

杨学珍, 张世新, 李利利. 豆科绿肥还田与氮肥配施对旱地冬小麦产量和水分利用特征的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(8): 232–239.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.08.033

# 豆科绿肥还田与氮肥配施对旱地冬小麦产量和水分利用特征的影响

杨学珍<sup>1</sup>, 张世新<sup>2</sup>, 李利利<sup>1</sup>

(1. 平凉市农业科学院, 甘肃平凉 744000; 2. 兰州理工大学, 甘肃兰州 730050)

**摘要:**探讨夏绿肥还田与氮肥配施对冬小麦产量和土壤水分利用特征的影响, 为旱地麦田休闲期绿肥种植及合理施氮提供理论支撑。本研究于 2018—2019 年和 2019—2020 年在平凉市农业科学院高平试验站开展裂区试验, 以“普冰 151”为对象, 主区为麦后夏休闲(W-A)、麦后复种麦黑豆[*Glycinemax* (L.) Merr, W-B]、麦后复种毛叶苕(*Vicia villosa* Roth, W-C)和麦后复种箭筈豌豆(*Vicia sativa* L., W-D)4 种绿肥还田种植模式; 副区设置 3 个氮肥用量(0、140、280 kg/hm<sup>2</sup>), 分析了不同种类的绿肥还田与氮肥配施对后茬冬小麦产量与土壤水分利用产生的影响。结果表明, 2 个试验年度内, 在 W-C-N1 处理条件下, 冬小麦收获后的土壤含水量提升幅度最大; 种绿肥可显著提高冬小麦干物质质量和产量, 在绿肥复种模式中, 施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> (N1) 处理的干物质质量和籽粒产量与施氮 280 kg/hm<sup>2</sup> (N2) 处理差异性不显著, 以 W-C-N1 处理提高幅度最大, 较 W-A-N0 处理干物质质量平均增加 18.18%, 平均增产 25.53%。绿肥刈割期在绿肥还田结合施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> 处理的条件下得到了明显的提高; 作物全生育期的耗水量在复种绿肥结合施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> 处理的条件下得到有效降低, 其中 W-C-N1 处理条件下作物耗水量的降低幅度最大, 较 W-A-N0 处理分别降低 6~10、11~33、21~39 mm; 复种豆科绿肥, 尤其 W-C 处理, 能够有效提高冬小麦水分利用率(WUE), 比 W-A 处理 WUE 平均高 26.26%; N1 与 N2 相比, W-A 处理 WUE 降低 2.16%~2.47%, W-B、W-C 和 W-D 处理 WUE 分别提高 6.82%~10.87%、6.28%~6.69%、2.01%~9.44%, 以 W-C-N1 处理 WUE 最大, 较 W-A-N0 处理高 30.69%~38.50%。因此, 从满足冬小麦获得高产和保证水分高效利用的双重角度考虑, W-C-N1 处理可显著促进冬小麦干物质的积累和产量的形成, 并且能创造适宜的水分环境, 是陇东黄土旱塬冬麦区较好的种植模式。

**关键词:**绿肥复种; 施氮量; 冬小麦; 产量; 水分利用效率

**中图分类号:**S512.1+10.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)08-0232-08

绿肥作为重要的有机肥源, 在农业健康绿色可持续发展中潜力极大<sup>[1]</sup>。研究表明, 豆科绿肥具有固碳减氮、增强旱作农田蓄水保墒能力的效果, 其翻压还田后可改善土壤理化性质和微生物酶活性, 提高土壤养分含量, 降低病虫害的发生<sup>[2-5]</sup>。据估算, 我国每年施入农田的化肥用量远远超过了土地承载能力, 已严重影响农田生态环境<sup>[6]</sup>。黄土旱塬区是典型的雨养农业区, 通过构建区域作物环保、绿色、高产的生产模式迫在眉睫, 对于提升农产品质量、旱地土壤水分贮藏与高效利用, 实现蓄水节肥增收具有重要参考价值。

冬小麦作为黄土旱塬上最主要的粮食类作物,

其稳产保供对该地区的民生保障具有重要意义。因为氮肥用量的合理性决定其产量, 因此, 氮肥实施与冬小麦产量之间的关系研究对于指导冬小麦种植、提高产量具有重大的现实意义。吕汉强等在甘肃河西绿洲灌区麦后复种绿肥, 发现全量混匀翻压或绿肥覆盖麦田可提高土壤含氮量, 同时有利于玉米高效吸收利用氮素<sup>[7]</sup>。赵娜等研究表明, 有机化肥和无机施肥相结合的方式, 可以有效降低氮肥的施用量<sup>[4]</sup>。张松茂等研究表明, 施氮 180 kg/hm<sup>2</sup> 配合绿肥还田 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 的措施, 可以有效提高河西灌区小麦产量, 同时减少成本消耗<sup>[8]</sup>。李含婷等对河西干旱的绿洲灌区如何提高玉米产量进行了相关研究, 证明了在玉米间作套种绿肥可有效维持玉米产量, 同时提高土壤水分供给能力<sup>[9]</sup>。其中, 玉米间作套种的箭筈豌豆减量 25%, 是最有效的保产措施。王国瑾等研究表明, 在绿洲灌区提高春小麦产量与氮肥利用率的有效措施为: 绿肥还田

收稿日期: 2022-05-09

基金项目: 甘肃省自然科学基金(编号: 20JR10RA277); 甘肃省重点研发计划(编号: 18YF1GA065)。

作者简介: 杨学珍(1973—), 女, 甘肃灵台县人, 高级农艺师, 从事农作物栽培与育种研究。E-mail: yangxuezheng8266@163.com。

30 000 kg/hm<sup>2</sup> 结合施氮 180 kg/hm<sup>2</sup><sup>[10]</sup>。苟志文等进行甘肃绿洲灌区提高小麦产量的相关研究,结果表明小麦种植后继续复种豆类绿肥的方式,对小麦的生产速率有促进作用<sup>[11]</sup>。其中,可在复种绿肥后减少氮肥 15%,是提高小麦生长速率与产量的最佳措施。李可懿等在分析黄土高原旱地种植时发现,小麦与绿肥轮作后施氮 108 kg/hm<sup>2</sup> 时,可以有效提高小麦生物量和产量<sup>[12]</sup>。可见,在绿洲灌区,构建与实施绿肥配施化肥作物高效养分的种植管理制度可以为该地区粮食稳产保供提供保障。黄土旱塬冬麦区普遍存在化肥过量施用和土壤肥力不足的双重现象,因不同农业生态气候条件和土壤类型存在显著差异,而有关定位试验下豆科绿肥还田与氮肥配施对冬小麦产量和水分利用特征影响的报道相对较少。为此,本研究通过 2 年定位试验,研究

不同豆科绿肥(麦黑豆、毛苕子、箭筈豌豆)还田下与氮肥配施对冬小麦产量及土壤水分的影响,以期黄土旱塬区豆科绿肥翻压还田后科学施用氮肥提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2018 年 7 月至 2020 年 7 月在甘肃省平凉市泾川县高平镇(平凉市农业科学院试验站)开展,土壤类型为黑垆土。采用冬小麦→夏绿肥—冬小麦的轮作方式,前茬小麦收获后,夏季休闲期复种不同绿肥,小麦播前 1 周翻压于土壤中,再种植冬小麦。试验地初始土壤理化性质详见表 1,月平均温度及降水量见图 1。

表 1 试验地初始土壤理化性质

年份	pH 值	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (g/kg)	全磷含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
2018	8.12	11.71	0.92	0.55	64.64	6.36	165.32
2019	8.14	12.97	0.89	0.57	65.92	6.27	163.66

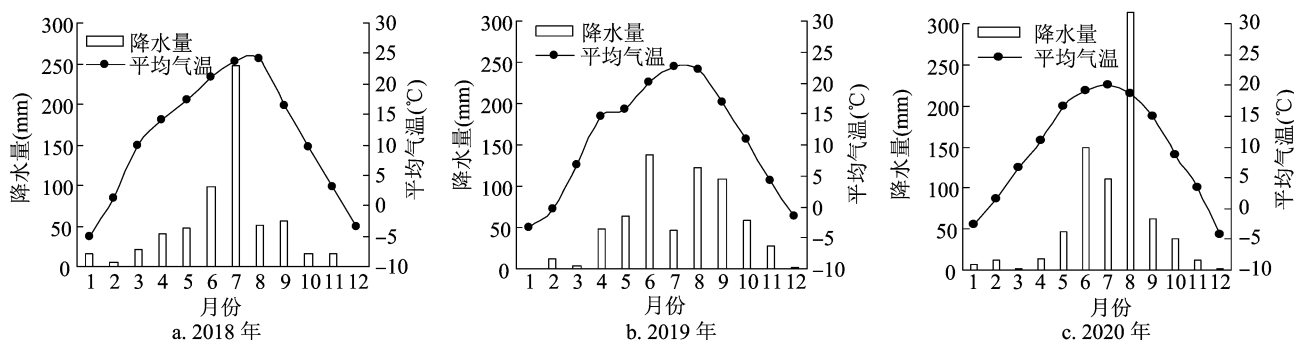


图 1 试验站 2018—2020 年降水量和平均温度

### 1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计,主处理为 4 个夏绿肥品种,分别为无绿肥(W-A)、麦黑豆(*Glycinemax*)、毛苕子(*Vicia villosa*, W-C)和箭筈豌豆(*Vicia sativa*, W-D);副处理为不同氮肥用量,分别为 0 kg/hm<sup>2</sup> (N0)、140 kg/hm<sup>2</sup> (N1)和 280 kg/hm<sup>2</sup> (N2)3 个施氮量,共 12 个处理,具体为:(1)无绿肥+不施氮(W-A-N0);(2)无绿肥+施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> (W-A-N1);(3)无绿肥+施氮 280 kg/hm<sup>2</sup> (W-A-N2);(4)麦黑豆+不施氮(W-B-N0);(5)麦黑豆+施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> (W-B-N1);(6)麦黑豆+施氮 280 kg/hm<sup>2</sup> (W-B-N2);(7)毛苕子+不施氮(W-C-N0);(8)毛苕子+施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> (W-C-N1);(9)毛苕子+施氮 280 kg/hm<sup>2</sup> (W-C-N2);(10)箭筈豌豆+不施氮(W-D-N0);(11)箭筈豌豆+施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> (W-D-N1);(12)箭筈豌豆+施氮 280 kg/hm<sup>2</sup> (W-D-N2)。主处理面积约为 138 m<sup>2</sup> (长 14.5 m×宽 9.5 m),副处理面积约为 43 m<sup>2</sup> (长 4.5 m×宽 9.5 m)。

每季小麦收获后 7 月上旬抢墒播种绿肥,至 9 月上旬翻压;冬小麦播种时间为 9 月底至 10 月上旬,收获期为翌年 7 月上旬。麦黑豆、毛苕子和箭筈豌豆播种量均为 120 kg/hm<sup>2</sup>,种植行距为 20 cm。

绿肥还田时用铡草机铡碎至 3 cm 左右小段后,用小型旋耕机均匀混合翻压至 20 cm 左右。实施的氮肥与磷肥为尿素和 16% 过磷酸钙,磷肥用量( $P_2O_5$ ) 120 kg/hm<sup>2</sup>,冬小麦播前所有肥料作为基肥全部施入。小麦播种按行称质量,每行 36 g,行距 20 cm,供试品种为普冰 151,人工开沟播种。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 冬小麦地上部干物质量 在冬小麦拔节期、灌浆期和成熟期,每试验小区随机选取 10 株小麦带回实验室,分离成茎、叶、穗 3 部分,然后装在牛皮纸袋中,依次进行杀青、烘干至恒质量、测定各器官干物质量,然后折算为单位面积干物质量。

1.3.2 土壤水分 在夏绿肥播种前、绿肥刈割期和冬小麦收获后,每小区除过边际效应随机选取 3 个样点,利用土钻提取 0~100 cm 土壤,然后以 20 cm 为隔断对土壤进行分层取样,将样本分别装在容器中,利用烘干法对各层样本的含水量进行测定,一般对同一个样本测定 3 次,并选取平均值作为最终的土壤含水量。而对土壤容重的测定一般选择环刀法,由于选取的试验地为旱地,且地下水埋藏较深,其他试验地特征因素均忽略不计。土壤含水量、作物生育期耗水量以及水分利用效率等相关指标计算方法参照 Wang 等提出的计算方法<sup>[13]</sup>。

1.3.3 产量 在小麦成熟期,取 3 m×1m 的样方面积,统计单位面积成穗数,并通过随机原则,选择 30 株小麦样本,对其穗粒数、千粒质量等数据进行检测,其中小麦的籽粒产量按照 14% 含水量测定。

1.4 数据分析

借助 Office 软件对收集的数据整理并作图,并采用 SPSS 23.0 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 绿肥还田模式与氮肥配施对冬小麦产量及构成因子的影响

2.2.1 冬小麦产量 由表 2 可知,2 个试验年份对冬小麦产量无显著影响,豆科绿肥还田模式与配施氮肥分别显著提高冬小麦产量,但二者交互作用对产量没有明显影响。与麦后休闲期(W-A)相比,麦后复种绿肥麦黑豆(W-B)、复种绿肥毛苕子(W-C)和复种绿肥箭筈豌豆(W-D)分别平均增产 9.87%、13.23%、9.16%,其不同种植模式还田效果对产量的影响从大到小依次为 W-C>W-B>W-D>W-A。施氮肥可显著提高冬小麦产

量,与不施氮肥(N0)相比,施氮处理 N1 和 N2 的小麦产量分别平均增加 12.33% 和 10.42%,其中,2018—2019 年施氮量增加至 140 kg/hm<sup>2</sup> 时,产量不再随氮肥用量的投入而明显增加,N1 和 N2 处理之间大多无显著性差异,以 N1 处理的产量最高,2019—2020 年度也表现出类似的趋势。总体来看,W-C-N1 处理在产量方面的效果最为突出,较 W-A-N0 处理平均增产 25.54%。

表 2 绿肥还田与氮肥配施对冬小麦产量及构成因子的影响

年份	种植模式	施氮量	产量构成			籽粒产量 (kg/hm <sup>2</sup> )
			单位面积穗数 (万穗/hm <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒/穗)	千粒质量(g)	
2018—2019	W - A	N0	324d	25b	34.40d	3 472.46d
		N1	379b	31a	47.11b	3 868.11c
		N2	373b	28ab	46.71b	3 713.04c
	W - B	N0	344c	25b	40.73c	3 639.13cd
		N1	394b	30a	48.60ab	4 323.18a
		N2	389b	28ab	46.95b	4 195.65b
	W - C	N0	357bc	28ab	40.21c	3 604.02cd
		N1	429a	32a	50.56a	4 389.86a
		N2	425a	30a	47.42b	4 366.66a
	W - D	N0	342c	26b	41.92c	3 688.40cd
		N1	413ab	28ab	50.23a	4 178.26b
		N2	394b	28ab	48.96ab	4 052.17bc
2019—2020	W - A	N0	333d	27c	32.89c	3 362.31d
		N1	368c	35b	40.27b	3 602.89cd
		N2	364c	33bc	38.76bc	3 664.49cd
	W - B	N0	357cd	28c	34.13c	3 750.72c
		N1	389ab	37ab	43.25a	3 969.56b
		N2	386ab	35b	40.11b	3 946.37b
	W - C	N0	367c	28c	33.9c	3 886.95bc
		N1	399a	39a	45.89a	4 191.30a
		N2	397a	37ab	45.57a	4 107.24a
	W - D	N0	358cd	27c	31.87c	3 637.68cd
		N1	387ab	36ab	45.25a	4 091.30ab
		N2	380b	33bc	43.11a	4 015.94ab
年份(Y)			NS	NS	NS	NS
种植模式(C)			**	NS	**	**
施氮量(N)			**	**	**	**
C × N			**	*	NS	NS

注:同列数据后不同小写字母表示同一年份不同处理间在 0.05 水平上差异显著。\*\*、\* 分别表示在 0.01、0.05 水平上差异显著,NS 表示无显著差异。下表同。

2.2.2 产量构成三因子 通过豆类作物绿肥还田的方式,种植区域内小麦单位面积穗数和千粒质量

等数据会有明显变化,但小麦单位面积穗粒数并没有产生显著变化;施氮量可显著促进产量构成三因素;豆科绿肥还田模式 + 配比施用氮肥的种植模式,对小麦千粒质量指标有明显的影 响,但小麦穗数和穗粒数在此模式下并没有发生显著变化(表 2)。与 W - A 相比,W - B、W - C 和 W - D 处理的单位面积穗数分别增加 5.54%、10.92%、6.20%,千粒质量分别提高 5.63%、9.78%、8.81%。施氮可显著促进产量三因素,总体来看,2 年试验 N1、N2 处理较 N0 处理穗数分别提高了 13.64%、11.84%,穗粒数分别增加了 27.99%、17.54%,千粒质量分别增加了 28.21%、23.52%,而不同种植模式下 N1 和 N2 处理之间的穗数、穗粒数和千粒质量无显著差异。结合绿肥还田模式和施氮量来看,W - C - N1 处理可显著提高小麦穗数、穗粒数和千粒质量,从而促进产量的形成。

2.2 绿肥还田模式与氮肥配施对冬小麦干物质积累的影响

由表 3 可见,2 个试验年份对冬小麦干物质质量无显著影响,麦后复种不同豆科绿肥较休闲期能显著提高小麦关键生育时期干物质质量,施氮显著促进小麦干物质的积累。与麦后休闲期(W - A)模式相比,麦后复种绿肥麦黑豆(W - B)、复种绿肥毛苕子(W - C)和复种绿肥箭筈豌豆(W - D)的平均干物质质量在成熟期分别提高 7.63%、9.72%、7.91%,其不同种植模式还田效果对干物质积累的影响从大到小依次为 W - C > W - D > W - B > W - A 处理。施氮肥可显著提高冬小麦干物质质量,与不施氮肥(N0)相比,施氮处理 N1 和 N2 的小麦干物质质量分别增加 10.03%、9.25%,其中,2018—2019 年施氮量增加至 140 kg/hm<sup>2</sup> 时,干物质质量不再随氮肥用量的投入而明显增加,并表现出 N1 和 N2 处理之间无显著性差异,以 N1 处理的干物质质量最高,2019—2020 年度也表现出类似的趋势。在小麦成熟期,W - C - N1 处理干物质积累量较其他处理高,其提高幅度在 0.74% ~ 18.18% 之间。通过显著性分析发现,绿肥品种还田模式与施氮量交互作用对小麦灌浆前干物质质量无显著影响,但显著影响灌浆后干物质质量,特别是成熟期干物质质量。

2.3 绿肥还田模式与氮肥配施对农田耗水特征的影响

2.3.1 土壤含水量 由图 2、图 3 可知,在绿肥刈割期,与麦后休闲期(W - A)模式相比,麦后复种绿

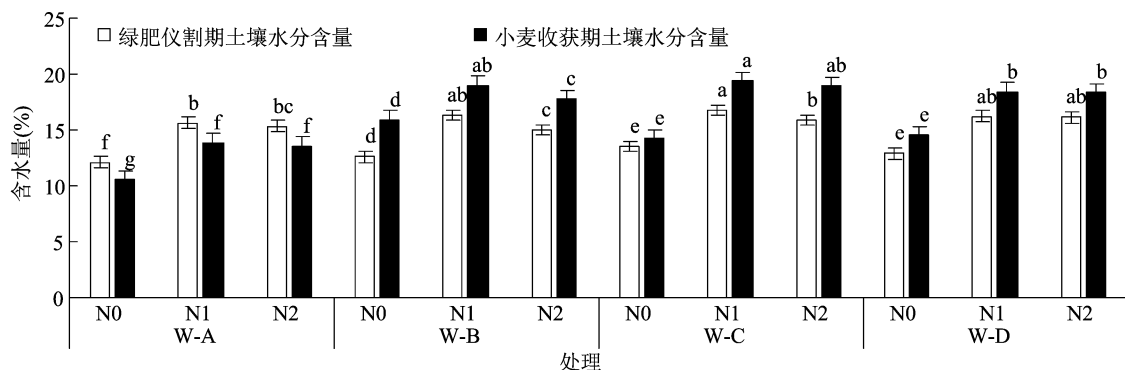
表 3 绿肥还田与氮肥配施对冬小麦干物质质量的影响					
年份 (年)	种植模式	施氮量	干物质质量(t/hm <sup>2</sup> )		
			拔节期	灌浆期	成熟期
2018—2019	W - A	N0	2.67 <sup>e</sup>	11.83 <sup>c</sup>	15.23 <sup>d</sup>
		N1	2.99 <sup>d</sup>	12.87 <sup>b</sup>	15.97 <sup>c</sup>
		N2	2.87 <sup>d</sup>	12.63 <sup>b</sup>	15.89 <sup>c</sup>
	W - B	N0	3.14 <sup>c</sup>	12.74 <sup>b</sup>	16.09 <sup>bc</sup>
		N1	4.09 <sup>ab</sup>	13.54 <sup>a</sup>	18.15 <sup>a</sup>
		N2	3.89 <sup>b</sup>	13.53 <sup>a</sup>	18.09 <sup>a</sup>
	W - C	N0	3.23 <sup>c</sup>	12.34 <sup>b</sup>	16.54 <sup>b</sup>
		N1	4.43 <sup>a</sup>	13.98 <sup>a</sup>	18.32 <sup>a</sup>
		N2	4.25 <sup>a</sup>	13.65 <sup>a</sup>	18.13 <sup>a</sup>
	W - D	N0	3.18 <sup>c</sup>	12.66 <sup>b</sup>	16.31 <sup>b</sup>
		N1	4.22 <sup>a</sup>	13.84 <sup>a</sup>	17.89 <sup>ab</sup>
		N2	4.09 <sup>ab</sup>	13.41 <sup>a</sup>	17.76 <sup>ab</sup>
2019—2020	W - A	N0	2.54 <sup>d</sup>	12.04 <sup>e</sup>	15.81 <sup>d</sup>
		N1	3.35 <sup>b</sup>	13.32 <sup>bc</sup>	16.84 <sup>c</sup>
		N2	3.22 <sup>b</sup>	13.02 <sup>c</sup>	16.71 <sup>c</sup>
	W - B	N0	2.89 <sup>c</sup>	12.87 <sup>d</sup>	16.04 <sup>cd</sup>
		N1	3.87 <sup>ab</sup>	13.55 <sup>bc</sup>	17.78 <sup>b</sup>
		N2	3.76 <sup>ab</sup>	13.26 <sup>c</sup>	17.58 <sup>b</sup>
	W - C	N0	2.77 <sup>cd</sup>	12.97	16.15
		N1	3.95 <sup>a</sup>	14.45 <sup>a</sup>	18.35 <sup>a</sup>
		N2	3.96 <sup>a</sup>	14.32 <sup>a</sup>	18.27 <sup>a</sup>
	W - D	N0	2.85 <sup>c</sup>	12.84 <sup>d</sup>	16.23 <sup>cd</sup>
		N1	3.85 <sup>ab</sup>	13.89 <sup>b</sup>	17.98 <sup>b</sup>
		N2	3.67 <sup>ab</sup>	13.69 <sup>b</sup>	17.85 <sup>b</sup>
年份(Y)			NS	NS	NS
种植模式(C)			**	NS	**
施氮量(N)			NS	**	**
C × N			NS	*	**

肥麦黑豆(W - B)、复种绿肥毛苕子(W - C)和复种绿肥箭筈豌豆(W - D)的平均土壤含水量分别提高 3.16%、9.88%、7.09%,不同种植模式还田效果对土壤含水量影响从大到小依次为 W - C > W - D > W - B > W - A。施氮肥可显著提高冬小麦干物质质量,与 N0 相比,N1 和 N2 处理可显著提高土壤含水量,但 N1 与 N2 处理无明显差异,以 N1 处理较高。在 W - A、W - B、W - C 和 W - D 这 3 种复种绿肥模式下,N1 处理较 N0 处理分别提高 24.03%、25.49%、25.07%。可见,复种翻压豆科绿肥条件下配施氮肥 140 kg/hm<sup>2</sup> 可显著提高土壤水分含量,以 W - C - N1 提高幅度较大,提高幅度在 2.62% ~ 36.15% 之间。

在冬小麦收获期,W - B、W - C 和 W - D 处理的平均土壤含水量较 W - A 处理分别提高

39.42%、42.41%、37.43%，W-B 处理在 2 个试验年度内一直保持较高的土壤含水量。通过 N1 处理的方式，土壤中的含水量明显增加，而选择 W-A、W-B、W-C 和 W-D 模式时，土壤中的含水量分别较 N0 提高了 22.46%、25.03%、28.08% 和 27.70%。而通过麦后复种绿肥和 N1 处理相结合

的方式对土壤进行处理，土壤中的含水量也会得到大幅度提升，其中 W-C-N1 模式下土壤含水量提升较高，较其他处理高 2.36%~83.49%。因此，可以得出，麦后复种绿肥毛苕子和配比施用氮肥 (140 kg/hm<sup>2</sup>) 相结合的种植模式，可使土壤拥有较高的持水量，为冬小麦生长创造适宜的土壤水分环境。



柱上不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下图同  
图2 2018—2019 年绿肥还田模式及施氮量对绿肥刈割期和冬小麦收获期土壤含水量的影响

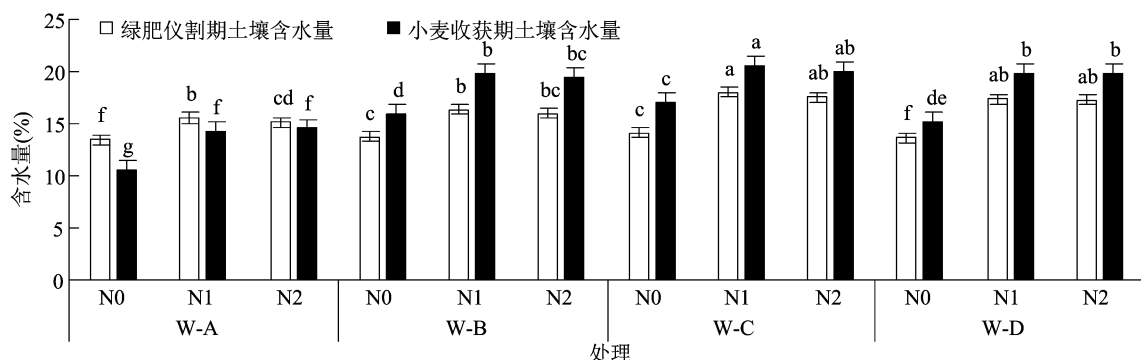


图3 2019—2020 年绿肥还田模式及施氮量对绿肥刈割期和冬小麦收获期土壤含水量的影响

2.3.2 阶段耗水量和耗水总量 由表 3 可知，绿肥复种期至刈割期，在 N1 水平下，麦后复种绿肥麦黑豆 (W-B)、复种绿肥毛苕子 (W-C) 和复种绿肥箭筈豌豆 (W-D) 的耗水量较麦后休闲期 (W-A) 分别降低 5.19%~7.59%、12.59%~19.62%、2.96%~6.96%，W-C 较 W-B、W-D 分别降低 7.81%~13.01%、9.92%~13.61%；N2 水平下，W-B、W-C 和 W-D 处理的耗水量较 W-A 处理分别降低 1.42%~4.35%、9.22%~14.29%、2.13%~4.35%。与 N2 处理相比，N1 处理耗水量降低 3~11 mm，其中在 W-A、W-B、W-C 和 W-D 模式下耗水量分别降低 1.86%~4.26%、5.19%~7.91%、7.81%~7.97%、4.55%~5.07%，以 W-C-N1 降幅最大。

绿肥刈割至小麦收获期，N1 水平下，W-B、W-C 和 W-D 处理的耗水量较 W-A 处理分别降

低 3.88%~10.79%、8.36%~15.45%、2.04%~7.16%，W-C 较 W-B、W-D 分别降低 4.66%~5.23%、1.29%~1.37%。N2 水平下，W-B、W-C 和 W-D 处理的耗水量较 W-A 处理分别降低 0.87%~7.87%、9.25%~14.33%、2.31%~8.99%。与 N2 处理相比，N1 处理耗水量降低 7~27 mm，其中在 W-A、W-B、W-C 和 W-D 模式下耗水量分别降低 3.18%~3.65%、6.12%~6.71%、2.23%~4.92% 和 3.70%~7.99%，以 W-C-N1 降幅最大。

绿肥播种至小麦收获期，N1 水平下，W-B、W-C 和 W-D 处理的耗水量较 W-A 处理分别降低 5.07%~9.21%、11.97%~14.64%、2.30%~7.09%。W-C 处理较 W-B 和 W-D 处理分别降低 5.99%~7.26%、5.24%~12.63%。N2 水平下，W-B、W-C 和 W-D 处理的耗水量较 W-A 处理

表 3 绿肥还田模式及施氮量对作物各生育阶段的耗水量的影响

年份	种植模式	耗水量(mm)			全生育期
		施氮量	绿肥播 前—刈割	绿肥刈割— 冬小麦收获	
2018—2019	W－A	N0	124d	323c	447c
		N1	135ab	343b	478b
		N2	141a	356a	497a
	W－B	N0	120e	292e	409f
		N1	128c	306d	434d
		N2	139a	328c	467bc
	W－C	N0	120e	295e	415f
		N1	118e	290f	408g
		N2	128c	305d	433cd
	W－D	N0	120e	301d	421e
		N1	131b	336bc	467bc
		N2	138a	324c	462bc
2019—2020	W－A	N0	137c	318c	455c
		N1	158a	335b	493ab
		N2	161a	346a	507a
	W－B	N0	131d	309e	440d
		N1	146b	322c	468b
		N2	154ab	343a	497ab
	W－C	N0	129d	309e	438e
		N1	127d	307e	434e
		N2	138c	314d	452c
	W－D	N0	129d	313d	442d
		N1	147b	311d	458c
		N2	154ab	338b	492ab
年份(Y)			NS	NS	NS
种植模式(C)			**	**	**
施氮量(N)			**	**	**
C×N			**	**	**

分别降低 1. 97% ~ 6. 04%、10. 85% ~ 12. 88%、3. 96% ~ 7. 04%。与 N2 相比,N1 耗水量降低 14 ~ 34 mm,其中在 W - A、W - B、W - C 和 W - D 模式

下耗水量分别降低 2. 76% ~ 3. 82%、5. 84% ~ 7. 07%、3. 98% ~ 5. 77% 和 1. 08% ~ 6. 91%,以 W - C - N1 降幅最大。总体而言,复种绿肥条件下 N1 处理均可降低作物耗水量,以冬小麦复种毛苕子配施氮肥 140 kg/hm<sup>2</sup> 效果最为显著。

2.4 绿肥还田模式与氮肥配施对水分利用效率的影响

由图 4 可见,绿肥复种模式与氮肥配施二者交互作用对冬小麦水分利用效率 (WUE) 产生显著的影响。2 个试验年份,在 N1 处理下,W - B、W - C 和 W - D 处理的 WUE 较 W - A 处理分别提高 16. 06% ~ 23. 10%、32. 15% ~ 32. 96%、10. 56% ~ 22. 23%,W - C 较 W - B 和 W - D 处理分别提高 8. 01% ~ 13. 86%、8. 11% ~ 20. 26%;在 N2 处理下,W - B、W - C 和 W - D 处理的 WUE 较 W - A 处理分别提高 9. 86% ~ 20. 25%、25. 72% ~ 34. 99%、12. 93% ~ 17. 40%,W - C 较 W - B 和 W - D 处理分别提高 12. 25% ~ 14. 44%、11. 32% ~ 14. 98%。N1 与 N2 相比,W - A 处理 WUE 降低 2. 16% ~ 2. 47%,W - B、W - C 和 W - D 处理 WUE 分别提高 6. 82% ~ 10. 87%、6. 28% ~ 6. 69%、2. 01% ~ 9. 44%,以 W - C - N1 处理 WUE 最大。可见,复种豆科绿肥可明显提高冬小麦 WUE,进一步配施 140 kg/hm<sup>2</sup> 的氮肥对 WUE 的提升更具优势。以复种毛苕子配施氮肥 140 kg/hm<sup>2</sup> 的效果最好。

3 讨论与结论

适宜的氮肥用量投入以及优化培肥措施可显著促进作物提质增产<sup>[14-16]</sup>。本研究结果表明,与麦后不复种绿肥模式相比,麦后复种豆科绿肥能够使冬小麦中的干物质量得到充分积累,且冬小麦中的干物质量会随土壤中氮肥量的增加而增加,但并非无界限,以施氮 140 kg/hm<sup>2</sup> 下的干物质量在成熟期

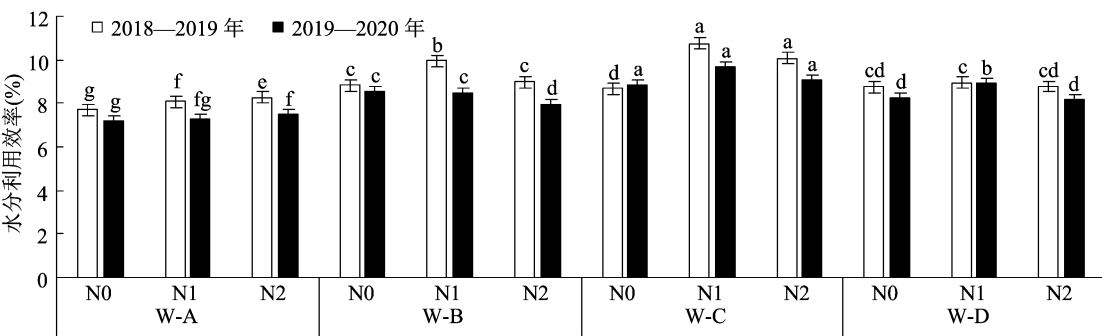


图4 绿肥还田模式及施氮量对绿肥刈割期和冬小麦水分利用效率的影响

达到最高(表 3),表明麦后复种绿肥并合理配施氮肥能显著提高冬小麦干物质质量,造成这种现象的原因可能是:第一,绿肥作物可以有效增加土壤中氮元素的储存量,提高作物对土壤中氮素的吸收效率,而仅依靠基施化学氮肥的方式,只能在小麦生长前期提供短期的氮素供应,在小麦后期生长成熟阶段,土壤中存在的氮素明显供应不足<sup>[17-18]</sup>;第二,合理施氮肥能促进小麦根系生长及活力,延长叶片光合作用时间和功能期,提高光合效率,进而促进地上部光合作用增加和光合同化产物的产生<sup>[19-20]</sup>。因此,通过绿肥翻压还田的方式,豆科绿肥还田可以充分供应作物所需要的土壤养分,若外界氮肥适量施用,加上作物绿肥提供的氮素供应,则冬小麦干物质质量能够得到充分的累积,优化了各阶段干物质积累的比例,为获得高产奠定了基础。从产量方面来看,麦后复种豆科绿肥较休闲期增产 9.16% ~ 13.23%,其中,麦后复种毛苕子配施 140 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥较其他种植模式增产效果显著,造成这一差异的原因是:一方面,豆科作物具有很强的固氮作用,可使土壤有效氮含量显著提高<sup>[4,21]</sup>;另一方面,豆科绿肥可激活土壤有效酶含量及酶活性<sup>[22-23]</sup>,对土壤生物活性和有机物质间互转均有积极的促进作用,有效改善了土壤肥力<sup>[24]</sup>。因此,有机绿肥和无机氮合理配施,对冬小麦养分产生错期供应,小麦对养分需求和土壤内部养分的供给相互对应,形成了一种有机的互补关系,一定程度上促进了小麦产量的提升<sup>[25]</sup>。适宜的绿肥品种还田和适量的化肥氮肥配施可显著提高冬小麦产量,而施氮量高于 140 kg/hm<sup>2</sup>,过量施加氮肥用量籽粒产量反而降低,这一研究结果与前人的研究结论<sup>[12]</sup>基本一致,主要是因为,土壤中氮素含量适度的情况下,若继续施用含氮素的肥料,会导致作物本身氮素交换频繁,部分营养器官的物质转换量降低,破坏作物灌浆,严重影响籽粒产量<sup>[26]</sup>。本研究通过作物还田施肥和化学氮肥混合配置的方式,研究旱农作物的种植技术,得出复种毛苕子和 140 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮密度可以使种植区域的冬小麦有较高的产量。

合理种植绿肥可增强田间土壤蓄水保墒能力,从而影响土壤内水分的存在环境,并为地上栽培作物提供更好地水吸收条件,最终可以提高作物的生产能力,同时保障了水分的循环生产效率<sup>[27-28]</sup>。本研究结果表明,麦后复种豆科绿肥较休闲期可使土壤含水量显著提高,且相比于其他复种模式,麦后

复种毛苕子时土壤中的含水量较高。主要是由于用作绿肥的作物在刈割之前,通常情况下,作物密集的枝条会覆盖地表,此时土壤中生物量高,可以明显减少土壤中水分的散失,加强外界水分的渗透率,因此,土壤中的水含量相对较高<sup>[29]</sup>;而当作物绿肥刈割之后,土壤孔隙度、持水量等指标都得到大幅提升,并且一定程度降低了土壤容重,从而提高了土壤的含水量,同时使作物耗水减少<sup>[30]</sup>;刈割之后,通过绿肥还田的方式,进一步降低了土壤中水分的流失,提高了土壤的含水量和外部渗透率,可以为冬小麦生长供给充足的水分,有效解决了冬小麦需水量大的问题<sup>[29-30]</sup>。对休闲期而言,这可能是由于不种植任何作物造成地面没有任何遮挡,增加了休闲期的无效蒸发耗水;后来,通过种植后茬小麦,裸露的土壤被枝叶紧紧覆盖,土壤的水分散发减少,以地面作物叶片的水分散失为主要方式。郑雪娇等学者的研究结果表明,随施氮量增加,不同作物在每个生长期的耗水量也在逐渐提高<sup>[31]</sup>,特别是在干旱的种植区域,过度施肥将会引起土壤中水量的快速消耗<sup>[32]</sup>。本研究在小麦后种植豆类植物的方式,能够有效提高土壤的持水量,降低水分散发,在此基础上,若种植区域内继续施用氮肥 140 kg/hm<sup>2</sup>,则可以更好地实现复种绿肥下的水分吸收。总体而言,小麦复种绿肥毛苕子结合 140 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥可使土壤含水量明显改善,降低系统耗水,促进小麦水分利用效率提高。

本研究中,在黄土旱塬区优先选择复种的绿肥品种为毛苕子,相比其他 2 种绿肥作物可在一定程度上促进干物质质量积累,增加产量,具有较适宜的土壤水分环境,显著提高水分利用效率。当然,不同绿肥品种因地上、地下部生物量的不同,根系在土壤存在的位置分布、厚度和腐蚀分解的程度也存在一定差异<sup>[33-34]</sup>,本研究只是针对产量和土壤水分特征方面进行了研究,而对于绿肥品种作物的生理生化及生物学分子机制还需进一步研究以解释其机理。

黄土旱塬区 2 年定位试验显示,绿肥还田配施氮肥可显著提高小麦关键时期干物质积累量,从而推动小麦高产量形成。绿肥还田模式的冬小麦产量较休闲期增加 21% ~ 23%,当施氮量超过 140 kg/hm<sup>2</sup> 时,小麦产量在施氮处理间无显著差异。与夏季休闲期相比,麦后复种豆科绿肥可显著提高土壤水分含量,降低作物生育期耗水量;麦后复种豆科绿肥毛苕子和配比化学氮肥 140 kg/hm<sup>2</sup>

的情形下,土壤耗水量相对较少,若施用较高氮肥,则夏休闲种植小麦耗水量将降低 80.9 ~ 92.7 mm。豆科绿肥复种还田的栽培模式,对于冬小麦产量的提升有促进作用,但在该模式下配比施用氮量 140 kg/hm<sup>2</sup>,对冬小麦的产量变化将无明显作用,并且可显著提高水分利用效率。因此,在资源性缺水的黄土旱塬区,复种绿肥毛苕子结合施氮肥 140 kg/hm<sup>2</sup> 可使冬小麦获得高产,也可保证水分高效利用。

#### 参考文献:

- [1] 樊志龙,柴强,曹卫东,等. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用[J]. 应用生态学报,2020,31(4):1389–1402.
- [2] 杨曾平,高菊生,郑圣先,等. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J]. 土壤,2011,43(4):576–583.
- [3] 高嵩涓,曹卫东,白金顺,等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物量特性[J]. 土壤学报,2015,52(4):902–910.
- [4] 赵娜,赵护兵,鱼昌为,等. 夏闲期种植翻压绿肥和施氮量对冬小麦生长的影响[J]. 西北农业学报,2010,19(12):41–47.
- [5] 张少宏,王俊,Rajan G,等. 黄土高原绿肥填闲种植的水分与产量效应:Meta 分析[J]. 中国生态农业学报,2021,29(11):1879–1892.
- [6] Yu Y L, Xue L H, Yang L Z. Winter legumes in rice crop rotations reduces nitrogen loss, and improves rice yield and soil nitrogen supply[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(3):633–640.
- [7] 吕汉强,于爱忠,王玉珑,等. 干旱绿洲灌区玉米氮素吸收利用对绿肥还田利用方式的响应[J]. 草业学报,2020,29(8):93–103.
- [8] 张松茂,胡发龙,殷文,等. 河西灌区绿肥对春小麦化学氮肥的替代及增产潜力初探[J]. 中国土壤与肥料,2021(2):256–261.
- [9] 李含婷,柴强,王琦明,等. 绿洲灌区不同施氮水平下玉米绿肥间作模式的水分利用特征[J]. 中国农业科学,2021,54(12):2608–2618.
- [10] 王国维,张松茂,胡发龙,等. 绿洲灌区春小麦产量和氮素利用率对绿肥还田量的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(7):1164–1172.
- [11] 苟志文,殷文,徐龙龙,等. 绿洲灌区复种豆科绿肥条件下小麦稳产的减氮潜力[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(12):2195–2203.
- [12] 李可懿,王朝辉,赵护兵,等. 黄土高原旱地小麦与豆科绿肥轮作及施氮对小麦产量和籽粒养分的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(2):110–116,123.
- [13] Wang X B, Hoogmoed W B, Cai D X, et al. Crop residue, manure and fertilizer in dryland maize under reduced tillage in Northern China; II. Nutrient balances and soil fertility[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 79(1):17–34.
- [14] 马忠明,王平,陈娟,等. 适量有机肥与氮肥配施方可提高河西绿洲土壤肥力及作物生产效益[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1298–1309.
- [15] 王敬国,林杉,李保国. 氮循环与中国农业氮管理[J]. 中国农业科学,2016,49(3):503–517.
- [16] 贺明荣,杨雯玉,王晓英,等. 不同氮肥运筹模式对冬小麦籽粒产量品质和氮肥利用率的影响[J]. 作物学报,2005,31(8):1047–1051.
- [17] Manna M, Swarup A, Wanjar R, et al. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2):397–409.
- [18] 韩梅,胥婷婷,曹卫东. 青海高原长期复种绿肥毛叶苕子对土壤供氮能力的影响[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(6):104–109.
- [19] 宋明丹,李正鹏,冯浩. 不同水氮水平冬小麦干物质积累特征及产量效应[J]. 农业工程学报,2016,32(2):119–126.
- [20] 赵财,王巧梅,郭瑶,等. 水氮耦合对地膜玉米免耕轮作小麦干物质积累及产量的影响[J]. 作物学报,2018,44(11):1694–1703.
- [21] 颜志雷,方宇,陈济琛,等. 连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(5):1151–1160.
- [22] 杨滨娟,黄国勤,兰延,等. 施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(10):2907–2913.
- [23] 孙颖,赵晓会,和文祥,等. 绿肥对土壤酶活性的影响[J]. 西北农业学报,2011,20(3):115–119.
- [24] 李红燕,胡铁成,曹群虎,等. 旱地不同绿肥品种和种植方式提高土壤肥力的效果[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(5):1310–1318.
- [25] 张久东,包兴国,王婷,等. 增施绿肥与降低氮肥对小麦产量和土壤肥力的影响[J]. 核农学报,2011,25(5):998–1003.
- [26] 李俊杰,邹洪琴,许发辉,等. 土壤微生物量氮对小麦各生育期氮素形态的调控[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(8):1321–1329.
- [27] 王磊,樊廷录,王勇,等. 夏闲期栽培模式对土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2015,34(5):55–58.
- [28] 唐红琴,李忠义,曾成城,等. 不同绿肥种类和还田量对柑橘园土壤养分的动态影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(16):214–219.
- [29] Anugroho F, Kitou M, Nagumo F, et al. Potential growth of hairy vetch as a winter legume cover crops in subtropical soil conditions[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56(2):254–262.
- [30] 马爱平,崔欢虎,亢秀丽,等. 不同海拔夏闲期压青茬口对麦田水分及水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(4):249–255.
- [31] 郑雪娇,张永丽,吴复学,等. 测墒补灌条件下施氮量对冬小麦耗水特性和水氮利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2017,37(10):1358–1363.
- [32] 张建军,樊廷录,党翼,等. 覆膜时期与施氮量对旱地玉米土壤耗水特征及产量的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(6):72–78.
- [33] 宋莉,廖万有,王烨军,等. 旱地作物间作绿肥研究进展[J]. 作物杂志,2017(6):7–11.
- [34] 杨叶华,张松,王帅,等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J]. 草业学报,2020,29(6):39–55.