文章编号:1000-7601(2025)05-0097-12 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.10

有机无机肥配施对黄土高原旱地春小麦产量和水分利用效率的影响

张 科[1,2],陈晓丽[1,3],魏文龙[1,4],李世清[1,2],罗珠珠[1,2],王林林[1,4]

(1. 省部共建干旱生境作物学重点实验室,甘肃 兰州 730070;2. 甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070;
3. 内蒙古自治区农牧业技术推广中心,内蒙古 呼和浩特 010010);4 甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了探讨氮磷肥配施和有机无机肥配施对小麦水分利用效率和产量的影响及其机制,于 2023—2024 年在陇中旱农区开展了田间试验。试验设置 8 个处理,分别是不施肥(CK)、氮磷化肥单施和配施(P、N、NP)及有机肥单施和有机无机肥配施(M、MP、MN、MNP),研究氮磷肥配施和有机无机肥配施对于小麦蒸腾耗水(T_c)、蒸散量(ET_c)、作物籽粒灌浆速率、作物产量和水分利用效率(WUE_g)的影响。结果表明:相比化肥施用处理(P,NP),有机无机肥配施处理(MP,MNP)下,小麦苗期的 T_c 显著增加 47.3%和 56.7%。相比 P 和 N 处理,MP 和 MN 处理显著增加小麦开花期的 T_c,增幅为 116.2%~122.6%,开花期的 ET_c 显著提高 22.2%~25.2%。相比 CK 处理,氮磷肥施用处理平均提高产量 28.6%~80.2%,WUE_g 提高 30.4%~100%,其中以 NP 处理产量和 WUE_g 最高。相比于单施化肥处理,有机无机肥配施分别增加了小麦产量和 WUE_g 15.4%~32.3%和 6.5%~37.5%,其中 MNP 处理的产量和 WUE_g 提高幅度最大。随机森林模型分析结果显示,相较于化肥施用处理,有机无机肥配施显著提高了灌浆期的阶段水分利用效率 67.7%~166.7%,增加了花后干物质积累 61.3%~89.8%,提高了花后干物质对籽粒的贡献率 23.2%~37.2%,增加了弱势粒数目20.5%~43.8%,提高了弱势粒灌浆速率 7.4%~58.3%,提高了弱势粒产量 4.6%~80.5%,从而增加了籽粒产量和 WUE_g。综上所述,有机无机肥配施(MNP 处理)通过促进土壤水转化为作物水,提高干物质积累,促进弱势粒灌浆及弱势粒产量,提高了旱地小麦产量和 WUE_g。因此,综合考虑产量和水分利用效率,陇中旱农区应以 MNP 施肥方式为宜。

关键词:春小麦;有机无机肥配施;水分利用效率;产量;黄土高原

中图分类号:S512.1+2; S147.34 **文献标志码**:A

Effects of organic-inorganic fertilizer combination on yield and water use efficiency of spring wheat in dryland of the Loess Plateau

ZHANG Ke[1,2], CHEN Xiaoli[1,3], WEI Wenlong[1,4], LI Shiqing[1,2], LUO Zhuzhu[1,2], WANG Linlin[1,4]

(1. *Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*; 2. *College of Resources and Environment*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*; 3. *Inner Mongolia Autonomous Region Farming and Animal Husbandry Technology Promotion Center*, *Hohhot*, *Inner Mongolia* 010010, *China*; 4. *College of Agronomy*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: A two-year field experiment (2023-2024) was conducted in the arid farming region of central Gansu Province (Loess Plateau) to investigate the effects and underlying mechanisms of combined nitrogen-phosphorus (NP) fertilization and combined organic-inorganic fertilization on water use efficiency (WUE_g) and yield of spring wheat. Eight treatments were implemented: unfertilized control (CK), sole chemical fertilizers (P, N, and NP), sole organic fertilizer (M), and combined organic-inorganic fertilizers (MP, MN, and MNP). Key parameters, including wheat transpiration consumption (T_c), evapotranspiration (ET_c), grain filling rate, grain yield, and WUE_g, were evaluated. The results showed that, compared to chemical fertilizer treatments (P, NP), the com-

收稿日期:2024-03-10 **修回日期**:2024-06-14

基金项目:国家自然科学基金(42167008);国家重点研发计划项目(2023YFD1900403)

作者简介:张科(2000-),男,陕西延安人,硕士研究生,研究方向作物水肥高效利用。E-mail:1032268303@qq.com

通信作者:罗珠珠(1979-),女,甘肃天水人,教授,主要从事土壤生态学研究。E-mail:luozz@gsau.edu.cn

王林林(1988-),男,甘肃天水人,博士,副教授,主要从事旱地作物高产高效栽培研究。E-mail:wangll@gsau.edu.cn

bined organic-inorganic treatments (MP, MNP) significantly increased T_c during the seedling stage by 47.3% and 56.7%, respectively. Comparedto P and N treatments, MP and MN significantly enhanced T_c during the flowering stage by 116.2%~122.6%, concurrently increasing the proportion of water consumption at the flowering stage (T_c/ET_c) by 22.2%~25.2%. Compared to CK, chemical NP fertilizer treatments increased grain yield and WUE_g by 28.6%~80.2% and 30.4%~100%, respectively, with NP treatment achieving the highest values. Combined organic-inorganic fertilization further increased grain yield and WUE_g by 15.4%~32.3% and 6.5%~37.5%, respectively, compared to sole chemical fertilizer treatments, with MNP exhibiting the greatest improvement. Random Forest analysis revealed that the yield and WUE_g enhancement under combined fertilization primarily resulted from a significant increase (67.7%~166.7%) in stage-specific water use efficiency during the grain-filling period; elevated post-anthesis dry matter accumulation (61.3%~89.8%) and its contribution to grain yield (23.2%~37.2%); an increased number of inferior grains (20.5%~43.8%); and improved grain filling rate (7.4%~58.3%) and yield (4.6%~80.5%) of inferior grains. In conclusion, combined organic-inorganic fertilization, particularly the MNP treatment, enhances grain yield and WUE_g in dryland spring wheat by promoting "soil water-crop water" conversion, increasing dry matter accumulation, and improving the filling and yield of inferior grains. Therefore, the MNP fertilization strategy is recommended for optimizing both yield and water productivity in the arid farming regions of the central Loess Plateau.

Keywords: spring wheat; organic-inorganic fertilizer combination application; water use efficiency; yield; Loess Plateau

小麦是我国三大主要粮食作物之一,2023年我国小麦播种面积达到2 305.9万 hm^2,小麦的单产为5 834.3 $kg \cdot hm^{-2}$[1]。小麦的稳产对保障我国粮食安全具有重要意义[2]。西北黄土高原属于典型的半干旱农业区,小麦是该地区主要的粮食作物之一,然而,干旱严重、土壤有机质含量低、耕地质量差是限制该地区作物产量的重要因子,导致小麦产量和籽粒产量水分利用效率(WUE_g)低而不稳[3]。因此,如何通过合理施肥提高小麦产量和 WUE_g 是当前该地区农业研究的热点。

养殖废弃物肥料化利用以培肥土壤是近年来作物学和土壤学等学科的热点研究内容[4],有机肥的投入可以部分替代和减少对化肥的依赖,培肥土壤、提高耕地质量对于提高作物产量和资源效率十分重要[5]。研究表明,有机无机肥配施可以改善土壤团聚体的特性,平衡有机和无机养分之间的转化,提高土壤养分,进而提高作物产量[6]。胡冬妮等[7]通过长期试验研究发现,有机肥结合化肥减施能提升坡耕地小麦-玉米轮作系统产量稳定性。也有研究表明,施用有机肥料可以提高土壤质量并提高养分利用率[8]。在相同的总氮投入下,有机无机肥配施可提高作物产量30.28%~35.65%,改善土壤质量,提高 WUE_g[9]。Wang 等[10]针对华北平原地区的麦-玉系统研究发现,有机无机肥配施可将冬小麦的 WUE_g 增加5%~9%,但是夏玉米的 WUE_g 降低6%~10%。通过整合分析发现,在不增加耗水的情况下,施用有机肥可以将小麦的产量和 WUE_g 分别增加20%和18%,但是也与有机无机肥配施方法有关,在化肥施用基础上增施有机肥可以提高小麦产量25%,而有机无机肥配施(有机肥配合化肥减施)可以提高小麦产量28%,在总氮投入相同情况下如果严格使用有机氮替代无机氮,则会导致小麦减产11%[11]。花后灌浆阶段是决定小麦籽粒产量和品质的关键时期,小麦籽粒灌浆特征参数可以很好地衡量小麦增产潜力[12]。不同的施肥措施可能会导致籽粒灌浆时间滞后、灌浆速率和籽粒重量降低,进而减少花后小麦干物质的转运和积累,最终导致产量的降低。杨建昌[13]研究发现,在不同类型和品种间水稻的籽粒灌浆特性存在显著差异。

然而,在黄土高原地区西部的陇中旱农区关于有机无机肥配施对于小麦水分利用特征和籽粒灌浆特性的影响研究较少,能否通过氮磷肥配施有机肥促进作物对有限水资源的利用效率和小麦产量亟需开展深入研究。为此,2023—2024年在定西市安定区开展了田间定位试验,分析有机无机肥配施对春小麦水分利用、干物质积累和产量的影响,以期揭示此施肥模式在优化资源利用与实现高效生产的潜力与机制,为旱农区水资源高效利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2023—2024年在甘肃省定西市李家堡(属陇中地区)的旱作农业综合实验站(104°44′E,35°28′N,海拔1 971 m)进行。该区属于温带半干旱

农业区,太阳辐射量为 592.9 kJ·cm^{-2},年平均日照时数为 2 476.6 h;年平均气温约 6.4℃,0℃以上有效积温达 2 933.5℃,10℃以上有效积温达 2 239.1℃,年蒸发量可达到 1 531 mm。试验区土壤类型为黄绵土,土层较深、土质绵软,保水保墒性能较好,土壤耕层有机碳含量为 6.2 g·kg^{-1},pH 值为 8.28,土壤全氮、全磷含量分别为 0.78 g·kg^{-1}和 1.8 g·kg^{-1},速效磷、速效钾含量分别为 12.6 g·kg^{-1}和 100.4 g·kg^{-1}。多年平均降水量 390 mm,2023 年和 2024 年生育期降水量分别为 232.24 mm 和 203.2 mm(图 1)。

1.2　试验设计

本试验为单因素随机区组设计,共设置 8 个处理(见表 1),各处理均设 3 个重复,共计 24 个小区,单个小区面积均为 70 m^2(7 m×10 m),小区与小区之间有 1.5 m 的间隔过道。供试春小麦选用当地主栽品种'定西 40 号'。播种量 187 kg·hm^{-2},行距为 20 cm。施用化肥氮肥用尿素(含 N 46%),磷肥用过磷酸钙(含 P_2O_5 16%),所有肥料均在播种前整地时一次性施入,氮磷肥施肥用量见表 1。所用羊粪有机氮磷量每年按实际测量含量带入(测定养分),基于等氮磷替代原则折算出 2023—2024 年羊粪用量,其中羊粪中所含有效养分量按国际文献推荐值以 80% 计入[14],羊粪在堆肥厂完全腐熟(全氮 0.37%,全磷 0.25%,全钾0.21%,碳氮比约为 25),除了 CK 和 M 处理,其余所有处理都是保持等氮或者等磷。春小麦于每年 3 月下旬播种,7 月下旬收获。所有处理的田间管理均一致,小麦生长期内无灌溉处理,人工清理杂草。

1.3　测定指标和方法

1.3.1　降雨量的测定　固定地点放置雨量筒以测量试验区的日降雨量。

1.3.2　各个时期田间含水量的测定　分别于春小麦播种前、苗期、分蘖期、拔节期、花期和收获后通过土钻法测定土壤含水量。测定时每 20 cm 土层取土样一次,直至 200 cm 深度。土样带回室内后立即测定鲜质量,并置于烘箱 105℃烘干至恒重,记录干质量,计算土壤质量含水量。

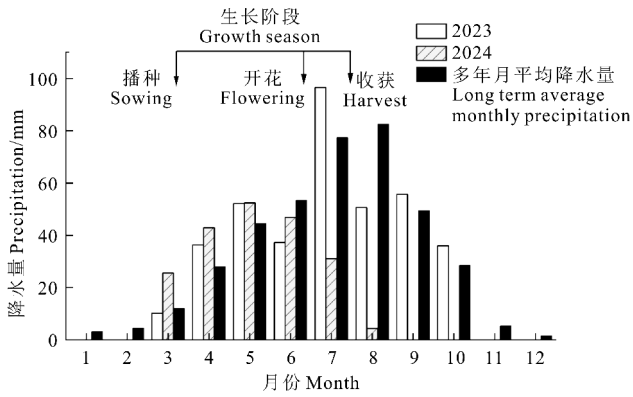


图 1　2023—2024 年试验区各月降水量和多年月平均降水量

Fig.1　Monthly precipitation and long term average monthly precipitation in the experimental site during 2023-2024

表 1　试验处理及其施肥量

Table 1　Test treatments and its fertilization rates

处理 Treatment	氮肥/(kg·hm^{-2}) Nitrogen fertilizer rate	磷肥/(kg·hm^{-2}) Phosphorus fertilizer rate	有机肥/(kg·hm^{-2}) Organic fertilizer rate	小麦播量/(kg·hm^{-2}) Seeding rate
对照(CK) Unfertilized control	0	0	0	225
单施磷肥(P) Single phosphorus fertilizer	0	105	0	225
单施氮肥(N) Single nitrogen fertilizer	105	0	0	225
氮肥+磷肥(NP) Nitrogen and phosphate fertilizers	105	105	0	225
单施有机肥(M) Single organic fertilization	0	0	8500	225
有机肥+磷肥(MP) Organic fertilizer combined with phosphate fertilizer	0	88	8500	225
有机肥+氮肥(MN) Organic fertilizer combined with nitrogen fertilizer	80	0	8500	225
有机肥+氮磷肥(MNP) Organic fertilizer combined with nitrogen and phosphorus fertilizers	80	88	8500	225

1.3.3 土壤棵间蒸发量的测定 将15 cm厚度的PVC管切割后制作成微型蒸发器,管长度约25~30 cm、直径约11 cm,取20 cm深度的原状土;微型蒸发器安装于每个小区边行向内数5~6行的春小麦行间(小区边界以内100 cm),每小区随机安装3个微型蒸发器,共72个。在春小麦全生育期内,不下雨时每天9:00将蒸发器打入各小区,取约20 cm深的原状土后,拔出蒸发器用双层保鲜膜封底,用精度0.01 g的电子秤测重,之后将蒸发器放回原处,再于次日上午同一时间测重,前后的重量变化量就是前一日的土壤棵间蒸发量(1 g重量相当于0.105 mm深度的蒸发量)。每隔3 d换一次蒸发器内部的土,并将测量完成后的土倒回原处;在每次降雨后更换蒸发器内部的土样,以尽可能使得蒸发器内部土样的水分含量与周边土壤保持一致。每日棵间蒸发量的平均值乘以该阶段内不下雨的天数即为该生长阶段的土壤棵间蒸发量。

1.3.4 干物质积累量和产量的测定 于春小麦的苗期、分蘖期、拔节期、开花期和收获期进行地上部干物质积累量(DM)测定,从每个小区中随机选择并收集30 cm长的3行地上部植株,105℃杀青后于75℃烘至恒重,称干质量。测产时以小区为单位,在作物成熟后剔除边行,收获计产。

1.3.5 计算公式

(1)农田耗水量(ET)。用土壤水分平衡公式计算。由于试验是在旱农区进行的,春小麦全生育期内没有对其进行灌溉处理,且每个小区周围的边界都阻隔了水流,因此地表径流可以忽略不计。此外,陇中旱农区的地下水位于地下38~40 m深的位置,因此上升到根区的毛管水和根区排水可以忽略不计。本研究中ET_i计算公式如下:

$$ET_i = P_i + SWD \tag{1}$$

式中,ET_i为春小麦农田耗水量,P_i为降水量,SWD为测定阶段的土壤0~200 cm土层的贮水量变化值(i=1、2、3、4、5分别依次对应小麦的苗期、分蘖期、拔节期、开花期、收获期)。

(2)作物蒸腾量(T):

$$T_i = ET_i - E_i \tag{2}$$

式中,T_i为阶段作物蒸腾量(mm),E_i为阶段棵间蒸发量(mm)。

(3)水分利用效率(WUE_g):

$$WUE_g = GY/ET_i \tag{3}$$

式中,WUE_g为籽粒产量水分利用效率(kg·mm^{-1}·hm^{-2}),GY为籽粒产量(kg·hm^{-2}),ET_i为农田耗水量(mm)。

(4)籽粒灌浆速率计算。籽粒灌浆动态的测定:于开花期选取株高、穗型大小基本一致且同一日开花的麦穗进行挂牌标记,每小区标记150穗。自开花后的第3、6、9、12、15、20、25、30、33、35 d每小区分别取标记穗15个,整穗以16个小穗计,将4~12小穗的第1~2位籽粒划为强势粒,其余划为弱势粒。籽粒灌浆动态用Richards增长方程拟合,参照前人文献中所描述的方法[15]:

$$W = \frac{A}{(1 + Be^{-kt})^{1/n}} \tag{4}$$

式中,W是籽粒重量(mg),A是最终籽粒重量(mg),t为花后时间(d),B,k和N是方程拟合系数。对上述方程求导,得籽粒灌浆速率R(mg·grain^{-1}·d^{-1}):

$$R = \frac{ABe^{-kt}}{N(1 + Be^{-kt})^{(N+1)/N}} \tag{5}$$

从籽粒重量A的5%(t_1)到95%(t_2)定义为活跃灌浆期D(d),这段时间内籽粒增加的重量除以灌浆时间即为平均籽粒灌浆速率(mg·d^{-1}·grain^{-1})。

1.4 数据统计分析

使用Microsoft Excel 2016进行数据整理,使用SPSS统计软件通过Duncan多重比较进行方差分析(P<0.05)。Pearson相关性分析被用于检验产量形成中各指标要素与产量和WUE_g的相关性,并以R语言中的rfPermute包进行机器学习随机森林模型分析,预测各指标要素对产量和WUE_g的重要性。用制图软件Origin 2021进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 有机无机肥配施对春小麦总蒸发量、各生育时期蒸腾量及其占耗水量比例的影响

总的来看,除M处理外,2024年各处理小麦全生育期蒸腾量和全生育期蒸发量均高于2023年(表2)。2023年NP处理下小麦全生育期的蒸发量比CK显著降低14.1%,其余各处理之间差异不显著。2024年各处理之间小麦全生育期蒸发量及蒸腾量占总农田耗水量的比例均无显著差异。MNP处理小麦苗期的蒸腾量比NP处理平均显著增加56.7%,MP处理小麦苗期蒸腾量比P处理显著增加47.3%;在拔节期,N和P处理下小麦蒸腾量比CK分别显著增加26.8%和84.2%,而NP处理小麦蒸腾量显著降低23.4%。相比于N和P处理,MN和MP小麦开花期蒸腾量比N和P处理分别显著增加

116.2~122.6%,开花期蒸腾量占总耗水量的比例显著提高 22.2%~25.2%,而 MNP 与 NP 处理在开花期的蒸腾量差异不显著。在收获期,MP 处理小麦蒸腾量比 M 处理显著提升 31.7%,而 MNP、MN 和 M 之间的蒸腾量差异不显著。NP 处理相比 CK 显著降低了小麦全生育期的蒸发量 12.4%,其余处理彼此之间差异并不显著。

2.2　有机无机肥配施对春小麦干物质积累量和阶段水分利用效率的影响

总的来说,2024 年的干物质积累量高于 2023 年(图 2)。相比于化肥施用处理,2023 年、2024 年有机无机肥配施处理在收获期干物质积累量分别显著增加 29.4%和 30.2%。相比于 CK,化肥施用处理小麦开花期的干物质积累量两年平均显著增加了 43.8%~78.3%。相比于 M 处理,MNP 和 MN 处理小麦开花期的干物质积累量分别显著增加 55.6%和 48.0%。相比于 NP,MNP 小麦开花期的干物质积累量显著增加 18.4%,相比于 N,MN 显著增加小麦开花期的干物质积累量 29.0%。在收获期,相比于 CK,化肥施用处理显著增加小麦干物质积累量 51.7%~91.2%。相比 M 处理,MNP 和 MN 小麦收获期的干物质积累量则显著增加了 44.2%~50.9%,相比于 NP 处理,MNP 小麦收获期的干物质积累量显著增加了 28.7%,相比于 N 处理,MN 处理小麦收获期的干物质积累量显著增加了 41.7%。

2024 年开花期的水分利用效率高于 2023 年(图 3)。2023 年,相比于化肥施用处理,有机无机肥配施处理小麦开花期的水分利用效率显著提升了 83.7%~137.9%。相比于化肥施用处理,2024 年有机无机肥配施处理小麦开花期的水分利用效率显著降低了 16.8%~78.1%,但收获期的水分利用效率显著提升了 165.6%~271.1%。相比于化肥施用处理,有机无机肥配施处理小麦拔节期的水分利用效率两年平均显著增加 45.7%~84.0%;在开花期,化肥施用处理比 CK 显著增加小麦的水分利用效率 50.2%~85.6%;相比于化肥施用处理,收获期有机无机肥配施处理小麦的水分利用效率显著增加 67.7%~166.7%。

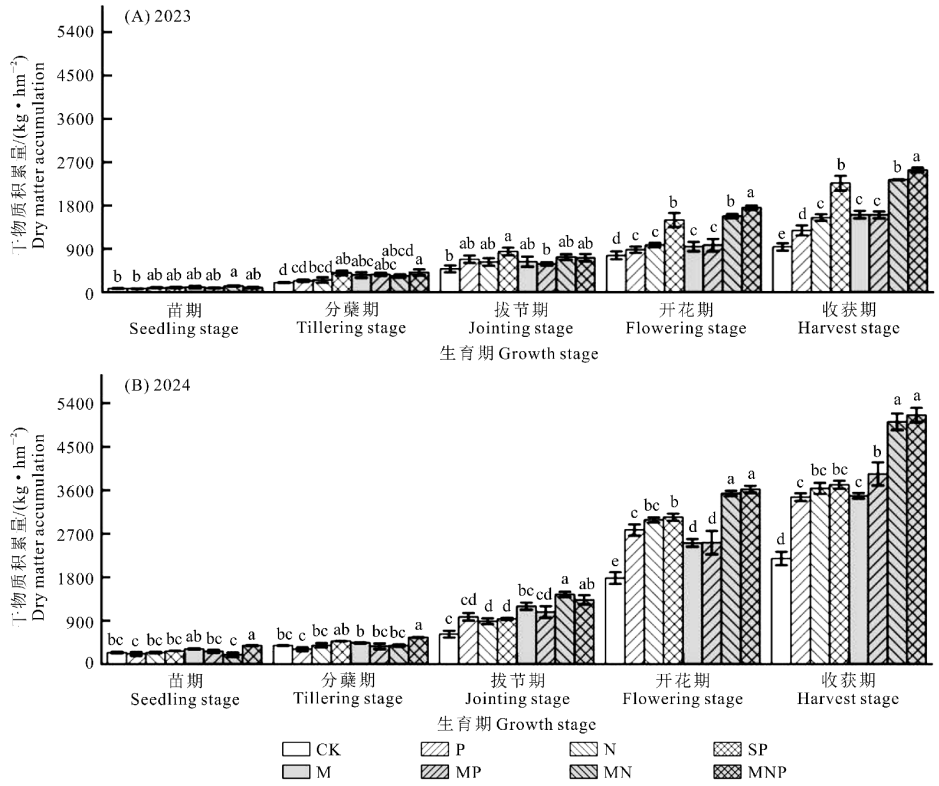
表 2　有机无机肥配施对春小麦总蒸发量、阶段蒸腾量及其占耗水量比例的影响

Table 2　Effects of organic-inorganic combination on total evaporation, transpiration, and its proportion in water consumption of spring wheat at each growth stage

年份 Year	处理 Treatment	T_1 /mm	T_1/ET_1 /%	T_2 /mm	T_2/ET_2 /%	T_3 /mm	T_3/ET_3 /%	T_4 /mm	T_4/ET_4 /%	T_5 /mm	T_5/ET_5 /%	T_c /mm	E_c /mm	T_c/ET_c /%
2023	CK	35.4c	61.3b	27.0c	77.8bc	68.0a	64.7b	51.7bc	71.5ab	16.7d	34.2c	198.8ab	94.5a	62.9a
	P	32.4c	61.6b	23.8cd	78.7bc	72.8a	79.3a	47.6c	57.9c	27.6c	33.1c	204.3a	85.6ab	68.8a
	N	43.3b	68.3ab	20.8d	73.5c	55.4b	73.2a	48.8c	72.1ab	25.0c	43.7b	197.3ab	88.7ab	63.9a
	NP	18.8d	52.6c	36.2b	85.2ab	38.2c	63.8b	65.4a	77.2a	28.7c	44.8b	187.2ab	81.2b	67.8a
	M	43.6b	70.3a	59.9a	90.0a	13.8e	38.2d	68.0a	77.9a	16.8d	31.9c	202.0ab	86.3ab	67.8a
	MP	44.6b	70.8a	34.5b	84.4ab	11.5e	25.6e	33.9d	53.9c	54.6a	60.1a	179.1b	91.9ab	64.8a
	MN	50.1a	73.8a	27.4c	79.5bc	22.4d	44.4cd	58.3b	73.4ab	42.0b	60.3a	200.2ab	86.2ab	68.3a
	MNP	13.6e	40.3d	35.7b	85.4ab	16.5e	46.1c	50.3c	68.4b	37.9b	54.1a	153.9c	87.3ab	61.9a
2024	CK	81.9b	69.7b	67.8a	86.3a	20.7f	49.6e	21.1cd	47.9c	43.8a	66.0a	235.3b	94.8a	71.2a
	P	29.8d	41.1d	53.1b	66.6bc	90.7a	81.6a	19.1d	51.6c	40.8a	63.4a	233.6bc	97.7a	70.3a
	N	86.2b	72.3b	42.9c	82.1a	57.2bc	70.0bc	29.8bc	57.0bc	35.8b	63.1a	251.8ab	98.3a	71.7a
	NP	85.3b	73.0ab	37.3d	81.8a	29.8e	63.3cd	20.2cd	48.8c	33.3b	60.1ab	205.8cd	97.8a	67.8a
	M	42.9c	58.1c	10.3g	51.3d	51.6cd	71.4bc	37.2b	61.8b	41.7a	62.7a	183.7d	95.3a	65.8a
	MP	47.1c	59.9c	19.8f	67.7b	48.4d	71.6bc	110.4a	82.2a	22.5c	54.9bc	248.2ab	98.1a	71.7a
	MN	23.2d	37.5d	15.6f	58.9cd	63.2b	72.7ab	116.7a	87.0a	25.5c	43.4d	244.3b	98.5a	71.3a
	MNP	149.4a	81.7a	31.7e	79.1a	30.1e	60.7d	35.7b	65.7b	26.2c	51.6c	273.0a	97.0a	73.8a
平均 Average	CK	58.6bc	66.9bc	47.4a	83.5ab	44.4c	61.5cd	36.4de	63.9cd	30.2bc	52.4bc	217.0abc	106.1a	67.2a
	P	31.1g	51.2d	38.5b	78.3ab	81.8a	80.8a	33.4e	61.2d	34.2ab	52.8bc	218.9ab	95.1ab	69.7a
	N	64.7b	71.1ab	31.8d	79.1ab	56.3b	72.4ab	39.3de	67.1cd	30.4bc	54.1abc	222.5a	96.7ab	63.6a
	NP	52.0cd	68.3abc	36.8bc	83.7a	34.0d	64.0bcd	42.8d	68.6bcd	31.0bc	53.8abc	196.5bc	92.9b	67.9a
	M	43.3ef	64.2bc	35.1bcd	81.9ab	32.7d	62.0cd	52.6c	72.4bc	29.3c	49.3c	192.9c	95.5ab	66.8a
	MP	45.8de	64.7bc	27.1e	78.3ab	29.9de	57.5cd	72.2b	76.6ab	38.6a	59.8a	213.6abc	97.6ab	68.6a
	MN	36.6fg	60.1c	21.5f	72.9b	42.8c	66.5bc	87.5a	82.0a	33.8bc	57.8ab	222.0ab	95.7ab	69.9a
	MNP	81.5a	76.0a	33.7cd	82.8ab	23.3e	55.2d	43.0d	67.7bcd	32.1bc	54.8abc	213.5abc	95.8ab	69.0a

注:同一列相同年份不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。T_1:苗期的蒸腾量;T_2:分蘖期的蒸腾量;T_3:拔节期的蒸腾量;T_4:开花期的蒸腾量;T_5:收获期的蒸腾量;T_c:全生育期的蒸腾量;E_c:小麦全生育期蒸发量;T_n/ET_n:各阶段蒸腾量占该阶段耗水量的比例。

Note: Different lowercase letters in the same column for the same year indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), the same below. T_1: Transpiration at seedling stage; T_2: Transpiration at tillering stage; T_3: Transpiration at jointing stage; T_4: Transpiration at flowering stage; T_5: Transpiration at harvest period; T_c: Transpiration during the whole growth period; E_c: Wheat evaporation during the whole growth period; T_n/ET_n: Proportion of transpiration in each stage to the water consumption in the same stage.



注:图中小写字母表示相同生长阶段下处理间差异显著($P<0.05$),误差线表示标准差($n=3$)。下同。

Note: The lowercase letters in the figure indicate significantly differences between treatments at the same growth stage ($P<0.05$), and the error bars represent the standard deviation ($n=3$). The same below.

图 2 有机无机肥配施对春小麦各生育时期干物质积累的影响

Fig.2 Effects of organic-inorganic combination on dry matter accumulation in spring wheat at different growth stages

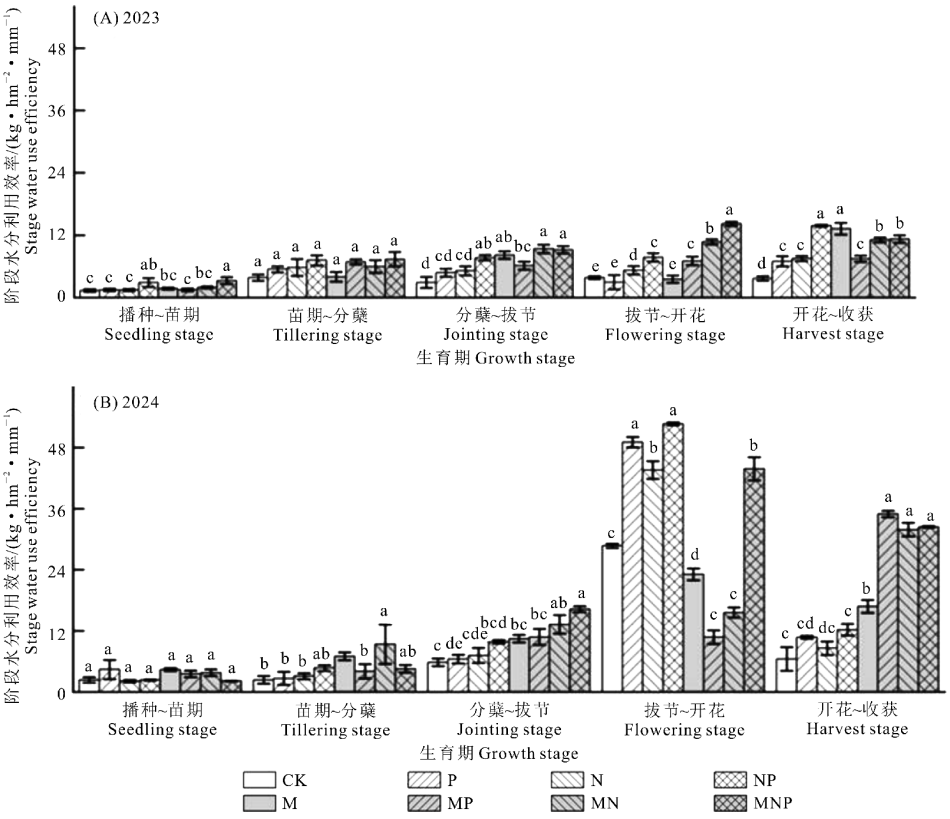


图 3 有机无机肥配施对春小麦各生育时期水分利用效率的影响

Fig.3 Effects of organic-inorganic combination on water use efficiency in spring wheat at different growth stages

2.3　有机无机肥配施对春小麦花后干物质积累和花前干物质转运的影响

有机无机肥配施对花后干物质积累的影响显著(表 3)。2023 年,P、N 和 NP 处理相比 CK 分别显著降低了花前干物质转运效率 45.9%、58.2%和 44.3%;MP、MN 和 MNP 处理比 M 处理分别显著提高花前干物质向籽粒转运量 146.7%、464.8%%和 539.1%。MP、MN 和 MNP 处理的花前干物质转运效率比 M 处理分别显著增加了 140.8%、240.8%和 246.9%。2024 年,化肥施用处理的花后干物质积累量比 CK 显著提高了 61.7%~68.4%;有机无机肥配施比 M 处理显著提高了花后干物质积累量 45.4%~57.1%。化肥施用处理比 CK 平均显著提高花后干物质积累 86.4%~148.2%;有机无机肥配施比 M 显著增加花后干物质积累 24.7%~41.2%。相比于化肥施用处理(P、N、NP),有机无机肥配施处理(MP、MN、MNP)的花后干物质积累量和花后积累干物质对籽粒贡献率两年平均显著增加61.3%~89.8%和 23.2%~37.2%。

2.4　有机无机肥配施对春小麦籽粒灌浆的影响

强势粒对于籽粒干质量的贡献大于弱势粒(图 4A、4B,见 106 页)。籽粒重量和籽粒灌浆速率受施肥处理的影响,相比于化肥施用处理,有机无机肥配施处理的强势粒和弱势粒平均籽粒干质量分别提升 9.4%和 27.7%。所有处理强势粒的籽粒灌浆速率峰值均出现在花后 15 d 左右,其中 CK 和 M 处理的峰值出现的更早一些(图 4B),弱势粒的籽粒灌浆速率峰值均出现在花后 15~20 d 左右(图 4D)。有机无机肥配施处理强势粒的最大灌浆速率相比于化肥施用处理平均提高 7.3%~13.4%,弱势粒则平均提高 7.4%~58.3%。

不同施肥处理对于小麦灌浆期穗粒数和穗粒重的差异具有显著影响(图 5)。相比于 P 和 NP 处理,MNP 和 MP 处理的春小麦平均穗粒重显著提高 9.7%~14.8%;相比于化肥施用处理,有机无机肥配施处理春小麦平均穗粒数显著提高 11.3%~19.5%,其中以弱势粒提高效果显著,显著提高 20.5%~43.8%。

表 3　有机无机肥配施对小麦花后干物质积累、花前干物质向籽粒转运量和转运效率的影响

Table 3　Effects of organic-inorganic combination on dry matter accumulation, pre-anthesis dry matter transport to grain and transport efficiency of wheat after anthesis

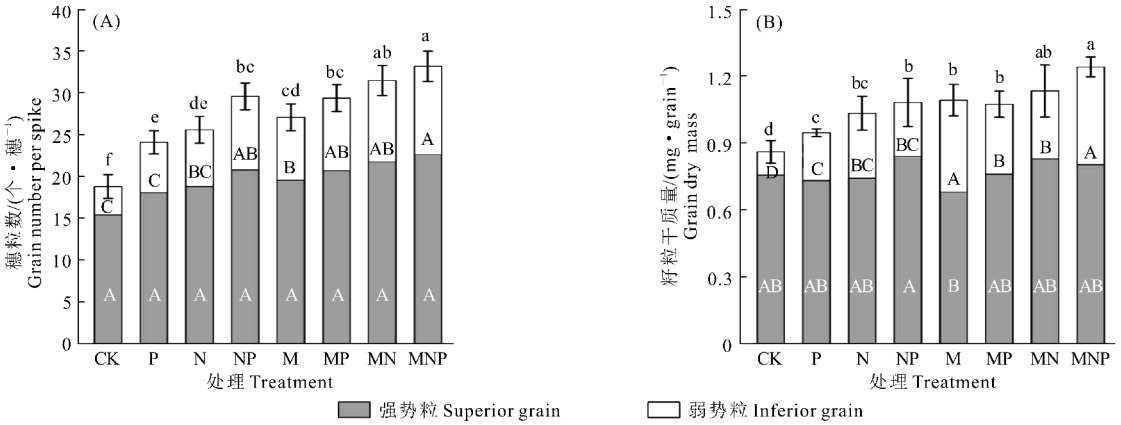
年份 Year	处理 Treatment	花后干物质积累 Post-anthesis dry matter accumulation /(kg·hm^{-2})	花后干物质积累对籽粒的贡献率 Contribution of post-anthesis dry matter accumulation to grain/%	花前干物质向籽粒转运量 Pre-anthesis dry matter remobilization to grain /(kg·hm^{-2})	花前干物质转运效率 Pre-anthesis dry matter remobilization efficiency/%
2023	CK	174.6±13.6e	41.8±3.2c	242.6±20.6b	31.8±2.6a
	P	398.2±32.3d	72.3±6.2b	152.3±10.8c	17.2±1.3b
	N	570.5±43.4c	81.4±7.2b	130.4±11.7cd	13.3±1.1c
	NP	766.2±68.2a	74.3±6.6b	264.3±22.7b	17.7±1.6b
	M	663.5±57.7b	93.4±7.8a	46.7±3.5e	4.9±0.4d
	MP	625.8±48.2bc	84.5±7.0ab	115.2±8.8d	11.8±0.9c
	MN	757.2±59.8a	74.2±5.6b	263.8±19.0b	16.7±1.2b
	MNP	781.5±59.4a	72.4±5.9b	298.5±22.4a	17.0±1.2b
2024	CK	404.3±30.7d	38.4±2.7d	647.2±45.3c	36.3±3.2a
	P	680.9±47.7c	50.9±4.5bc	657.7±48.0c	23.7±1.9d
	N	653.7±54.9c	45.5±3.2cd	783.4±62.7b	26.2±2.2cd
	NP	670.6±50.3c	41.5±3.4d	945.1±77.5a	31.0±2.2b
	M	978.1±73.4b	57.3±4.2b	727.6±59.7bc	29.0±2.6bc
	MP	1421.8±120.9a	84.5±6.3a	261.0±20.9e	10.4±0.8e
	MN	1480.8±122.9a	81.9±7.1a	326.4±26.4e	9.2±0.8e
	MNP	1536.3±119.8a	77.9±5.5a	436.6±33.6d	12.1±0.9e
平均 Average	CK	289.4±24.6f	40.1±3.1c	444.9±34.7bc	34.0±3.0a
	P	539.5±44.2e	61.6±5.5b	405.0±29.6bcd	20.5±1.7c
	N	612.1±53.3de	63.4±4.7b	456.9±37.9b	19.8±1.6cd
	NP	718.4±53.2cd	57.9±4.9b	604.7±48.4a	24.4±2.1b
	M	820.8±59.9c	75.4±5.5a	387.2±32.5cd	17.0±1.2de
	MP	1023.8±88.0b	84.5±6.8a	188.1±14.7f	11.1±0.8g
	MN	1119.0±96.2ab	78.1±5.9a	295.1±22.1e	13.0±1.2fg
	MNP	1158.9±95.0a	75.1±5.9a	367.6±32.7d	14.5±1.0ef

注:表中数据是平均值±标准差(n=3),下同。

Note: The data in the table are mean ± standard deviation (n=3), the same below.

2.5 有机无机肥配施对春小麦产量和水分利用效率的影响

总体而言,2023 年小麦的穗粒数、产量和 WUE_g 均低于 2024 年(表 4)。2023 年,MP 处理相比 P 处理显著提高了小麦的 *GY* 和 WUE_g,分别提高了4.6%和 42.1%;MN 比 N 处理显著提高了小麦的 *GY* 和 WUE_g,分别提高了 5.6%和 52.2%;而 MNP 比 NP 显著提升了小麦的 WUE_g,提高了 6.2%,但小麦的 *GY* 在 NP、MN 和 MNP 处理之间差异不显著。2023 年小麦各处理的 *HI* 彼此之间均无显著差异。2024 年,



注:图中不同大写字母表示同一指标(强势粒或者弱势粒)在处理间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示每穗的总穗粒数/总穗粒重(强势粒+弱势粒)在处理间差异显著($P<0.05$)。误差线表示标准差($n=3$)。

Note: The different capital letters in the figure indicate significant differences between treatments for the same indicator (superior or inferior grains) ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences in the total number of grains per spike or the total grain dry mass per spike (superior grains+ inferior grains) between treatments ($P<0.05$). The error line represents the standard deviation ($n=3$).

图 5 有机无机肥配施对 2023—2024 年春小麦平均穗粒数和强、弱势籽粒干质量的影响

Fig.5 Effects of organic-inorganic combination on average grain number per spike and dry mass of superior and inferior grains of spring wheat in 2023-2024

表 4 有机无机肥配施对春小麦产量构成要素、产量和水分利用效率的影响

Table 4 Effects of organic-inorganic combination on yield components, yield and water use efficiency of spring wheat

年份 Year	处理 Treatment	穗数 /(Spikes·m^{-2})	千粒重 *TGW* /g	籽粒产量 *GY* /(kg·hm^{-2})	WUE_g /(kg·mm^{-1}·hm^{-2})	收获指数 *HI*/%
2023	CK	433.7±35.1bc	34.0±2.5d	417.1±31.3d	1.3±0.1e	44.4±3.6a
	P	425.7±30.2bc	37.1±3.2cd	550.5±49.0c	1.9±0.2d	43.0±3.3a
	N	400.0±33.2c	38.9±2.8bc	701.0±61.7b	2.3±0.2cd	45.2±3.6a
	NP	455.3±33.2bc	37.9±2.9c	1030.5±85.5a	3.7±0.3b	45.5±3.3a
	M	399.7±29.2c	43.1±3.6a	710.2±49.7b	2.4±0.2c	44.1±3.8a
	MP	466.3±41.0bc	40.7±3.4abc	741.0±60.0b	2.7±0.2c	46.2±3.3a
	MN	510.3±39.8b	42.1±3.6ab	1021.0±74.5a	3.5±0.3b	43.7±3.9a
	MNP	594.3±51.7a	39.7±2.9abc	1080.0±95.0a	4.3±0.4a	42.5±3.5a
2024	CK	486.3±34.5a	34.3±3.1d	1051.4±83.1e	3.2±0.3d	48.1±3.4a
	P	462.3±38.4a	33.9±2.7d	1338.6±107.1d	4.0±0.3c	38.7±3.4bc
	N	467.0±38.8a	33.9±2.8d	1437.1±103.5cd	3.9±0.3c	39.5±3.4bc
	NP	505.0±40.4a	40.8±3.4b	1615.7±129.3bc	5.3±0.4b	43.5±3.7ab
	M	511.7±45.5a	38.0±2.8c	1705.7±129.6b	6.1±0.5a	48.9±4.2a
	MP	470.7±40.5a	36.2±2.7cd	1682.9±146.4b	4.9±0.4b	42.7±3.4ab
	MN	503.0±43.8a	45.9±4.1a	1807.1±141.0ab	5.3±0.4b	35.3±2.8c
	MNP	481.3±41.9a	35.7±3.0cd	1972.9±169.7a	5.3±0.5b	39.0±3.4bc
平均 Average	CK	460.0±40.5ab	34.1±2.8f	734.3±57.3f	2.3±0.2e	46.3±3.7a
	P	444.0±38.6ab	35.5±2.8ef	944.5±84.1e	3.0±0.2d	40.8±2.9ab
	N	433.5±38.1b	36.4±3.0de	1069.0±88.7de	3.2±0.2d	42.4±3.0a
	NP	480.2±42.7ab	39.3±3.3bc	1323.1±100.6bc	4.6±0.4ab	44.5±3.6a
	M	455.7±34.6ab	40.5±3.5b	1208.0±108.7cd	4.2±0.3bc	46.5±3.5a
	MP	468.5±39.4ab	38.4±2.9bcd	1211.9±87.3cd	3.9±0.3c	44.5±3.4a
	MN	506.7±37.0ab	44.0±3.85a	1414.0±117.4ab	4.4±0.4abc	36.0±2.8b
	MNP	537.8±37.6a	37.7±3.4cde	1526.4±135.8a	4.9±0.4a	40.8±3.1ab

MP 处理比 P 处理显著提高了小麦的 *GY* 和 WUE_g,分别提高 25.7%和 22.5%;MN 处理比 N 处理的 *GY* 和 WEU_g分别显著提高 5.7%和 35.9%;MNP 比 NP 处理的 *GY* 显著提升了 2.1%,但小麦的 WUE_g在 NP、MP、MN 和 MNP 处理之间差异不显著。2024 年小麦各处理的穗数彼此之间均无显著差异。MP 处理比 P 处理两年平均 *TGW*、*GY* 和 WUE_g分别显著提高 8.2%、28.3%和 30%;MN 处理比 N 处理的 *TGW*、*GY* 和 WUE_g分别显著提高 20.9%、32.3%和 37.5%;而 MNP 比 NP 处理 *GY* 则显著提升 5.4%。小麦穗数在 CK、P、NP、M、MP 和 MN 处理之间均无显著差异。MN 处理比 M 显著降低 *HI* 9.2%。

2.6　相关性分析

Pearson 相关性分析结果表明(图 6A),WUE_b、WUE_j、*BY*、*IGDW*、*SGNP*、*IGNP*、*PDMA* 与籽粒产量和 WUE_g均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。*IGWP*、*PNPP* 和 *TGW* 与籽粒产量和 WUE_g呈显著正相关关系($P<0.05$)。WUE_b和 *BA* 与籽粒产量呈极显著正相关关系($P<0.01$),与 WUE_g呈显著正相关关系($P<0.05$)。E_c与 WUE_g具有显著负相关关系,*PDMRE* 与籽粒产量也呈显著负相关关系($P<0.05$)。随机森林分析结果表明(图 6B、C),对产量贡献较大的指标是:WUE_g(13.7%)、*IGNP*(13.2%)、WUE_b(12.2%)、*BA*(12.1%)、*PDMA*(11%)、*SGNP*(10.5%)、*IGDW*(10%)、*PNPP*(9.1%)、*BY*(8.9%)、WUE_j(8.5%)、WUE_h(7.5%),而对 *WUE* 贡献较大的指标有 WUE_b(14.6%)、*GY*(14.3%)、WUE_j(10.9%)、*IGNP*(10.5%)、*PDMA*(9.5%)、*BY*(9.4%)、WUE_h(9%)、*SGNP*(8.7%)、*PDMRE*(7.6%)、*IGDW*(7.2%)。综合来看,*PDMRE*、*PDMA*、WUE_h、WUE_j、WUE_b、*IGNP*、*IGDW*、*BY* 这 8 项指标对于籽粒产量和籽粒产量水分利用效率的贡献度较大。

3　讨　论

3.1　有机无机肥配施对春小麦蒸发量、蒸腾量及阶段水分利用效率的影响

在春小麦生长过程中,农田的总耗水量主要包括土壤棵间蒸发量和作物蒸腾量[16]。作物耗水受蒸腾影响,提高作物蒸腾量、降低无效蒸发对于年蒸发量远大于降雨量的陇中地区具有重要意义[17]。本研究结果显示,棵间蒸发量占总农田耗水量的比例在 30%左右,这与前人研究结论一致[18]。其主要原因是有机肥的施用并不会直接导致作物蒸腾总量增加,而是通过适度降低农田的总耗水量,进而使得作物蒸腾量占总耗水量的比例表现出升高的趋势[19]。本研究中,相较于化肥施用处理,有机无机肥配施处理显著提高了苗期和开花期的植株蒸腾量 47.3%~122.6%,并显著提高开花期蒸腾量占全生育期耗水量的比例,提高了 22.2%~25.2%,说明该措施促进了土壤水-作物水的转化,这与 Wang 等[20]在绿肥还田研究中得出的结论一致。

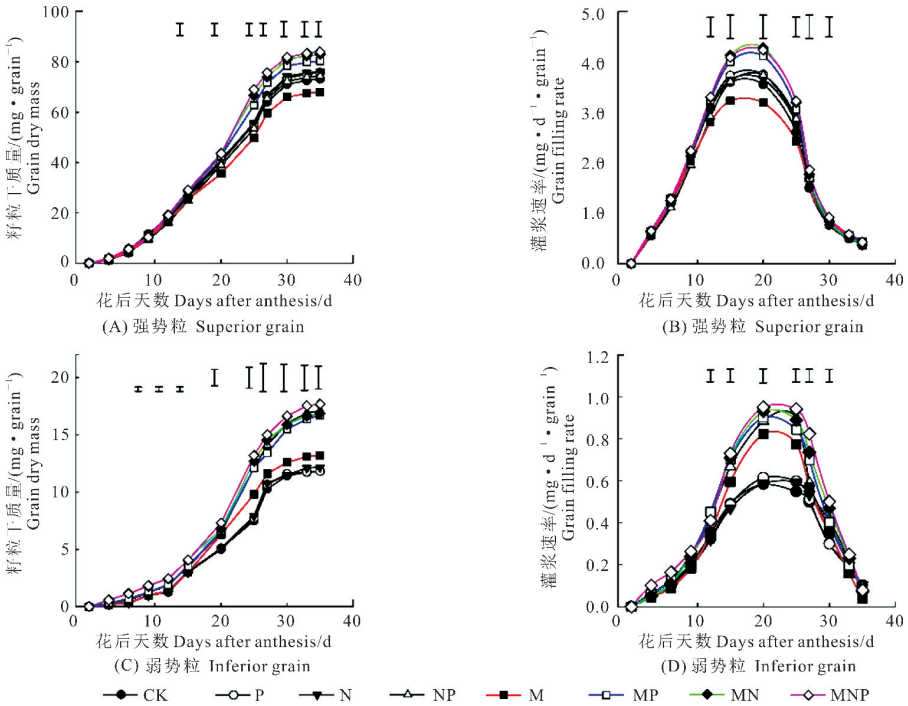
3.2　有机无机配肥施对春小麦干物质积累与转运的影响

施肥处理提高了小麦的干物质积累量,这与 Zhai 等[21]的研究结果一致,主要是因为施肥处理增加了冠层覆盖,有利于降低土壤蒸发,从而提高了蒸腾效率,有利于干物质积累。本研究发现,有机无机肥配施处理显著提高了小麦的阶段水分利用效率,特别是拔节期~开花期和灌浆期的阶段水分利用效率,这与前人的研究结果一致[22-23]。有机无机肥配施提高了小麦干物质积累,主要是有机肥施用提高了小麦抗旱性,促进冠层生长,改善光合特性,提高蒸腾效率[4]。此外,施用有机肥能改善土壤物理结构,增加土壤有机碳含量和微生物活性,提高土壤养分含量,从而有益于植株对氮磷钾等养分的吸收和积累,进而提高干物质积累[24]。

3.3　有机无机肥配施对春小麦籽粒灌浆、产量及 WUE_g的影响

干物质的积累能力是影响作物产量的关键因素[25],而籽粒灌浆是光合产物向籽粒转运致使籽粒干质量增加的过程,因此籽粒灌浆特征是影响麦类作物产量形成的重要因素[13]。本研究结果表明,施肥处理显著促进了小麦穗数、穗粒数、灌浆速率和千粒重,提高了籽粒产量和水分利用效率,这与任强等[26]、Chen 等[27]的研究结果一致。本研究发现高产处理的强势粒数目及强势粒产量相对稳定,而对弱势粒的灌浆速率提升幅度要大于强势粒,导致高产处理弱势粒数目及弱势粒产量显著增加,这与前人在秸秆还田研究中的发现一致[28]。相似的结果也在水分控制试验中被报道,前人研究发现中度干旱胁迫后复水相比于正常供水处理能显著增加小麦弱势粒的最大灌浆速率和平均灌浆速率,对强势粒则无显著影响[29]。2024 年,有机无机肥配施相比单纯化肥施用的籽粒产量和 WUE_g提升幅度更大,说明在干旱时进行有机无机肥配施的增产增效效果更好,这也与以往研究结果一致[30]。

以往研究多关注产量及其构成要素的变化,对有机无机肥配施下强势粒和弱势粒灌浆特征的研究较少。本研究首次探讨有机无机肥配施对弱势粒灌浆的影响,在等氮磷水平下,有机无机肥配施处

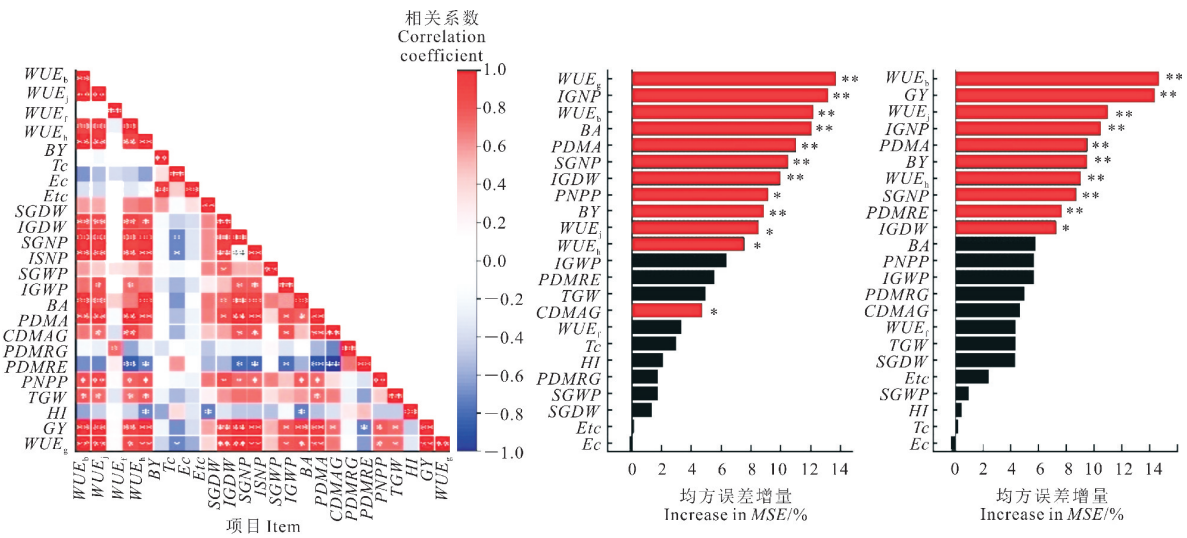


注:图中数据为 2023—2024 平均值,垂直误差线表示 $LSD_{0.05}$ 值($n=3$)。

Note: The data in the figure are the average values for 2023-2024, and the vertical error bars represent the $LSD_{0.05}$ value ($n=3$).

图 4 有机无机肥配施对 2023—2024 年春小麦籽粒干质量和灌浆速率的影响

Fig.4 Effects of organic-inorganic combination on grain dry mass and grain filling rate of spring wheat in 2023-2024



注:*GY*:籽粒产量;WUE_g:水分利用效率;*IGDW*:弱势粒干质量;*PDMRG*:花前干物质向籽粒转运量;*SGWP*:强势粒穗粒重;*PDMRE*:花前干物质转运效率;*CDMAG*:花后干物质积累对籽粒的贡献;*IGWP*:弱势粒穗粒重;*PNPP*:穗数;*SGDW*:强势粒干质量;*BA*:开花期生物量;*SGNP*:强势粒穗粒数;*PDMA*:花后干物质积累;*IGNP*:弱势粒穗粒数;WUE_j:分蘖期~拔节期水分利用效率;WUE_f:拔节期~开花期水分利用效率;WUE_h:灌浆期水分利用效率;WUE_b:生物量产量水分利用效率;*BY*:生物量产量。“*”和“**”分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。

Note: *GY*: Grain yield; WUE_g: Grain yield water use efficiency; *IGDW*: Inferior grain dry mass; *PDMRG*: Pre-anthesisdry matter remobilization to grain; *SGWP*: Superior grain weight per panicle; *PDMRE*: Pre-anthesisdry matter remobilization efficiency; *CDMAG*: Contribution of post-anthesis-dry matter accumulation to grain; *IGWP*: Inferior grain seight per panicle; *PNPP*: Panicle number per plant; *SGDW*: Superior grain dry mass; *BA*: Biomass during anthesis; *SGNP*: Superior grain number per panicle; *PDMA*: Post-anthesis dry matter accumulation; *IGNP*: Inferior grain number per panicle; WUE_j: Water use efficiency during tillering stage to jointing stage; WUE_f: Water use efficiency during jointing stage to flowering stage; WUE_h: Water use efficiency during grain filling stage; WUE_b: Biomass yield water use efficiency; BY: Biomass yield. “*” and “**” indicate significant differences at the levels of $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

图 6 小麦不同指标与籽粒产量和籽粒水分利用效率之间的相关性分析

Fig.6 Correlation analysis between different wheat indexes and grain yield and grain water use efficiency

理(如 MNP)显著促进了弱势粒的灌浆速率,提高了弱势粒数目和弱势粒粒重,从而促进了小麦产量和 WUE_g,说明有机无机肥配施下的增产主要依赖于弱势粒数目和弱势粒粒重的增加,其机制可能是有机肥施入增强了弱势粒中蔗糖-淀粉代谢途径关键酶活性,进而促进籽粒灌浆。我们通过机器学习随机森林模型分析结果表明,有机无机肥配施增加产量和 WUE_g 主要是通过调整水分利用策略,将更多的耗水转化为作物蒸腾,增加地上部干物质积累,最终促进拔节期~开花期和灌浆期水分利用效率,提高花前干物质转运效率及花后干物质向籽粒转运,增加弱势粒数目,提高弱势粒灌浆速率,增加弱势粒干质量,从而提高籽粒产量和 WUE_g。

4　结　论

在黄土高原旱地条件下,相较于不施肥对照(CK),单施化学氮磷肥(NP)可显著提高春小麦产量(28.6%~80.2%)和籽粒水分利用效率(30.4%~100%)。然而,与单施化肥处理(NP、N、P)相比,有机无机肥配施处理(MNP、MN、MP)进一步显著提高了小麦产量(15.4%~32.3%)和 WUE_g(6.5%~37.5%),其中 MNP 处理效果最优,其产量较 NP 处理显著增加 5.4%。增产增效的主要机制在于:有机无机肥配施处理显著提升了灌浆期的阶段水分利用效率(提升 67.7%~166.7%),显著增加了花后干物质积累量(61.3%~89.8%)及其对籽粒的贡献率(23.2%~37.2%),同样显著增加了弱势粒数目(20.5%~43.8%)并提高了其灌浆速率(7.4%~58.3%)和产量(4.6%~80.5%),从而促进了“土壤水-作物水”转化和干物质积累向籽粒的高效分配。因此,综合考虑产量和水分利用效率的最大提升,推荐在陇中旱农区春小麦种植中采用有机无机肥配施模式(MNP)。

参 考 文 献:

[1] 卢春燕. 我国小麦生产现状与提高小麦生产能力的思考[J]. 南方农业, 2021, 15(30): 177-178.
LU C Y. Reflections on the current situation of wheat production in China and the improvement of wheat production capacity[J]. South China Agriculture, 2021, 15(30): 177-178.

[2] 张志伟, 魏秀华, 于海涛, 等. 小麦抗倒伏研究进展[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(19): 21-23.
ZHANG Z W, WEI X H, YU H T, et al.Research progress on lodging resistance of wheat[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2021, 49(19): 21-23.

[3] TANG L D, SHAIKH I A, TUNIO A, et al. Effect of raised flat bed and ridge planting on wheat crop growth and yield under varying soil moisture depletions[J]. Agronomy-Basel, 2024, 14(7): 1404.

[4] WANG L L, WANG S W, CHEN W, et al. Physiological mechanisms contributing to increased water-use efficiency in winter wheat under organic fertilization[J]. PLoS One, 2017, 12(6): e0180205.

[5] GUO Y J, QIU T L, GAO M, et al. Does increasing the organic fertilizer application rate always boost the antibiotic resistance level in agricultural soils? [J]. Environmental Pollution, 2023, 322: 121251.

[6] WANG Y H, LIU H, HUANG Y, et al. Effects of cultivation management on the winter wheat grain yield and water utilization efficiency [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 12733.

[7] 胡冬妮, 董志新, 朱波. 有机肥替代化肥对紫色土坡耕地氮素流失的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(3): 431-440.
HU D N, DONG Z X, ZHU B. Impact of substitution of synthetic nitrogen fertilizer with organic fertilizers on nitrogen loss from sloping cropland of purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(3): 431-440.

[8] LIU C A, ZHOU L M. Soil organic carbon sequestration and fertility response to newly-built terraces with organic manure and mineral fertilizer in a semi-arid environment[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 172: 39-47.

[9] ZHAI L C, WANG Z B, ZHAI Y C, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer benefits grain yield, water use efficiency, and economic return of summer maize[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 217: 105287.

[10] WANG X Q, NIE J W, WANG P X, et al. Does the replacement of chemical fertilizer nitrogen by manure benefit water use efficiency of winter wheat-summer maize systems? [J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106428.

[11] 李玮, 乔玉强, 曹承富, 等. 安徽省不同生态区冬小麦产量及土壤肥力评价[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2): 242-252.
LI W, QIAO Y Q, CAO C F, et al. Winter wheat yield and soil fertility evaluation in different ecological zones of Anhuiprovince[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(2): 242-252.

[12] 吴梦寅, 蔡炜, 钟笑涵, 等. 高温胁迫对水稻籽粒灌浆与稻米品质影响及其机理研究进展[J]. 中国稻米, 2024, 30(3): 10-17.
WU M Y, CAI W, ZHONG X H, et al. Research advances in high temperature stress on the grain-filling and quality of rice and its mechanism[J]. China Rice, 2024, 30(3): 10-17.

[13] 杨建昌. 水稻弱势粒灌浆机理与调控途径[J]. 作物学报, 2010, 36(12): 2011-2019.
YANG J C. Mechanism and regulation in the filling of inferior spikelets of rice [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2011-2019.

[14] RIEUX C M, VANASSE A, CHANTIGNY M H, et al. Yield and bread-making potential of spring wheat under mineral and organic fertilization[J]. Crop Science, 2013, 53(3): 1139-1147.

[15] Richards F. A flexible growth function for empirical use[J]. Journal of Experimental Botany, 1959, 10: 290-301.

[16] 孙仕军, 樊玉苗, 刘彦平, 等. 土壤棵间蒸发的测定及其影响因

素[J]. 节水灌溉, 2014, (4): 79-82.
SUN S J, FAN Y M, LIU Y P, et al. Measurement and influencing factors of Soil evaporation between plants [J]. Water Saving Irrigation, 2014, (4): 79-82.

[17] 刘庆, 马建涛, 柴雨葳, 等. 覆盖栽培对旱地春玉米耗水特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(3): 145-153.
LIU Q, MA J T, CHAI Y W, et al. Effects of mulch pattern on water use characteristics and yield of dryland spring maize[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(3): 145-153.

[18] 刘昌明, 张喜英, 胡春胜. SPAC 界面水分通量调控理论及其在农业节水中的应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(5): 446-451.
LIU C M, ZHANG X Y, HU C S.SPAC interface water flux control and its application to water-saving in agriculture [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2009, 45(5): 446-451.

[19] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]. 水利学报, 1998, (10): 37-40.
LIU C M, ZHANG X Y, YOU M Z. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by largescale weighing lysimeter and micro lysimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (10): 37-40.

[20] WANG Pengfei, YU Aizhong, WANG Feng, et al. Nitrogen reduction by 20%with green manure retention reduces soil evaporation,promotes maize transpiration and improves water productivity in arid areas[J]. Field Crops Research, 2024, 315: 109488.

[21] ZHAI L C, ZHANG L H, CUI Y Z, et al. Combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer alleviates the kernel position effect in summer maize by promoting post-silking nitrogen uptake and dry matter accumulation[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(4): 1179-1194.

[22] 费聪. 有机肥替代化肥对旱区雨养玉米养分吸收利用及产量的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(7): 1355-1364.
FEI C. Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on nutrientabsorption-utilization and yield of rain-fed maize in arid region [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(7): 1355-1364.

[23] 陈梦茹, 邢英英, 解云霞, 等. 有机肥等氮替代化肥对春玉米生长、产量和水肥利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 369-381.
CHEN M R, XING Y Y, XIE Y X, et al. Effects of organic manure and other nitrogen substitutes on spring maize growth,yield,and water and fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 369-381.

[24] YOU J S, ZHOU H P, XU M G, et al. Fertilization highly increased the water use efficiency of spring maize in dryland of northern China: A meta-analysis[J]. Agronomy-Basel, 2023, 13(5): 1331.

[25] 杨永, 柴雨葳, 常磊, 等. 不同覆盖处理对冬小麦干物质积累转运及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 155-166.
YANG Y, CHAI Y W, CHANG L, et al. Effects of different mulching treatments on accumulation and translocation of dry matter and yield in winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 155-166.

[26] 任强, 徐珂, 樊志龙, 等. 小麦玉米间作氮肥后移利于减少土壤蒸发提高水分利用效率[J]. 中国农业科学, 2024, 57(7): 1295-1307.
REN Q, XU K, FAN Z L, et al. Nitrogen fertilizer postponing application benefits wheat-maize intercropping by reducing soil evaporation and improving water use efficiency[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(7): 1295-1307.

[27] CHEN Y L, LIU T, TIAN X H, et al. Improving winter wheat grain yield and water use efficiency through fertilization and mulch in the loess plateau[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(6): 2059-2068.

[28] 王贺正, 张冬霞, 张静, 等. 秸秆还田配施磷肥对旱地小麦籽粒灌浆特性及磷素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (10): 150-159.
WANG H Z, ZHANG D X, ZHANG J, et al. Effects of straw returning and phosphorus fertilizer application on grain filling characteristics and phosphorus absorption and utilization of dryland wheat[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023, (10): 150-159.

[29] 杨丽丽, 任建宏, 刘溢建, 等. 小麦花后水分亏缺和复水对同化物转运和籽粒灌浆的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(11): 1909-1918.
YANG L L, REN J H, LIU Y J, et al. Effect of water deficit and rehydration on the post-flowering assimilate transport and grain filling in wheat[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(11): 1909-1918.

[30] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质和水分利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 250-258.
PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on the yield,quality, and water use efficiency of dryland wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4): 250-258.