

水氮耦合对旱地胡麻产量形成与花后氮素积累转运的影响

崔政军¹ 刘 栋¹ 吴 兵^{1,2} 刘 斌¹ 马 俊¹ 赵邦庆¹ 高玉红^{1*} 牛俊义¹

(¹甘肃农业大学农学院/甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070; ²甘肃农业大学生命科学技术学院, 兰州 730070)

摘 要 为明确旱地胡麻在有限灌水条件下的最佳水氮耦合管理模式, 采用完全随机裂区试验设计, 以灌水(I_0 : $0 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; I_{1200} : $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; I_{1800} : $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)为主区, 施氮量(N_0 : $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_{60} : $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_{120} : $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)为副区, 测定胡麻不同生育阶段氮素积累量、花后氮素转运特征、产量和氮肥利用率。结果表明: 不同水氮处理对旱地胡麻不同生育时期各器官氮素吸收、积累及产量的耦合效应不同。不灌水条件下, 施氮有利于胡麻花期和成熟期茎秆对氮素的吸收, 不同灌水水平下 N_{120} 均抑制了茎秆对氮的吸收; I_{1200} 水平下, 花期叶片氮含量随施氮量的增加先升高后下降, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 11.0% 和 28.9%; I_{1800} 水平下, 施氮提高了成熟期胡麻叶片中氮含量, N_{60} 和 N_{120} 较 N_0 高 39.7% 和 26.9%。水氮对胡麻阶段氮素积累量影响的耦合效应主要表现在现蕾期以后, 同一灌水水平下, N_{60} 促进了胡麻现蕾期以后各阶段氮素积累量, 而 N_{120} 具有抑制作用。施氮分别提高了 I_{1200} 和 I_{1800} 水平下叶片和茎秆氮素转运率和贡献率。灌水 $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 显著增加了胡麻单株有效蒴果数和籽粒产量 (6.6%~22.8%), 是试验区比较适宜的水氮耦合管理模式。

关键词 水氮耦合; 胡麻; 产量; 氮素积累; 氮素转运; 氮肥利用率

Effects of water and nitrogen coupling on grain yield formation and nitrogen accumulation, transportation of oil flax in dryland. CUI Zheng-jun¹, LIU Dong¹, WU Bing^{1,2}, YAN Bin¹, MA Jun¹, ZHAO Bang-qing¹, GAO Yu-hong^{1*}, NIU Jun-yi¹ (¹College of Agronomy, Gansu Agricultural University/Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070, China; ²College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China).

Abstract: A completely random split zone experiment with irrigation as main plots and nitrogen application rate as sub-plots was carried out to examine the optimal water-nitrogen coupling mode for oil flax planting in dryland. There were three irrigation levels, no irrigation ($0 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, I_0), irrigation at $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (I_{1200}) and at $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (I_{1800}); and three nitrogen application rates, no nitrogen ($0 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, N_0), $60 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_{60}) and $120 \text{ kg} \cdot \text{N} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N_{120}). We investigated nitrogen accumulation content at different growth stages, nitrogen transport characteristics after anthesis, grain yield and nitrogen utilization efficiency of oil flax. Results showed that the coupling effects of water and nitrogen application on nitrogen uptake in different organs, nitrogen accumulation during different growth stages and grain yield of dry land oil flax varied greatly. Under no irrigation, nitrogen application was beneficial to stem nitrogen absorption at anthesis and maturity stages, but $120 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ inhibited it at different irrigation levels. At the $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (I_{1200}) irrigation level, foliar nitrogen content at anthesis stage increased first and then decreased with increasing nitrogen rates, and N_{60} increased foliar nitrogen content by 11.0% and 28.9% respectively compared with N_0 and N_{120} . At the $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (I_{1800}) irrigation level, nitrogen application

本文由国家特色油料作物产业技术体系建设专项资金 (CARS-14-1-16)、国家自然科学基金项目 (31660368, 31760363) 和甘肃农业大学伏羲杰出人才项目 (Gaufx-02J05) 资助 This work was supported by the China Agriculture Research System of Construct Special Fund (CARS-14-1-16), National Natural Science Foundation of China (31660368, 31760363) and Fuxi Outstanding Talent Cultivation Plan of Gansu Agricultural University (Gaufx-02J05).

2019-05-22 Received, 2020-01-04 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoyh@gsau.edu.cn

increased foliar nitrogen content at maturity stage, with that in N_{60} and N_{120} treatments being 39.7% and 26.9% higher than N_0 , respectively. The effects of water-nitrogen coupling on nitrogen accumulation in different growth stages of oil flax was mainly shown after budding stage. Under the same irrigation level, N_{60} promoted and N_{120} inhibited nitrogen accumulation in each stage after budding. Nitrogen application increased nitrogen transport rate and contribution rate of leaves and stems under I_{1200} and I_{1800} . The coupling of I_{1800} and N_{60} significantly increased the number of effective capsules per plant and grain yield of oil flax (6.6%–22.8%), which was a suitable water-nitrogen coupling management mode in this area.

Key words: water and nitrogen coupling; oil flax; grain yield; N accumulation; N translocation; N utilization efficiency.

水是作物产量的主要限制因素,特别是在占全球耕地 40% 的干旱或半干旱气候区,灌溉是维持粮食稳定生产的有效途径^[1]。氮作为植物生长的必需营养元素之一,参与植株新陈代谢的每一环节,通过影响光合作用来影响作物生长和产量形成^[2-3]。研究表明,在一定范围内,作物产量随施氮量的增加而增加,但超过某一界限时产量将不再增加,甚至会出现下降^[4]。有研究认为,氮肥肥效的发挥与土壤水分有显著的相关性,水分不足降低了氮肥利用率;而一定阶段内水分过量则易引起肥料淋溶,不仅造成资源浪费,而且污染生态环境,不利于农业的可持续发展^[5]。诸多学者在玉米 (*Zea mays*)^[6]、小麦 (*Triticum aestivum*)^[7]、水稻 (*Oryza sativa*)^[8] 等作物上的研究表明,水肥之间存在耦合效应,而且正效应居多。实践证明,水氮耦合效应在促进作物高产、资源高效利用等方面具有重要作用^[9]。

胡麻 (*Linum usitatissimum*) 是我国北方干旱半干旱地区重要的油料作物^[10],因其具备耐旱、耐寒、耐瘠薄、生育期短、适应性广等特点,在陇东黄土高原丘陵沟壑区农业生产中占有重要地位,是该区主要经济作物之一^[11]。由于该区地处干旱和半干旱区,年际和年内降雨量变化很大,降雨与作物对水分的需求极不协调,致使胡麻在生产过程中产量较低,且极不稳定^[12-13]。姚玉璧等^[14]研究认为,合理有效的水肥管理是提高胡麻单产的重要措施,灌水 1800 和 1200 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 较不灌水增产 40.4% 和 27.4%^[15],适量增施氮肥可以促进花后干物质累积及营养器官贮存干物质向籽粒的转运,从而提高籽粒产量^[16]。杨萍等^[17]研究发现,胡麻氮肥过量影响光合产物的合成,不利于胡麻产量形成。而高珍妮等^[18]研究表明,高水肥条件下,胡麻营养生长旺盛,株高较高,在成熟前极易发生倒伏,严重影响产量,且降低籽粒品质。高玉红等^[12]研究发现,水、氮单因素及水氮互作对胡麻根、茎、叶片、籽粒中氮素

的耦合效应表现为:水氮互作>氮>水,且水氮互作条件下胡麻根、茎、果皮含氮量与籽粒产量呈极显著正相关关系。谢亚萍等^[19]研究发现,花期到青果期是胡麻植株生物产量和籽粒“库”形成的关键时期,叶和茎是籽粒充实的主要源器官,对籽粒产量的贡献最大。近年来对胡麻氮素积累转运作了大量研究,尤其是在不同施氮水平^[19-20]、氮磷配施^[21]和种植模式^[12,17]等方面取得了一定进展,但对胡麻花后氮素积累转运情况还缺乏系统研究。探讨水氮耦合对胡麻关键生育时期氮素积累转运的调控机理,对增加胡麻产量、提高氮素利用效率和改善胡麻品质等具有重要意义。因此,本试验基于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区气候生态条件,以胡麻品种‘定亚 22’为材料,研究不同水氮耦合模式对旱地胡麻产量形成与花后氮素积累转运的影响,以期为该区节水节肥增效和提高胡麻产量提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2018 年 4—8 月在甘肃省定西市农业科学院西寨油料试验站 (34°26' N, 103°52' E) 进行。试验地属中温带偏旱区,平均海拔 2050 m,年均太阳辐射 592.9 $kJ \cdot cm^{-2}$,日照时数 2161 h,年平均气温 8.78 °C,无霜期 213 d。试验地农田土壤为黄绵土,土质绵软,土层深厚,质地均匀。试验地 0~30 cm 土层土壤基本理化性状为:全氮 0.81 $g \cdot kg^{-1}$,全磷 0.69 $g \cdot kg^{-1}$,碱解氮 49.37 $mg \cdot kg^{-1}$,速效磷 27.24 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾 108.42 $mg \cdot kg^{-1}$,有机质 10.12 $g \cdot kg^{-1}$,pH 值 8.14,胡麻生育期降水量和平均气温如图 1 所示。

1.2 试验设计

试验以胡麻品种‘定亚 22’为材料,采用裂区试验设计,以灌水水平为主区,施氮水平为裂区。设置不灌水 0 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (I_0)、灌水 1200 $m^3 \cdot hm^{-2}$ (花期

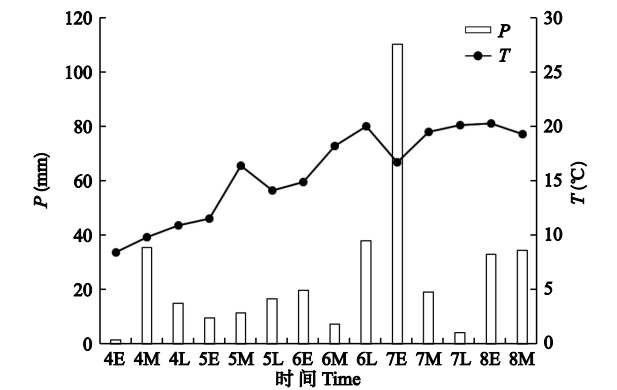


图 1 胡麻生育期平均气温(T)和降雨量(P)
Fig.1 Average air temperature (T) and precipitation (P) during oil flax growing period.
E: 上旬 Early ten days of month; M: 中旬 Middle ten days of month; L: 下旬 Last ten days of month.

600 m³ · hm⁻² + 青果期 600 m³ · hm⁻², I₁₂₀₀)、灌水 1800 m³ · hm⁻² (花期 900 m³ · hm⁻² + 青果期 900 m³ · hm⁻², I₁₈₀₀) 3 个灌水水平,灌溉水通过管道引入各小区内,管道上安装水表,用水表进行计量;设置不施氮 0 kg · hm⁻² (N₀)、施氮 60 kg · hm⁻² (N₆₀)、施氮 120 kg · hm⁻² (N₁₂₀) 3 个施氮水平,氮肥品种为尿素(含 N 46%),2/3 作基肥,1/3 于现蕾期追施,施磷(P₂O₅)90 kg · hm⁻²,磷肥品种为过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)。种植密度 7.5 × 10⁶ 株 · hm⁻²,播深 3 cm,行距 20 cm。9 个处理,3 次重复,共 27 个小区。试验主区面积为 34 m²(长 6.8 m、宽 5.0 m),副区面积为 10 m²(长 5.0 m、宽 2.0 m)。各小区间隔 40 cm,各重复间隔 50 cm,四周设保护行,其他管理措施同大田生产。

1.3 测定项目与方法

按胡麻生育时期(苗期、现蕾期、盛花期、青果期和成熟期),以 5 点采样法在每个小区选取具有代表性且长势基本一致的植株 30 株,将植株按茎、叶、非籽粒(包括花、花蕾和蒴果皮)、籽粒等器官分开,于 105 ℃ 恒温箱中杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒重,测定其干物质质量^[16],之后粉碎混匀过 0.5 mm 筛,用于氮素测定。采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,半微量凯氏定氮法测定植株各器官氮含量。各指标计算公式如下^[19]:

各器官氮素积累量 = 各器官干物质质量 × 各器官含氮率/100

各器官氮素转运量 = 各器官初花期氮素积累量 - 各器官成熟期氮素积累量

各器官氮素转运率 = 各器官氮素转运量/各器

官初花期氮素积累量 × 100%

各器官转运氮素对籽粒的贡献率 = 各器官氮素转运量/成熟期籽粒氮素积累量 × 100%

氮肥利用效率(NUE) = 籽粒产量/氮吸收量

氮素收获指数(NHI) = 籽粒含氮量/氮吸收量

氮肥农学利用率(AUE) = (施氮区产量 - 未施氮区产量)/施氮量

氮肥偏生产力(PFP) = 籽粒产量/施氮量

成熟期选取代表性植株 30 株进行考种,考察有效蒴果数、果粒数和千粒重等,并实收计产。收获时按小区单打单收,晒干后称取胡麻籽粒重,测得小区实际产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 24.0 软件对数据进行统计分析。采用一般线性模型单变量法进行方差分析和多重比较(α = 0.05)。利用 Excel 2016 软件作图。图表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同水氮耦合方式对胡麻产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,灌水量和施氮量对胡麻产量、单株有效蒴果数影响显著,灌水和施氮耦合显著影响产量、单株有效蒴果数和果粒数。在相同灌水水平下,N₆₀和 N₁₂₀胡麻籽粒产量无显著差异。I₀水平下,胡麻籽粒产量随施氮量的增加而增加,N₆₀和 N₁₂₀较 N₀

表 1 水氮耦合对胡麻籽粒产量及其构成因子的影响
Table 1 Effects of water-nitrogen coupling on yield and its components of oil flax

处理 Treatment		单株 有效果数 Pod number per plant	果粒数 Seed number per pod	千粒重 1000-seed weight (g)	籽粒产量 Grain yield (kg · hm ⁻²)
I ₀	N ₀	9.1 ± 1.2d	7.1 ± 1.0b	7.9 ± 0.2a	1044 ± 33d
	N ₆₀	12.3 ± 2.0b	7.1 ± 0.5b	7.5 ± 0.6a	1070 ± 70c
	N ₁₂₀	12.2 ± 3.8b	7.3 ± 0.4ab	8.0 ± 0.3a	1097 ± 46c
I ₁₂₀₀	N ₀	10.1 ± 0.6c	6.5 ± 0.4c	8.0 ± 0.2a	1088 ± 97c
	N ₆₀	13.4 ± 2.7ab	7.1 ± 0.8b	7.5 ± 0.3a	1166 ± 20b
	N ₁₂₀	11.6 ± 3.6bc	7.5 ± 1.2a	7.4 ± 0.5a	1153 ± 98bc
I ₁₈₀₀	N ₀	11.9 ± 1.7bc	7.4 ± 0.6ab	7.8 ± 0.1a	1152 ± 51bc
	N ₆₀	13.8 ± 1.2a	7.1 ± 1.2b	7.8 ± 0.1a	1282 ± 88a
	N ₁₂₀	10.4 ± 2.7c	6.7 ± 0.5c	7.9 ± 0.1a	1203 ± 113ab
方差分析 Variance analysis	I	4.8 *	0.6 ns	1.4 ns	37.9 * * *
	N	4.4 *	1.0 ns	3.6 ns	12.1 * *
	I × N	32.3 * * *	4.5 * *	3.9 ns	2.3 *

I: 灌水量 Irrigation amount; N: 施氮量 N application rate. 同列不同字母表示差异显著(P < 0.05) Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level. ns: P > 0.05; * P < 0.05; * * P < 0.01; * * * P < 0.001. 下同 The same below.

分别增产 2.2%~5.1%; I_{1200} 和 I_{1800} 水平下,胡麻籽粒产量随施氮量的增加先增加后下降, I_{1200} 水平下, N_{60} 和 N_{120} 较 N_0 分别增产 7.2%~6.0%, I_{1800} 水平下, N_0 较 N_{60} 和 N_{120} 分别低 10.1%和 4.2%。在相同施氮水平下,胡麻产量随灌水量的增加而增加。 N_0 水平下, I_{1200} 和 I_{1800} 较 I_0 增加 4.2%和 10.3%; N_{60} 水平下, I_0 较 I_{1200} 和 I_{1800} 低 8.2%和 16.5%; N_{120} 水平下, I_{1200} 和 I_{1800} 较 I_0 增加 5.1%和 9.7%。在相同灌水水平下,胡麻单株有效蒴果数随施氮量的增加先增加后下降。 I_0 水平下, N_{60} 和 N_{120} 较 N_0 高 35.2%和 34.1%; I_{1200} 水平下, N_0 较 N_{60} 和 N_{120} 低 24.6%和 12.9%; I_{1800} 水平下, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 16.0%~32.7%。在 N_0 和 N_{60} 水平下,胡麻单株有效蒴果数随灌水量的增加而增加。 N_0 水平下, I_{1200} 和 I_{1800} 较 I_0 高 11.0%和 30.8%; N_{60} 水平下, I_0 较 I_{1200} 和 I_{1800} 低 8.2%和 10.9%;在 N_{120} 水平下,胡麻单株有效蒴果数随施氮量的增加而下降, I_0 较 I_{1200} 和 I_{1800} 高 5.2%和 17.3%。说明合理的灌水量与氮肥用量耦合有助于胡麻单株有效蒴果数和果粒数

的增加,最终实现增产,而高水高氮水平反而降低了胡麻单株有效蒴果数和籽粒产量。

2.2 不同水氮耦合方式下胡麻花后各器官含氮率

由图 2 可知,不同水氮耦合方式下,胡麻茎、叶的氮含量为花期最高,成熟期最低;蒴果的氮含量成熟期最高。不同水氮耦合方式下不同生育时期各器官氮含量存在差异。对于茎秆氮含量,花期表现为在同一灌水水平下随施氮量的增加先升高后下降,在同一施氮水平下随灌水量的增加先下降后升高。花期, I_0 水平下, N_{60} 与 N_{120} 处理间无显著差异,较 N_0 高 73.9%和 72.1%; I_{1200} 水平下, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 67.6%和 30.6%; I_{1800} 水平下, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 54.4%和 28.1%。成熟期, I_0 水平下, N_{60} 和 N_{120} 较 N_0 显著高 107.1%和 110.6%; I_{1200} 水平下, N_{60} 较 N_0 显著高 57.5%; I_{1800} 时, N_{60} 较 N_{120} 和 N_0 高 64.4%和 111.0%;在 N_0 和 N_{120} 水平下,茎秆氮含量随灌水量的增加先升高后下降,在 N_{60} 水平下,随灌水量的增加而升高。对于叶片氮含量而言,在花期,同一灌

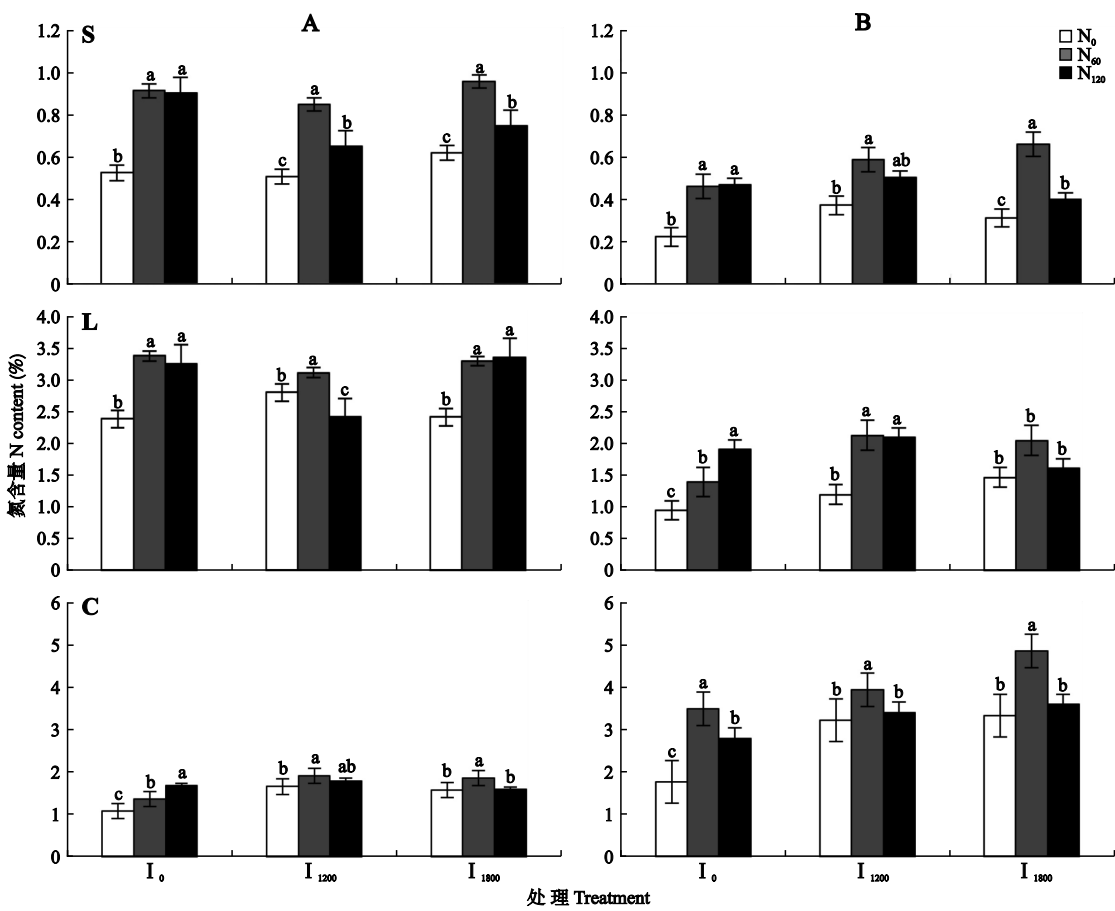


图 2 不同水氮耦合方式下胡麻花期、成熟期各器官氮含量

Fig.2 N content in different organs of oil flax under different water-nitrogen coupling patterns in anthesis and maturity stage.

S: 茎 Stem; L: 叶 Leaf; C: 蒴果 Capsule. A: 花期 Anthesis stage; B: 成熟期 Maturity stage. I: 灌水量 Irrigation amount; N: 施氮量 N application rate. 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level.

水水平下,在 I_0 、 I_{1200} 水平时,其随施氮量的增加先升高后下降,在 I_{1800} 水平时,随施氮量的增加而升高;在 N_0 水平下,叶片氮含量随灌水量的增加先升高后下降,在 N_{60} 和 N_{120} 水平下,随灌水量的增加先下降后升高。成熟期, I_0 水平下, N_{120} 较 N_{60} 和 N_0 高 36.9% 和 102.0%; I_{1200} 水平下, N_0 较 N_{60} 和 N_{120} 低 43.9% 和 43.1%; I_{1800} 水平下, N_0 和 N_{120} 较 N_{60} 低 28.4% 和 21.2%;在 N_0 水平下,叶片氮含量随灌水量的增加而升高,在 N_{60} 和 N_{120} 水平下,随灌水量的增加先升高后下降。对于蒴果氮含量,花期、成熟期在 I_{1200} 和 I_{1800} 水平下均表现出随施氮量的增加先升高后下降,在 I_0 水平下,花期随施氮量的增加而增加,成熟期先升高后下降;在同一施氮量下,花期蒴果氮含量随灌水量的增加先升高后下降,成熟期随灌水量的增加而升高。综上,不同水氮耦合方式下,除个别处理外,花期、成熟期不同器官氮含量随施氮量的增加先升高后下降, N_{60} 处理下氮含量最高。

2.3 不同水氮耦合方式下胡麻氮素积累量

由表 2 可知,施氮量显著影响现蕾期-成熟期胡麻氮素积累量,灌水影响整个生育期的氮素积累量,而水氮耦合只影响现蕾期-成熟期氮素积累量,不同水氮耦合方式对胡麻各生育时期氮素阶段累积量的影响不同。不同水氮耦合方式下胡麻氮素阶段累积量以青果至成熟期最大,苗期最小。在整个胡麻生育期,除个别处理(现蕾期-花期 I_0N_{60}) 外, $I_{1800}N_{60}$ 处理氮素积累量显著高于其他处理,各生育时期较 I_0N_0 处理分别高 106.7%、150.1%、210.1%、212.7% 和 532.6%,较其余处理分别高 9.8%~75.2%、43.1%~137.7%、9.7%~85.1%、5.8%~161.6% 和 21.3%~150.5%,表明高灌低氮处理利于胡麻生育时期氮素

的积累。播种-苗期, I_0 和 I_{1200} 水平下,氮素积累量随施氮量的增加而增加,施氮较不施氮显著增加 17.8%~71.4%, I_{1800} 水平下,氮素积累量随施氮量的增加先增加后降低, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 40.4% 和 9.0%;在同一施氮水平下,氮素积累量随灌水量的增加而升高, I_{1200} 、 I_{1800} 较 I_0 分别高 28.6% 和 48.6%、26.2% 和 73.8%、5.0% 和 11.7%。苗期-现蕾期, I_0 水平下,氮素积累量随施氮量的增加而增加, N_{60} 和 N_{120} 较 N_0 显著增加 46.7% 和 56.7%, I_{1200} 和 I_{1800} 水平下,随施氮量的增加先升高后下降, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 分别高 46.0%、21.9% 和 70.5%、43.5%;在 N_0 和 N_{60} 水平下,氮素积累量随灌水量的增加而升高,在 N_{120} 水平下,随灌水量的增加先减后增。现蕾期-花期,同一灌水水平下,氮素积累量随施氮量的增加先升高后降低, N_{60} 较 N_0 平均升高 30.0%~183.0%,较 N_{120} 平均升高 14.2%~39.8%; N_0 水平下,氮素积累量随灌水量的增加先升高后降低, N_{60} 较 N_{120} 水平下,氮素积累量随灌水量的升高先下降后升高。花期-青果期, I_0 水平下,氮素积累量随施氮量的增加而增加, N_{60} 和 N_{120} 较 N_0 显著增加 84.8% 和 115.9%; I_{1200} 和 I_{1800} 水平下,随施氮量的增加先升高后下降, I_{1200} 水平下, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 105.8% 和 33.9%; I_{1800} 水平下, N_{60} 较 N_0 和 N_{120} 高 161.7% 和 117.1%。青果期-成熟期,同一灌水量下,氮素积累量均随施氮量的增加先升高后下降,同一施氮水平下,氮素积累量随灌水量的增加而增加, N_0 、 N_{60} 和 N_{120} 水平下, I_{1800} 较 I_0 分别高 231.8%、126.4% 和 61.9%,较 I_{1200} 分别高 30.5%、21.4% 和 14.0%。综上可知,灌水前,胡麻氮素积累量受施氮量影响显著,灌水后,灌水、施氮量及水氮耦合效应均显著影响氮素积累量,且随灌水

表 2 水氮耦合对胡麻各生育时期氮素积累量的影响
Table 2 Effects of water-nitrogen coupling on N accumulation of oil flax at different growth stages (mg · plant⁻¹)

处理 Treatment		播种-苗期 So-Se	苗期-现蕾期 Se-Bu	现蕾期-花期 Bu-An	花期-青果期 An-Yo	青果期-成熟期 Yo-Ma
I_0	N_0	3.5±0.8e	12.0±1.0e	17.1±1.3d	28.9±1.6f	27.7±2.7f
	N_{60}	4.2±0.9e	17.6±1.4c	48.4±8.6ab	53.4±6.4d	77.3±19.5e
	N_{120}	6.0±0.2bc	18.8±1.8c	42.4±4.7b	62.4±39.2c	69.8±2.8e
I_{1200}	N_0	4.5±0.6de	12.6±1.6e	34.3±12.4c	41.5±12.3e	70.4±9.9e
	N_{60}	5.3±0.4cd	18.4±1.2c	44.6±10.8b	85.4±34.0b	144.2±77.1b
	N_{120}	6.3±0.6b	15.1±0.7d	31.9±5.7c	63.8±11.6c	99.1±7.7cd
I_{1800}	N_0	5.2±0.3cd	17.6±0.8c	28.7±3.9c	34.5±15.1f	91.9±11.0d
	N_{60}	7.3±0.3a	30.0±0.7a	53.1±7.1a	90.3±20.9a	175±45.4a
	N_{120}	6.7±0.4ab	20.9±1.5b	42.8±7.3b	41.6±17.5e	113.0±16.5c
]方差分析		I	15.4 ^{ns}	9.6 ^{**}	4.7 [*]	21.3 ^{**}
Variance		N	16.2 ^{**}	13.9 ^{**}	26.7 ^{**}	32.8 ^{**}
analysis		I×N	4.4 ^{ns}	2.5 ^{ns}	4.3 [*]	3.7 [*]

So: Sowing stage; Se: Seeding stage; Bu: Budding stage; An: Anthesis; Yo: Young fruit stage; Ma: Maturity stage.

量的增加而持续升高,随施氮量的增加先升高后下降,高水低氮(I₁₈₀₀N₆₀)有利于胡麻阶段氮素积累量的增加和增产。

2.4 不同水氮耦合方式下胡麻氮素转运量

由表 3 可知,灌水、氮肥、灌水×氮肥均能显著影响胡麻茎叶中氮素转运量、转运率以及茎和叶对籽粒中氮素的贡献率。就茎秆而言,I₀水平下,N₁₂₀氮素转运量较 N₀和 N₆₀高 250.0%和 33.3%,I₁₂₀₀水平下,N₀和 N₆₀处理间无显著差异,较 N₁₂₀高 23.8%和 23.8%,I₁₈₀₀水平下,不同施氮处理间无显著差异;N₀和 N₆₀水平下,氮素转运量随灌水量的增加而增加,I₁₈₀₀较 I₁₂₀₀和 I₀分别高 287.5%、19.2%和 61.9%、30.8%,N₁₂₀水平下,I₁₈₀₀较 I₁₂₀₀和 I₀高 17.9%和 57.1%。I₀水平下,氮素转运率随施氮量的增加而增加,I₁₂₀₀和 I₁₈₀₀水平下,随施氮量的增加先下降后升高;N₀水平下,I₁₂₀₀和 I₁₈₀₀处理间氮素转运率无显著差异,较 I₀高 99.7%和 95.5%;N₆₀水平下,不同灌水水平下无显著差异;N₁₂₀水平下,I₀和 I₁₈₀₀处理间氮素转运率无显著差异,较 I₁₂₀₀高 24.7%和 22.3%。各处理对籽粒中氮素的贡献率表现为 I₁₈₀₀>I₀>I₁₂₀₀,N₁₂₀>N₀>N₆₀,I₁₈₀₀较 I₀和 I₁₂₀₀高 17.9%和 33.6%,N₁₂₀较 N₀和 N₆₀高 4.1%和 37.3%,说明高灌水量和高施氮量均能提高胡麻茎秆氮素转运量、转运率和对籽粒的贡献率。就叶片而言,同一施氮水平下,低灌水量(I₁₂₀₀)下氮素转运量、转运率以及叶片对籽粒氮素的贡献率均显著高于不灌水(I₀)和高灌水量处理(I₁₈₀₀);I₀水平下,N₁₂₀氮素转运量较 N₆₀和 N₀高 61.9%和 41.7%;I₁₂₀₀和 I₁₈₀₀水平下,N₆₀较 N₀和 N₁₂₀

高 16.2%、2.4%和 40.0%、68.0%;同一施氮水平下,氮素转运量随灌水量的增加先升高后下降。I₀和 I₁₂₀₀水平下,氮素转运率随施氮量的增加先降低后升高,I₁₈₀₀水平下,随施氮量的增加而下降;N₀水平下,氮素转运率随灌水量的增加而增加,N₆₀和 N₁₂₀水平下,随灌水量的增加先升高后下降。I₀和 I₁₂₀₀水平下,对籽粒的贡献率表现为 N₁₂₀最高,较 N₀和 N₆₀分别高 51.0%、97.0%和 16.3%、19.8%,而 I₁₈₀₀水平下,N₀最高,较 N₆₀和 N₁₂₀高 35.3%和 42.0%。表明低灌水量有利于胡麻叶片氮素转运量、转运率以及叶片对籽粒中氮素的贡献率,高灌水量具有抑制作用,而高氮(N₁₂₀)处理下叶片对籽粒中氮素的贡献率最高。叶片中平均氮素转移量较茎秆高 32.3%,叶片中氮素对籽粒的贡献率较茎秆高 25.8%。

2.5 不同水氮耦合方式下胡麻氮肥利用率

由表 4 可知,灌水和施氮量显著影响氮肥利用率(NUE)、氮肥偏生产力(PFP)、氮肥农学利用率(AUE)和氮素收获指数(NHI)。其中,灌水对 NUE、PFP 和 NHI 的影响达到极显著水平,施氮量对 PFP、AUE 和 NHI 的影响达到极显著水平,灌水×施氮量对 AUE 影响显著,对 PFP 影响极显著,而灌水×施氮量对 NUE 和 NHI 无显著影响。灌水对 NUE 的影响表现为 I₁₈₀₀>I₁₂₀₀>I₀,3 个灌水水平间均差异显著,N₆₀和 N₁₂₀的 NUE 较 N₀高 6.5%和 4.9%。灌水量对 PFP 的影响与灌水量对 NUE 的影响相似,I₁₈₀₀较 I₁₂₀₀、I₀高 8.1%、16.4%,I₁₂₀₀较 I₀高 7.7%,差异显著,N₆₀的 PFP 显著高于 N₁₂₀,较 N₁₂₀高 103.7%。I₁₈₀₀的 AUE 最高,较 I₁₂₀₀和 I₀高 39.6%和

表 3 水氮耦合对胡麻茎秆和叶氮素转运量、转运率及其对籽粒中氮素贡献率的影响
Table 3 Effects of water-nitrogen coupling on N translocation amount, translocation rate in stem and leaf and their contribution to grain N of oil flax

处理 Treatment		茎 Stem			叶 Leaf		
		转运量 Translocation amount (mg · plant ⁻¹)	转运率 Translocation rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)	转运量 Translocation amount (mg · plant ⁻¹)	转运率 Translocation rate (%)	贡献率 Contribution rate (%)
I ₀	N ₀	0.8±0.1e	37.4±2.5d	22.0±4.4b	2.1±0.3e	62.6±3.0bcd	26.1±2.7c
	N ₆₀	2.1±0.2d	48.6±0.4c	19.2±2.0b	2.4±0.4de	47.1±2.0d	20.0±3.2d
	N ₁₂₀	2.8±0.4bc	66.6±5.0b	31.4±3.5a	3.4±0.5bc	66.8±2.2bc	39.4±7.5a
I ₁₂₀₀	N ₀	2.6±0.5cd	74.7±3.8a	23.5±2.9b	3.7±0.1abc	77.6±7.9a	34.9±7.4b
	N ₆₀	2.6±0.4cd	47.7±8.0c	20.5±3.8b	4.3±0.6a	65.5±9.1bc	33.9±11.1b
	N ₁₂₀	2.1±0.2d	53.4±2.5c	20.0±4.1b	4.2±0.3ab	81.0±13.1a	40.6±5.5a
I ₁₈₀₀	N ₀	3.1±0.1abc	73.1±4.2ab	33.8±6.4a	3.0±0.6cd	77.8±4.5ab	34.5±13.9b
	N ₆₀	3.4±0.6a	49.4±3.7c	20.5±3.8b	4.2±0.6ab	63.5±9.1bc	25.5±3.2c
	N ₁₂₀	3.3±0.2ab	65.3±5.4b	31.2±3.5a	2.5±0.4de	55.0±12.1cd	24.3±4.9c
方差分析	I	45.3***	16.34**	7.4**	24.7***	14.7***	3.9*
Variance	N	9.9**	26.7***	9.2**	5.6*	8.3***	7.6**
analysis	I×N	12.9*	30.0**	4.3*	7.7*	4.0*	4.1*

表 4 水氮耦合对胡麻氮肥利用参数的影响
Table 4 Effects of water-nitrogen coupling on N utilization parameters of oil flax

处理 Treatment		氮肥 利用效率 NUE	氮肥偏 生产力 PFP	氮肥农学 利用率 AUE	氮素 收获指数 NHI
		(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)	
I ₀	N ₀	26.3±0.4d	—	—	0.4±0.1c
	N ₆₀	28.3±0.8cd	17.8±1.2c	0.4±0.6c	0.6±0.1b
	N ₁₂₀	28.4±2.1cd	9.1±0.4d	0.4±0.7c	0.5±0.0bc
I ₁₂₀₀	N ₀	28.5±0.5cd	—	—	0.5±0.0bc
	N ₆₀	30.2±0.1abc	19.4±0.3b	1.3±0.7b	0.6±0.3ab
	N ₁₂₀	30.0±3.8bc	9.6±0.1d	0.6±0.2c	0.6±0.1b
I ₁₈₀₀	N ₀	31.3±1.1abc	—	—	0.5±0.0b
	N ₆₀	33.1±1.2a	21.4±0.3a	2.2±0.6a	0.6±0.1a
	N ₁₂₀	31.9±1.5ab	10.0±0.3d	0.4±0.3c	0.6±0.7ab
方差分析	I	34.5***	24.8***	3.7*	15.0***
Variance	N	5.7*	52.7***	10.3***	18.4***
analysis	I×N	0.3 ^{ns}	9.0**	3.9*	0.5 ^{ns}

NUE: N use efficiency; PFP: Partial factor productivity; AUE: Agromomic use efficiency; NHI: N harvest index.

197.1%,施氮量对 AUE 的影响与对 PFP 的影响一致。两灌水处理的 NHI 差异不显著,但显著高于不灌水(I₀),I₁₈₀₀和 I₁₂₀₀较 I₀高 22.3%和 13.7%,施氮对 NHI 的影响与灌水相似,施氮(N₆₀和 N₁₂₀)较不施氮(N₀)高 24.9%和 11.2%。可见,灌水和施氮量显著影响 NUE,灌水×施氮量显著影响 PFP 和 AUE,对 NUE 和 NHI 无显著影响,NUE 随灌水量的增加而升高,NUE 和 NHI 随施氮量的增加先升高后下降,PFP 和 AUE 随施氮量的增加而下降。

3 讨 论

水和肥是农业生产投入的两大主要因素,也是可以调控的两大重要技术措施,并且水分和养分对作物生长存在显著的耦合关系^[22]。本研究发现,灌水和施氮量显著影响胡麻产量,二者耦合效应显著。在同一施氮水平下,胡麻籽粒产量随灌水量的增加而增加,在同一灌水水平下,胡麻籽粒产量随施氮量的增加先升高后下降。在相同灌水水平下,N₆₀较 N₀增产 2.5%~11.2%;在 N₆₀水平下,I₀较 I₁₂₀₀和 I₁₈₀₀分别低 8.2%和 16.5%;胡麻单株有效蒴果数随着施氮量的增加先增加后下降,N₆₀水平下,I₁₈₀₀较 I₀显著增加 12.2%。这与崔政军等^[15]的研究结果一致。灌水和施氮对胡麻籽粒产量的耦合效应显著,主要源于水氮耦合提高了植物体内碳氮代谢关键酶的活性,促进了植物光合作用和碳氮代谢产物的生成^[23-24]。可见,合理的灌水量与氮肥量耦合有助于胡麻单株有效蒴果数和果粒数的增加,最终实现增产,而高水高氮反而降低了胡麻单株有效蒴果数和

籽粒产量。

施入农田的化学肥料在土壤微生物和作物根系的作用下,最终被运输到植株体内参与各种生化反应,而植株不同器官的养分浓度受施肥量的影响^[25]。有研究表明,在一定范围内,植株氮素吸收量和氮含量随施氮量的增加而增大,继续增加施氮量反而降低植株氮含量,而不同器官中氮素吸收量因器官和施肥量而异^[12]。本研究发现,胡麻花期、成熟期不同器官氮含量随施氮量的增加先升高后下降;N₆₀水平下,成熟期不同器官氮含量随灌水量的增加而增加。水分不仅影响土壤中氮素的有效性,同时对氮素吸收、作物体内氮素积累和运转等都有一定的影响^[26]。Kibe 等^[27]研究认为,适宜的土壤水分可同时提高小麦产量和氮素吸收效率,灌水过量则起反作用。有学者研究发现,玉米灌浆期较高的土壤水分条件会影响穗部氮素的同化吸收^[28]。本研究中,从现蕾期开始,灌水与施氮量均显著影响氮素积累量,且耦合效应显著,高水低氮(I₁₈₀₀N₆₀)处理有利于胡麻各生育时期的氮素积累。同一灌水条件下,胡麻茎秆、叶片氮素转运量均以 N₆₀最高,较 N₁₂₀和 N₀分别高 2.3%~26.6%和 1.0%~65.8%;不灌水(I₀)条件下,茎秆转运率以 N₁₂₀处理最高,灌水(I₁₂₀₀和 I₁₈₀₀)条件下,转运率以 N₀处理最高。这与谢亚萍等^[19]的研究结论不同,可能与不同区域气候条件、土壤类型以及水氮耦合处理不同有关。叶片中氮素对籽粒氮素的贡献率以 I₁₂₀₀最高,分别较 I₀和 I₁₈₀₀高 28.1%和 29.8%,表明低灌水量有利于胡麻叶片中氮素向籽粒转移,而高灌水量反而抑制了叶片中氮素向籽粒转移。这与谢亚萍等^[19]的研究结果一致。

合理施肥能够提高作物氮肥利用率,过量供应氮肥反而导致氮肥利用率下降^[29]。在农业生产中,水分和养分密不可分,作物对养分的吸收、运转和利用都依赖于土壤水分,土壤水分状况在很大程度上决定着肥料的有效性、吸收量和利用率^[30]。水氮耦合显著影响西瓜(*Citrullus vulgaris*)^[31]、番茄(*Lycopersicon esculentum*)^[32]的氮利用效率,其中,灌水的增产效应大于氮肥。本研究表明,灌水和施氮量显著影响氮肥利用效率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮收获指数。高娜等^[33]在油菜上的研究表明,水氮互作显著影响肥料利用率。肥料利用率随灌水量的增加呈增加趋势,随施氮量的增加呈降低趋势,而肥料损失率呈增加趋势。本研究发现,同一灌水水平下,氮肥偏生产力和氮肥农学利用率随施氮量

的增加而下降,同一施氮水平下,随灌水量的增加而增加。这与高娜等^[33]的研究结果一致。

水氮耦合显著影响胡麻产量和产量构成因子,灌水×氮肥显著影响氮肥利用参数,水氮耦合通过提高花后营养器官中氮素转移量、转移率以及对籽粒的贡献率来提高氮肥利用率,最终表现为胡麻的增产效应。综合考虑胡麻籽粒产量、不同生育阶段氮素积累量、花后营养器官氮素转移量、转移率以及对籽粒的贡献率和氮肥利用参数,在陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区同等肥力土壤条件下的胡麻生产中,灌水 $1800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (花期 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ + 青果期 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、施氮 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2/3 作为基肥,1/3 于现蕾期追施)是能够兼顾高产和较高氮素利用效率的水氮管理措施。

参考文献

- [1] Cattivelli L, Rizza F, Badeck E, *et al.* Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Research*, 2008, **105**: 1–4
- [2] 秦姗姗, 侯宗建, 吴忠东, 等. 水氮耦合对冬小麦氮素吸收及产量的影响. 排灌机械工程学报, 2017, **35** (5): 440–447 [Qin S-S, Hou Z-J, Wu Z-D, *et al.* Effects of water coupling on nitrogen absorption and yield of winter wheat. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, **35**(5): 440–447]
- [3] 赵亚妮, 王科, 王佳锐, 等. 施氮对单作和套作小麦产量和氮素利用特征的影响. 中国生态农业学报, 2016, **24**(7): 845–852 [Zhao Y-N, Wang K, Wang J-R, *et al.* Wheat grain yield and nitrogen use characteristics under monoculture and intercropping with different nitrogen fertilization rates. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24**(7): 845–852]
- [4] Zhu ZL, Chen DL. Nitrogen fertilizer use in China contribution to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**: 117–127
- [5] 冯萌, 于成, 林丽果, 等. 灌溉和施氮对河西走廊紫花苜蓿生物量分配与水分利用效率的影响. 中国生态农业学报, 2016, **24**(12): 1623–1632 [Feng M, Yu C, Lin L-G, *et al.* Effects of water and nitrogen fertilizer on biomass distribution and water use efficiency of alfalfa (*Medicago sativa*) in Hexi Corridor. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, **24**(12): 1623–1632]
- [6] 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. 中国农业科学, 2019, **52**(3): 428–444 [Wei T-B, Chai Q, Wang W-M, *et al.* Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, **52**(3): 428–444]
- [7] 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. 作物学报, 2018, **44**(11): 1694–1703 [Zhao C, Wang Q-M, Guo Y, *et al.* Effects of water-nitrogen coupling patterns on dry matter accumulation and yield of wheat under no-tillage with previous plastic mulched maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, **44**(11): 1694–1703]
- [8] 徐国伟, 吕强, 陆大克, 等. 干湿交替灌溉耦合施氮对水稻根系性状及籽粒库活性的影响. 作物学报, 2016, **42**(10): 1495–1505 [Xu G-W, Lyu Q, Lu D-K, *et al.* Effect of wetting and drying alternative irrigation coupling with nitrogen application on root characteristic and grain-sink activity. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, **42**(10): 1495–1505]
- [9] Wang Q, Li F, Zhao L, *et al.* Effects of irrigation and nitrogen application rates on nitrate nitrogen distribution and fertilizer nitrogen loss, wheat yield and nitrogen uptake on a recently reclaimed sandy farmland. *Plant and Soil*, 2010, **337**: 325–339
- [10] Yan B, Wu B, Gao YH, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus on the regulation of nonstructural carbohydrate accumulation, translocation and the yield formation of oilseed flax. *Field Crops Research*, 2018, **219**: 229–241
- [11] 崔红艳, 胡发龙, 方子森, 等. 灌溉量和灌溉时期对胡麻需水特性和产量的影响. 核农学报, 2015, **29** (4): 812–819 [Cui H-Y, Hu F-L, Fang Z-S, *et al.* Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and grain yield of oil flax. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, **29**(4): 812–819]
- [12] 高玉红, 吴兵, 牛俊义, 等. 水肥耦合对间作胡麻氮素养分及其产量和品质的影响. 干旱地区农业研究, 2016, **34**(2): 69–75 [Gao Y-H, Wu B, Niu J-Y, *et al.* Effects of water and fertilizer coupling on nitrogen content, grain yield and quality of intercropped oil flax. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, **34**(2): 69–75]
- [13] 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. 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. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, **26**(1): 129–134]
- [14] 姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等. 黄土高原半干旱区气候变暖对胡麻生育和水分利用效率的影响. 应用生态学报, 2011, **22**(10): 2635–2642 [Yao Y-B, Wang R-Y, Yang J-H, *et al.* Effects of climate warming on oil flax growth and water use efficiency in semi-arid region of Loess Plateau, Northwest China. *Chinese Journal of*

- Applied Ecology*, 2011, **22**(10): 2635–2642]
- [15] 崔政军, 高玉红, 剡斌, 等. 水氮耦合对土壤水分时空分布与胡麻耗水特性及产量的影响. 核农学报, 2019, **33**(2): 398–411 [Cui Z-J, Gao Y-H, Yan B, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on spatial and temporal distribution of soil water and water consumption characteristic and grain yield of oil flax. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(2): 398–411]
- [16] 陆增根, 戴廷波, 姜东, 等. 氮肥运筹对弱筋小麦群体指标与产量和品质形成的影响. 作物学报, 2007, **33**(4): 590–597 [Lu Z-G, Dai T-B, Jiang D, *et al.* Effects of nitrogen strategies on population quality index and grain yield and quality in weak-gluten wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, **33**(4): 590–597]
- [17] 杨萍, 李杰, 剡斌, 等. 胡麻/大豆间作体系下施氮对胡麻干物质积累和产量的影响. 中国油料作物学报, 2015, **37**(4): 489–497 [Yang P, Li J, Yan B, *et al.* Effects of applied nitrogen on dry matter accumulation and oil flax yield in flax/soybean intercropping system. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2015, **37**(4): 489–497]
- [18] 高珍妮, 赵利, 郭丽琢, 等. 灌溉量和施氮量对油用亚麻茎秆抗倒性能及产量的影响. 中国生态农业学报, 2015, **23**(5): 544–553 [Gao Z-N, Zhao L, Guo L-Z, *et al.* Effects of irrigation and nitrogen fertilizer rates on oilseed flax stem lodging resistance and yield. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, **23**(5): 544–553]
- [19] 谢亚萍, 吴兵, 牛俊义, 等. 施氮量对旱地胡麻养分积累、转运及氮素利用率的影响. 中国油料作物学报, 2014, **36**(3): 357–362 [Xie Y-P, Wu B, Niu J-Y, *et al.* Effect of different nitrogen level on nutrients accumulation, transfer and nitrogen utilization efficiency of dry land oil flax. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2014, **36**(3): 357–362]
- [20] 王斌, 谢亚萍, 牛小霞, 等. 施氮量对胡麻产量相关生理因子、品质和氮肥利用率的影响. 土壤与作物, 2017, **6**(1): 32–38 [Wang B, Xie Y-P, Niu X-X, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on physiological determinants of seed yield, quality and nitrogen use efficiency of oilseed flax. *Soils and Crops*, 2017, **6**(1): 32–38]
- [21] 吴兵, 高玉红, 谢亚萍, 等. 氮磷配施对旱地胡麻干物质积累和籽粒产量的影响. 核农学报, 2017, **31**(5): 996–1004 [Wu B, Gao Y-H, Xie Y-P, *et al.* Effects of nitrogen application combined with phosphorus on dry matter accumulation and seed yield of rain-fed flax. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, **31**(5): 996–1004]
- [22] 张君. 阴山北麓马铃薯水氮耦合效应及合理利用机制研究. 博士论文. 北京: 中国农业大学, 2018 [Zhang J. The Coupling Effects of Water and Fertilizer and Its Rational Utilization Mechanism on Potato in the Northern Foot of Yinshan Mountain. PhD Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2018]
- [23] 韦敬娜, 姜俊红, 李就好, 等. 水肥耦合对烤烟叶面积积累量的影响研究. 灌溉排水学报, 2015, **34**(5): 85–90 [Wei X-N, Jiang J-H, Li J-H, *et al.* Effects of water and fertilizer coupling on flue cured tobacco leaf area accumulation. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, **34**(5): 85–90]
- [24] 徐国伟, 王贺正, 翟志华, 等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响. 农业工程学报, 2015, **31**(10): 132–141 [Xu G-W, Wang H-Z, Zhai Z-H, *et al.* Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, **31**(10): 132–141]
- [25] 陈磊, 郝明德, 张少民, 等. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, **13**(2): 230–235 [Chen L, Hao M-D, Zhang S-M, *et al.* Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, **13**(2): 230–235]
- [26] 杨明达, 关小康, 刘影, 等. 滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响. 作物学报, 2019, **45**(3): 443–459 [Yang M-D, Guan X-K, Liu Y, *et al.* Effects of drip irrigation pattern and water regulation on the accumulation and allocation of dry matter and nitrogen, and water use efficiency in summer maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, **45**(3): 443–459]
- [27] Kibe AM, Singh S, Kalra N, *et al.* Water-nitrogen relationships for wheat growth and productivity in late sown conditions. *Agricultural Water Management*, 2006, **84**: 221–228
- [28] 苗文芳, 陈素英, 邵立成, 等. 不同灌溉处理对夏玉米氮素吸收及转移的影响. 中国生态农业学报, 2011, **19**(2): 293–299 [Miao W-F, Chen S-Y, Shao L-C, *et al.* Effect of irrigation on nitrogen uptake and translocation in summer maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(2): 293–299]
- [29] Brennan RF, Bolland MDA. Influence of potassium and nitrogen fertilizer on yield, oil and protein concentration of canola (*Brassica napus* L.) grain harvested in south-western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 2007, **47**: 976–983
- [30] 李世娟, 周殿玺, 李建民, 等. 水分和氮肥运筹对小麦氮素吸收分配的影响. 华北农学报, 2001, **16**(3): 86–91 [Li S-J, Zhou D-X, Li J-M, *et al.* Effect of different nitrogen application on yield, nitrogen distribution and utilization in winter wheat under soil water stress. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2001, **16**(3): 86–91]
- [31] 杜少平, 马忠明, 薛亮, 等. 旱砂田补灌水氮互作对西瓜产量、品质及水氮利用的影响. 应用生态学报,

2015, **26**(12): 3715–3722 [Du S-P, Ma Z-M, Xue L, *et al.* Interactive impact of water and nitrogen on yield, quality of watermelon and use of water and nitrogen in gravel-mulched field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(12): 3715–3722]

[32] 米国全, 程志芳, 赵肖斌, 等. 水氮耦合对日光温室番茄产量和土壤水、氮利用率的影响. 华北农学报, 2013, **28**(4): 174–178 [Mi G-Q, Chen Z-F, Zhao X-B, *et al.* Influences of different water and nitrogen application on yield, WUE_y and NUE in solar greenhouse. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, **28**(4): 174–178]

[33] 高娜, 张玉龙, 刘玉, 等. 水氮调控对小油菜养分吸

收、水氮利用效率及产量的影响. 中国生态农业学报, 2017, **25**(6): 821–828 [Gao N, Zhang Y-L, Liu Y, *et al.* Regulation effects of irrigation and nitrogen fertilization on nutrient absorption, water/nitrogen use efficiency and yield of rape. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, **25**(6): 821–828]

作者简介 崔政军, 男, 1988 年生, 博士研究生。主要从事作物栽培与生理生态研究。E-mail: 987437555@qq.com

责任编辑 张凤丽

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

