

水氮运筹对糜子生育后期干物质积累、转运及水氮利用效率的影响

刘鹏¹, 杨刚¹, 常闻谦¹, 程炳文³, 赵世伟^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 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. 宁夏农林科学院 固原分院, 宁夏 固原 756000)

摘要: 为明确干旱、半干旱地区糜子水肥关系, 并为水肥资源高效利用提供技术依据, 以固陵 21 号为材料, 在盆栽试验条件下, 采用完全随机组合设计, 水分设置 50%, 70%, 90% 田间持水量, 施氮量设置 0, 0.05, 0.10 gN/kg 干土 (折合纯氮 0, 75, 150 kg/hm²), 研究不同水氮处理对糜子生育后期总叶面积、净光合速率、干物质积累与转运、水分利用效率及氮素利用效率的影响。结果表明: 适宜水氮条件可以延缓叶片的衰老速度, 维持较高的总叶面积, 显著提高糜子灌浆期的净光合速率, 促进灌浆后干物质的积累及转运, 增加产量; 糜子水分利用效率随施氮量的增加而增加, 随土壤水分水平的提高而降低, 追施氮量超过 75 kg/hm² 后有减小趋势; 糜子氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率、氮肥偏生产力随土壤含水量的提高而提高, 随施氮量的增加而降低。拔节期 70% 田间持水量和追施氮 75 kg/hm² 耦合主要通过延缓叶片衰老速度, 增强灌浆期功能叶光合输出能力, 增加灌浆后干物质的积累量, 促进干物质的转运, 提高水分利用效率以及氮素利用效率, 从而对糜子产量产生调控作用。试验条件下, W₂N₂ (70% 田间持水量、追氮 75 kg/hm²) 为最优水氮组合。

关键词: 糜子; 净光合速率; 干物质; 产量; 水氮利用效率

中图分类号: S516; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0139-07

Effects of Water and Nitrogen Management on Dry Matter Accumulation, Transportation, and Water and Nitrogen Use Efficiency of Broomcorn Millet in the Late Growth Stage

LIU Peng¹, YANG Gang¹, CHANG Wenqian¹, CHENG Bingwen³, ZHAO Shiwei^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 3. Guyuan Branch of Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Guyuan, Ningxia 756000, China)

Abstract: To provide high-yield and efficient utilization of water and fertilizer resources in the arid and semi-arid areas of China, broomcorn millet, Gumi 21, was adopted as test crop. Under the conditions of pot experiment, a completely random combination design was adopted, and the water contents were set as 50%, 70%, and 90% of the field water holding capacity. Nitrogen use rates such as 0, 0.05, 0.10 g N/kg dry soil (converted to pure nitrogen 0, 75, 150 kg/hm²) were set. The total leaf area, net photosynthetic rate, dry matter accumulation and transport, water use efficiency and nitrogen use efficiency of different water and nitrogen treatments in the late growth stage of broomcorn millet were examined. The results showed that suitable water and nitrogen conditions could delay the senescence rate of leaves, maintain a high total leaf area, significantly increase the net photosynthetic rate of the broomcorn millet during the grain filling stage, promote the accumulation and transport of dry matter after the grain filling stage, and increase the yield; the water use efficiency of broomcorn millet increased with the increase of nitrogen application rate, and decreased with the increase of soil water level. After the application of nitrogen more than 75 kg/hm², water

use efficiency of broomcorn millet presented the decreasing trend. The agronomic utilization efficiency, nitrogen fertilizer physiological utilization efficiency and nitrogen fertilizer partial productivity of broomcorn millet increased with the increase of soil water content, and decreased with the increase of nitrogen application rate. The 70% of field water holding capacity and nitrogen application rate of 75 kg/hm² can regulate the production of broomcorn millet mainly by delaying the senescence rate of leaves, enhancing the photosynthetic output capacity of functional leaves during the filling stage, increasing the accumulation of dry matter after the filling stage, promoting the transport of dry matter, improving water use efficiency and nitrogen utilization efficiency. Under the experimental conditions, 70% field water holding capacity and topdressing nitrogen rate of 75 kg/hm² is the optimal water and nitrogen combination.

Keywords: broomcorn millet; net photosynthetic rate; dry matter; yield; water and nitrogen use efficiency

糜子(*Panicum miliaceum* L.)是我国干旱、半干旱农作区的最主要粮食作物和经济作物之一,具有抗旱、耐瘠薄、耐盐碱、生育期短等特点^[1-2],这就决定了糜子在干旱、半干旱中低产区的重要地位。水分和氮素是决定作物产量的最主要因素,也是人为调控最频繁、影响最显著的环境因子^[3]。对于糜子而言,在灌浆期水分胁迫会抑制糜子籽粒灌浆,造成严重减产,拔节期胁迫次之,而拔节期追施氮肥可促进糜子产量提高,水氮管理对糜子拔节后生长发育及产量的作用效果明显^[4-5]。水分和氮素对作物生长的作用效果不同,但二者却相互影响,相互制约,合理的水氮条件会产生相互促进机制,提高作物的产量和水氮利用效率,实现增产增效^[6]。因此,水氮运筹对于提高糜子产量,挖掘干旱半干旱地区耕地生产潜力以及水氮资源的高效利用具有重要意义。近年来,研究者关于水氮耦合对作物生长发育及产量的影响研究较多。薛青武等^[7]提出,在小麦灌浆期水分胁迫条件下,适量增施氮肥可以增强小麦旗叶对水分胁迫的生理适应性,增加叶面积指数和光合色素含量,维持较高水平的光合速率,促进植株的生长发育,减轻了水分胁迫对植株产量的不利影响。上官周平等^[8]发现,增施氮肥可明显提高旱作小麦叶片光合速率,延缓功能叶的衰老速度,有利于植株在生育后期形成更多的光合产物,促进籽粒灌浆和增加穗粒数,减轻了干旱对籽粒产量的影响,提高土壤水分利用效率和籽粒产量。王艳哲等^[9]认为,水氮通过调控地上和地下干物质分配而影响作物产量和水分利用效率,在水分胁迫条件下,增施氮肥会降低作物根冠比,促进地上部干物质的积累和产量的形成。魏廷邦等^[10]发现,水肥耦合可增强玉米的光合作用,提高干物质积累速率,延长干物质积累的持续天数,有利于干物质的积累和产量的提高。目前关于水氮耦合研究主要集中在小麦^[11-13]、水稻^[6,14]、玉米^[10,15]等大宗作物上,且对作物生长发育及产量形成过程的研究较多,但是针对干旱

半干旱气候条件下的,水氮运筹对糜子生育后期干物质积累与转运及水氮利用效率的调控研究尚少见报道。本研究从糜子干物质的积累与转运以及对水氮利用效率两个方面出发,通过研究不同水氮对糜子干物质转运和积累的影响以及对水氮利用效率的调控,探讨水氮运筹对糜子产量的调控机理,给糜子高产与水肥资源高效利用提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验与 2018 年在中国科学院固原生态试验站(106°26'E,36°01'N,海拔 1 760 m)防雨棚内进行,该地区年平均气温 6.2℃,0℃以上积温 3 100℃,年平均日照时数达 2 518 h,年平均降雨量 422 mm,无霜期 130~150 d。供试盆栽土采自宁夏固原河川乡农田 0—20 cm 耕层土壤,土壤类型为黄绵土,前茬为马铃薯,其中田间最大持水量为 23%,pH 值为 8.5,有机质含量为 9.6 g/kg,全 N 含量为 0.62 g/kg,碱解 N 含量 55 mg/kg、速效 P 含量 13.8 mg/kg、速效 K 的含量 143 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用水氮 2 因素 3 水平,完全组合进行盆栽试验,共 9 个处理。糜子拔节后水分设置 3 个水平,分别为 W₁(水分胁迫处理,土壤含水量保持在田间持水量 50%)、W₂(正常供水处理,土壤含水量保持在田间持水量 70%)、W₃(充足供水处理,土壤含水量保持在田间持水量 90%);糜子拔节后施氮量设置 3 个水平,分别为 N₁(低量施氮)、N₂(中量施氮)、N₃(高量施氮),具体施用量为 0,0.05,0.10 g N/kg 干土(折合纯氮 0.75,150 kg/hm²)。各处理基础施肥量均保持一致,纯 N、P₂O₅、K₂O 的施用量分别为 0.05 g/kg,0.109 g/kg,0.054 g/kg 干土(折合纯氮 75 kg/hm²,P₂O₅ 120 kg/hm²,K₂O 60 kg/hm²);供试土壤与肥料按比例混合均匀后全部装入塑料桶(半

径 16 cm,高 30 cm,装土量 20 kg),并浇水至田间持水量于合适墒情统一播种,出苗后于糜子 3 叶期间苗,每盆留生长一致的植株 8 株,并在土壤表面覆盖 1 cm 厚的蛭石防止浇水造成表层土壤板结。糜子苗期水分正常供应,土壤含水量维持在 70%田间持水量。糜子拔节后,结合灌水进行施氮处理并开始用称重法进行水分控制。试验于防雨棚内进行,全生育期内无自然降水因素的干扰。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 光合参数及叶面积测定 分别于糜子抽穗期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期 4 个时期,每个时期选取长势一致的植株 3 株,采用 TPS-2 型光合仪(英国 PP-Systems 公司)于晴天上午 9:00—11:00 对糜子旗叶进行光合参数的测定,每个生育期连续测 3 d,测定结果取平均值。叶面积测定采用量叶法,叶面积=长×宽×0.75^[16]

1.3.2 干物质积累及转运 分别于糜子抽穗期、灌浆前期、灌浆后期、成熟期进行取样,按根、茎、叶、籽粒等不同器官处理,分别置于 105℃烘箱杀青 30 min,再在 75℃下烘干至恒重,用万分之一天平称量各部位干物质重量。

干物质移动率=(开花后器官最大干质量—成熟器官干质量)/开花后器官最大干质量×100%

干物质转运率=(开花后器官最大干质量—成熟器官干质量)/籽粒最大干质量×100%

1.3.3 产量及水氮利用效率 在糜子成熟期测定各处理的穗重、穗粒重,计算单株籽粒产量;采用凯氏定氮仪测定植株各器官中全氮含量。

植株(籽粒)水分利用效率=植株生物量(籽粒)

干质量/生育期总耗水量;

氮肥农学利用效率=(拔节后施氮下的籽粒干质量—拔节后不施氮下的籽粒干质量)/拔节后施氮量;

氮肥生理利用率=(拔节后施氮的籽粒干质量—拔节后不施氮的籽粒干质量)/(拔节后施氮的植株吸氮量—拔节后不施氮的植株吸氮量);

氮肥偏生产力=籽粒干质量/施氮量

1.4 数据统计与分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件进行数据处理及分析;采用 Origin 2016 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮条件对糜子叶面积及净光合速率的影响

由表 1 可知,抽穗期糜子总叶面积达到最大,并且随着生育期的推进,糜子总叶面积均呈现出递减的变化趋势。在同一水分处理条件下,随着施氮量的增加,糜子各生育期总叶面积表现出先递增后递减的趋势(抽穗期、灌浆前期 W₁ 处理除外),N₂ 处理的总叶面积较 N₁ 处理处理的差异显著($p<0.05$),而 N₃ 处理与 N₁ 处理差异不显著($p<0.05$),这表明适宜的增施氮肥可促进糜子叶片生长,增加糜子总叶面积,而追施高量氮肥对植株总叶面积的促进效果则不明显。在 N₂ 处理条件下,随着土壤含水量的提高,糜子各生育期总叶面积表现出增加趋势,W₂ 处理和 W₃ 处理较 W₁ 处理差异均达到显著水平($p<0.05$),而在 N₁ 处理和 N₃ 处理条件下,不同时期各水分处理间糜子总叶面积差异不明显,这表明合理的水氮耦合可以提高糜子各时期的总叶面积,这将有利于增强糜子光合作用的输出能力。

表 1 不同水氮处理下糜子总叶面积的变化

水分处理	施氮处理	抽穗期	灌浆前期	灌浆后期	成熟期
W ₁	N ₁	307.7±89.0d	256.3±53.6e	205.3±38.7c	160.7±24.7f
	N ₂	340.3±89.8cd	278.7±24.2de	216.7±43.1c	206.3±24.7cde
	N ₃	360.3±31.9bcd	304.3±24.8cde	215.7±54.8c	180.3±63.3de
W ₂	N ₁	397.0±9.8abcd	329.0±17.4cd	260.7±43.6bc	246.7±76.5bcde
	N ₂	451.3±43.7ab	398.7±32.3ab	346.3±80.6ab	318.0±52.1ab
	N ₃	399.3±22.5abcd	347.3±26.7bc	324.7±32.1ab	293.7±72.7abc
W ₃	N ₁	380.0±78.5bcd	331.0±51.3cd	281.7±40.5bc	269.3±43.9abcd
	N ₂	490.3±5.0a	431.3±23.5a	392.0±30.3a	356.0±15.4a
	N ₃	418.3±46.8abc	367.7±30.2bc	317.0±84.1ab	266.0±21.6abcd

注:同一列数字后的不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。

由表 2 可知,随着糜子生育时期的推进,糜子功能叶净光合速率呈现出先递增后递减的变化趋势,并在灌浆前期达到了最大值(W₁N₁ 处理除外)。在同一水分条件下,随着施氮的增加,糜子各生育期旗叶净光合速率均有增加趋势,N₂ 处理和 N₃ 处理的净光合速率较 N₁

处理在灌浆前期和灌浆后期差异达到显著水平($p<0.05$),而在抽穗期以及成熟期则差异不明显,这说明增施氮肥可提高糜子生育后期功能叶的净光合速率,特别是在灌浆期更为明显,这将有助于维持糜子生育后期功能叶较高的光合产物输出能力。在同一施氮条件

下,随着土壤水分含量提高,糜子旗叶净光合速率与水分水平呈正相关关系,即功能叶净光合速率随着土壤含水量增加而增大,在糜子灌浆前期到灌浆后期阶段,W₃ 处理和 W₂ 处理条件下的净光合速率值

与 W₁ 处理条件下的相比差异均达到显著水平($p<0.05$),这表明适宜的土壤含水量有利于维持糜子灌浆期旗叶较高水平的净光合速率,而干旱胁迫会对糜子旗叶净光合速率产生不利影响。

表 2 不同水氮处理下糜子净光合速率的变化

水分处理	施氮处理	抽穗期	灌浆前期	灌浆后期	成熟期
W ₁	N ₁	15.37±1.01de	14.03±1.21d	9.03±1.03d	1.23±0.15c
	N ₂	16.67±2.57cde	18.90±1.47c	12.90±1.47b	2.80±1.42abc
	N ₃	14.33±0.55 e	17.30±0.80c	10.30±0.80cd	2.77±0.6abc
W ₂	N ₁	17.53±0.60bcd	18.97±1.52c	11.97±1.52bc	1.53±0.49bc
	N ₂	19.77±0.90ab	21.50±1.15ab	16.60±1.15a	3.23±0.72ab
	N ₃	18.97±2.06abc	22.80±0.87a	15.80±0.87a	3.03±1.29ab
W ₃	N ₁	17.30±0.75bcd	19.50±1.13bc	12.50±1.13bc	1.73±0.6bc
	N ₂	20.87±1.48a	21.77±1.27ab	15.63±1.10a	3.83±1.31a
	N ₃	19.83±0.99ab	22.33±1.68a	15.33±1.68a	3.20±0.4ab

2.2 不同水氮条件对糜子干物质积累及转运的影响

由表 3 可知,糜子干物质积累量随着生育期的推进而呈现递增趋势,在成熟期达到最大值(N₁ 处理的除外)。在 W₂ 处理和 W₃ 处理条件下,随着施氮量的提高,糜子各生育期干物质积累量基本呈现出先递增后递减的趋势,其中在灌浆前期、后期及成熟期 N₃ 处理和 N₂ 处理的干物质积累量较 N₁ 处理的差异均达到显著水平($p<0.05$),N₃ 处理和 N₂ 处理处理间则差异不明显;而在 W₁ 处理条件下,糜子各生育期内干物质积累量表现出随施氮量增大而递增的趋势,

这说明增施氮肥对提高糜子干物质积累量有积极影响,高量的氮素可在一定程度上缓解干旱胁迫对糜子干物质积累造成的不利影响。在相同施氮水平条件下,随着土壤含水量的提高,糜子干物质积累量呈现出逐渐递增的规律,W₂ 处理和 W₃ 处理均优于 W₁ 处理的干物质累积量,除抽穗期各水分处理间差异不明显外,其余各生育期差异均达到显著水平($p<0.05$),这表明提高土壤含水量对糜子灌浆期到成熟期干物质积累有明显的促进作用,这将会为籽粒产量的形成奠定充足的物质基础。

表 3 不同水氮处理下糜子干物质积累量的变化

水分处理	施氮处理	抽穗期	灌浆前期	灌浆后期	成熟期
W ₁	N ₁	6.45±1.45	7.84±1.57c	10.50±0.16e	9.43±0.93e
	N ₂	8.86±2.24	9.66±1.36bc	11.06±0.75de	11.26±0.34d
	N ₃	9.15±2.06	10.96±1.86ab	11.87±0.93cde	12.37±0.55cd
W ₂	N ₁	10.12±2.76	12.42±2.01ab	12.84±0.54bcd	12.63±0.81c
	N ₂	10.51±1.27	12.93±1.68a	14.19±1.87ab	14.86±0.70ab
	N ₃	9.22±2.28	11.64±2.33ab	14.29±0.21ab	14.30±0.35b
W ₃	N ₁	10.31±0.65	12.95±0.59a	13.47±0.67abc	12.79±1.09c
	N ₂	11.34±0.94	13.02±0.78a	15.03±1.56a	16.00±0.29a
	N ₃	10.08±1.13	12.31±1.02ab	14.43±1.26ab	15.65±0.70a

由表 4 可知,不同水氮处理条件下糜子干物质转运量、移动率、转运率差异显著($p<0.05$)。在同一水分条件下,随着施氮量的增加,糜子干物质转运量、移动率、转运率均呈现出上升趋势,N₂ 处理的总体上优于 N₃ 处理的干物质转运量、移动率、转运率,方差分析结果表明 N₂ 处理与 N₃ 处理差异不显著($p<0.05$),但二者相较于 N₁ 处理的转运量、移动率差异均达到显著水平,而转运率则差异不显著($p<0.05$),这说明适量的增施氮肥可提高糜子干物质的转运量和移动率,但对转运率的影响不明显;随着土壤水分含量的提高,同一施氮处理下的糜子干物质转运量、

移动率、转运率增加明显,W₃ 处理和 W₂ 处理较 W₁ 处理差异达到显著水平($p<0.05$),其中 W₃N₂ 处理的转运量、移动率、转运率较高,分别达到了 3.59 g,32.46%,54.48%,这说明糜子干物质转运量、移动率、转运率的大小由水氮两因素共同决定,较高水平土壤含水量以及适量的增施氮肥有助于提高糜子干物质的运移能力,促进干物质向籽粒部位的运输,从而形成更高的籽粒产量。

2.3 不同水氮条件对糜子籽粒产量的影响

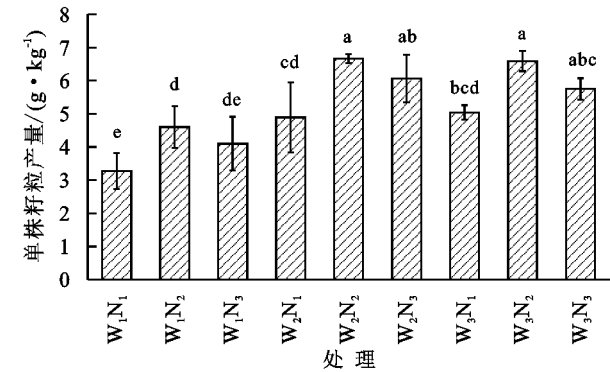
由图 1 可知,不同水氮条件下,糜子各处理间单株籽粒产量差异显著($p<0.05$)。在同一水分条件下,单

株籽粒产量随着施氮量的提高增加明显, N_2 处理、 N_3 处理较 N_1 处理差异均达到显著水平 ($p<0.05$), N_2 处理优于 N_3 处理, 但差异不显著 ($p<0.05$), 这表明增施氮肥可提高糜子籽粒产量, 但施氮量超过一定范围, 增效会下降。在同一施氮水平下, 随着土壤水分水平的提高, 糜子籽粒产量呈现增加趋势, W_2 处理、

W_3 处理与 W_1 处理相比籽粒产量均达到显著差异 ($p<0.05$), 土壤水分条件的改善可提高糜子籽粒产量。各处理中, 单株籽粒产量最高为 W_2N_2 处理, 达到了 6.66 g, 这表明充足的水分条件和施氮量并不能使产量达到最大化, 而适宜的水氮条件有利于糜子发挥最大的生产潜力。

表 4 不同水氮处理对糜子干物质转运的影响

水分处理	施氮处理	成熟干质量/g	最大干质量/g	转运量/g	移动率/%	转运率/%
W_1	N_1	5.04±0.36e	5.78±0.29e	0.74±0.09e	12.88±2.03d	23.19±4.76c
	N_2	4.99±0.51e	6.52±0.28e	1.53±0.23d	23.57±4.42c	33.68±7.01bc
	N_3	5.77±0.09de	7.48±0.55d	1.71±0.58d	22.53±6.19c	41.62±11.62ab
W_2	N_1	6.18±0.61cd	8.12±0.36d	1.94±0.37cd	24.02±5.18c	41.02±11.93ab
	N_2	6.44±0.45cd	9.84±0.22b	3.40±0.60a	34.50±5.54a	51.10±9.33a
	N_3	6.69±0.61bc	9.55±0.67bc	2.86±0.39ab	29.95±3.67abc	47.41±6.43ab
W_3	N_1	6.71±0.67bc	8.98±0.62c	2.27±0.35bcd	25.34±4.23bc	45.2±8.18ab
	N_2	7.42±0.12ab	11.00±0.51a	3.59±0.59a	32.46±4.04ab	54.48±9.34a
	N_3	8.14±0.18a	10.75±0.22a	2.61±0.33bc	24.27±2.68c	45.56±6.73ab



注:不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同水氮处理下糜子籽粒产量比较

2.4 不同水氮条件对糜子水氮利用效率的影响

由表 5 可知,不同水氮处理条件下的糜子籽粒水分利用效率和植株水分利用效率差异显著 ($p<0.05$)。在同一水分条件下,随着施氮量的增加,糜子籽粒水分利用效率和植株水分利用效率均表现出增大的趋势, N_2 处理的最高, 其次为 N_3 处理的水分利用效率, 方差分析结果表明, N_2 处理的籽粒水分利用效率较 N_1 处理的差异达到显著水平 ($p<0.05$), 而 N_3 处理的籽粒水分利用效率与 N_1 处理的相比差异则不显著, 这说明适量的增施氮肥可提高籽粒水分利用效率, 而过高的施氮水平则效果不明显。在同一氮素处理条件下, 随着土壤水分条件的改善, 糜子籽粒水分利用效率和植株水分利用效率都呈现出减小的趋势, 各水分处理间水分利用效率表现为 $W_1>W_2>W_3$, 这表明适度降低土壤含水量可提高籽粒和植株水分利用效率。

在同一水分条件下, 随着施氮量的增加, 糜子的氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率以及氮肥偏生

产力表现出递减的规律, N_2 处理的明显优于 N_3 处理的, 方差分析结果表明, 在 W_2 和 W_3 处理条件下, 氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力差异显著 ($p<0.05$), 而氮肥生理利用效率差异无明显差异 ($p<0.05$), 这说明过高的施氮量会降低糜子的氮肥利用效率。在同一施氮水平下, 随着土壤水分条件的改善, 糜子氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率、氮肥偏生产力均表现出了增大的规律, 且 W_2 处理条件下的高于 W_3 处理的, 这说明较高水平的土壤含水量有利于提高糜子的氮肥利用效率。在所有水氮处理中, W_2N_2 处理的氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率、氮肥偏生产力最优, 分别为 7.09 g/g, 36.00 g/g, 26.65 g/g, 而 W_1N_3 处理的最低, 分别为 1.01 g/g, 15.53 g/g, 7.53 g/g, 这说明适量的水分供应和氮素供应才有利于提高糜子氮素利用效率, 而不是土壤含水量和施氮量越高越好。

3 讨论

3.1 水氮对糜子干物质积累与转运及产量的影响

自从作物产量的源库理论形成后, 研究者经常从源库的观点来探讨实现作物高产的途径。源是指生产或输出同化物的器官, 而植株绿叶面积、功能叶光合速率及光合作用持续时间通常是用来衡量源的指标^[17]。流是指源、库之间同化物的运输, 即干物质的转运能力。作物源器官的输出能力及同化物质的积累与转运(流)对作物产量形成有重要意义, 水氮运筹是调节作物内部代谢的有效措施之一^[18-20]。王月福等^[21]研究发现, 增加施氮量可提高小麦花后功能叶叶绿素含量和净光合速率, 延缓了功能叶的衰老速

度,保证了小麦生育后期功能叶较高水平的光合效率;适宜的施氮水平可促进花后光合产物从营养器官向籽粒中的运输,提高籽粒中可溶性糖的含量,促进淀粉的积累,提高籽粒重及籽粒产量。孙永健等^[22]

研究结果表明,适宜条件的水氮处理组合可提高水稻的光合速率,有利于植株渗透调节物质的积累及保护酶活性的提高,促进作物生育后期干物质的积累及转运,提高作物的产量。

表 5 不同水氮处理对糜子水氮利用效率的影响

水分处理	施氮处理	籽粒水分 利用效率/ (g·kg ⁻¹)	植株水分 利用效率/ (g·kg ⁻¹)	氮肥农学 利用效率/ (g·g ⁻¹)	氮肥生理 利用效率/ (g·g ⁻¹)	氮肥偏 生产力/ (g·g ⁻¹)
W ₁	N ₁	0.68±0.11bc	1.95±0.19cd	—	—	—
	N ₂	0.95±0.13a	2.33±0.07b	4.02±1.15ab	28.7±8.05ab	17.07±0.93b
	N ₃	0.85±0.17abcd	2.56±0.12a	1.01±0.72b	15.53±8.85ab	7.53±0.34d
W ₂	N ₁	0.69±0.15bc	1.78±0.12de	—	—	—
	N ₂	0.94±0.02ab	2.10±0.10c	7.09±2.23a	36.00±7.45a	26.65±0.31a
	N ₃	0.86±0.10abc	2.02±0.05c	2.34±0.81b	25.11±7.64ab	12.12±0.83c
W ₃	N ₁	0.66±0.03d	1.67±0.14e	—	—	—
	N ₂	0.86±0.04abc	2.09±0.04c	6.19±0.20a	26.68±1.53ab	26.36±0.70a
	N ₃	0.75±0.04bcd	2.04±0.09c	1.42±0.19b	12.49±0.84b	11.5±0.37c

本研究中,在同一水分水平下,随着施氮量的增加,糜子各生育期总叶面积表现出先递增后递减的趋势,中氮处理的总叶面积显著高于低氮处理下的,而各生育期旗叶净光合速率则表现出增加趋势,中氮处理和高氮处理的净光合速率较低氮处理在灌浆前期和灌浆后期差异达到显著水平,这表明适宜的水氮条件可以延缓糜子叶片的衰老速度,维持较高的总叶面积,显著提高糜子灌浆期的净光合速率,增强糜子源器官生育后期的同化物输出能力,这与王月福等^[21]研究结果相似。进一步研究表明,随着水氮水平的提高,糜子干物质积累量呈现增加趋势,这表明较高水平的水氮条件可促进糜子干物质的积累,这与郭丙玉等^[23]在玉米上的研究结果一致。在同一水分条件下,随着施氮量的增加,糜子干物质转运量、移动率、转运率均有所提高,中氮处理条件下的干物质转运量和移动率与低氮处理下的差异显著,而转运率差异不明显,但随着水分水平的提高,中氮处理下的转运量、运动率和转运量较低氮处理的差异则达到显著水平,这表明水氮互作有利于维持糜子“流”的通畅,促进干物质向籽粒部(库)的运输,提高干物质的转运率,为籽粒产量的形成奠定物质基础。所有水氮处理中,W₂N₂和W₃N₂处理具有最高的籽粒产量,且在灌浆期具有较高总叶面积和净光合速率,以及较高的转运率及干物质积累量,这说明水氮耦合可能主要通过增强糜子“源”器官的输出能力以及促进干物质的运输来增加产量。

3.2 水氮对糜子水分利用效率和氮素利用效率的影响

在干旱半干旱地区,土壤水分和养分是限制作物

产量的两个主要因素^[8]。水分利用效率和氮素利用效率是衡量作物生产过程中的高效性重要指标,提高作物的水氮利用效率有利于在有限的水分条件和肥力水平下获得最高的产量和经济效益^[24]。王绍华^[14]等发现,随着施氮量的增加,水稻吸氮量增加,营养器官中滞留的氮素增加,而氮素转运率、氮素利用率和产谷效率均下降。刘明等^[25]提出,随着施氮量的提高,玉米产量、干物质积累量及水分利用效率呈现增加趋势,而氮素利用效率则呈现先增加后减小的趋势;充足的水分条件不利于水分利用效率的提高,而适量的水氮水平有利于水分利用效率和氮素利用效率的提高。赵炳梓^[11]、栗丽^[12]等认为,随着水分水平的提高,小麦的耗水量、氮肥利用效率、氮肥偏生产力及籽粒产量均提高,而灌溉水利用效率降低;随着施氮量增加,灌溉水利用效率呈现出先增加后降低的趋势。

本研究中,在一定的施氮水平内,糜子水分利用效率随着施氮量的增加而增加,超过合适的施氮量后有减小趋势,这可能是由于过高的氮素使得糜子植株生长旺盛,蒸腾作用过强,导致水分损失较大,水分利用率下降;在同一施氮水平下,糜子水分利用效率会随着水分水平的提高而降低,这表明适度的降低土壤含水量提和增加施氮量可提高糜子水分利用效率,这与刘明^[25]、赵炳梓^[11]等的研究结果基本一致。在同一水分条件下,增施氮肥会降低糜子的氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率以及氮肥偏生产力;在同一施氮水平下,随着土壤水分水平的提高,糜子氮肥农学利用效率、氮肥生理利用效率、氮肥偏生产力均表

现出了增加的趋势,但正常供水下的氮肥利用效率高
于充足供水下的,这可能是由于充足供水条件下会造
成土壤中的氮素随水分流失,从而降低了氮素利用效
率。所有处理中, W_2N_2 处理具有较优的水氮利用效
率,这表明适宜的增施氮肥和土壤含水量有助于植株
保持较高水平的水氮利用效率。

4 结论

拔节后 70%田间持水量的土壤水分条件和中量施
氮耦合可延缓糜子叶片的衰老速度,维持较高的总叶面
积,显著增强灌浆期的净光合速率,促进灌浆前期到成
熟期干物质的积累,显著提高糜子花后干物质的转运
量、移动率和转运率,提高了籽粒产量,并且具有较高
的水分利用效率和氮素利用效率。拔节后 70%田间
持水量的土壤水分条件、追施氮量 75 kg/hm^2 的水
氮组合为产量和效益兼优的最佳组合。

参考文献:

- [1] 王纶,王星玉,温琪汾,等. 中国黍稷种质资源研究与利用[J]. 植物遗传资源学报,2005,6(4):374-471.
- [2] 贾根良,代惠萍,冯佰利,等. PEG 模拟干旱胁迫对糜子幼苗生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2008,28(10):2073-2079.
- [3] Prasad R, Hochmuth G J, Boote K J. Estimation of nitrogen pools in irrigated potato production on sandy soil using the model SUBSTOR[J]. Plos One, 2015,10(1):e0117891.
- [4] 徐学选,陈国良,穆兴民. 不同干旱强度对糜子产量的影响及其在估产中的应用[J]. 水土保持通报,1994,14(6):41-47.
- [5] 王君杰,曹晓宁,王海岗,等. 施氮时期对糜子产量和氮素利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报,2017,2(12):20-25.
- [6] 李俊峰,杨建昌. 水分与氮素及其互作对水稻产量和水肥利用效率的影响研究进展[J]. 中国水稻科学,2017,31(3):327-334.
- [7] 薛青武,陈培元. 灌浆期土壤干旱条件下氮素营养对小麦旗叶光合作用的影响[J]. 干旱地区农业研究,1989,12(3):86-93.
- [8] 上官周平,刘文兆,徐宣斌,等. 旱作农田冬小麦水肥耦合增产效应[J]. 水土保持研究,1999,6(1):103-106.
- [9] 王艳哲,刘秀位,孙宏勇,等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2013,21(3):282-289.
- [10] 魏廷邦,柴强,王伟民,等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. 中国农业科学,2019,52(3):428-444.
- [11] 赵炳梓,徐富安,周刘宗,等. 水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率[J]. 土壤,2003,35(2):122-125.
- [12] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等. 水氮处理对冬小麦生长、产量和水氮利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(5):1367-1373.
- [13] 张笑培,王和洲,周新国,等. 拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):19-26.
- [14] 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(4):497-501.
- [15] 贺冬梅,张崇玉,王丹妮,等. 玉米拔节期水肥耦合效应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(3):164-166.
- [16] 贾根良,张社奇,代惠萍,等. 拔节后糜子干物质积累及分配规律研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(4):86-90.
- [17] 郭文善,封超年,严六零,等. 小麦开花后源库关系分析[J]. 作物学报,1995,21(3):334-340.
- [18] 周宝元,孙雪芳,丁在松,等. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响[J]. 中国农业科学,2017,50(11):2129-2140.
- [19] Heuvelink E. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model[J]. Annals of Botany, 1996,77(1):71-80.
- [20] 杨国虎,李建生,罗湘宁,等. 干旱条件下玉米叶面积变化及地上干物质积累与分配的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2005,33(5):27-32.
- [21] 王月福,于振文,李尚霞,等. 氮素营养水平对小麦开花后碳素同化、运转和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2016,22(2):55-59.
- [22] 孙永健,孙园园,刘凯,等. 水氮互作对结实期水稻衰老和物质转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(6):1339-1349.
- [23] 郭丙玉,高慧,唐诚,等. 水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(12):3679-3686.
- [24] 李武超,李磊,王炜,等. 小麦水氮耦合效应与水肥高效利用研究[J]. 华北农学报,2018,33(5):236-242.
- [25] 刘明,张忠学,郑恩楠,等. 不同水氮管理模式下玉米光合特征和水氮利用效率试验研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12):27-34.