

水氮互作对胡麻干物质生产和产量的影响

崔红艳, 方子森*

(甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学 农学院, 兰州 730070)

摘要:以‘陇亚杂1号’胡麻为试验材料,设计田间水(主区)、氮(副区)两因子裂区试验,水分设置分茎水(W_1)、分茎水+开花水(W_2 , 60 mm+40 mm)、分茎水+现蕾水+开花水(W_3 , 60 mm+40 mm+40 mm)3个处理,施纯氮量设置0(N_1)、75.0(N_2)、112.5(N_3)、150.0(N_4) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 共4个水平,考察水氮互作对胡麻干物质积累与分配以及籽粒产量的影响,探讨不同水氮配合下胡麻的增产机制。结果显示:(1)灌溉量和施氮量对胡麻主要生育时期的干物质积累与分配有显著影响,胡麻籽粒产量的水氮互作效应达到极显著水平,其中水分效应大于氮肥效应。(2)同一施氮量水平下, W_2 处理明显增加了胡麻成熟期籽粒的干物质分配量和花后干物质同化量对籽粒的贡献率,且籽粒产量显著高于其他处理10.51%~27.99%。(3)灌水量相同条件下,开花后干物质同化量对籽粒的贡献率以 N_3 水平的最高,显著高于其他施氮水平7.90%~42.43%;在 W_2 、 W_3 处理下,施氮水平为 N_3 时胡麻籽粒产量最高,但施氮量过多,籽粒产量反而显著下降7.96%~9.62%。研究表明,水氮协调在胡麻干物质积累和分配中起着关键的作用,而干物质的积累和分配又与籽粒产量密切相关;在本试验条件下,施纯氮量为112.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、全生育期在分茎期和开花期灌2次水(60 mm+40 mm)处理为胡麻节水减氮较为适宜的水氮组合。

关键词:胡麻;灌水模式;施氮量;干物质积累;干物质分配;籽粒产量

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Nitrogen and Irrigation Interaction on Dry Matter Production and Grain Yield of Oil Flax under Different Irrigation Modes

CUI Hongyan, FANG Zisen*

(Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to investigate the production mechanism of oil flax under different coordination with water-nitrogenous fertilizer, we used ‘Longyaza 1’ to as material to elucidate the effects of nitrogen and irrigation interaction on dry matter accumulation, distribution and grain yield of oil flax. The split plot design was employed with main plot of water (W_1 , irrigation amount was 60 mm at stem stage; W_2 , irrigated at stem and flowering stage, and irrigation amount was 60 mm and 40 mm; W_3 , irrigated at stem, squaring and flowering stage, and irrigation amount was 60 mm, 40 mm and 40 mm), sub-plot of nitrogen fertilizer (N_1 , 0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_2 , 75.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_3 , 112.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_4 , 150.0 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). The results showed that: (1) the irrigation amount and N application rate has a significant effect on dry matter accumulation and distribution, and there was extremely significant interactive effect between irrigation and nitrogen rate on grain yield, moreover, irrigation rate played a more important role than nitrogen rate. (2) Compared with other treatments, dry matter distribution in grains at maturity stage and contribution of dry matter accumulation

收稿日期: 2015-10-16; 修改稿收到日期: 2015-12-27

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-17-GW-9)

作者简介: 崔红艳(1989—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: cuihongyan1989@163.com

* 通信作者: 方子森(1958—), 男, 教授, 主要从事大田作物和中草药栽培研究。E-mail: fangzs@gsau.edu.cn

amount after anthesis to grains under the same N application levels were markedly raised and grain yield was significantly increased by 10.51%—27.99% in W_2 . (3) The contribution of dry matter accumulation amount after anthesis to grains at N_3 levels under the same irrigation conditions was significantly increased by 7.90%—42.43%; at the W_2 and W_3 irrigation level, the grain yield of N_3 treatment was the largest, but over-fertilization of nitrogen caused significantly reduction of yield with a drop of 7.96%—9.62%. Therefore, water and nitrogen coordination played a key role in dry matter accumulation and distribution, which was closely related to the grain yield; the nitrogen rate of 112.5 kg · hm⁻², irrigation amount of 60 mm and 40 mm at stem and flowering stage in the whole growth period was optimal combination of irrigation and nitrogen for the higher grain yield of oil flax under the conditions of this experiment.

Key words: oil flax; irrigation amount; nitrogen fertilizer rate; dry matter accumulation; dry matter distribution; grain yield

胡麻(*Linum usitatissimum* Linn.)又称油用亚麻,具有较强的耐旱、耐寒、耐瘠薄和适应性广等特性,是中国北方干旱半干旱地区的重要油料作物和经济作物^[1]。中国胡麻种植面积近 70 万 hm²,主要分布于甘肃、河北、山西、内蒙古、宁夏、新疆等省份,西藏、云南、贵州、广西、山东等地也有零星种植^[2]。中国胡麻主产区水资源随年份和季节变化较大,7~9 月的降雨量占全年总降雨量的 55%,降雨对水分的供应与作物对水分的需求不协调,春旱和伏旱时常发生,致使胡麻籽粒产量低而不稳^[3-4]。同时,胡麻是需氮肥较多而不耐高氮的作物,合理的施用氮、磷、钾肥是胡麻优质高产栽培的关键^[5-6]。但近年来在胡麻种植方面仍存在施肥不科学问题,普遍存在偏施氮肥的现象,而且当地水资源严重短缺,不合理灌溉制度(主要指灌溉量和灌溉方法)使作物水分利用效率较低,造成水肥资源浪费和环境污染。因此,如何缓解不合理灌溉和过量施肥与资源短缺的矛盾,协调胡麻生长与产量之间的均衡发展,对于实现胡麻高产高效种植具有重要意义。

干物质生产是作物产量形成的基础,胡麻籽粒产量形成的过程实际上就是干物质生产与分配的过程。各种农艺措施对作物产量的影响大多与干物质积累特点及其转化效率有关,干物质积累与合理分配是提高作物产量的关键^[7]。水分和氮素是影响农业生产和作物生长的两个重要因素,合理灌溉与施氮是作物增产的主要手段^[8]。研究表明,水与氮存在明显互作效应,土壤的水分状况会影响作物对养分的吸收和利用,适当增施氮肥可以在一定程度上减小土壤水分不足对产量造成的负效应,达到“以肥补水、以水调肥”的效果^[9-11]。王李芳等^[12]研究认为,只有在适当灌水、施氮条件下,烤烟干物质积累最快,而且能够实现优质丰产。Mhammod 等^[13]研究发现,水肥配合施用有利于提高马铃薯的水肥利

用率,从而提高马铃薯的产量。土壤水分与氮肥对作物的干物质积累、运转和产量形成等具有协同作用,是优质高产栽培中的主要农艺措施^[14]。迄今为止,有关水分和氮素对作物干物质生产和产量的影响已有大量报道^[15-17],但水氮互作对胡麻干物质积累、分配以及籽粒产量影响的研究报道较少。本试验研究了水氮互作条件下胡麻干物质积累分配规律的变化及其籽粒产量响应效应,进一步分析了胡麻干物质生产与籽粒产量的关系,为优化当地胡麻生产的灌溉和施肥技术提供科学参考。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2014 年 3~8 月在甘肃省兰州市榆中县三角城乡(92°13'~108°46'E, 32°11'~42°57'N)良种繁育场进行。试验区地处黄土高原丘陵沟壑区,海拔 1 875 m,年平均气温 7℃,年日照时数 2 563 h,无霜期 146 d,年降雨量 382 mm,年蒸发量 1 341 mm。试验地为平地,前茬为小麦,常年精耕细作,土质较好,肥力中等。试验地土壤属沙壤土,胡麻播种前试验田 0~20 cm 土层土壤养分含量为:有机质 16.50 g · kg⁻¹,全氮 1.12 g · kg⁻¹,全磷 0.80 g · kg⁻¹,全钾 20.11 g · kg⁻¹,碱解氮 59.26 mg · kg⁻¹,速效磷 13.11 mg · kg⁻¹,速效钾 125.34 mg · kg⁻¹,pH 7.69。

1.2 试验设计

试验采用完全裂区设计,主区为灌溉量,设分茎期、现蕾期、开花期 3 个灌水时期,分茎期灌水 60 mm,现蕾期和开花期均灌水 40 mm,由此构成 3 个灌溉量水平:60 mm(W_1 ,分茎水)、100 mm(W_2 ,分茎水+开花水)和 140 mm(W_3 ,分茎水+现蕾水+开花水),用水表计算灌水量。副区为施氮量,设 4 个水平,纯氮施用量分别为:0(N_1)、75(N_2)、112.5

表 1 胡麻水氮互作试验方案
Table 1 Experimental design of water-nitrogen interaction of oil flax

处理 Treatment	灌水总量 Total irrigation amount/mm	灌水量 Irrigation amount/mm			施氮量 Nitrogen amount /(kg·hm ⁻²)
		分茎期 Stem stage	现蕾期 Squaring stage	开花期 Flowering stage	
W ₁ N ₁	60	60			0
W ₁ N ₂	60	60			75.0
W ₁ N ₃	60	60			112.5
W ₁ N ₄	60	60			150.0
W ₂ N ₁	100	60		40	0
W ₂ N ₂	100	60		40	75.0
W ₂ N ₃	100	60		40	112.5
W ₂ N ₄	100	60		40	150.0
W ₃ N ₁	140	60	40	40	0
W ₃ N ₂	140	60	40	40	75.0
W ₃ N ₃	140	60	40	40	112.5
W ₃ N ₄	140	60	40	40	150.0

(N₃)和 150(N₄) kg·hm⁻²。试验共组成 12 个水肥处理组合(表 1),每处理重复 3 次。小区面积 20 m²(4 m×5 m),播种密度为 750 万株·hm⁻²,人工条播,播深 3 cm,行距 20 cm。为消除小区间的水分和氮素移动,主区之间设 2 m 人行道,副区之间设 1 m 人行道。氮肥的 2/3 作为基施(播种前施用),1/3 于现蕾前追施;其他基肥用量为 P₂O₅ 75 kg·hm⁻²,K₂O 53 kg·hm⁻²。所施肥料为尿素(含 N 46.4%)、磷酸二铵(含 P₂O₅ 46%,N 18%)、硫酸钾(含 K₂O 52%)。供试胡麻品种为‘陇亚杂 1 号’,3 月 22 日播种,8 月 7 日收获。田间管理同当地大田生产。2014 年胡麻生育期间总降雨量为 274.6 mm。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 地上部干物质积累量 于胡麻幼苗期(4 月 19 日)、分茎期(5 月 13 日)、现蕾期(5 月 30 日)、开花期(6 月 15 日)和成熟期(8 月 7 日),分别在每个小区选取具有代表性且长势基本一致的植株 20 株(地上部)带回实验室。前 3 个生育时期留取整株样品,开花期和成熟期将植株分为籽粒、叶片、主茎+分枝+果壳 3 部分,于 105℃恒温箱中杀青 30 min,而后将温度降至 80℃烘干 6~8 h 至恒重,测定干物重(干物质积累量,D)^[18]。并依据如下公式计算相关指标:

各生育阶段干物质积累量=阶段末干物质积累量-阶段初干物质积累量^[19]

各器官的干物质分配比例(%)=各器官的干物质积累量/植株地上部干物质积累量×100^[20]

营养器官开花前贮藏同化物转运量=开花期干

重-成熟期干重^[21]

营养器官开花前贮藏同化物转运率(%)=(开花期干重-成熟期干重)/开花期干重×100^[21]

开花后同化物输入籽粒量=成熟期籽粒干重-营养器官花前贮藏物质转运量^[21]

开花前营养器官贮藏同化物转运量对籽粒产量的贡献率(%)=开花前营养器官贮藏物质转运量/成熟期籽粒干重×100^[21]

开花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率(%)=开花后同化物输入籽粒量/成熟期籽粒干重×100^[21]

1.3.2 籽粒产量及其构成因子测定 收获时在每个小区中随机取样 30 株,带回实验室进行考种。分别测定单株有效果数、果粒数、千粒重和单株产量。收获时按小区单打单收,晒干后称取胡麻籽粒重量,测得小区实际产量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 17.0 统计软件进行数据处理和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 水氮处理对胡麻各生育阶段干物质积累量的影响

胡麻地上部干物质总重随发育进程不断增加,且前期增长比较缓慢,现蕾期以后增加迅速,在成熟期达到最大值(表 2)。分茎期以前,胡麻干物质积累量受施氮水平的影响较大,随氮肥施用量的增加干物质积累量逐渐增加。分茎期至现蕾期,不同水分条件下,W₃处理的干物质积累量最大,比 W₁、

W₂ 处理分别显著增加 6.78%和 4.96%;从不同施氮水平来看,除 W₁ 处理外胡麻的干物质积累量表现为 N₄>N₃>N₂>N₁,但处理之间差异不显著。现蕾期以后,随着植株生长进程加快,干物质积累量迅速增大,且水分管理和氮肥运筹对干物质积累存在极显著的交互效应($P<0.01$)。就开花期至成熟期的干物质积累量而言,随施氮量增加而增大,至 N₃ 水平时达到最高,随之下降,N₃ 的干物质积累量分别比 N₁、N₂、N₄ 高出 27.32%、13.71%、9.03%;在相同氮肥水平下不同灌水处理间比较,W₂ 处理的干物质积累量最高,显著高于 W₁、W₃ 处理 15.61%、6.23%,这表明水氮能协同促进胡麻植株干物质的积累,且 W₂ 处理与 N₃ 氮肥运筹措施配合较好,明显提高了现蕾期后的胡麻植株的干物质积累量。

2.2 水氮处理对胡麻成熟期干物质在各器官中分配的影响

由表 3 可以看出,不同水氮处理下胡麻成熟期干物质在各器官中的分配量及比例均表现为:籽粒>主茎+分枝+果壳>叶片,这表明籽粒在干物质

的分配上占有绝对优势。各灌水处理间比较,成熟期的单株干重以 W₂ 处理最高,分别显著高于 W₁、W₃ 处理 9.10%和 2.16%。成熟期籽粒的干物质分配比例以 W₂ 处理最大,W₁ 处理次之,两者分别比 W₃ 处理显著增加了 9.71%和 5.62%;叶片的干物质分配比例随灌水量的增加而增大,而主茎+分枝+果壳的干物质分配比例则呈现相反的趋势(W₁>W₂>W₃),且差异显著,这表明 W₂ 处理降低了干物质在主茎+分枝+果壳的分配比例,从而增加了籽粒的干物质分配量和分配比例,有利于籽粒产量的提高。同一灌溉水平下不同施氮量处理间比较,成熟期单株干重表现为 N₃>N₄>N₂>N₁;籽粒和叶片的分配量和分配比例的变化趋势完全一致,均随施氮量增加而先增大后减小,并在 N₃ 水平时达到最大;而主茎+分枝+果壳的分配量则随氮肥施用量的增加而持续增大,说明 N₃ 水平施氮量对成熟期干物质在籽粒和叶片中的分配有明显的调控效应。方差分析表明,灌水处理和施氮水平对成熟期单株干重以及干物质在各器官中的分配均存在极显著的交互效应($P<0.01$)。可见,合理的水氮处理

表 2 不同水氮处理下胡麻不同生育阶段干物质积累量

Table 2 The dry matter accumulation at different phases of oil flax growth under different water and nitrogen conditions/(mg·plant⁻¹)

处理 Treatment	播种-幼苗期 Breeding to seedling	幼苗期-分茎期 Seedling to stemming	分茎期-现蕾期 Stemming to squaring	现蕾期-开花期 Squaring to flowering	开花期-成熟期 Flowering to ripping
W ₁ N ₁	159.16 bc	324.65 cd	816.24 e	1 332.12 g	2 028.00 i
W ₁ N ₂	160.50 abc	330.09 bcd	946.78 abc	1 380.23 ef	2 326.50 h
W ₁ N ₃	163.39 abc	345.71 a	935.89 c	1 426.56 c	2 804.90 bc
W ₁ N ₄	165.25 abc	330.64 bcd	904.94 d	1 410.21 cde	2 560.54 ef
W ₂ N ₁	158.13 c	316.32 d	940.62 bc	1 384.79 def	2 486.44 fg
W ₂ N ₂	161.34 abc	322.94 cd	943.06 bc	1 415.59 cd	2 749.31 cd
W ₂ N ₃	161.74 abc	337.06 abc	947.28 abc	1 578.87 a	3 136.02 a
W ₂ N ₄	165.66 ab	342.39 ab	951.50 abc	1 553.74 a	2 865.47 b
W ₃ N ₁	159.18 bc	323.83 cd	955.72 abc	1 361.77 fg	2 400.06 gh
W ₃ N ₂	163.61 abc	327.43 cd	959.94 ab	1 394.86 cde	2 666.87 de
W ₃ N ₃	165.03 abc	336.13 abc	964.17 ab	1 522.98 b	2 862.92 b
W ₃ N ₄	167.95 a	343.98 ab	968.39 a	1 521.37 b	2 648.62 de
W ₁	162.08a	332.77 a	900.96 c	1 387.28 c	2 429.98 c
W ₂	161.72 a	329.68 a	945.61 b	1 483.25 a	2 809.31 a
W ₃	163.94 a	332.84 a	962.06 a	1 450.24 b	2 644.62 b
N ₁	158.82 c	321.60 b	904.19 b	1 359.56 c	2 304.83 b
N ₂	161.82 b	326.82 b	949.93 a	1 396.89 bc	2 580.89 ab
N ₃	163.39 b	339.63 a	949.11 a	1 509.47 a	2 934.61 a
N ₄	166.29 a	339.00 a	941.61 a	1 495.11 ab	2 691.54 ab

注:WiNj 表示水氮处理组合,W₁~W₃ 和 N₁~N₄ 分别表示各水平水分处理和氮肥处理的平均值。同列数据后不同小写字母表示处理间有显著差异($P<0.05$)。下同。

Note:WiNj indicates the treatment combination of water and nitrogen,and introduction of treatments W₁ to W₃ and N₁ to N₄ are the average of different levels of water and nitrogen,respectively. Different letters within same column indicate significant difference among treatments($P<0.05$). The same as below.

表 3 不同水氮处理下胡麻成熟期干物质在不同器官中的分配
Table 3 The dry matter distribution in different organs of oil flax at maturity stage

处理 Treatment	单株干重 Total dry matter weight per plant/g	籽粒 Kernel		叶片 Leaf		主茎+分枝+果壳 Stem+spike axis+kernel husk	
		干重 Dry weight/g	比例 Ratio/%	干重 Dry weight/g	比例 Ratio/%	干重 Dry weight/g	比例 Ratio/%
W ₁ N ₁	2.97 f	1.40 e	47.05 bc	0.39 f	12.94 e	1.19 f	40.01 a
W ₁ N ₂	3.11 e	1.43 e	45.90 cd	0.45 e	14.47 d	1.23 e	39.63 a
W ₁ N ₃	3.57 c	1.68 bc	47.08 b	0.64 ab	17.91 a	1.25 de	35.00 f
W ₁ N ₄	3.42 d	1.61 c	47.11 b	0.53 cd	15.50 bcd	1.28 cd	37.39 cde
W ₂ N ₁	3.22 e	1.50 d	46.47 bc	0.48 de	15.00 d	1.24 de	38.53 b
W ₂ N ₂	3.49 cd	1.65 c	47.16 b	0.53 cd	15.14 cd	1.32 c	37.70 bcd
W ₂ N ₃	3.86 a	1.86 a	48.26 a	0.63 b	16.38 bc	1.37 b	35.36 f
W ₂ N ₄	3.70 b	1.71 b	46.24 bc	0.58 c	15.69 bcd	1.41 a	38.07 bcd
W ₃ N ₁	3.23 e	1.46 de	45.13 d	0.54 c	16.61 b	1.24 e	38.26 bc
W ₃ N ₂	3.49 cd	1.64 c	47.00 bc	0.57 c	16.34 bc	1.28 cd	36.66 e
W ₃ N ₃	3.70 b	1.72 b	46.38 bc	0.69 a	18.66 a	1.30 c	34.95 f
W ₃ N ₄	3.55 cd	1.65 c	46.54 bc	0.58 c	16.36 bc	1.32 c	37.09 de
W ₁	3.27 c	1.53 c	46.79 a	0.50 c	15.21 b	1.24 c	38.01 a
W ₂	3.57 a	1.68 a	47.03 a	0.56 b	15.55 b	1.33 a	37.42 b
W ₃	3.49 b	1.62 b	46.26 b	0.59 a	16.99 a	1.28 b	36.74 c
N ₁	3.14 c	1.45 c	46.21 a	0.47 b	14.85 b	1.22 b	38.93 a
N ₂	3.36 bc	1.57 bc	46.69 a	0.52 b	15.32 b	1.28 ab	38.00 a
N ₃	3.71 a	1.75 a	47.24 a	0.65 a	17.65 ab	1.30 ab	35.11 b
N ₄	3.56 b	1.66 ab	46.63 a	0.56 ab	15.85 a	1.34 a	37.52 b

可减少干物质在茎叶等器官中的滞留,促进干物质向籽粒中的分配。

2.3 水氮处理对胡麻开花后干物质积累和转运的影响

由表 4 可知,不同水氮处理下,W₂N₃ 处理开花后干物质积累量和同化物对籽粒的贡献率均达到最高。随着灌水量的增加,营养器官开花前贮藏同化物转运量逐渐减少,而营养器官开花前贮藏同化物转运率和开花前贮藏同化物对籽粒贡献率的变化趋势一致,呈现出先降后升的趋势,开花后干物质积累量和同化量对籽粒的贡献率均以 W₂ 处理的最高,分别比 W₁ 处理增加 22.76%、22.46%,比 W₃ 处理增加 5.98%、6.43%,且差异达到显著水平。同一灌溉水平下不同施氮量处理间比较,营养器官开花前贮藏同化物转运量和转运率随施氮量的增加呈先降后升的变化趋势;在 W₁ 处理下,开花前贮藏同化物对籽粒贡献率以 N₂ 处理的最高,而在 W₂、W₃ 处理下,N₁ 处理的显著高于其他施氮水平 17.61%~63.39%;开花后干物质积累量和同化量对籽粒的贡献率均以 N₃ 处理的最高,在 W₁、W₃ 处理下显著高于其他施氮水平 6.32%~47.83%和 8.39%~42.43%,在 W₂ 处理下,N₃ 的开花后干物质积累量

与 N₄ 处理之间无显著差异,但开花后干物质同化量对籽粒的贡献率较 N₄ 处理显著增加 7.90%。不同灌水处理和施氮水平对胡麻开花后营养器官干物质再分配量和开花后积累量影响的差异均达到极显著水平,且表现出极显著的交互效应($P<0.01$)。这说明 W₂N₃ 处理能显著提高胡麻开花后干物质的积累能力,促进花后同化物向籽粒的转运,为胡麻高产奠定基础。

2.4 水氮处理对胡麻籽粒产量及其构成因子的影响

不同水氮处理对胡麻籽粒产量构成因子有较大的影响,其中 W₂N₃ 处理的影响最为明显(表 5)。不同灌水处理间比较,胡麻的单株有效果数、果粒数和千粒重以及单株产量均表现为 W₂>W₃>W₁,且达到显著差异水平。同一灌溉水平下不同施氮量处理间比较,胡麻的单株有效果数和果粒数表现为 N₃>N₄>N₂>N₁;胡麻的千粒重在 W₁ 处理下随施氮量的增加而逐渐增加但处理间差异不显著,而在 W₂、W₃ 处理下以 N₃ 水平的最大,施用过多氮肥时会使千粒重不同程度的下降,降幅达 2.29%~11.83%,尤其是在 W₃ 处理下达到显著水平($P<0.05$);单株产量随氮肥施用量的增大而先增后降,并以 N₃ 水平的最大,且 N₄ 在 W₃ 处理下比 N₃ 显著降低 39.17%。

表 4 不同水氮处理下胡麻开花后营养器官干物质再分配量和开花后积累量

Table 4 The dry matter accumulation amount after anthesis and dry matter translocation amount from vegetative organ to grain under different water and nitrogen conditions

处理 Treatment	DMTAA/(mg·plant ⁻¹)	DMTRA/%	CDMTAATG/%	DMAAA/(mg·plant ⁻¹)	CDMAAATG/%
W ₁ N ₁	68.28 a	33.06 a	50.62 ab	117.45 e	58.29 g
W ₁ N ₂	66.87 b	30.77 ab	54.36 a	96.58 f	54.83 g
W ₁ N ₃	64.66 de	27.34 bc	43.76 cd	142.78 b	68.70 de
W ₁ N ₄	66.05 bc	23.68 cd	47.84 bc	133.96 c	63.38 f
W ₂ N ₁	65.30 cd	25.71 c	46.65 bc	138.15 bc	66.37 ef
W ₂ N ₂	61.88 gh	20.53 def	39.67 de	144.89 b	75.15 bc
W ₂ N ₃	57.97 i	15.82 g	30.02 f	162.62 a	82.39 a
W ₂ N ₄	61.71 h	16.57 fg	35.55 ef	156.81 a	76.36 bc
W ₃ N ₁	63.39 ef	25.90 c	52.15 ab	125.61 d	55.79 g
W ₃ N ₂	66.38 bc	20.92 de	42.48 cd	140.50 bc	74.37 c
W ₃ N ₃	58.47 i	17.64 efg	31.92 f	155.82 a	79.46 ab
W ₃ N ₄	63.08 fg	25.47 c	42.61 cd	146.56 b	72.49 cd
W ₁	66.46 a	28.71 a	49.14 a	122.69 c	61.30 c
W ₂	61.72 b	19.66 c	37.97 c	150.62 a	75.07 a
W ₃	62.83 c	22.48 b	42.29 b	142.12 b	70.53 b
N ₁	492.44 a	28.22 a	49.81 a	127.07 b	60.15 b
N ₂	487.84 a	24.07 b	45.50 ab	127.32 b	68.12 ab
N ₃	452.76 b	20.26 bc	35.23 b	153.74 a	76.85 a
N ₄	477.12 a	21.90 c	42.00 ab	145.77 a	70.74 ab

注:DMTAA. 营养器官开花前贮藏同化物转运量;DMTRA. 营养器官开花前贮藏同化物转运率;CDMTAATG. 开花前贮藏同化物对籽粒贡献率;DMAAA. 开花后干物质积累量;CDMAAATG. 开花后干物质同化量对籽粒的贡献率。

Note:DMTAA. Dry matter translocation amount after anthesis;DMTRA. Dry matter translocation ratio after anthesis;CDMTAATG. Contribution of dry matter translocation amount to grains after anthesis;DMAAA. Dry matter accumulation amount after anthesis;CDMAAATG. Contribution of dry matter assimilation amount to grains after anthesis.

表 5 不同水氮处理下胡麻籽粒产量构成因子

Table 5 The yield components of oil flax under different water and nitrogen conditions

处理 Treatment	单株有效果数 Pod number per plant	果粒数 Seed number per pod	千粒重 1 000-grain weight/g	单株产量 Output per plant/g	籽粒产量 Grain yield/(kg·hm ⁻²)
W ₁ N ₁	8.04 e	6.66 e	9.27 f	0.53 g	1 565.27 g
W ₁ N ₂	8.74 de	6.86 de	9.46 ef	0.60 fg	1 812.47 f
W ₁ N ₃	10.42 c	7.40 b	9.56 def	0.75 d	2 232.85 d
W ₁ N ₄	9.39 cd	6.87 de	9.59 def	0.70 de	2 280.79 d
W ₂ N ₁	9.76 cd	7.09 d	9.76 de	0.78 cd	2 091.22 e
W ₂ N ₂	11.61 b	7.36 bc	10.12 c	0.84 bc	2 480.82 c
W ₂ N ₃	13.80 a	8.07 a	10.47 b	0.96 a	2 869.89 a
W ₂ N ₄	11.84 b	7.84 a	10.23 bc	0.89 ab	2 658.33 b
W ₃ N ₁	8.96 de	6.90 de	9.36 f	0.66 ef	1 992.87 ef
W ₃ N ₂	10.38 c	7.42 b	9.78 d	0.84 bc	2 330.65 d
W ₃ N ₃	12.56 b	7.44 b	10.92 a	0.90 ab	2 518.67 c
W ₃ N ₄	9.82 cd	7.12 cd	9.76 de	0.65 ef	2 297.73 d
W ₁	9.15 c	6.95 c	9.47 c	0.64 c	1 972.85 c
W ₂	11.75 a	7.59 a	10.14 a	0.87 a	2 525.07 a
W ₃	10.43 b	7.22 b	9.95 b	0.76 b	2 284.98 b
N ₁	9.15 b	6.88 b	9.46 b	0.66 b	1 883.12 c
N ₂	10.01 ab	7.21 ab	9.78 ab	0.76 ab	2 207.98 b
N ₃	12.26 a	7.63 a	10.31 a	0.87 a	2 540.47 a
N ₄	10.35 ab	7.28 ab	9.86 ab	0.75 ab	2 412.28 ab

另外,胡麻籽粒产量以 W_2N_3 处理最高,为最佳的水氮耦合方式,显著促进高产形成。各灌水处理的籽粒产量以 W_2 最高,分别显著高于 W_1 、 W_3 处理 27.99%、10.51%。同一灌溉水平下不同施氮量处理间而言,籽粒产量在 W_1 处理下表现为 $N_4 > N_3 > N_2 > N_1$,但 N_3 与 N_4 处理间差异不显著;在 W_2 、 W_3 处理下,籽粒产量随氮肥施用量的增大而呈先升后降的变化趋势,并在 N_3 水平达到最高, N_4 水平比 N_3 水平显著降低 7.96%~9.62%。方差分析表明,胡麻的籽粒产量及其构成因子的水氮互作效应均达到极显著水平,即水氮的协同配合与胡麻籽粒产量的增加有着紧密的联系。

3 讨 论

农作物干物质的积累、分配、运转对产量形成的影响已受到人们广泛重视^[22-23]。干物质和养分积累是作物器官分化、产量形成的前提,养分吸收是干物质形成和累积的基础,干物质积累越多,籽粒产量也就越高^[24]。因此,提高干物质的生产能力是增加胡麻籽粒产量的根本途径。本试验结果表明,不同施氮水平对胡麻生育前期干物质积累的影响较小,这可能由于不灌水使胡麻生育前期受水分胁迫的影响限制了氮肥效应的发挥,而在分茎后,随着植株生长进程加快,增加灌水对各施氮处理胡麻干物质积累有明显的促进作用,且水分管理和氮肥运筹对干物质积累存在极显著的交互效应,这表明水肥结合能满足胡麻生长发育需求,从而提高了胡麻植株的干物质积累量,这与谢志良等^[25]在棉花上的研究结果一致。张均华等^[26]研究认为,作物开花前合成的同化物约 3%~30%转运到籽粒,但不同作物类型、不同生长环境条件下同化物转运量有很大差异。何军等^[27]指出,节灌模式下施肥量的增加可以起到以肥补水的作用,促进了水稻根、茎部分干物质向籽粒的分配。本研究中,在相同施氮水平下, W_2 处理较大地提高了胡麻成熟期籽粒干物质的分配量和分配比例以及花后干物质同化量对籽粒的贡献率;同一灌溉水平下不同施氮量处理间比较,籽粒干物质的分配量和分配比例均随施氮量增加而增大,至 N_3 水平时达到最大,随后下降,而开花后干物质同化量对籽粒的贡献率以 N_3 水平的最高,显著高于其他施氮水平 7.90%~42.43%。可见,合理的水氮处理可减少干物质在茎叶等器官中的滞留,促进花后同

化物向籽粒的转运,为胡麻高产奠定基础。

有研究报道,水氮互作在对农作物籽粒产量的调控中存在互补效应,增加施氮量可补偿因灌水不足导致的籽粒产量降低^[28-29]。但 Shaaban^[30]指出,水分效应在灌水与氮肥对籽粒的影响中起主导作用,而氮肥对灌水的补偿效应甚微。本研究结果表明不同灌水模式下施氮量对胡麻籽粒产量的影响比较明显,施氮量和灌水量对胡麻籽粒产量产生调控与互补效应,且水分效应大于氮肥效应,施氮量对灌溉量有补偿效应。在 W_1 处理下,施氮量的增加可极显著提高胡麻籽粒产量,但施氮量过高时增产效果不明显;在 W_2 、 W_3 处理下,施氮水平为 N_3 时胡麻籽粒产量达到最大,继续增加施氮量,籽粒产量却不升反降,降幅达 7.96%~9.62%。随着施氮水平的提高,灌溉量引起的胡麻籽粒产量差异并不一致,以 W_2 处理的最高,显著高于其他处理 10.51%~27.99%。本试验条件下水氮配比为 W_2N_3 的处理籽粒产量最高,较其他处理显著增产 7.96%~83.35%。可见,在胡麻生产管理中,盲目增加灌水量或者增施氮肥,并不能得到理想的籽粒产量,而合理的水氮搭配促进了胡麻植株对土壤水氮的有效利用,不仅能保证胡麻籽粒产量增加,还可减少资源浪费。

综上所述,灌溉量和施氮量对胡麻主要生育期的干物质积累与分配及籽粒产量有显著影响,胡麻籽粒产量的水氮互作效应达到极显著水平,其中水分效应大于氮肥效应。在相同施氮水平下,适宜灌水处理(W_2)明显提高了胡麻成熟期籽粒干物质的分配量和分配比例以及花后干物质同化量对籽粒的贡献率,且籽粒产量显著高于其他处理 10.51%~27.99%。同一灌溉水平下不同施氮量处理间比较,开花后干物质同化量对籽粒的贡献率以 N_3 水平的最高,显著高于其他施氮水平 7.90%~42.43%,在灌水量较适宜和较高条件下(W_2 、 W_3),施氮水平为 N_3 时胡麻籽粒产量达到最高,继续增加施氮量,籽粒产量反而显著下降,降幅达 7.96%~9.62%。水氮协调在胡麻干物质积累和分配中起着关键的作物,而干物质的积累和分配又与籽粒产量及其构成因子密切相关。从产量效应、资源利用和环境等综合效应方面考虑,在当地地域气候条件下,施氮量为 $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、全生育期在分茎期和开花期灌两次水为胡麻节水减氮较为适宜的水氮组合。

参考文献:

- [1] 吴 兵,高玉红,赵 利,等.旧膜再利用方式对旱地胡麻干物质生产及水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(11):1 457-1 463.
WU B,GAO Y H,ZHAO L,*et al.* Effects of used plastic film disposal patterns on dry matter production and water use efficiency of oil flax in arid areas[J].*Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2012,20(11):1 457-1 463.
- [2] 罗世武,王 勇,岳国强,等.不同施肥水平与方法对胡麻的增产效应[J].现代农业科技,2009,15:10-12.
LUO S W,WANG Y,YUE G Q,*et al.* Effects of different fertilization level and methods on yield increase of oil flax[J].*Modern Agricultural Science and Technology*,2009,15:10-12.
- [3] 张 雷,李小燕,牛芬菊,等.旱地微垄地膜覆盖沟播栽培对土壤水分和胡麻产量的影响[J].作物杂志,2011,(4):95-97.
ZHANG L,LI X Y,NIU F J,*et al.* Effects of upland micro-ridges half covering planting on soil moisture and flax yield[J].*Crops*,2011,4:95-97.
- [4] 王改玲,李立科,郝明德,等.长期施肥及不同施肥条件下秸秆覆盖、灌水对土壤酶和养分的影响[J].核农学报,2012,26(1):129-134.
WANG G L,LI L K,HAO M D,*et al.* Effect of long-term fertilization, stubble mulch and irrigation under different fertilization on soil enzyme and soil nutrients[J].*Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2012,26(1):129-134.
- [5] 索全义,郝虎林,索风兰,等.磷钾化肥对胡麻产量形成的影响[J].内蒙古农业科技(土肥专辑),2002:18-19.
SUO Q Y,HAO H L,SUO F L,*et al.* The effect of nitrogen and phosphorus fertilizers on yield formation of oil flax[J].*Inner Mongolia Agricultural Science and Technology* (Soil and Fertilizer Album),2002:18-19.
- [6] 崔红艳,方子森,牛俊义.胡麻栽培技术的研究进展[J].中国农学通报,2014,30(18):8-13.
CUI H Y,FANG Z S,NIU J Y. Advances in the research of oil flax[J].*Chinese Agricultural Science Bulletin*,2014,30(18):8-13.
- [7] 孔丽红,赵玉路,周福平.简述小麦干物质积累运转与高产的关系[J].山西农业科学,2007,35(8):6-8.
KONG L H,ZHAO Y L,ZHOU F P. The relations of the high production and the wheat dry matter accumulation and the revolution[J].*Journal of Shanxi Agricultural Sciences*,2007,35(8):6-8.
- [8] 刘世全,曹红霞,杨 慧,等.水氮供应与番茄产量和生长特性的关联性分析[J].中国农业科学,2014,47(22):4 445-4 452.
LIU S Q,CAO H X,YANG H,*et al.* The correlation analysis between tomato yield,growth characters and water and nitrogen supply[J].*Scientia Agricultura Sinica*,2014,47(22):4 445-4 452.
- [9] 王绍华,曹卫星,丁艳峰,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.
WANG S H,CAO W X,DING Y F,*et al.* Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice[J].*Scientia Agricultura Sinica*,2004,37(4):497-501.
- [10] 谢英荷,栗 丽,洪坚平,等.施氮与灌水对夏玉米产量和水氮利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1 354-1 361.
XIE Y H,SU L,HONG J P,*et al.* Effects of nitrogen application and irrigation on grain yield,water and nitrogen utilizations of summer maize[J].*Plant Nutrition and Fertilizer Science*,2012,18(6):1 354-1 361.
- [11] 郑 睿,康绍忠,胡涛涛,等.水氮处理对荒漠绿洲区酿酒葡萄光合特性与产量的影响[J].农业工程学报,2013,29(4):133-141.
ZHENG R,KANG S Z,HU X T,*et al.* Effects of water and nitrogen conditions on the diurnal variation of photosynthesis characteristic and yield of grapevine in arid oasis region[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2013,29(4):133-141.
- [12] 王李芳,刘国顺,张永辉,等.水氮耦合对烤烟干物质积累及产质量的影响[J].作物研究,2011,25(1):51-55.
WANG L F,LIU G S,ZHANG Y H,*et al.* Effects of water and nitrogen coupling on dry matter accumulation and yield and quality of flue-cured tobacco[J].*Crop Research*,2011,25(1):51-55.
- [13] MOHAMMAD M J,ZUAQI S. Enhancement of yield and nitrogen and water use efficiencies by nitrogen drip-fertigation of garlic[J].*Journal of Plant Nutrition*,2003,26(9):1 749-1 766.
- [14] 付雪丽,王晨阳,郭天财,等.水氮互作对小麦籽粒蛋白质、淀粉含量及其组分的影响[J].应用生态学报,2008,19(2):317-322.
FU X L,WANG C Y,GUO T C,*et al.* Effects of water-nitrogen interaction on the contents and components of protein and starch in wheat grains[J].*Chinese Journal of Applied Ecology*,2008,19(2):317-322.
- [15] 董 剑,赵万春,高 翔,等.水氮调控对小麦植株干物质积累、分配与转运的影响[J].华北农学报,2012,27(3):196-202.
DONG J,ZHAO W C,GAO X,*et al.* Effects of irrigation and nitrogen control on accumulation,distribution and transport of dry matter of wheat plant[J].*Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2012,27(3):196-202.
- [16] 孔 东,晏 云,段 艳,等.不同水氮处理对冬小麦生长及产量影响的田间试验[J].农业工程学报,2008,24(12):36-40.

- KONG D, YAN Y, DUAN Y, *et al.* Field experiment study on growth and yields of winter under different water and nitrogen treatments[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, **24**(12):36-40.
- [17] CABANGON R J, TUONG T P, CASTILLO E G, *et al.* Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical low land rice conditions in China[J]. *Paddy Water Environment*, 2004, **2**:195-206.
- [18] XU Z Z, YU Z W, W D, *et al.* Nitrogen accumulation and translocation for winter wheat under different irrigation regimes[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2005, **191**:439-449.
- [19] 王桂良, 叶优良, 李欢欢, 等. 施氮量对不同基因型小麦产量和干物质累积的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, **30**(1):116-122.
- WANG G L, YE Y L, LI H H, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on grain yield and dry matter accumulation for different genotypes of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, **30**(1):116-122.
- [20] 郑成岩, 于振文, 马兴华, 等. 高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J]. 作物学报, 2008, **34**(8):1 450-1 458.
- ZHENG C Y, YU Z W, MA X H, *et al.* Water consumption characteristic and dry matter accumulation and distribution in high-yielding wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, **34**(8):1 450-1 458.
- [21] 屈会娟, 李金才, 沈学善, 等. 种植密度和播期对冬小麦品种兰考矮早八干物质和氮素积累与转运的影响[J]. 作物学报, 2009, **35**(1):124-131.
- QU H J, LI J C, SHEN X S, *et al.* Effects of plant density and seeding date on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in winter wheat cultivar Lankao Ai-zao 8[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, **35**(1):124-131.
- [22] LAURA ERCOLI, LEONARD LULLI, MARCO MARIOT-TI, *et al.* Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, **28**:138-147.
- [23] SAN-OH Y, MANO Y, OOKAWA T, *et al.* Comparison of dry matter production and associated characteristic between direct-sown and transplanted rice plants in a submerged paddy field and relationship to planting patterns[J]. *Field Crops Research*, 2004, **87**:43-58.
- [24] 王丽梅, 李世清, 邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. 中国农业科学, 2010, **43**(13):2 697-2 705.
- WANG L M, LI S Q, SHAO M A. Effects of N and water supply on dry matter and N accumulation and distribution in maize (*Zea mays* L.) leaf and straw-sheath[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, **43**(13):2 697-2 705.
- [25] 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, **17**(1):160-165.
- XIE Z L, TIAN C Y. Coupling effects of water and nitrogen on dry matter accumulation, nitrogen uptake and water-nitrogen use efficiency of cotton under mulched drip irrigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, **17**(1):160-165.
- [26] 张均华, 刘建立, 张佳宝. 施氮量对稻麦干物质转运与氮肥利用的影响[J]. 作物学报, 2010, **36**(10):1 736-1 742.
- ZHANG J H, LIU J L, ZHANG J B, *et al.* Effects of nitrogen application rates on translocation of dry matter and utilization of nitrogen in rice and wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, **36**(10):1 736-1 742.
- [27] 何 军, 崔远来, 张大鹏, 等. 不同水肥耦合条件下水稻干物质积累与分配特征[J]. 灌溉排水学报, 2010, **29**(5):1-5.
- HE J, CUI Y L, ZHANG D P, *et al.* Characteristics of rice dry matter accumulation and distribution under different water and fertilizer treatment[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, **29**(5):1-5.
- [28] 郭天财, 姚站军, 王晨阳, 等. 水肥运筹对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 西北植物学报, 2004, **24**(10):1 786-1 791.
- GUO T C, YAO Z J, WANG C Y, *et al.* Effects of irrigation and fertilizer application regimes on photosynthetic characteristics of flag leaves and yield traits of wheat[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.*, 2004, **24**(10):1 786-1 791.
- [29] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(6):1 188-1 195.
- ZHAI B N, LI S X. Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38**(6):1 188-1 195.
- [30] SHAABAN S M. Effect of organic and inorganic nitrogen fertilizer on wheat plant under water regime[J]. *Journal of Applied Science Research*, 2006, **2**(10):650-656.

(编辑:裴阿卫)