

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.22136

有机无机配施及亏缺灌溉对关中地区冬小麦生长及氮素利用效率影响

欧阳啸丰^{1, 3}, 宿顺顺⁴, 冯浩^{1, 2, 3}, 吴淑芳^{1, 3*}, 胡亚瑾^{1, 3}, 陈霁菲^{1, 3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4. 北京良乡蓝鑫水利工程设计有限公司, 北京 102401)

摘要: 研究不同比例有机无机肥配施与亏缺灌溉耦合作用下, 冬小麦氮素累积、转运利用效率以及土壤硝态氮分布等状况, 探求提高关中地区冬小麦产量的适宜有机无机配施比以及相应的亏缺灌溉量, 为该地区冬小麦的高产高效提供科学有效的水肥管理。结合 2 个水平的灌溉 (充分灌溉 W1 和亏缺灌溉 W2), 采用等氮的原则, 对有机肥与无机肥按照不同比例混施 (F1: 100% 化肥、F2: 24% 有机肥和 76% 化肥混施、F3: 48% 有机肥和 52% 化肥混施), 研究亏缺灌溉与有机无机肥配施对冬小麦氮素转运及利用效率影响和土壤硝态氮分布情况。有机无机配施能有效促进作物生长, 显著增加作物籽粒产量以及显著提高开花期后氮素累积、分配和转运。在充分灌溉 W1 条件下, F2 和 F3 处理的籽粒产量较 F1 处理提高 12.0% ~ 28.6%; 亏缺灌溉 W2 条件下, 有机肥处理的小麦籽粒产量提高 16.6% ~ 31.8%。在相同灌溉条件下, 成熟期 F2 和 F3 处理相对 F1 处理, 冬小麦氮素累积量、向籽粒转运量和氮肥生产效率分别提高了 12.8% ~ 40.4%、11.9% ~ 36.5%、13.0% ~ 31.6%; 相同有机无机配施比例下 (F2 和 F3), 冬小麦亏缺灌溉 W2 处理下各种氮素吸收利用指标高于充分灌溉 W1 处理 10.0% ~ 28.5%。有机无机肥配施能够显著提高不同土层土壤硝态氮含量, 在相同灌溉条件下, 在 0 ~ 100 cm 土层 F3 处理硝态氮含量分别较 F1 和 F2 处理增加了 66.4% ~ 76.4% 和 1.2% ~ 13.9%; 相同有机无机配施比例下 (F2 和 F3), 在 0 ~ 100 cm 土层 W1 处理 F1、F2、F3 土壤硝态氮含量分别低于 W2 处理 15.1%、9.9%、19.9%。48% 化肥和 52% 有机肥配施、亏缺灌溉 (50%) 处理是该试验条件下冬小麦高产高效的最佳水肥管理模式。

关键词: 冬小麦; 有机无机肥配施; 亏缺灌溉; 氮素转运; 氮素利用效率

小麦是我国陕西省第二大粮食作物品种, 关中平原是陕西省小麦的主要产区, 其粮食产量占陕西省粮食总产量的 30% 左右, 小麦的种植面积和产量对陕西省的粮食生产和粮食安全有着较大影响。因此, 提升关中平原地区小麦的生产能力可以给陕西省经济可持续发展以及社会稳定与繁荣提供强有力的保障。为了获得更高的产量, 当地长期使用大量的化肥。化肥的长期施用, 一方面有力地保证了粮食安全, 另一方面也导致了土壤肥力下降和生态环境恶化。经调查研究发现, 我国陕西省关中地

区氮肥施用过剩严重, 仅有 30% 左右的农户施肥量合理^[1-2]。长期过量施用化肥不仅导致农民粮食成本的增加, 而且化肥利用率低, 大部分通过淋溶、径流和硝化等途径进入到河流、湖泊和大气环境, 对生态环境造成损害, 同时破坏了原来土壤的结构, 出现土壤酸碱化等问题^[3]。单施有机肥或无机肥均不能实现农业绿色可持续发展, 将两者按照一定比例混施, 才能避免长期施用化肥所带来的土壤肥力下降和生态环境恶化现象。有机无机肥配施能够有效地促进作物氮肥吸收利用、降低对环境的破坏、增强土壤保水保肥能力。通过长期定位试验指出, 不同比例有机肥与氮磷钾化肥混施能够提高作物氮素累积量, 增加土壤生产力^[4-5]。因此, 将有机肥与无机肥按一定的比例配施对于提高陕西关中地区冬小麦产量和氮素利用效率具有十分重要的意义。在我国淡水水资源短缺且日益严峻的背景

收稿日期: 2022-03-15; 录用日期: 2022-06-09

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目 (2021YFD1900700)。

作者简介: 欧阳啸丰 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为有机无机配施对作物产量及氮素影响研究。E-mail: 18274850997@163.com。

通讯作者: 吴淑芳, E-mail: wsfjs@163.com。



下, 研究学者们已逐渐从作物高产灌水模式转向研究节水灌溉高效利用模式。有研究指出, 作物对于干旱的及时反应能够降低或者避免对于植物的损伤^[6]。一定范围的水分亏缺既不会影响作物产量, 还能够促进作物对水分的吸收利用^[7-8]。

当前, 关于有机肥无机肥配施对于陕西关中地区冬小麦的生长以及氮素利用效率的影响已有一系列的研究报道, 亏缺灌溉等高效灌水模式对于冬小麦等作物生长的效应也有一系列的报道, 但是关于两者耦合作用对于冬小麦的生长发育、产量性状和氮素利用效率的影响还有待进一步研究。本研究通过设置不同比例的有机无机肥配施, 在不同的灌水量的作用下, 研究有机无机配施与亏缺灌溉对关中地区冬小麦的生长、干物质累积量、产量、氮素转运和氮素吸收利用效率的影响机制, 旨在一定的灌水量下, 探索出提高关中地区冬小麦产量的有机无机氮肥配比, 为该地冬小麦高效高产的水肥管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西关中地区杨凌高新农业产业示

范区西北农林科技大学 (34° 16' 56" N, 108° 4' 30" E), 海拔 521 m, 多年平均降水量 600 mm, 降水量季节分配不均, 主要集中在夏季 (7—9 月); 多年平均蒸发量为 1440 mm, 属大陆性暖温带季风型半湿润气候区; 年平均气温为 13℃, 日照时间为 2196 h, 无霜期为 169 ~ 200 d。试验时间为 2019 年 10 月至 2020 年 6 月, 试验期间的每日温度和降水量见图 1。0 ~ 20 cm 土层的基本指标见表 1。

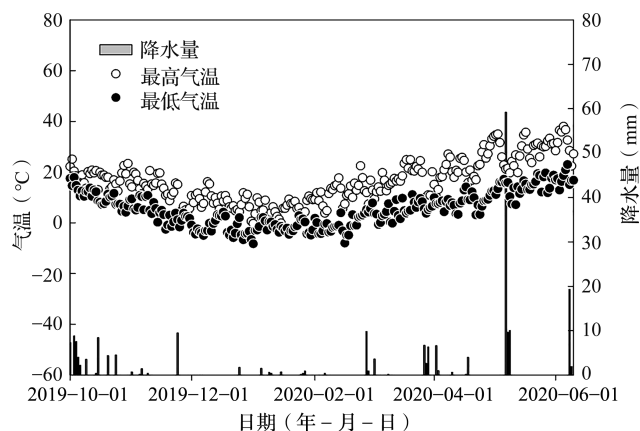


图 1 2019 年 10 月至 2020 年 6 月降水量和最高气温和最低气温

表 1 试验地土壤基本指标

有机质 (g/kg)	pH	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	容重 (g/cm ³)	田间持水量 (g/g)	土壤质地
13.1	8.17	0.97	19.97	173.35	1.4	22.2	中壤土

1.2 有机肥制备

本研究选用的生物有机肥由杨凌霖科生态环境有限公司与西北农林科技大学共同研制, 重量百分比是: 油渣 45%, 作物秸秆 25%, 食用菌菌渣 8%, 钙镁磷肥或磷矿粉 4%, 中药渣 5%, 石灰或草木灰 3%, 解淀粉芽孢杆菌 1%, 活性炭或胶原蛋白 4%, 聚丙烯酰胺 5%, 上述原料经过一系列粉碎、制堆、熟化、发酵等工艺合成, 有机肥中的有机质、N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 79.2%、6.7%、2.3%、0.3%。重金属含量均低于《肥料中重金属含量限量标准》(GB 4284—2018) 的限量。

1.3 田间试验

供试冬小麦品种小偃 22 为当地推广的种植品种。本试验采用 2 个灌水处理 (W1 充分灌溉和 W2 亏缺灌溉处理) 和 3 种有机无机肥混施处理。采用 2 因

素随机区组设计 (表 2)。施肥处理采用等氮的原则, 即有机无机配施的肥料中含氮量相同, 其中有机肥中的含氮量为 6.68%, 按照 20% 的当季矿化量计算。F1 处理是单施化肥; F2 处理是 76% 化肥和 24% 有机肥; 处理 F3 是 52% 化肥和 48% 有机肥。总共 6 个处理, 3 次重复, 18 个种植小区。每个小区面积为 18 m² (4 m × 4.5 m)。肥料选用尿素 (N 46.4%)、磷酸二铵 (N 12%、P₂O₅ 61%) (均为质量分数)。试供土壤为中壤土, 冬小麦施氮肥 (N) 150.0 kg/hm²、磷肥 (P₂O₅) 120.0 kg/hm²。各处理的氮肥 (有机肥和尿素)、磷肥都在作物播种前全部撒入土壤中作为基肥施用, 在作物的生育期不再追肥。灌水在冬小麦拔节期和灌浆期进行。每小区种植冬小麦 16 行, 行距 25 cm, 播种量是 187.5 kg/hm²。播种时间为 2019 年 10 月 1 日, 收获时间为 2020 年 6 月 10 日。

表 2 不同处理的施肥量和灌水情况

灌溉	施肥	灌水定额 (mm)	有机肥用量 (t/hm ²)	来自有机肥 N (kg/hm ²)	来自化肥 N (kg/hm ²)	化肥 N 减少比例 (%)
W1	F1	120	0	0	150	0
W1	F2	120	4	36.44	113.56	24
W1	F3	120	8	71.88	78.12	48
W2	F1	60	0	0	150	0
W2	F2	60	4	36.44	113.56	24
W2	F3	60	8	71.88	78.12	48

注：有机无机肥配施处理用尿素将 N 补齐到 225 kg/hm²。W1、W2 在拔节期和灌浆期分别灌水 60、30 mm。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 冬小麦产量测定

在冬小麦的生育期内于各种植小区进行取样，包括拔节期、开花期、灌浆期、收获期，每小区都用 3 点取样法，拔节期将植株的茎和叶分开，开花期将植株的茎、叶、穗分开。植株样品于烘箱中 105℃杀青 30 min，然后将温度调到 75℃烘干至恒重。在冬小麦的收获期对试验地的每个处理小区进行产量的测定。具体的方法：取每个小区 1 m² 冬小麦放入网兜中，自然状态下将其风干，然后人工进行脱粒，计算小麦产量。

1.4.2 植株氮素含量的测定

将冬小麦的开花期和成熟期植株样品用烘箱烘干后，用粉碎机将植物的茎、叶、穗器官分别进行粉碎研磨，然后过 1 mm 的筛子，粉碎过筛的样品粉末用 H₂SO₄-H₂O₂ 溶液在炉中进行消煮，利用凯氏定氮仪（FOSS-2000 型）测定营养器官氮素含量。

1.4.3 土壤硝态氮的测定

在冬小麦的拔节期、成熟期内，在每个处理采集 0 ~ 100 cm 土层土壤，每 20 cm 为一层，每个处理 3 次重复。将取回的土壤样品在实验室内自然风干，然后过 1 mm 筛，用 2 mol/L 的 KCl 溶液浸提 - 流动分析仪测定土壤中硝态氮含量。

1.5 数据处理与统计分析

1.5.1 数据指标计算

(1) 氮素积累、转运及分配的计算

植株氮素吸收量 (kg/hm²) = 植株氮素含量 × 干物质质量；

营养器官氮素转移量 (kg/hm²) = 开花期营养器官氮素吸收量 - 成熟期营养器官氮素吸收量；

开花期后营养器官氮素吸收量 (kg/hm²) = 成熟期氮素吸收总量 - 开花期氮素吸收量；

营养器官氮素转移率 (%) = 营养器官氮素转移量 / 开花期营养器官氮素吸收量 × 100。

(2) 氮素利用等指标的计算

氮素吸收效率 (kg/kg) = 植株氮素累积量 / 施氮量；

氮素利用效率 (kg/kg) = 籽粒产量 / 植株氮素累积量；

氮肥生产效率 (kg/kg) = 籽粒产量 / 施氮量；

氮素收获指数 (%) = 籽粒氮素吸收量 / 植株氮素吸收量 × 100。

1.5.2 统计分析

用 Excel 2013 进行数据处理；用 SPSS 20.0 进行方差分析；用 Sigmaplot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦穗长、有效穗数、千粒重和产量的影响

由表 3 可知，在相同的灌水条件下，与单施无机肥相比，有机无机配施能显著地提高冬小麦的穗长、有效穗数、千粒重和籽粒产量。在相同的施肥条件下，冬小麦有效穗数、千粒重和籽粒产量均表现为 W2 处理 > W1 处理。W1 处理的 F3 小麦籽粒产量为最高，高于其他处理 12.0% ~ 28.6%；W2 处理下 F3 小麦籽粒产量达到最高水平，高于其他处理 16.6% ~ 31.8%。而且 W2 处理的 F3 籽粒产量最高达 10488.6 kg/hm²，较 W1 处理中最高产量增加了 5.3%。但是在 W1 和 W2 条件下，F3 处理较 F2 处理的有机肥增加 24%，籽粒产量相应增加了 12.0% 和 16.6%，有机肥比例增加率大于籽粒产量增加率。在



同一施肥比例下, W2 处理的有效穗数和千粒重较 W1 处理分别增加了 0.5% ~ 8.4% 和 2.9% ~ 10.7%。灌溉类型对冬小麦有效穗数和千粒重有极显著影响; 施肥比例对冬小麦穗长、有效穗数、千粒重和籽粒产量有极显著影响; 两者交互作用对有效穗数有显著性影响, 对其他产量及其性状无显著性影响。

表 3 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦穗长、有效穗数、千粒重和产量的影响

灌溉	施肥	穗长 (cm)	有效穗数 (个 /m ²)	穗粒数	千粒重 (g)	籽粒产量 (kg/hm ²)
W1	F1	6.3c	493.7c	34.5c	34.6f	7743.1c
W1	F2	7.3b	524.0b	36.2ab	41.8c	8889.8b
W1	F3	7.3b	540.7b	38.6a	44.0b	9957.8a
W2	F1	6.5c	496.4c	31.2d	38.3d	7955.8c
W2	F2	7.2b	532.0b	33.5b	43.0bc	8997.9b
W2	F3	7.6a	586.3a	36.2ab	47.3a	10488.6a
显著性检验 (F 值)						
灌溉类型		NS	**	*	**	NS
施肥比例		**	**	**	**	**
灌溉类型 × 施肥比例		NS	*	NS	NS	NS

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$); *, ** 分别表示显著、极显著, NS 表示不显著。下同。

2.2 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦开花期后营养器官氮素累积及转运的影响

由表 4 可知, 开花期小麦植株氮素累积量并没有随着灌溉量的增加而呈现增长趋势, 小麦开花期后氮素吸收量和营养器官转运量均表现为随着有机肥比例的增加而增加的趋势。W1 处理和 W2 处理的 F3 氮素吸收量最大, 其他处理较 F3 降低了 22.5% ~ 45.6%

和 21.8% ~ 50.6%。其中 W2 处理中 F3 氮素转运量比 W1 处理中 F3 提高了 10.1%。在不同灌溉量条件下, F2、F3 的施肥比例下的氮素转运效率无显著性差异, 但 F2 和 F3 处理较 F1 处理的氮素转运效率分别提高 9.6% ~ 9.9% 和 23.6% ~ 34.3%。在亏缺灌溉条件下, 48% 有机肥 +52% 化肥对于小麦开花期后氮素累积及转运量具有明显提高的效果。

表 4 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦开花期前后氮素累积及转运影响

灌溉	施肥	开花期营养器官 氮累积量 (kg/hm ²)	开花期后氮素吸收量 (kg/hm ²)	营养器官氮素转运量 (kg/hm ²)	氮素转运效率 (%)
W1	F1	84.3d	62.0c	36.5c	36.2%c
W1	F2	101.1c	73.7b	40.4bc	39.8%bc
W1	F3	128.3b	90.3a	62.6a	48.6%a
W2	F1	110.1ab	63.8c	40.4bc	39.4%bc
W2	F2	116.4bc	78.9b	45.7b	43.2%b
W2	F3	141.2a	96.1a	68.9a	48.7%a
显著性检验 (F 值)					
灌溉类型		NS	NS	NS	NS
施肥比例		*	**	**	*
灌溉类型 × 施肥比例		*	*	**	*

2.3 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦氮素利用效率的影响

由表 5 可知, 不同比例的有机无机配施与亏缺灌溉可以显著增加冬小麦成熟期氮素累积量; 不同的灌溉量与有机无机配施比例分别不同程度地影响着冬小麦氮素吸收、利用效率。W1 处理和 W2 处理的 F3 成熟期氮素累积量最大, 其他处理较 F3 降低了 6.0% ~ 27.9% 和 7.1% ~ 19.3%。不同的灌溉量与有机无机配施比例显著影响冬小麦的氮素吸

收效率, 且均呈现 F3 处理 >F2 处理 >F1 处理。亏缺灌溉显著影响冬小麦氮素利用效率, 在等量施肥下, 氮素利用效率提高了 5.7% ~ 9.4%。有机无机配施比例极显著影响冬小麦氮肥生产效率, 与 F3 相比, 氮肥生产效率下降了 14.2% ~ 24.1%。由此可见, 亏缺灌溉显著影响冬小麦氮素吸收效率以及氮素利用效率, 有机无机配施比例显著影响氮素累积量、吸收利用效率以及氮收获指数, 尤其是极显著影响氮肥生产效率。

表 5 有机无机配施与亏缺灌溉对小麦氮素吸收利用的影响

灌溉	施肥	成熟期氮素累积量 (kg/hm ²)	氮素吸收效率 (kg/kg)	氮素利用效率 (kg/kg)	氮肥生产效率 (kg/kg)	氮收获指数 (%)
W1	F1	166.3d	0.6c	39.2e	34.4c	0.77d
W1	F2	217.5b	0.8b	44.2cd	39.5b	0.82b
W1	F3	230.8a	1.0ab	58.4b	44.3a	0.86ab
W2	F1	191.6c	0.7c	42.9d	35.4c	0.80c
W2	F2	220.6b	1.0ab	46.7c	40.0b	0.83b
W2	F3	237.3a	1.1a	62.3a	46.6a	0.88a
显著性检 (F 值)						
灌溉类型		NS	*	*	NS	NS
施肥比例		*	*	NS	**	*
灌溉类型 × 施肥比例		*	*	*	NS	**

2.4 有机无机配施与亏缺灌溉对土壤硝态氮影响

图 2 是有机无机配施与亏缺灌溉作用下冬小麦拔节期 0 ~ 100 cm 土壤硝态氮分布情况。由图 2 可知, 不同灌溉处理能够影响土壤硝态氮在不同土层的分布, 在小麦拔节期土壤硝态氮主要分布在 20 cm 土层处, 在 40 ~ 100 cm 土层土壤硝态氮累积量先减小后稳定。与单施化肥相比, 有机无机肥配施能够显著提高不同土层土壤硝态氮含量, 且

在 0 ~ 100 cm 土层土壤硝态氮含量整体表现为 F3 处理 >F2 处理 >F1 处理的趋势, 在 0 ~ 100 cm 土层 F3 处理硝态氮含量分别较 F1 和 F2 处理增加了 66.4% ~ 76.4% 和 1.2% ~ 13.9%。W1 和 W2 处理的 0 ~ 40 cm 土壤硝态氮分别占 0 ~ 100 cm 土壤的 64.2% ~ 70.3% 和 61.6% ~ 70.0%。在 0 ~ 100 cm 土层 W1 处理 F1、F2、F3 土壤硝态氮含量分别低于 W2 处理 15.1%、9.9%、19.9%。

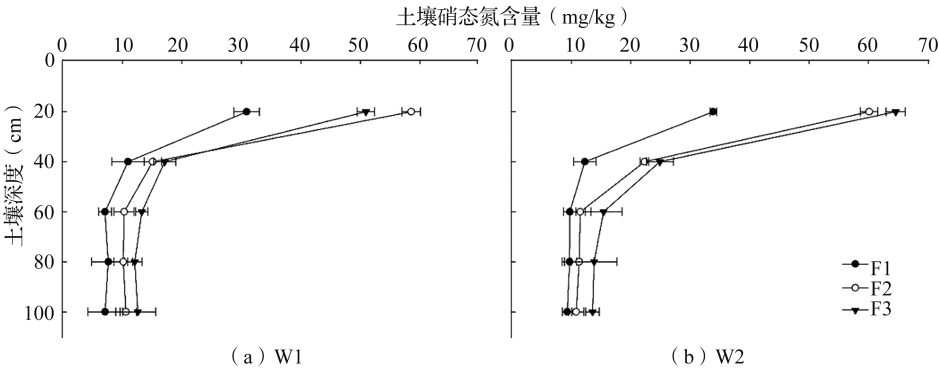


图 2 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦拔节期 0 ~ 100 cm 土壤硝态氮分布的影响

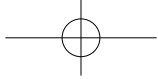


图3是有机无机配施与亏缺灌溉作用下冬小麦成熟期0~100 cm土壤硝态氮分布情况。由图3可知,各处理的土壤硝态氮在0~100 cm土层内先降低然后趋于稳定,土壤硝态氮在20 cm土层达到最大,绝大部分土壤硝态氮在0~60 cm土层内。其中W1和W2处理0~60 cm土层硝态氮分别占0~100 cm土层硝态氮的52.6%~58.1%和

41.6%~61.2%。W1和W2处理土壤硝态氮均表现为F3处理>F2处理>F1处理的趋势。下层土壤(60~100 cm)硝态氮累积量较上层(0~60 cm)有所下降。W1处理F1、F2、F3的0~40 cm土层硝态氮累积量较W2处理分别增加2.3%、14.8%、13.6%;W1处理在60~100 cm土层硝态氮含量分别低于W2处理37.2%、3.2%、29.3%。

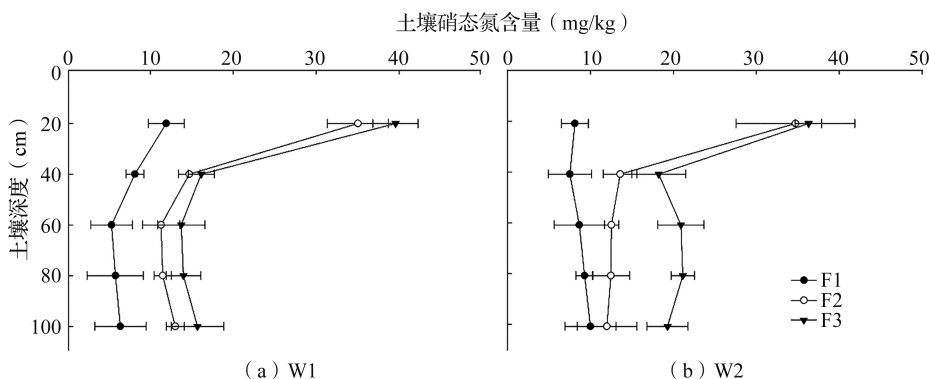


图3 有机无机配施与亏缺灌溉对冬小麦成熟期0~100 cm土壤硝态氮分布的影响

3 讨论

有研究发现,有机无机肥配施能够优化冬小麦产量要素,增加作物千粒重和穗数^[9]。张晶等^[10]研究发现,有机无机肥配施能够提高冬小麦叶片的光合速率和灌浆速率,增加作物产量。本次试验中,在同一施肥比例下,W2处理的小麦产量及其构成因素相对于W1处理有较好优势;在相同的灌溉条件下,有机无机配施对冬小麦的穗长、有效穗数、千粒重和产量有显著影响,表现为F3处理>F2处理>F1处理。W2处理的F3籽粒产量最高,达10488.6 kg/hm²,较W1处理中最高产量增加了5.3%。有研究结果表明,增施50%的有机肥有利于提高玉米产量,对小麦没有增产效果^[11]。相关研究结果表明,在相同氮磷钾条件下,50%的有机肥氮能够增加轮作系统水稻-小麦的籽粒产量^[12]。在本研究中配施48%有机肥对小麦生长以及产量效果最佳,试验结果的差异性的原因可能有以下几种:一是试验地的土壤肥力、土壤理化性质等存在差异;二是试验地区自然条件不同,降水、气候存在差异;三是作物耕作方式及灌溉模式不同;四是有机无机肥配施比例不同。

魏猛等^[13]在长期定位试验中研究发现,有机无机肥配施较其他处理能够有效提高土壤有机质和

氮磷钾含量。周江明^[14]对水稻实施有机无机肥混施试验研究发现,20%的有机肥处理能够使水稻器官氮素含量最大。本试验研究结果表明,冬小麦开花期后氮素吸收量和营养器官转运量均表现F3处理>F2处理>F1处理,且在亏缺灌溉条件下,48%有机肥+52%化肥能显著提升小麦开花期后氮素累积及转运效率。这说明F3处理可以促进冬小麦开花后氮素向籽粒的转运和累积,进而提升作物的产量和粒重等。恰当比例有机无机肥配施与生育期内适宜的土壤水分亏缺将有利于作物生长发育和促进干物质积累及其向籽粒的转运量和转移率,从而提高作物产量。通过大量研究发现,有机肥料氮比例过高,土壤养分供应不足,不利于作物正常生长;有机肥比例过低,前期化肥氮素大量流失,氮肥资源得不到充分利用^[15-16]。在本试验中,48%有机肥处理对冬小麦氮素转移和利用效果最佳,这可能与土壤中可利用的氮素、施用有机肥次数、作物种类有关。

高洪军等^[17]研究表明在春玉米整个生育期,在等量施氮条件下有机无机配施处理下硝态氮含量明显高于化肥处理。赵聪等^[18]在陕西杨凌进行定点试验,研究发现有机无机肥配施增加了土壤耕层硝态氮含量。通过本试验发现,W1和W2处理下土壤硝态氮均表现为F3处理>F2处理>F1处理



的趋势。土壤硝态氮在 20 cm 土层达到最大, 绝大部分土壤硝态氮在 0 ~ 60 cm 土层内, 下层 (60 ~ 100 cm) 土壤硝态氮累积量较上层 (0 ~ 60 cm) 有所下降, 多次降水使得土壤表层氮素逐渐向深层土壤淋失, 但是氮素主要分布在表层土壤。有研究表明, 有机无机肥配施可以协调适宜的碳氮比, 提高微生物的活性, 促进土壤氮素矿化作用^[19]。有机无机肥配施可以增加有机氮在土壤的累积率, 提高氮肥利用效率, 减少氮素损失^[20]。

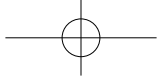
4 结论

有机无机配施与亏缺灌溉可以明显促进冬小麦的生长发育、使干物质累积量达到最佳和提高植株氮素利用率。在 52% 化肥和 48% 有机肥及亏缺灌溉 (50%) 处理下, 冬小麦的干物质累积量和籽粒产量达到最大, 干物质累积量最高为 12801.8 kg/hm², 籽粒产量最高达 10488.6 kg/hm²。亏缺灌溉结合有机肥处理能够提高小麦营养器官中氮素向穗部转运量和转运速率, 提高植株穗部氮素累积量, 从而提升产量, 同时提高植株氮肥生产效率。

有机无机配施与亏缺灌溉可以显著增加土壤耕层硝态氮含量, 且土壤硝态氮在 20 cm 土层达到最大, 提高氮肥转化利用效率, 进而提升作物产量。虽然在不同灌溉条件和不同比例有机无机配施下, 吸收利用氮素的能力不同, 导致土壤中硝态氮累积量有差异, 但是 F3 处理下土壤中硝态氮累积量达到最高。

参考文献:

- [1] 常艳丽, 刘俊梅, 李玉会. 陕西关中平原小麦/玉米轮作体系施肥现状调查与评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8): 51-61.
- [2] 赵护兵, 王朝辉, 高亚军, 等. 陕西省农户小麦施肥调研评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 245-253.
- [3] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 1-8.
- [4] 李志军, 王海东, 张富仓, 等. 新疆滴灌施肥棉花生长和产量的水肥耦合效应[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(12): 1069-1077.
- [5] 周晓阳, 徐明岗, 周世伟, 等. 长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1615-1621.
- [6] Yu W J, Li Y Z, Cao Y P, et al. Drought assessment using GRACE terrestrial water storage deficit in Mongolia from 2002 to 2017[J]. Water, 2019, 11(6): 1301.
- [7] Ballester C, Castel J, Jimnez bello M A, et al. Are sap flow and canopy temperature measurements useful alternatives to stem water potential for detecting plant water stress in citrus trees? [J]. Acta Horticulturae, 2014, 1038: 51-58.
- [8] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9): 1275-1284.
- [9] Islam M R, Siraj S, Huda A, et al. Improvement yield and nitrogen uptake of wheat through application of organic and inorganic fertilizers [J]. Progressive Agriculture, 2016, 27(2): 149-153.
- [10] 张晶, 张定一, 王丽, 等. 不同有机肥和氮磷组合对旱地小麦的增产机理研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 238-243.
- [11] Workneh B, Mulugeta L, Erik K, et al. Soil nutrient build-up, input interaction effects and plot level N and P balances under long-term addition of compost and NP fertilizer [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 218: 220-231.
- [12] Subehia S K, Sepehya S, Rana S S, et al. Long-term effect of organic and inorganic fertilizers on rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) yield, and chemical properties of an acidic soil in the western Himalayas [J]. Experimental Agriculture, 2013, 49(3): 382-394.
- [13] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 等. 长期不同施肥方式对黄潮土肥力特征的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 838-846.
- [14] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240.
- [15] 史力超, 朱云, 翟勇, 等. 施氮对滴灌春小麦干物质积累、转运及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 844-849.
- [16] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 171-177.
- [17] 高洪军, 朱平, 彭畅, 等. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 318-325.
- [18] 赵聪, 曹莹菲, 刘克, 等. 长期不同施肥对壤土氮素分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1375-1381.
- [19] 李彦, 李廷亮, 焦欢, 等. 不同培肥措施对采煤塌陷区复垦土壤氮素矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 227-232, 239.
- [20] 张璐, 文石林, 蔡泽江, 等. 有机肥与化肥不同比例配施下水稻土铵态氮释放特征[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 15-22.



Effects of organic and inorganic fertilization and deficit irrigation on winter wheat growth and nitrogen utilization efficiency in Guanzhong region

OUYANG Xiao-feng^{1, 3}, SU Shun-shun⁴, FENG Hao^{1, 2, 3}, WU Shu-fang^{1, 3*}, HU Ya-jin^{1, 3}, CHEN Ji-fei^{1, 3} (1. School of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling Shaanxi 712100; 3. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100; 4. Beijing Liangxiang Lanxin Hydraulic Engineering Design Co. Ltd., Beijing 102401)

Abstract: The effects of different proportion of organic and inorganic fertilizers, combined with deficit irrigation, on nitrogen accumulation, transport and utilization efficiency of winter wheat, soil nitrate distribution, etc. were studied to explore the suitable proportion of organic and inorganic fertilizers and the corresponding deficit irrigation for winter wheat production, and provide scientific and effective water and fertilizer management for high yield of winter wheat in the region. Two levels of irrigation (full irrigation W1 and deficit irrigation W2), three proportions of organic and inorganic fertilizers at same nitrogen level (F1: 100% inorganic fertilizer; F2: 24% organic fertilizer combined with 76% inorganic fertilizer; F3: 48% organic fertilizer combined with 52% inorganic fertilizer) were set up. The results showed that the combination of organic and inorganic fertilizers effectively promoted the crop growth, significantly increased grain yield, nitrogen accumulation, distribution, and transport after the flowering period. Under W1 and W2 conditions, the grain yield of F2 and F3 increased by 12.0%-28.6% and 16.6%-31.8%, respectively, compared with F1. Under the same irrigation condition, the nitrogen accumulation amount, transport amount to grain, and nitrogen production efficiency of F2 and F3 in maturity period increased by 12.8%-40.4%, 11.9%-36.5%, 13.0%-31.6%, respectively, compared with F1. Under the same ratio of organic to inorganic (F2 and F3), the nitrogen absorption and utilization indicators of W2 were 10.0%-28.5% higher than those of W1. Combination of organic and inorganic fertilizers significantly improved the soil nitrate nitrogen content of different soil layers. Under the same irrigation conditions, the nitrate nitrogen content of 0-100 cm soil layer of F3 increased by 66.4%-76.4% and 1.2%-13.9%, respectively, compared with that of F1 and F2. Under the same organic and inorganic ratio (F2 and F3), the soil nitrate nitrogen content of F1, F2, F3 under W1 condition at 0-100 cm soil layer was 15.1%, 9.9% and 19.9% lower than that of F1, F2, F3 under W2 condition, respectively. 48% organic fertilizer mixed with 52% inorganic fertilizer, combined with deficit irrigation (50%) treatment is the optimum water and fertilizer management for winter wheat to obtain high yield.

Key words: winter wheat; combination of organic and inorganic fertilizers; deficit irrigation; nitrogen transport; nitrogen utilization efficiency