，RTSW、NTSW 处理土壤全氮量显著高于 RTMW 处理，较 RTMW 处理分别提高了 34.06%、20.94%。而 30~50 cm 土层，只有 RTSW 处理土壤全氮量显著高于 RTMW 处理，较 RTMW 处理提高了 13.58%。

成熟期 (图 4 (b)) 0~10 cm 土层, NTSW、RTMW 处理土壤全氮量最高, 分别达到了 1.79、1.83 mg/kg, 较 RTMW 处理分别提高了 2.44%、35.51%, 较 RTSW 处理分别提高 16.75%、19.46%。10~20、20~30 cm 土层, NTSW 处理土壤全氮量最高, 较

RTMW 处理分别提高 43.87%、54.44%。而 30~50 cm 土层, NTSW、RTSW 处理土壤全氮量无显著差异, 二者均显著高于 RTMW、NTMW 处理。总体而言, 与玉米前茬相比, 大豆前茬能够提高播前土壤全氮量, NTSW 处理有利于冬小麦农田土壤氮素积累。

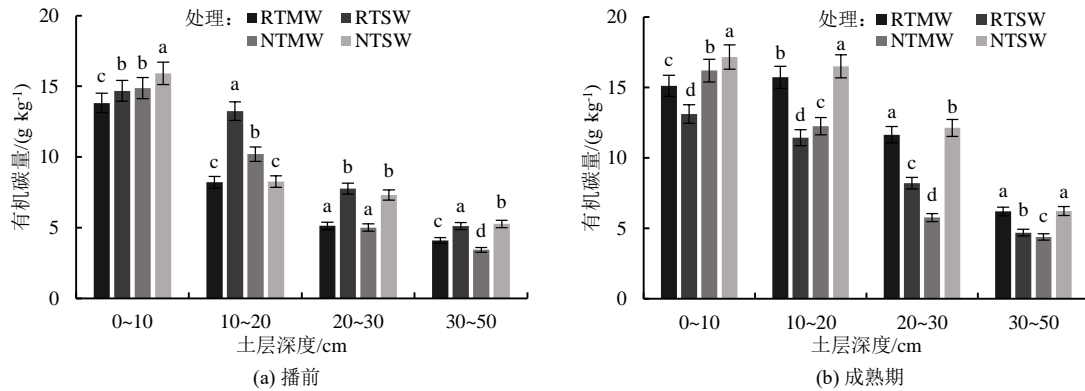


图 3 不同耕作方式和前茬作物对土壤有机碳量的影响

Fig.3 Effects of different tillage and previous crops on soil organic carbon content

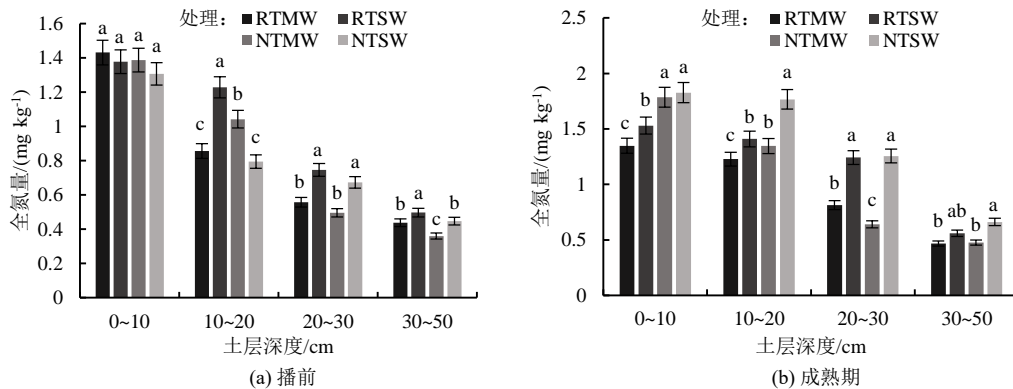


图 4 不同耕作方式和前茬作物对土壤全氮量的影响

Fig.4 Effects of different tillage and previous crops on soil total nitrogen

## 2.4 耕作方式和前茬作物对土壤速效养分的影响

### 2.4.1 耕作方式和前茬作物对土壤速效磷量的影响

图 5 为不同耕作方式和前茬作物对土壤速效磷量的影响。由图 5 可知, 各处理土壤速效磷量均随土层深度增加而降低; 播前 (图 5 (a)), 0~10 cm 土层, NTSW 处理土壤速效磷量较高, 达到了 56.77 mg/kg, 较 RTMW 处理提高 32.19%, RTMW 处理与 NTMW 处理无显著差异。10~20 cm 土层, RTMW 处理土壤速效磷量显著高于其他处理, 而 20~50 cm

土层, 大豆前茬处理土壤速效磷量显著高于玉米前茬处理。

成熟期 (图 5 (b)), 0~10 cm 土层, NTSW 处理土壤速效磷量最高为 52.35 mg/kg, 分别较 RTMW、RTMW、NTMW 处理提高 16.93%、117.41%、24.63%。10~50 cm 土层, NTSW 处理土壤速效磷量则显著低于 RTMW 处理。总体而言, 虽然 NTSW 处理能够提高 0~10 cm 土层土壤速效磷量, 但 RTMW 处理更有利于冬小麦农田土壤速效磷量的积累。

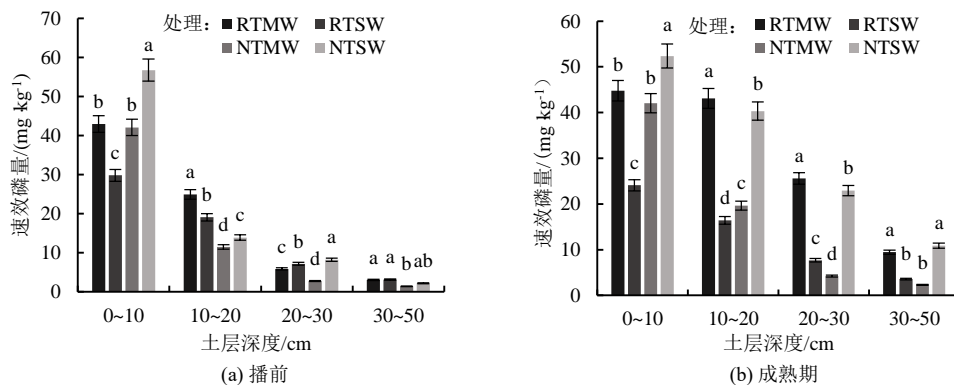


图 5 不同耕作方式和前茬作物对土壤速效磷量的影响

Fig.5 Effects of different tillage and previous crops on soil available phosphorus

2.4.2 耕作方式和前茬作物对土壤速效钾量的影响

图 6 为不同耕作方式和前茬作物对土壤速效钾量的影响。由图 6 可知，各处理土壤速效钾量随土层深度增加而降低。播前（图 6 (a)），0~10 cm 土层，各处理间土壤速效钾量无显著差异。10~20、20~30 cm 土层，RTSW 处理土壤速效钾量显著高于其他处理，分别达到了 361.60、216.00 mg/kg。而 30~50 cm 土层各处理土壤速效钾量无显著差异。

成熟期（图 6 (b)），RTMW 处理土壤速效钾量

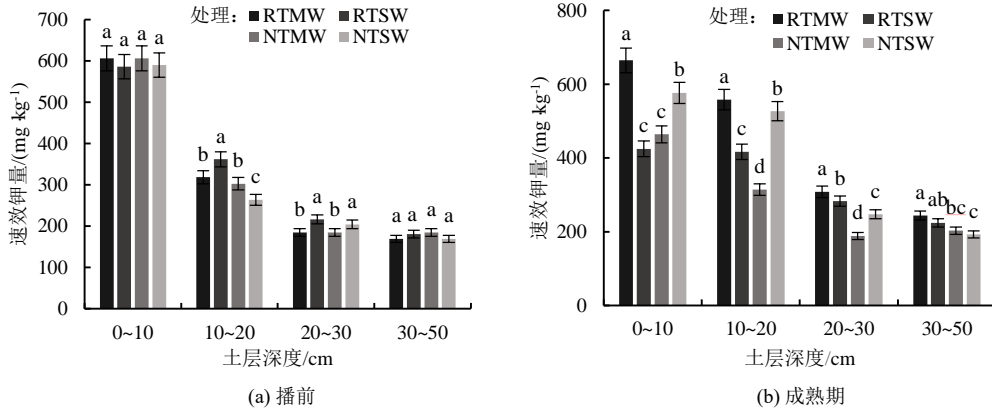


图 6 不同耕作方式和前茬作物对土壤速效钾量的影响

Fig.6 Effects of different tillage and previous crops on soil available potassium

2.4.3 耕作方式和前茬作物对土壤硝态氮量的影响

图 7 为不同耕作方式和前茬作物对土壤硝态氮量的影响。由图 7 可知，随着土层深度增加，各处理土壤硝态氮量随土层深度增加逐渐降低。播前（图 7 (a)），0~10 cm 土层，NTMW、RTMW 处理土壤硝态氮量显著高于其他处理，与 RTMW 处理相比，NTMW 处理硝态氮量提高了 62.41%。10~20 cm 土层，NTMW、RTMW 处理硝态氮量同样高于其他处理，但与 RTMW 处理相比，NTMW 处理硝态氮量

在 0~10、10~20、20~30、30~50 cm 土层均最高，分别达到了 664.59、558.35、307.94、243.55 mg/kg，显著高于 RTSW、NTMW、NTSW 处理。0~10、10~20 cm 土层，NTSW 处理土壤速效钾量较 RTSW 处理分别提高 35.79%、26.44%。总体而言，与 RTMW 处理相比，大豆前茬能够提高播前 10~30 cm 土层速效钾量，而 RTMW 处理更有利于冬小麦农田土壤速效钾量的积累。

降低了 17.00%。20~30 cm 土层，NTMW、RTMW 处理硝态氮量差异不显著，但显著高于其他处理。30~50 cm 土层，则 NTSW 处理土壤硝态氮量最低。

成熟期（图 7 (b)），0~10、10~20、20~30、30~50 cm 土层中，NTSW 处理土壤硝态氮量均最高，分别较 RTMW 处理提高了 111.71%、84.50%、42.06%、55.75%。总体上看，RTMW、NTMW 处理能够提高播前土壤硝态氮量，但 NTSW 处理更有利于冬小麦农田土壤硝态氮量的积累。

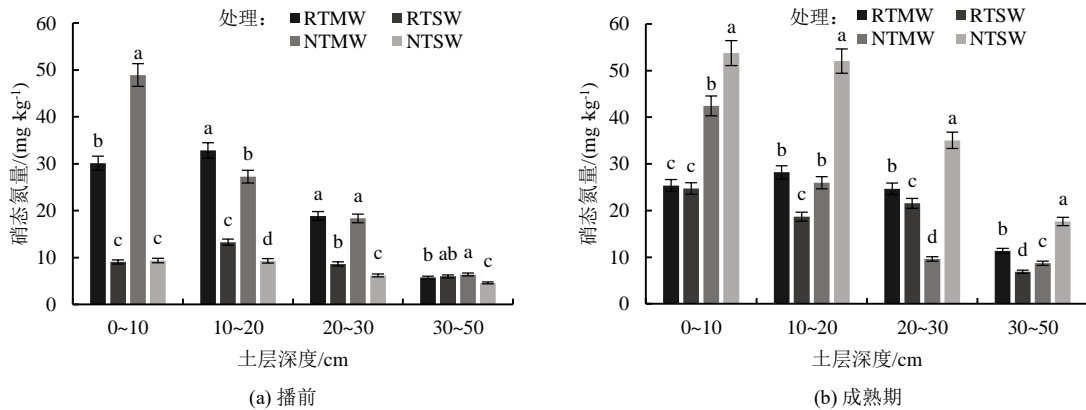


图 7 不同耕作方式和前茬作物对土壤硝态氮量的影响

Fig.7 Effects of different tillage and previous crops on soil nitrate nitrogen

2.4.4 耕作方式和前茬作物对土壤铵态氮量的影响

图 8 为不同耕作方式和前茬作物对土壤铵态氮量的影响。由图 8 可知，随着土层深度的增加，各处理土壤铵态氮量随土层深度增加逐渐降低。播前（图 8 (a)），NTMW 处理各土层土壤铵态氮量均显

著高于其他处理。10~40 cm 土层，RTSW 处理铵态氮量也显著高于 RTMW、NTSW 处理。

成熟期，0~10 cm 土层，RTSW 处理土壤铵态氮量分别较 RTMW、NTMW、NTSW 处理显著提高 18.10%、31.93%、10.07%。10~20 cm 土层，NTMW

处理土壤铵态氮量最低。20~30 cm 土层, RTSW 处理土壤铵态氮量显著高于其他处理。30~50 cm 土层, NTSW 处理土壤铵态氮量最高。总体上看, 与

RTMW 处理相比, NTMW 处理增加了播前土壤铵态氮量, 但大豆前茬更有利于冬小麦农田土壤铵态氮量的积累。

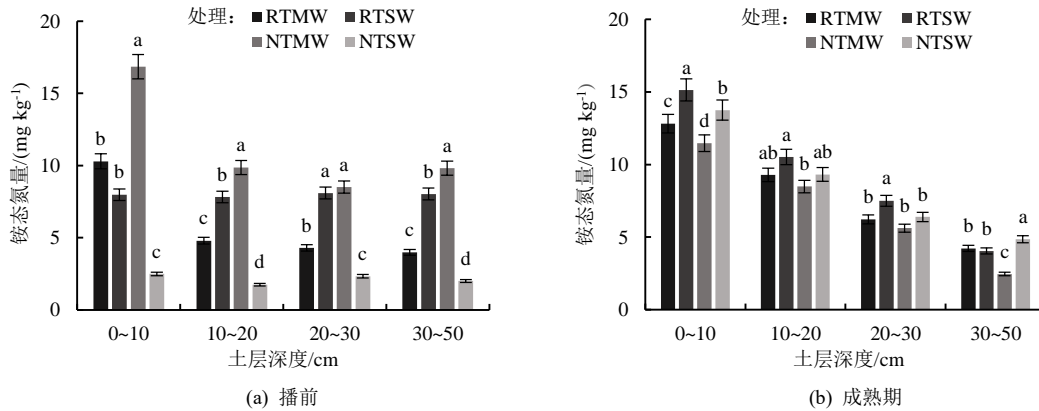


图 8 不同耕作方式和前茬作物对土壤铵态氮量的影响

Fig.8 Effects of different tillage and previous cropping on soil ammonium nitrogen

## 2.5 耕作方式和前茬作物对冬小麦产量及构成因素影响

### 2.5.1 耕作方式及前茬作物对冬小麦产量的影响

由表 3 可知, 耕作方式极显著影响土壤有机碳量、全氮量、速效磷量、速效钾量、硝态氮量、铵态氮量, 前茬作物极显著影响土壤全氮量、硝态氮

量、铵态氮量, 前茬作物显著影响土壤速效磷量, 耕作方式与前茬作物交互作用极显著影响有机碳量、速效磷量、速效钾量、硝态氮量, 显著影响土壤全氮量; 另外, 耕作方式和前茬作物及二者交互作用均极显著影响冬小麦产量。故耕作方式和前茬作物都是影响土壤养分及冬小麦产量的重要因素。

表 3 不同耕作方式和前茬作物下土壤养分指标及冬小麦产量的方差分析

Tab.3 F value of variance analysis of soil nutrient index and winter wheat yield under different tillage methods and planting systems

因素	有机碳量	全氮量	速效磷量	速效钾量	硝态氮量	铵态氮量	产量
耕作方式	46.77**	33.27**	24.03**	240.68**	9 086.09**	32.83**	25.93**
前茬作物	5.28	113.44**	9.93*	3.98	3 779.61**	71.61**	78.68**
耕作方式×前茬作物	2 262.36**	3.50*	1 009.72**	918.18**	10 366.52**	1.57	26.82**

注 \*\*表示在 0.01 水平上极显著相关, \*表示在 0.05 水平上显著相关。

### 2.5.2 耕作方式及前茬作物对冬小麦产量构成要素及水分利用效率的影响

从表 4 可以看出, 在免耕 (NT) 处理下, 大豆前茬 (SW) 处理的冬小麦穗数、穗粒数、千粒质量具有显著差异, 均表现为大豆前茬 (SW) 处理>玉米前茬 (MW) 处理, 冬小麦产量最终表现为 NTSW 处理>NTMW 处理, NTSW、NTMW 处理的冬小麦产量分别达到 9 516、8 152 kg/hm<sup>2</sup>; 在旋耕 (RT) 处理下, 大豆前茬 (SW) 处理的穗粒数、千粒质量显著高于玉米前茬 (MW) 处理, 而穗数显著低于玉米前茬 (MW) 处理, 因此冬小麦产量表现为 RTSW 处理>RTMW 处理, 2 个处理冬小麦产量分别达到 8 519、8 160 kg/hm<sup>2</sup>。对于玉米前茬 (MW) 处理来说, 虽然 RTMW、NTMW 处理冬小麦穗数和

千粒质量具有显著性差异, 但二者产量无显著性差异。对于大豆前茬 (SW) 处理来说, 虽然旋耕处理和免耕处理冬小麦穗粒数、千粒质量无显著性差异, 但冬小麦整体穗数增加, 所以 NTSW 处理冬小麦产量显著高于 RTSW 处理。总体来说, 不管旋耕处理还是免耕处理, 大豆前茬 (SW) 处理的冬小麦产量都高于玉米前茬处理, 其中 NTSW 处理的冬小麦产量最高, 该处理主要是通过增加冬小麦穗数、穗粒数和千粒质量增加冬小麦产量。大豆前茬处理保持着较高的水分利用效率, 其中 NTSW 处理的水分利用效率最高, 为 1.63 kg/(mm·hm<sup>2</sup>), 较 RTMW 处理高 8.67%, 其次是 NTMW 处理, 说明免耕处理和前茬处理都能显著提高冬小麦的水分利用效率。

表 4 冬小麦产量及水分利用效率

Tab.4 Winter wheat yield and water use efficiency

处理	穗数/10 <sup>4</sup> 穗	穗粒数/粒	千粒质量/g	产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	耗水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	水分利用效率/(kg·mm <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
RTMW	37.04±0.59b	31±1b	39.11±0.37c	8 160±89c	5 440.65±40.85c	1.50±0.03b
RTSW	35.15±0.41c	34±1a	42.68±1.68ab	8 519±263b	5 679.50±23.45b	1.47±0.02b
NTMW	32.11±0.34d	31±1b	40.72±1.45b	8 152±27c	5 436.95±28.53c	1.50±0.01b
NTSW	44.67±0.52a	35±1a	43.29±0.60a	9 516±333a	5 878.25±45.08a	1.63±0.06a

注 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示各处理间差异显著 (P<0.05)。

### 2.6 耕作方式和前茬作物对冬小麦养分利用效率的影响

由表 5 可知，与 RTMW 处理相比，RTSW、NTSW 处理显著提高了冬小麦氮素利用效率，分别达到了 73.78、87.50 kg/kg，RTMW、NTMW 处理冬小麦氮素利用效率无显著差异，说明不同前茬作物是影响冬小麦氮素利用效率的关键因素；RTSW 处理冬小麦磷素利用效率最低，为 183.10 kg/kg，显著低于其他处理，其他处理间无显著差异，说明耕作方式和不同前茬作物均会对冬小麦磷素利用效率产生影响；与 RTMW 处理相比，NTSW、RTSW 处理显著提高了冬小麦钾素利用效率，分别达到了 60.78、53.47 kg/kg，RTMW 处理冬小麦钾素利用效率显著高于 NTMW 处理，同样说明耕作方式和不同前茬作物，均会对冬小麦钾素利用效率产生影响。

表 5 冬小麦养分利用效率

Tab.5 Nutrient use efficiency of winter wheat

处理	氮素利用效率/ (kg kg <sup>-1</sup> )	磷素利用效率/ (kg kg <sup>-1</sup> )	钾素利用效率/ (kg kg <sup>-1</sup> )
RTMW	23.78±0.59c	224.05±8.48a	42.38±2.50c
RTSW	73.78±4.93b	183.10±3.52b	53.47±2.90b
NTMW	24.47±0.59c	228.62±13.81a	34.92±0.93d
NTSW	87.50±7.85a	212.72±20.78a	60.78±1.11a

### 2.7 土壤养分指标与冬小麦产量相关性分析

图 9 为土壤养分指标与冬小麦产量相关性分析，图 9 中\*\*表示在  $P<0.01$  水平上极显著相关，\*表示在  $P<0.05$  水平上显著相关。由图 9 可知，冬小麦产量与土壤硝态氮量极显著正相关 ( $P<0.01$ )，相关系数为 0.72；有机碳量与速效磷量、硝态氮量极显著正相关 ( $P<0.01$ )，相关系数分别为 0.908、0.873，与全氮量显著正相关 ( $P<0.05$ )，相关系数为 0.583；全氮量与硝态氮量极显著正相关 ( $P<0.01$ )，相关系数为 0.848；速效磷量与速效钾量显著正相关 ( $P<0.05$ )，相关系数为 0.664，与硝态氮量极显著正相关 ( $P<0.01$ )，相关系数为 0.729。

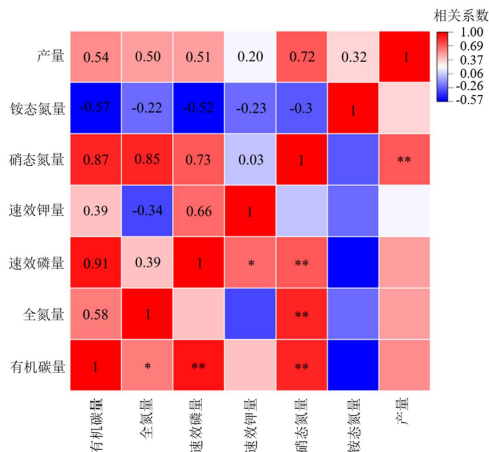


图 9 土壤养分指标与冬小麦产量相关性分析

Fig.9 Correlation analysis between soil nutrient index and winter wheat yield

## 3 讨论

### 3.1 耕作方式和前茬作物对冬小麦农田土壤含水率的影响

土壤含水率是影响作物产量的重要因素之一<sup>[13]</sup>。本研究中，免耕处理的土壤含水率高于旋耕处理。这可能是因为传统连年旋耕作业可导致耕层过浅、犁底层变硬，土壤养分表层积聚，作物生育后期供肥能力变差<sup>[14-15]</sup>，免耕可降低机械化翻动对土壤结构的破坏，有效增强土壤蓄水保墒的能力，但连年免耕易使土壤体积质量增加，影响作物根系的生长发育<sup>[15]</sup>。王玉玲等<sup>[16]</sup>研究证实，在黄土旱塬区进行免耕-深松组合的逐年轮耕模式能提高冬小麦生育期 0~200 cm 土层土壤含水率。贾梦圆等<sup>[17]</sup>研究同样发现，免耕、休耕措施都能够提高土壤含水率。此外大豆植株根系发达，能够增加土壤孔隙度和透水性，有利于增加土壤含水率和排水能力，但本研究中，玉米前茬处理的土壤含水率高于大豆前茬处理，这可能与土壤类型有关。

### 3.2 耕作方式和前茬作物对冬小麦农田土壤养分的影响

耕作方式直接通过改变土壤结构和质地影响土壤养分转化，进而影响土壤肥力<sup>[18]</sup>。豆科作物通过生物固氮作用、植物残留物归还、微生物分解等过程增加了土壤有机质、氮素等养分，促进了养分积累<sup>[19]</sup>。本研究中，免耕大豆前茬处理显著增加了后茬麦田土壤有机碳量、全氮量、硝态氮量。这是因为土壤碳贮量与植物多样性之间呈显著的正相关关系，植物多样性丰富的土壤固碳速率更高，更有利于储存碳。同时，豆科、禾本科等不同科属的植物残体联合还田能够显著提高土壤有机碳水平<sup>[20]</sup>。而且保护性耕作方式通常会将植物残留物保留在土壤表面，增加有机质输入，从而提供更多的有机氮来源，促进土壤中全氮积累。传统旋耕耕作方式可能会清除或深埋植物残留物，减少全氮的输入。

土壤速效养分是评价土壤肥力的重要指标，也是影响植物生长发育的关键因子<sup>[21]</sup>。耕作方式影响土壤速效养分量<sup>[22]</sup>。本研究中，旋耕玉米前茬处理的后茬麦田土壤速效磷量、速效钾量最高。可能是因为土壤在旋耕扰动下，提高土壤透气性，促进有机质分解，增加了土壤中有效养分。免耕有助于保持土壤微生物群落多样性，提高土壤持水能力，从而为大豆根系提供更好的生长环境<sup>[23]</sup>。根系分泌的有机酸和酶可以溶解土壤中的磷和钾，并将其转化为可被植物吸收的形式。此外，大豆根系活动还能增加土壤铵态氮量。这也是免耕大豆前茬处理的后茬麦田土壤也能保持较高速效磷量、速效钾量、铵

态氮量的原因。

### 3.3 耕作方式和前茬作物对冬小麦养分利用效率及产量的影响

养分利用效率反映了不同养分元素对作物产量和籽粒产量的贡献。本研究表明,与传统旋耕玉米前茬处理相比,免耕处理和大豆前茬处理均能提高冬小麦氮素利用效率、磷素利用效率、钾素利用效率。这是因为免耕土壤结构、土壤微生物数量和活性相对稳定,有利于提高养分利用效率<sup>[24]</sup>;谭月臣<sup>[25]</sup>也认为,与旋耕处理相比,免耕处理能显著提高冬小麦氮素利用效率和籽粒吸氮量,这与本研究结论一致。另外,大豆作为豆科植物,能够通过根际土壤中的根瘤菌共生固定大量氮。因此,大豆前茬能够增加土壤氮素量,并提供一定程度的氮素营养供应给后茬冬小麦,从而提高冬小麦氮素利用效率。并且大豆具有较强磷素、钾素吸收能力,能够通过其发达的根系吸收土壤中的磷素和钾素,因此,大豆前茬能够增加土壤中的磷素和钾素,从而提高冬小麦对磷素利用效率和钾素利用效率。

耕作方式或者前茬作物会对后茬作物生长和产量产生一定的影响<sup>[12]</sup>。本研究中,大豆前茬处理冬小麦产量均高于玉米前茬处理冬小麦产量。这可能是因为大豆种植可以增加土壤有机质量,有机质对土壤保水性、通透性和养分保持能力等方面有益影响。增加土壤有机质量可以改善土壤结构,提高水分和养分的保持能力,为冬小麦生长提供更好的环境。旋耕玉米前茬处理和免耕玉米前茬处理虽然穗数和千粒质量有所差异,但最终冬小麦产量却无显著性差异。而免耕大豆前茬处理的冬小麦却高于旋耕大豆前茬处理。这可能是因为免耕措施提高了冬小麦穗数,进而提高了冬小麦产量。

## 4 结论

1) 与传统旋耕玉米前茬处理相比,免耕大豆前茬处理显著 ( $P < 0.05$ ) 提高了后茬麦田土壤有机碳量、全氮量、硝态氮量;传统旋耕玉米前茬处理的后茬麦田土壤速效磷量、速效钾量较高;后茬麦田土壤铵态氮量则表现为旋耕大豆前茬处理最高,较传统旋耕玉米前茬处理高 13.39%~20.64%。

2) 免耕大豆前茬处理通过提高穗数、穗粒数、千粒质量提高了冬小麦产量,产量达 9 516 kg/hm<sup>2</sup>;免耕大豆前茬处理的水分和养分利用效率较高, $WUE$ 、氮素利用效率、磷素利用效率、钾素利用效率分别达到了 1.63 kg/(mm·hm<sup>2</sup>)、87.50 kg/kg、212.72 kg/kg、60.78 kg/kg,这是提高冬小麦产量的关键因素。

综上所述,免耕大豆前茬模式较易推广应用,

且在土壤肥力保持、改善土壤环境和增产效果上最好,对于促进华北平原农业可持续发展也具有重要意义。但由于本试验持续时间有限,对于长期种植该模式下土壤养分的变化和增产效应还有待于进一步定位观察。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

### 参考文献:

- [1] 郭璇,关小康,温鹏飞,等.不同种植模式和灌溉方式对麦棉产量、品质及经济效益的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(1):39-46,53.  
GUO Xuan, GUAN Xiaokang, WEN Pengfei, et al. Effect of irrigation and planting patterns on yield, quality and economic return of winter wheat-cotton cropping system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(1): 39-46, 53.
- [2] 戴双,晔妍,巨伟,等.面条、面包优质兼用小麦研究进展[J].中国粮油学报,2021,36(2):172-179.  
DAI Shuang, ZI Yan, JU Wei, et al. Advances on breeding of wheat cultivars with both good noodle and bread making quality[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 172-179.
- [3] 张明君,李玲玲,谢军红,等.不同耕作方式对陇中旱农区春小麦和豌豆根系空间分布及产量的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):3 917-3 925.  
ZHANG Mingjun, LI Lingling, XIE Junhong, et al. Effects of tillage practices on root spatial distribution and yield of spring wheat and pea in the dry land farming areas of central Gansu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 3 917-3 925.
- [4] 王玉英,胡春胜,董文旭,等.华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(4):651-657.  
WANG Yuying, HU Chunsheng, DONG Wenxu, et al. Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 651-657.
- [5] 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[J].水土保持学报,2021,35(5):264-271.  
WU Jinzhi, HUANG Ming, LI Youjun, et al. Effects of tillage practices and nitrogen rates on grain yield, water use efficiency and planting profit in winter wheat in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5): 264-271.
- [6] 张国伟,王晓婧,杨长琴,等.前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(9):1 493-1 501.  
ZHANG Guowei, WANG Xiaojing, YANG Changqin, et al. Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1 493-1 501.
- [7] 朱敏,石云翔,孙志友,等.秸秆还田与旋耕对川中土壤物理性状及玉米机播质量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(7):1 025-1 033.  
ZHU Min, SHI Yunxiang, SUN Zhiyou, et al. Effect of straw return and rotary tillage on soil physical properties and mechanical sowing quality of maize in Central Sichuan[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1 025-1 033.
- [8] 褚鹏飞,于振文,王东,等.耕作方式对小麦耗水特性和籽粒产量的影响[J].中国农业科学,2010,43(19):3 954-3 964.  
CHU Pengfei, YU Zhenwen, WANG Dong, et al. Effects of tillage on



- water consumption characteristics and grain yield of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 3 954-3 964.
- [9] 刘贤德, 李晓辉, 李文华, 等. 玉米自交系苗期耐旱性差异分析[J]. *玉米科学*, 2004, 12(3): 63-65.  
LIU Xiande, LI Xiaohui, LI Wenhua, et al. Analysis on difference for drought responses of maize inbred lines at seedling stage[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2004, 12(3): 63-65.
- [10] 王丽君, 李豪, 马君红, 等. 洛阳烟区土壤养分指标适宜性评价及茬口效应分析[J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(7): 1 534-1 538.  
WANG Lijun, LI Hao, MA Junhong, et al. Suitability assessment of soil nutrient and analysis of stubble effect in tobacco-growing area in Luoyang[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(7): 1 534-1 538.
- [11] 李春喜, 翁正鹏, 邵云, 等. 华北平原两熟区不同夏播作物对土壤养分和小麦籽粒产量及品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(10): 1 215-1 222.  
LI Chunxi, WENG Zhengpeng, SHAO Yun, et al. Effect of different summer-sowing crops on soil nutrients and wheat grain yield and quality in the double cropping area of North China Plain[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(10): 1 215-1 222.
- [12] 杨佳, 崔福柱, 郭秀卿, 等. 不同耕作方式及前茬作物对冬小麦产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2019, 47(3): 362-365.  
YANG Jia, CUI Fuzhu, GUO Xiuqing, et al. Effects of different tillage methods and previous crops on winter wheat yield[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 362-365.
- [13] 黄超, 刘战东, 赵霖, 等. 不同产量水平下冬小麦生长发育和耗水特性研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 10-16.  
HUANG Chao, LIU Zhandong, ZHAO Ben, et al. Study on growth, development and water consumption characteristics of winter wheat under different yield levels[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(10): 10-16.
- [14] 陈盛, 黄达, 张力, 等. 秸秆还田对土壤理化性质及水肥状况影响的研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(6): 1-11.  
CHEN Sheng, HUANG Da, ZHANG Li, et al. The effects of straw incorporation on physicochemical properties of soil: A review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(6): 1-11.
- [15] 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[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(14): 2 977-2 990.  
GUO Xingyu, WANG Hao, YU Qi, et al. Effects of tillage on soil moisture and yield of wheat-maize rotation field in Weibei upland plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14): 2 977-2 990.
- [16] 王玉玲, 李军. 黄土旱塬区平衡施肥下不同土壤耕作模式的蓄水纳墒及作物增产增收效应研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(1): 151-163.  
WANG Yuling, LI Jun. Study on soil water storage, crop yields and incomes under different soil tillage patterns with balance fertilization in the Loess Dryland Region[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(1): 151-163.
- [17] 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(11): 1 964-1 976.  
JIA Mengyuan, HUANG Lanmei, LI Qicong, et al. Effects of tillage methods on physico-chemical and microbial characteristics of farmland soil and nutritional quality of wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(11): 1 964-1 976.
- [18] 霍星辰, 杨诗韵, 赵鹏飞, 等. 深松技术及其对土壤理化性质的影响[J]. *农业科技与装备*, 2016(3): 62-64.  
HUO Xingchen, YANG Shiyun, ZHAO Pengfei, et al. Subsoiling technology and its effect on soil chemical and physical properties[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2016(3): 62-64.
- [19] 耿赛男, 李岚涛, 苗玉红, 等. 大豆和玉米影响后茬作物氮素供应的研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(5): 919-932.  
GENG Sainan, LI Lantao, MIAO Yuhong, et al. Research advances on the mechanisms of soybean and maize influence nitrogen supply in subsequent crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(5): 919-932.
- [20] 李洋, 石柯, 朱长伟, 等. 不同轮作模式对黄淮平原潮土区土壤养分及作物产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 312-321.  
LI Yang, SHI Ke, ZHU Changwei, et al. Effect of different crop rotations on soil nutrients and crop yield in fluvo-aquic soil in Huang Huai Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2): 312-321.
- [21] 张喜峰, 郑敏, 王静, 等. 陇县植烟土壤养分状况分析及综合评价[J]. *农学学报*, 2017, 7(11): 14-18.  
ZHANG Xifeng, ZHENG Min, WANG Jing, et al. Soil nutrients analysis and soil fertility evaluation in Longxian tobacco-growing areas[J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7(11): 14-18.
- [22] 王梦宇, 仝昊天, 韩燕来, 等. 深耕及培肥对砂姜黑土理化性质和小麦产量的影响[J]. *土壤通报*, 2022, 53(6): 1 431-1 439.  
WANG Mengyu, TONG Haotian, HAN Yanlai, et al. Effects of deep tillage and fertilization on wheat yield and physicochemical properties of lime concretion black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(6): 1 431-1 439.
- [23] 雷进田, 刘俊杰, 刘株秀, 等. 保护性耕作增强了真菌群落生态网络稳定性[J]. *微生物学报*, 2023, 63(7): 2 835-2 847.  
LEI Jintian, LIU Junjie, LIU Zhuxiu, et al. Conservation tillage enhanced the stability of fungal community network[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(7): 2 835-2 847.
- [24] 赵晶, 刘萌, 付威, 等. 传统耕作结合秸秆地膜双元覆盖是提高渭北旱塬春玉米产量和养分吸收的有效措施[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(7): 1 151-1 163.  
ZHAO Jing, LIU Meng, FU Wei, et al. Coventional tillage and dual mulching of straw and plastic film has stable effects on spring maize yield and nutrient absorption in Weibei dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(7): 1 151-1 163.
- [25] 谭月臣. 氮肥、耕作和秸秆还田对作物生产和温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.  
TAN Yuechen. Crop production and greenhouse gas emission as affected by fertilization, tillage and straw management[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018.

soils in the Hetao Irrigation District in Inner Mongolia. This paper investigates the impact of different combinations of irrigation amounts in the dual irrigations on changes in soil water and salt, as well as the growth of sunflower.

**【Method】** The field experiment compared two spring (S) irrigation amounts: 95 mm and 135 mm, and three summer (W) irrigation amounts: 68, 100 mm and 135 mm. In each treatment, we measured the spatiotemporal changes in soil water and salt, as well as crop growth characteristics. **【Result】** ① The soil water content in the S135W135 treatment was the highest among all treatments during the experimental period, with the average soil water content and saturation being 17.10% and 75.53%, respectively. The coefficient of variation of soil water content in the S95W135 treatment was 22.40%, the lowest among all treatments. ② Depending on the summer irrigation amount, the desalination rate of the 0-80 cm soil layer under S135 and S95 varied from 32.64% to 50.50% and 21.8% to 38.87%, respectively. Although the spring irrigation amounts did not significantly affect immediate post-irrigation salt content, the S135W100 and S95W135 combinations showed deeper leaching depths and higher desalination rates (40.77% and 33.37%, respectively) than other treatments. ③ Aboveground dry matter production was significantly higher in the S95W135 and S135W100 combinations than in other combinations, surpassing the S135W135 combination by 10.55% and 9.94%, respectively. The S135W100 combination achieved the highest water use efficiency at 21.59%, an increase of 13.03% compared to S135W135. **【Conclusion】** Reducing spring irrigation by 30% to 95 mm combined with a summer drip irrigation of 135 mm is the most efficient irrigation scheme for sunflower cultivation in the salt-affected soils in the Hetao Irrigation District.

**Key words:** Hetao Irrigation District; water-saving irrigation; water and salt transport; water use efficiency; desalination rate

责任编辑: 韩 洋

(上接第 9 页)

## Effect of tillage and preceding crops on yield, water and fertilizer use efficiency of winter wheat

SHAO Yun<sup>1</sup>, WANG Pengfei<sup>1,2</sup>, AN Jiahui<sup>1,2</sup>, MENG Ye<sup>2</sup>, CHEN Haiqing<sup>2</sup>,  
LIU Xuchen<sup>2</sup>, LIU Zhandong<sup>2</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>, MA Shoutian<sup>2\*</sup>

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453000, China;

2. Institute of Farmland Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

**Abstract: 【Objective】** Winter wheat in Northern China is often rotated with other crops which are expected to have a legacy effect. This paper aims to study the effect of different tillage and preceding crops on soil nutrients, yield and water use efficiency of the winter wheat. **【Method】** The field experiment consisted of a rotary tillage (RT) and a no-tillage (NT). The preceding crops for each tillage were corn (MW) or soybean (SW). During the experiment, we measured the changes in soil nutrients, soil water content, water and fertilizer use efficiency, and yield of the wheat.

**【Result】** For the same preceding crop, non-tillage increased soil water content compared to rotary tillage; under the same tillage, soil water content with maize as the preceding crop was higher than that with soybean as the preceding crop. In all treatments, soil nutrients decreased with soil depth. In the 0-50 cm soil layer, NTSW increased soil organic carbon, soil total nitrogen and nitrate nitrogen by 4.14%-13.54%, 35.51%-54.44% and 55.75%-112%, respectively, compared to the RTMW. RTMW had the highest available phosphorus and potassium in the 10-50 cm soil layer. The RTSW had the highest ammonium nitrogen in the 0-50 cm soil layer, 13.39%-20.64% more than that in the RTMW. The winter wheat in NTSW had the highest spike numbers, spikelet numbers, thousand-grain weight; and its grain yield was 16.62% higher than that of RTMW. The NTSW had the highest water use efficiency, 8.67% more than that of RTMW. The NTSW had the highest nitrogen, phosphorus and potassium use efficiency.

**【Conclusion】** The NTSW facilitated nutrient accumulation in the winter wheat field. It had the highest water and fertilizer use efficiency and increased grain yields the most as a result.

**Keywords:** rotary tillage; no-tillage; preceding crop; soil nutrient; water and fertilizer use efficiency; crop yield

责任编辑: 白芳芳