

氮肥和密度对胡麻水分、氮素 利用率及产量的影响

吴 兵^{1,2}, 高玉红^{2,3}, 李鹏红⁴, 剡 斌^{2,3}, 崔政军², 牛俊义²

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

3. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 中南财经政法大学公共管理学院, 湖北 武汉 430073)

摘 要:在大田环境下, 设置氮肥(0、75、150 kg · hm⁻²)和密度(4.5、7.5、10.5 × 10⁶ 粒 · hm⁻²) 2 因素共 9 个处理(N₀D₁、N₀D₂、N₀D₃、N₁D₁、N₁D₂、N₁D₃、N₂D₁、N₂D₂、N₂D₃)的随机区组试验, 分析了不同施氮量和种植密度组合对旱地胡麻土壤含水量、贮水量、籽粒产量及产量构成因子、水分和氮素利用率的影响。结果表明, 氮肥、密度各处理土壤含水量变化主要表现在苗期~青果期 0~60 cm 土层, 以 N₁D₁ 处理为优, 最高达到 15.52%; N₂D₁ 处理 0~200 cm 土壤平均含水量为 18.25%, 其生育季内 0~200 cm 土壤贮水量亦较最低处理 N₁D₃ 增加 4.62%, 具有较好的肥水耦合优势。胡麻产量随处理中施氮量和密度增加呈先降后升趋势, 随施氮量变幅为 66.58~171.64 kg · hm⁻², 随密度变幅为 32.42~68.47 kg · hm⁻²。籽粒产量和水分利用效率对施氮水平呈现明显的正效应, 高氮(N₂)较中氮(N₁)和不施氮(N₀)水平产量上升 14.97%~16.05%, 水分利用效率增加 7.14%~21.75%; 而增加密度对胡麻产量和水分利用效率并未有显著影响, 组合中均为 4.5 × 10⁶ 粒 · hm⁻² 处理下最高, 分别达到 1 802.00 kg · hm⁻² 和 7.87 kg · hm⁻² · mm⁻¹。增施氮肥显著提高了植株氮素吸收量, 高氮(N₂)、中氮(N₁)较不施氮(N₀)分别显著增加 82.21% 和 57.55%; 平均氮素吸收利用率则均随施氮量和密度上升而降低, 高氮(N₂)较中氮(N₁)水平显著降低 42%, 高密度(D₃)、中密度(D₂)平均氮素利用率分别较最低密度(D₁)处理显著降低 58.45% 和 35.19%。在试验处理区间内, 高氮配合增密不利于提高氮素吸收利用率, N₁D₁ 组合氮素利用率最优, 为 64.3%。氮肥密度互作后, 籽粒产量与有效分茎数间(0.688^{*})、有效分枝数与单株有效果数间(0.877^{*})均显著相关, 且分茎数、分枝数受密度影响程度大于施氮量, 而千粒重受限于施氮量更甚, 不同施氮水平间变幅达到 0.04~0.29 g。因此, 氮肥密度互作时, 增密对水分利用效率及产量无显著影响, 适量氮肥施用可促进胡麻生育前、中期水分有效利用和提高氮素利用率, 使胡麻产量及水分利用效率显著增加。在本试验及相似农田生态类型环境下, 兼顾节本增效和环境安全, 施氮量 75~150 kg · hm⁻²、种植密度 4.5 × 10⁶ 粒 · hm⁻² 可作为黄土高原干旱半干旱区胡麻高效生产的适宜参考氮肥密度组合。

关键词: 胡麻; 氮肥与密度互作; 水分利用效率; 氮素吸收利用率; 产量

中图分类号: S565.9 **文献标志码:** A

Effect of density and nitrogen on water and nitrogen utilization and seed yield of oil flax

WU Bing^{1,2}, GAO Yuhong^{2,3}, LI Penghong⁴, YAN Bin^{2,3}, CUI Zhengjun², NIU Junyi²

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

4. School of Public Administration, Zhongnan University of Economics and Law, Wuhan, Hubei 430073, China)

Abstract: In order to clarify mechanism of water and fertilizer utilization and establish an optimal cultivation mode in arid land farming of oil flax, a field experiment was conducted with two-factor randomized block test, three planting densities (4.5 × 10⁶, 7.5 × 10⁶ plant · hm⁻², and 10.5 × 10⁶ plant · hm⁻²), and three nitrogen (N) application rates (0, 75 kg · hm⁻², and 150 kg · hm⁻²). The effects of density and N application rate on variation of soil

water content, soil water storage, yield and yield components, water and N use efficiencies were studied. The results showed that variation of soil water content in 0~60 cm soil layer was reflected at the stage from seedling to fruit stage under density and N fertilizer treatments, besides for optimal treatment in N_1D_1 up to 15.52%. Fertilizer-water coupling advantage appeared in N_2D_1 treatment, which had an average soil water content of 18.25% in 0~200 cm soil, and the soil water storage in the 0~200 cm period during the growing season also increased by 4.62% compared with the lowest treatment N_1D_3 . Grain yield and water use efficiency had obvious positive effects on N application rate, yield and water use efficiency under high N level (N_2) increased by 14.97%~16.05% and 7.14%~21.75% compared with the levels of medium N (N_1) and no N (N_0), respectively. The yield of oil flax increased first and then decreased with the increase in N application rate and density in the combination treatments, the variation of grain yield were 66.58~171.64 kg·hm⁻² and 32.42~68.47 kg·hm⁻² with the amount of N application and the density, respectively. It confirmed that density increasing had no significant effect on oil flax yield and water use efficiency for highest yield under 4.5×10^6 plant·hm⁻², reaching 1 802.00 kg·hm⁻² and 7.87 kg·hm⁻²·mm⁻¹. N application significantly increased the N uptake of the plants, high N (N_2) and middle N (N_1) increased by 82.21% and 57.55%, respectively, compared with no N (N_0), while the average N utilization decreased with increasing N application rate and density. Nitrogen utilization rate under high N (N_2) level significantly reduced by 42% compared to medium N (N_1), average N utilization rate in high (D_3), medium (D_2) density and lower density (D_1) treatments significantly reduced 58.45% and 35.19%, respectively. In the experimental treatment interval, high N combined with densification was not conducive to improving N utilization, the N utilization rate of medium N (N_1) low density (D_1) amount to 64.3%, which was an optimal combination. After the interaction of density and N fertilizers, the numbers of branches and stems were affected by the density more than the amount of N applied, while the 1000-grain weight was more affected by the N application rate, the 1000-grain weight variation reached 0.04~0.29 g under the three N application levels. There was a significant correlation between grain yield and effective number of stems (0.688*), effective number of branches and number of effective capsules (0.877*). Therefore, the increase in density had no significant effect on water use efficiency and yield, the application of appropriate N fertilizer promoted the effective utilization of water in the early and middle stages of flax and increased the N utilization rate. The yield and water use efficiency of flax were significantly increased. In this experiment and similar farmland ecological type environment, the nutrient management model of 75~150 kg·hm⁻² N application rate and 4.5×10^6 plant·hm⁻² planting density can be used as a suitable reference for the efficient production of oil flax in the arid and semi-arid regions for the Loess Plateau.

Keywords: oil flax; interaction between nitrogen fertilizer and planting density; WUE; nitrogen absorption and utilization rate; seed yield

在雨养农业区,干旱与土壤贫瘠一直是作物产量提升的主要限制因子。如何最大程度地利用自然降水、提升作物对水分和土壤肥力的利用效率,是旱区农业生产面临的主要课题^[1]。研究表明,作物群体适宜种植密度和氮肥的调控是其对水肥资源高效利用的重要途径^[2-3]。氮素是作物必需营养元素之一,直接参与植株器官建成和多种生理生化过程,合理施用可以提高作物产量、改善作物品质,过量或不合理施用会导致氮肥利用率降低、污染环境和水源,浪费能源^[4]。目前,世界范围氮肥的平均利用率约为 33%,我国主要农作物的氮肥利用率远低于国际平均水平^[5-6]。在当前兼顾作物高产及环境安全背景下,施肥与耕作技术的深入协作研究

已成为农业工作者关注的热点问题之一。种植密度是调控作物群体特征、改善作物对水肥资源利用效率与库源平衡的重要措施,以往在小麦^[7]、玉米^[8]、油菜^[9]和水稻^[10]等作物的研究均表明,适宜种植密度有利于促进土壤氮素高效吸收、增加群体光合性能、平衡花后物质分配比例、提高水分及肥料利用率,进而实现作物高产增效。

胡麻(*Linum usitatissimum* L.)是我国北方干旱半干旱区主要油料作物,分布在甘肃、青海、宁夏、内蒙古、河北等地区,具有抗旱、耐瘠、耐寒、适应性广等特点^[11]。近年来,随着胡麻籽油市场及其深加工产品的需求增长及农业种植结构调整的要求,亟需改进种植技术、培育高产优质品种。胡麻是需肥

较多又不耐高氮的作物^[12-14],适宜的施肥水平可使其产量增加 20.5%~77.3%^[15],刘德平等^[16]的研究亦表明在保证产量的前提下,合理配施氮、磷肥可促进水肥利用、减少农业面源污染。Pegeau 等^[17]则指出,胡麻高产的获得同氮肥及密度间互作紧密相关。当前,肥料与密度组合对胡麻产量影响的研究已有报道^[18-20],而在有效水分条件下,通过合理施氮和选择适宜种植密度,能否改善土壤肥力状况,调控作物对土壤水分的消耗,提高胡麻水氮利用率及产量的综合研究鲜见报道。为此,本研究在黄土高原典型旱作条件下,探讨密度与氮肥互作后的胡麻水肥高效利用机理,构建胡麻高产栽培技术模式,以期为合理施用氮肥配套适宜密度实现胡麻高产和资源高效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2014 年在甘肃省定西农业科学院油料试验站基地进行。该区地处黄河中游黄土高原沟壑区,海拔高度 1 793 m,年平均气温 7℃,年日照时数 2 500 h,无霜期 146 d,年降水量 300~400 mm,年蒸发量平均为 1 524.8 mm。胡麻为当地的主要油料作物。供试土壤为黑垆土,有机质含量为 11.06 g·kg⁻¹,全氮 0.99 g·kg⁻¹,碱解氮 72.15 mg·kg⁻¹,速效磷 8.31 mg·kg⁻¹,速效钾 247.02 mg·kg⁻¹,pH 值 8.3。2014 年试验区年降雨量分布情况见图 1。

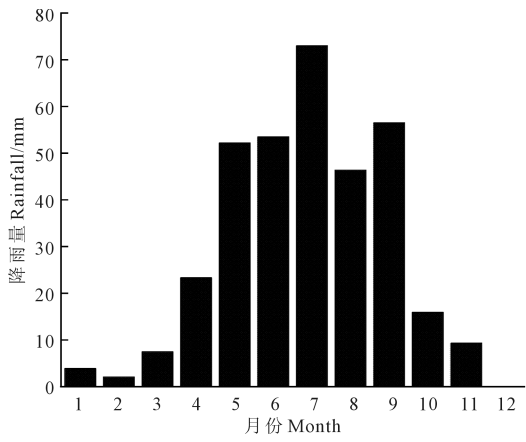


图 1 2014 年试验区降水量逐月分布

Fig.1 Distribution of rainfall for experiment area in 2014

1.2 试验设计

采用二因素随机区组试验设计,试验因素为氮肥和密度。氮肥设 3 个水平,分别为: N_0 :不施氮, N_1 :施氮 75 kg·hm⁻²(中氮), N_2 :施氮 150 kg·hm⁻²(高氮);种植密度设 3 个水平,分别为: D_1 :4.5×10⁶粒·hm⁻²(低密度), D_2 :7.5×10⁶粒·hm⁻²(中密

度), D_3 :10.5×10⁶粒·hm⁻²(高密度)。分 9 个处理,每个处理重复 3 次,共 27 个小区。处理代号分别为: N_0D_1 、 N_0D_2 、 N_0D_3 、 N_1D_1 、 N_1D_2 、 N_1D_3 、 N_2D_1 、 N_2D_2 、 N_2D_3 ,氮肥品种分别为尿素(含纯氮 46.4%),2/3 作为基肥,1/3 作为追肥于现蕾前追施。供试胡麻品种选用“陇亚杂 1 号”,来自甘肃省农业科学院胡麻育种室。胡麻为露地条播,播深 3 cm,行距 20 cm。各处理的氮肥、密度配置情况见表 1。

各小区磷、钾肥的施用量均为 P₂O₅ 75.0 kg·hm⁻²和 K₂O 52.5 kg·hm⁻²。磷、钾肥品种分别为过磷酸钙和硫酸钾,均作为基肥施用。小区面积为 20 m²(5 m×4 m)。小区间隔 30 cm,各重复间隔 50 cm,四周设 1 m 的保护行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 分别在胡麻播种前、苗期、现蕾期、盛花期、青果期、成熟期和收获后,采用土钻取土烘干法测定 0~200 cm 土层的土壤含水量,每 20 cm 为一个取样距离,重复 3 次。称土壤鲜重后,在 105℃ 恒温下烘 24 h 至恒重,称土壤干重,计算土壤含水量。

$$w = \frac{Sw}{Ms - m} \times 100\%$$

式中, w 为土壤相对含水量(%), Sw 为土壤水分(%), Ms 为总干重(g), m 为铝盒质量(g)。

1.3.2 土壤贮水量及水分利用效率 根据土壤含水量计算土壤贮水量。依据胡麻播种前、收获后的土壤贮水量和胡麻全生育期降雨量,计算胡麻耗水量,依据产量和耗水量计算胡麻水分利用效率^[21]。

土壤贮水量:

$$S_w = d \times r \times w / 10$$

式中, S_w 为土壤的贮水量(mm), d 为土层厚度(cm), r 为土壤容重(g·cm⁻³), w 为土壤含水量(%).

耗水量:

$$ET = P + \Delta E$$

式中, ET 为耗水量(mm), P 为降水量(mm), ΔE 为胡麻播种前、收获后土壤贮水量的变化(mm)。

水分利用效率:

$$WUE = Y / ET$$

式中, WUE 为作物水分利用效率(kg·hm⁻²·mm⁻¹), Y 为作物籽粒产量(kg·hm⁻²), ET 为耗水量(mm)。

由于试验地平整,地下水位较深,且降雨量少,故未考虑深层渗漏量、毛管上升水和径流量。

1.3.3 胡麻植株氮素含量测定及氮素利用率 各小区随机选取成熟期胡麻植株 20 株,分为秸秆和籽粒两部分,60℃ 分别烘干至恒重后称重。之后粉碎过筛,以浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,半微量凯氏定氮法^[22]

测定秸秆和籽粒的含氮量,计算氮总吸收量和氮素吸收利用率^[23]。

氮总吸收量=胡麻秸秆生物量(kg·hm⁻²)×秸秆氮含量(%) + 胡麻籽粒生物量(kg·hm⁻²)×籽粒氮含量(%)

氮素吸收利用率(ANRE)=(施氮区植株总吸收氮量(kg·hm⁻²)-空白区植株总吸收氮量(kg·hm⁻²)/施氮量(kg·hm⁻²)×100%

1.3.4 收获后农艺性状与产量 胡麻成熟后,按小区单打单收,测定各小区实际产量。每小区随机取样 20 株,进行室内考种,测定株高、分茎数、分枝数、蒴果数、蒴果种子粒数、千粒重、秕粒率等产量构成因子。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 进行数据处理和方差分析,用 Microsoft Excel 2013 和 Origin 2018 进行数据统计和作图。

2 结果与分析

2.1 不同处理胡麻田土壤水分的垂直变化

图 2 表明,不同氮肥、密度处理 0~200 cm 土层土壤含水量因生育时期及土层深度变化趋势有所差异,苗期、青果及成熟期随土层深度增加呈现“先降后升”趋势,含水量变化拐点均出现在 60~80 cm;现蕾期与盛花期含水量呈随土层加深而逐步增加态

势。相同生育时期内,氮肥、密度互作后,含水量变化处理间差异明显,主要表现在苗期~盛花期 0~60 cm 土层中,苗期、现蕾期及盛花期含水量最高处理分别为 N₁D₁、N₀D₂、N₁D₁,较对应时期最低处理 N₀D₁、N₂D₂、N₁D₃ 分别显著高出 9.70%、13.48% 和 59.24%,盛花期后处理间土壤水分含量无显著差异。由此可见,密度、氮肥互作对土壤水分垂直变化的影响主要体现在胡麻生育前期,各处理 0~200cm 土层平均水分含量由低到高依次表现为: N₀D₁ < N₁D₂ < N₀D₃ < N₁D₁ < N₂D₂ < N₀D₂ < N₁D₃ < N₂D₃ < N₂D₁。可见,尽管高氮低密度处理(N₂D₁)具有总体水分保持优势,但在出现含水量显著差异的生育前期中,中氮低密度(N₁D₁)水平也具备适宜的肥水耦合优势,有利于促进胡麻植株旺盛生长。

表 1 各处理氮肥、密度配置实施表

Table 1 Planting density and nitrogen fertilizer of different treatments

处理 Treatment	氮肥/(kg·hm ⁻²) Nitrogen fertilizer	密度/(×10 ⁴ 粒·hm ⁻²) Planting density
N ₀ D ₁	0	450
N ₀ D ₂	0	750
N ₀ D ₃	0	1050
N ₁ D ₁	75	450
N ₁ D ₂	75	750
N ₁ D ₃	75	1050
N ₂ D ₁	150	450
N ₂ D ₂	150	750
N ₂ D ₃	150	1050

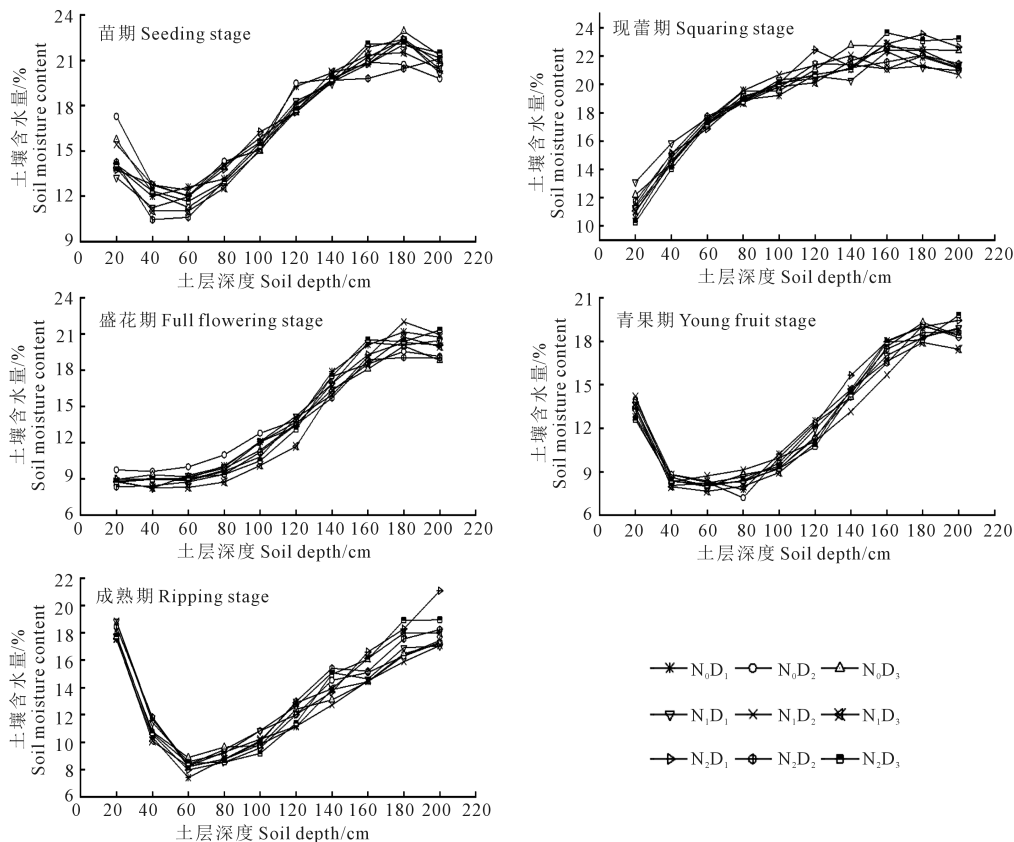


图 2 不同处理胡麻生育期内土壤水分的垂直变化
Fig.2 Vertical change of soil water content during oil flax growth stages under different treatments

2.2 不同处理胡麻田 0~200 cm 土层土壤贮水量变化

图 3 表明,在胡麻整个生长期内,不同密度、氮肥处理下 0~200 cm 土层贮水量变化趋势基本相同,呈现“倒 S”型曲线。苗期、盛花期及青果期 0~200 cm 土壤贮水量均表现为 N₂D₁ 高于其他处理,分别较同时期最低处理 N₀D₁、N₁D₃、N₁D₃ 高出 16.84 mm、26.87 mm 和 14.29 mm,成熟期除低于 N₀D₁ 处理 3.7%外,较其他处理 N₀D₂、N₀D₃、N₁D₁、N₁D₂、N₁D₃、N₂D₂、N₂D₃ 分别高出 6.6%、8.4%、2.5%、5.3%、0.8%、0.2%、0.9%。分时期贮水量未表现出规律性趋势。0~200 cm 土壤平均贮水量则表现为 N₂D₁、N₀D₁ 和 N₀D₂ 间差异不显著,但均显著高于其余处理,分别与最低 N₁D₃ 处理间相差 4.62%、3.98% 和 4.30%。

2.3 不同处理对胡麻产量和产量构成因子的影响

2.3.1 不同处理对胡麻产量构成因子的影响及其与产量相关性 由表 2 可以看出,不同氮肥、密度处理下,有效分茎数、有效分枝数、单株有效硕果数均呈现先增加后下降的趋势,N₁D₂ 处理有效分茎数达到了 0.44,N₁D₃ 处理有效分枝数达到了 22.69。

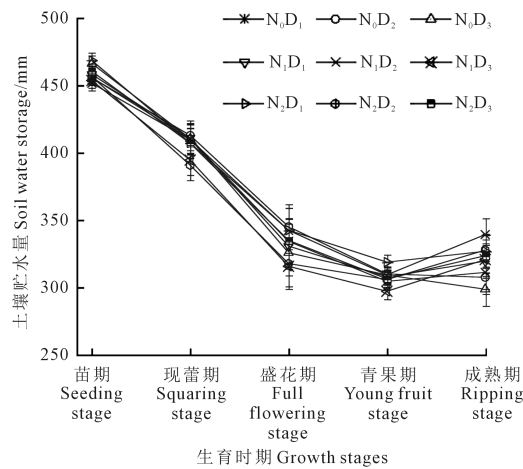


图 3 胡麻生育期内 0~200 cm 土层贮水量变化
Fig.3 Variation of 0~200 cm soil water storage during oil flax growth stages

每果粒数、千粒重无明显变化规律,N₂D₁ 处理千粒重达到 7.56 g,比最低 N₁D₁ 处理高出 9.7%。可见,密度、氮肥互作,分茎数、分枝数受密度影响程度大于施氮量,而千粒重受施氮量影响更明显。结合各产量构成因子与产量间的相关分析可见(图 4),密度、氮肥互作后,籽粒产量与有效分茎数间(0.688^{*})、有效分枝数与单株有效果数间(0.877^{*})均达到了显著相关关系,其余因子及与产量两两之间相关性不明显,高产相应适宜氮肥及密度的选择显著影响分茎数、分枝数及有效果数。

2.3.2 不同处理对胡麻籽粒产量的影响 由表 3 可见,处理间农田耗水量、籽粒产量及水分利用效率均表现出差异性。N₁D₂ 的农田耗水量为 247.70 mm,分别显著高出 N₀D₁、N₀D₂、N₂D₁ 和 N₂D₂ 处理 18.7%、10.6%、8.2% 和 8.1%。N₂D₁ 处理下籽粒产量最高,为 1 802 kg·hm⁻²,与 N₂D₃ 间差异不显著,但较其他处理分别显著高出 23.7%、6.2%、18.8%、16.0%、37.1%、12.4%、13.1%。产量、水分利用效率随施氮量和密度增加呈现先降后升趋势,而处理间变化规律不明显,但最高处理 N₂D₁ 除与 N₂D₃、N₀D₂ 间差异不显著外,均显著高于其他处理。

2.4 不同处理对胡麻水分及氮素利用效率的影响

2.4.1 水分利用效率 如图 5A 所示,同一氮肥量不同密度条件下,在 N₀ 水平下,D₂ 比 D₁、D₃ 水平的水分利用效率分别提高了 8.5%、17.5%,差异达到显著水平;在 N₁ 水平下,D₃ 比 D₁、D₂ 水平的水分利用效率提高了 10.5%、24.1%,且与 D₃ 间差异显著;在 N₂ 水平下,D₁、D₃ 间差异不显著,但分别较 D₂ 水分利用效率显著增加 13.07%、10.20%。在 N₀、N₁、N₂ 不同水平下,水分利用效率最高的 D₂、D₃、D₁ 处理分别达 7.58、6.94 kg·hm⁻²·mm⁻¹ 和 7.87 kg·hm⁻²·mm⁻¹。同一密度不同施氮量条件下(图 5B),在 D₁ 水平,N₂ 较 N₀、N₁ 水平的水分利用效率显著提高

表 2 氮肥密度处理对胡麻产量构成因子的影响

处理 Treatment	有效分茎数 Effective sub-stemming number	有效分枝数 Effective stem branching number	单株有效硕果数 Kernel number per plant	每果粒数 Seed number per kernel	千粒重 1000-grain weight/g
N ₀ D ₁	0.32b	15.16cd	9.80d	7.41abc	7.32ab
N ₀ D ₂	0.24bc	14.93d	10.38cd	6.73b	7.01bc
N ₀ D ₃	0.31b	16.33c	13.44c	7.02ab	7.03bc
N ₁ D ₁	0.29b	22.31abc	14.87bc	7.40abc	6.89c
N ₁ D ₂	0.44abc	16.67c	11.44c	6.29b	7.17bc
N ₁ D ₃	0.40abc	22.69abc	15.53abc	6.96b	7.20b
N ₂ D ₁	0.18cd	16.73c	10.64c	6.58b	7.56abc
N ₂ D ₂	0.09d	17.76bc	12.04c	7.22ab	7.14bc
N ₂ D ₃	0.18cd	15.16cd	8.18d	6.93b	7.43abc

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05),下同。
Note: Different letters in the same column mean significant differences among treatments (P<0.05), the same below.

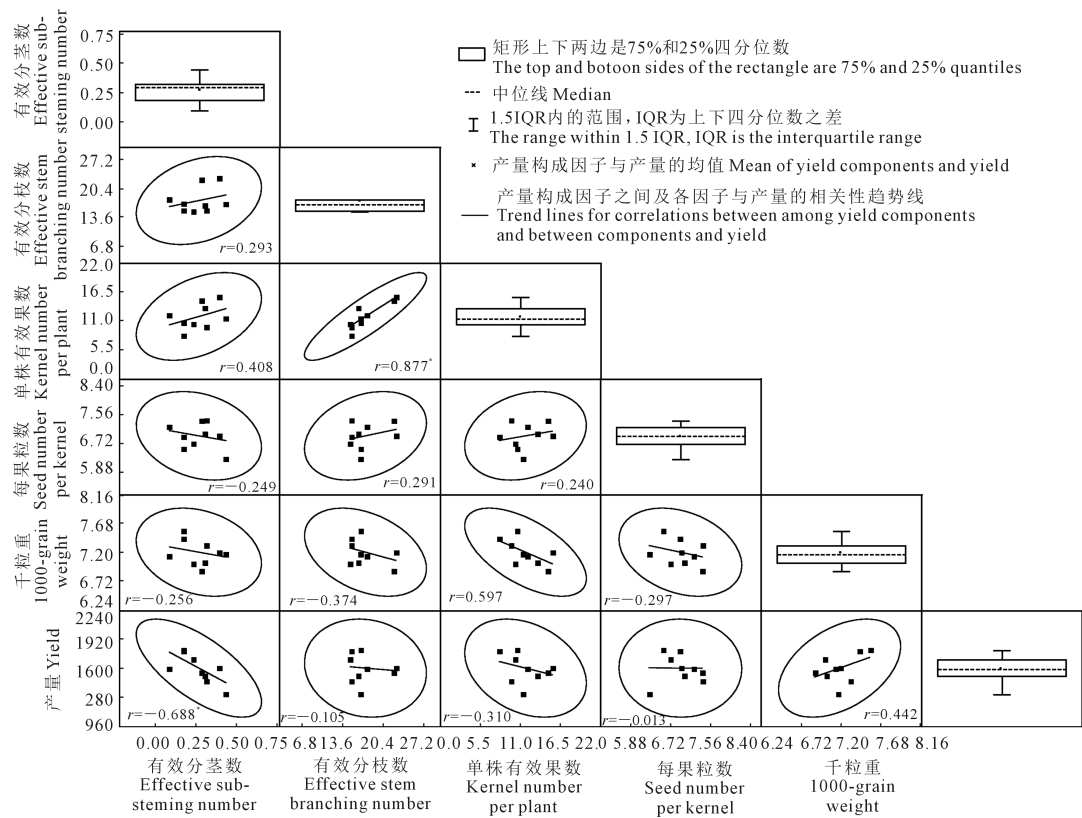


图 4 产量构成因子散点矩阵统计分析图
Fig.4 Statistical analysis of scatter matrix for oil flax yield component factors

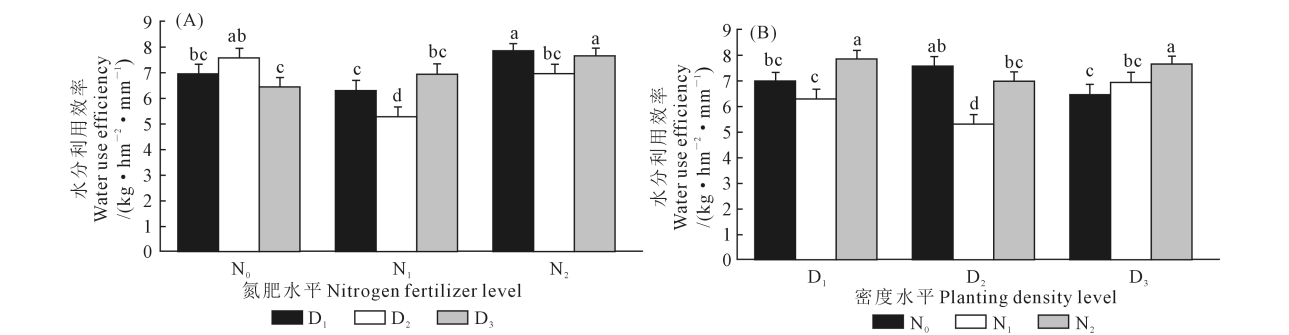
表 3 氮肥密度处理对胡麻籽粒产量和水分利用效率的影响
Table 3 Effects of different planting density and nitrogen on oil flax yield and water use efficiency

处理 Treatment	农田耗水量 Water consumption /mm	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
N ₀ D ₁	208.75 d	1456.75 d	6.98 bc
N ₀ D ₂	224.00 cd	1696.83 b	7.58 ab
N ₀ D ₃	235.95 abc	1516.75 c	6.43 c
N ₁ D ₁	247.20 ab	1553.17 bc	6.28 c
N ₁ D ₂	247.70 a	1314.75 d	5.31 d
N ₁ D ₃	231.00 abc	1602.67 bc	6.94 bc
N ₂ D ₁	228.83 bc	1802.00 a	7.87 a
N ₂ D ₂	229.23 bc	1593.50 bc	6.96 bc
N ₂ D ₃	233.43 abc	1789.75 a	7.67 a

12.7%、20.2%;在 D₂水平下,N₀比 N₁、N₂水平增加了 43.8%、8.9%,且 N₀、N₂ 均显著高于 N 水平;在 D₃水平下,N₂比 N₀、N₁水平的水分利用效率显著提高了 7.6%、9.5%。在 D₁、D₂、D₃不同水平下,对应施氮水平为 N₂、N₀、N₂时获得同密度水平最高水分利用效率,分别为 7.87、7.58 kg·hm⁻²·mm⁻¹和 7.67 kg·hm⁻²·mm⁻¹。可见,密度和氮肥交互处理后均显著

影响胡麻的水分利用效率,其中,N₂D₁处理胡麻水分利用效率具有优势,较其他处理的分别上升了 12.8%、3.8%、22.4%、25.3%、48.2%、13.4%、13.1%、2.6%。水肥互作后,以肥调水、提高水分利用效率效应显著。

2.4.2 氮素利用率 表 4 表明,氮肥水平和种植密度对胡麻氮素吸收量和氮素利用率有显著的影响。胡麻氮素吸收量在相同密度水平下均呈现随施氮量增加而上升的趋势,高氮(N₂)更有利于氮素的吸收,比中氮(N₁)和不施氮(N₀)分别提高 15.7%、82.2%,并与后者间差异显著;但在相同施氮量条件下,则呈现随密度增加而下降趋势,低密度(D₁)获得最高的氮素吸收量。氮素吸收利用率均呈现随施氮量和种植密度增加而下降的趋势,高氮(N₂)比中氮(N₁)处理氮素吸收利用率显著降低 42.0%;高(D₃)、中密度(D₂)平均氮素利用率分别较低密度(D₁)处理显著降低 58.45%和 35.19%。可见,过量施氮虽能增加氮素吸收量,但高氮与增加密度均不利于提高氮素吸收利用率,氮肥、密度交互处理后,中氮(N₁)和低密度(D₁)更有利于氮素利用率的提高。



注:柱上不同字母表示同一氮肥量和密度水平下水分利用效率在 $P<0.05$ 水平差异显著。
Note: Different letters above the bars indicate a significant difference in water use efficiency among treatments ($P<0.05$) same water use efficiency of nitrogen and planting density.

图5 不同处理对胡麻水分利用效率的影响
Fig.5 Effects of water use efficiency under different treatments

表4 氮肥与密度交互对胡麻氮素吸收量及氮素吸收利用率的影响								
Table 4 Effects of nitrogen content and density interaction on nitrogen absorption and ANRE of oil flax								
处理 Treatment	氮素吸收量 Nitrogenabsorption/(kg · hm ⁻²)				氮素吸收利用率 Apparent nitrogen recovery efficiency/%			
	D ₁	D ₂	D ₃	平均 Average	D ₁	D ₂	D ₃	平均 Average
N ₀	43.3b	52.8b	60.9b	52.3b				
N ₁	91.5a	80.9a	74.7b	82.4a	64.3a	37.5a	20.0a	40.6a
N ₂	97.6a	94.7a	93.6a	95.3a	36.2b	27.7b	21.8a	28.6b
平均 Average	77.5a	76.0b	76.4b		50.3a	32.6b	20.9c	

注:最后一行平均值后不同字母表示处理间差异显著,其余数据均为同列数值间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters next to the average values of the last row indicate that there was significant difference between the treatments. Among the rest of the data they mean significant differences between the values in the same column ($P<0.05$).

2.5 密度、氮肥与产量的回归分析

为了准确反映不同密度氮肥处理下胡麻产量随氮肥密度水平变化的规律,探索密度、氮肥与胡麻产量间存在的定量关系,对其进行回归分析,得出密度、氮肥与产量间的回归分析方程为:

$$y = 1947 - 2.3x_1 - 1.3x_2 + 0.03x_1^2 + 0.001x_2^2 - 0.001x_1x_2 \quad (R^2 = 0.55^*)$$

式中, y 为胡麻估计产量, x_1 为试验中实际氮肥量, x_2 为试验中实际密度, R^2 为回归系数,回归模型的参数估计见表5,经检验回归模型达到显著水平($P < 0.05$)。从密度、氮肥与产量间的回归图(图6)可知,密度、氮肥处理与产量之间呈现三维凹面,不同的氮肥密度处理下胡麻产量具有最大值和最小值,最优产量值出现在高氮肥水平,中密度和中氮肥水平下产量具有最小值。为了反映实际产量与预期产量之间的差别,利用回归方程计算预期产量,并得出预期实际产量与实际产量的残差(实际产量-预期产量),见表6。其中N₀D₁、N₀D₃、N₁D₂、N₂D₂处理下实际产量低于预期产量值,N₀D₂、N₁D₁、N₁D₃、N₂D₁、N₂D₃处理下实际产量高于预期产量,其中N₁D₁、N₂D₁、N₂D₃处理具备实际产量优势的同时,也高于预期值,分别高出预期值3.38%、2.46%和1.98%。因此,选择N₂D₁、N₁D₁处理水平在实际胡麻种植中更加高产高效。

表5 模型回归参数估计			
Table 5 Model regression parameter estimation			
参数 Parameter	标准误 Standard error	t 值 t value	P
1947	739.713	2.631	0.078
-2.3	4.425	-0.524	0.637
-1.3	2.059	-0.634	0.571
0.03	0.022	1.254	0.299
0.001	0.001	0.701	0.534
-0.001	0.004	-0.210	0.847

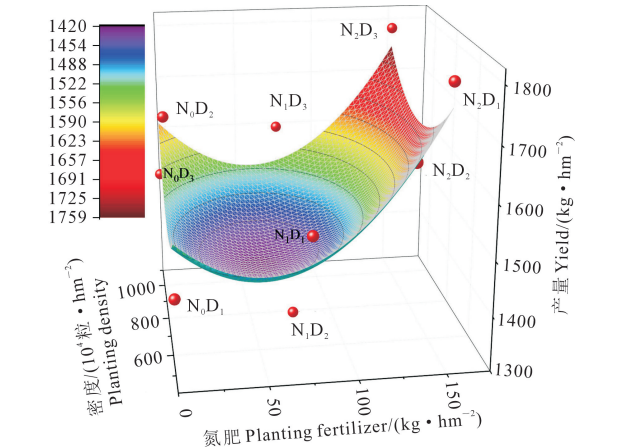


图6 密度、氮肥与产量的回归图
Fig.6 Regression relationship between density, nitrogen fertilizer and yield

表 6 实际产量与预期产量比较
Table 6 Final yield and forecast comparison

处理 Treatment	实际产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	预期产量 Forecast/(kg·hm ⁻²)	残差 Residual
N ₀ D ₁	1456.75	1550.89	-94.14
N ₀ D ₂	1696.83	1500.01	196.82
N ₀ D ₃	1516.75	1619.43	-102.68
N ₁ D ₁	1553.17	1502.37	50.80
N ₁ D ₂	1314.75	1433.43	-118.68
N ₁ D ₃	1602.67	1534.79	67.88
N ₂ D ₁	1802.00	1758.66	43.34
N ₂ D ₂	1593.50	1671.65	-78.15
N ₂ D ₃	1789.75	1754.95	34.80

3 讨论与结论

在旱作农田生态系统中,土壤水分状况直接影响着作物的生长发育和籽粒产量形成。研究认为,水肥之间存在耦合效应,养分不足在很大程度上限制水分作用的发挥,而过量施肥不仅导致肥料的经济效益降低、污染环境的潜势增加,还会造成作物对深层土壤水分的过度消耗^[24-26]。亦有研究表明,适宜的种植密度可优化根系对土壤水分和养分吸收的空间,实现有限水分的最高利用效率^[27]。本研究中,施氮量与密度配合后对土壤水分垂直变化的影响主要体现在胡麻生育前期,土壤含水量处理间变化主要表现在苗期~盛花期 0~60 cm 土层中,苗期、现蕾期及盛花期含水量最高处理分别为 N₁D₁、N₀D₂、N₁D₁,盛花期后,处理间土壤水分含量无显著差异。当季水分运移动态中,适氮(N₁)结合减密(D₁)在保证耕层土壤综合可利用水分的同时,促进植株营养生长阶段的形态建成,此优势效应在生育后期则可能因植株耗水增加、降水减少、土壤蒸散加剧等而有所减弱。这与我们前期研究结果一致^[28]。已有在小麦^[29,30]等作物上的研究也表明,0~60 cm 土层土壤含水量受灌水和降水等影响显著,其下深层水分受影响较小。本试验中,土壤含水量变化拐点均出现在 60~80 cm 土层,表明氮肥密度处理后也具备相应的“以肥调水”效应,由耕层 60 cm 有所下移,这亦与高氮(N₂)和中氮(N₁)水平平均农田耗水量分别高出不施氮水平(N₀)3.56%和 8.71%的结果一致。土壤贮水是作物水分的重要来源,尤其是深层水分的利用程度是提高作物水分利用效率的重要途径^[31-32]。N₂D₁全生育期内 0~200 cm 土壤平均贮水量及在苗期、盛花期及青果期优于其他处理的表现,也证实了这一点。由土壤含水量、贮水量时空变化可见,在密度氮肥因素中,生育前、中期耕层土壤含水量及全生育期贮水量对施氮

量响应更显著,处理组合内,高氮低密度处理(N₂D₁)经历了前期的水分吸收利用损耗后,其总体水分保持优势降低了植株群体的竞争,促进了肥水耦合,为其同化物累积和生殖器官的形成奠定了光合水分基础,有利于胡麻植株旺盛生长。

已有诸多密度、肥料单因素试验对作物水分及氮素利用效率的研究均表明,在一定范围内,产量随种植密度或施肥量的增加呈现单峰曲线。如谢亚萍等^[33]研究表明,在施氮量单因素条件下,氮素利用率随施氮量的增加呈现先增加后降低的趋势,施纯氮 55.2 kg·hm⁻²时,氮素利用率达到 68.63%。刘青林等^[34]认为,当施氮量达到 221 kg·hm⁻²时,春小麦产量与水分利用效率分别达到最大值 6 365 kg·hm⁻²、14.51 kg·hm⁻²·mm⁻¹。本研究中,施氮量与密度互作后,同水平下胡麻平均产量呈现随施氮量和密度增加呈先降后升趋势,未显现适氮与适密组合后的产量优势效应。N₂D₁处理下获得了最高籽粒产量和水分利用效率,二者对施氮水平呈现明显的正效应,增加密度对胡麻产量和水分利用效率并未有显著影响^[35]。而氮素吸收利用率并未呈现出一致趋势,过量施氮虽能增加氮素吸收量,但高氮配合增密并不利于提高氮素吸收利用率,氮肥、密度交互处理后,中氮(N₁)和低密度(D₁)组合更有利用于氮素利用率的提高。这也进一步解释了崔政军^[36]等提出的关于高产、高水分利用率同最优氮素利用率间的矛盾。氮肥过量施用是导致胡麻氮素利用率降低的重要原因之一,过量的氮肥随雨水淋溶、渗漏,旱作条件下作物吸收缓慢;减少种植密度利于提高氮素的吸收量,减少氮素的流失,进而提高胡麻的氮素利用率^[37]。曹秀霞等^[38]在提出胡麻适宜氮肥、密度水平的同时,认为氮肥、密度处理后,密度对产量构成因子影响较大,除株高外,随种植密度的增加,主茎分枝数、单株果数、单株粒数、分茎数逐渐减少。本研究则表明,密度氮肥互作后籽粒产量与有效分茎数间(0.688*)、有效分枝数与单株有效果数间(0.877*)均显著相关,且分茎数、分枝数受密度影响程度大于施氮量,而千粒重受限于施氮量更甚。增大密度不利于产量构成因子中分茎数及分枝数的积累,与曹秀霞等人^[38]结论一致;千粒重因施氮量上升而增加则可能由于氮素水平的上升促进了植株蛋白质与氨基酸代谢,进而提高千粒重,调控产量形成^[39-40],有关胡麻氮肥精准运筹后籽粒产量构成及品质间关系的探索还需进一步深入研究。

本研究通过胡麻产量随密度氮肥水平变化,初

步建立了其三维响应面定量回归模型 ($P<0.05$), 验证了密度氮肥双因素处理后的实际产量同预期产量间的差异, 其中, N_1D_1 、 N_2D_1 、 N_2D_3 处理在具备实际产量优势的同时, 也高于预期值。结合中氮 (N_1) 低密度 (D_1) 处理后胡麻氮肥利用率的充分挖掘, 产量、水分利用效率及水肥耦合对高氮 (N_2) 低密度 (D_1) 处理的优势响应, 均奠定了高产获得的生理基础。因此, 在本试验及相似农田生态类型环境下, 兼顾节本增效和环境安全, 选择施氮量 $75 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、种植密度 $45 \times 10^5 \text{ 粒} \cdot \text{hm}^{-2}$, 在实际胡麻种植过程更加高产高效。同时, 还需结合当地生产条件、土壤肥力、种子质量和环境条件等因素综合考虑。

参 考 文 献:

[1] 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[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 69-75.

[2] Canfield D E, Glazer A N, Falkowski P G. The evolution and future of Earth's nitrogen cycle [J]. Science, 2010, 330(6001): 192-196.

[3] 陈光荣, 高世铭, 张国宏, 等. 种植方式与密度对旱作大豆产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 39-41.

[4] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China-contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, 63(2-3): 117-127.

[5] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.

[6] Raun W R, Jhonson G V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production [J]. Agronomy Journal, 1999, 91(3): 357-363.

[7] 姜丽娜, 刘佩, 齐冰玉, 等. 不同施氮量及种植密度对小麦开花期氮素积累转运的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(2): 131-141.

[8] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 等. 施氮量及种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1343-1353.

[9] 田效琴, 李卓, 刘永红. 施氮量和播种密度对不同熟期油菜干物质质量和产量的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(4): 798-807.

[10] 苏祖芳, 周培南, 许乃霞, 等. 氮肥、密度条件对水稻氮素吸收和产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(4): 281-286.

[11] 王斌, 赵利, 王利民, 等. 胡麻种质资源主要品质性状的分析与评价[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(6): 785-792.

[12] 张仁陟, 李小刚, 胡恒觉. 施肥对提高旱地农田水分利用效率的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3): 221-226.

[13] 党占海, 张建平. 我国亚麻产业现状及发展对策[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004: 161-162.

[14] 索全义, 郝虎林, 索风兰. 氮磷化肥对胡麻产量形成的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2001, (S3): 18-19.

[15] 魏景云, 高炳德, 索全义, 等. 旱地油用亚麻优化施肥的研究[J]. 中国油料作物学报, 1998, (4): 79-83.

[16] 刘德平, 杨树青, 史海滨, 等. 氮磷施肥条件下作物产量及水肥利用效率[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 902-909.

[17] Pageau D, Lajeunesse J, Lafond J. Effect of seeding rate and nitrogen fertilization on oilseed flax production [J]. Canadian Journal of Plant Science, 2006, 86(2): 363-370.

[18] 谢亚萍, 牛小霞, 牛俊义, 等. 钾肥和密度对胡麻干物质及钾积累转运和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 194-200.

[19] 郭秀娟, 冯学金, 杨建春, 等. 不同种植密度和肥料配施对胡麻植株性状和经济产量的效应[J]. 作物杂志, 2017, (2): 135-138.

[20] 刘栋, 马建富, 郭娜, 等. 氮肥与密度互作对胡麻产量及农艺性状的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(6): 14-18, 22.

[21] 邓西平, 山仑, 稻永忍, 等. 密度、施肥对旱地春小麦产量、水分利用效率和籽粒养分含量的补偿效应[J]. 西北植物学报, 2003, 23(11): 1861-1870.

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-267.

[23] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.

[24] 王殿武, 刘树庆, 文宏达, 等. 高寒半干旱区春小麦田施肥及水肥耦合效应研究[J]. 中国农业科学, 1999, 32(5): 62-68.

[25] 王晓峰, 田霄鸿, 陈自惠, 等. 不同覆盖施肥措施对黄土旱塬冬小麦土壤水分的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1105-1111.

[26] 郭胜利, 吴金水, 郝明德, 等. 长期施肥对 NO_3^- -N 深层积累和土壤剖面中水分分布的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 75-78.

[27] 吴海卿, 杨传福. 以肥调水提高水分利用效率的生物学机制研究[J]. 灌溉排水, 1998, 17(4): 6-10.

[28] 吴兵, 高玉红, 高珍妮, 等. 施肥对旱地胡麻耗水特性和籽粒产量的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 188-193.

[29] 孟维伟, 张微, 张永丽, 等. 灌水对不同小麦品种耗水特性和土壤硝态氮运移的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(6): 1123-1129.

[30] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦耗水特性和产量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(9): 1657-1664.

[31] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长及土壤水分利用的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2342-2352.

[32] 安顺清, 刘庚山, 吕厚荃, 等. 冬小麦底墒供水特征研究[J]. 应用气象学报, 2000, 11(S1): 119-127.

[33] 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[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 357-362.

[34] 刘青林, 张恩和, 王琦, 等. 灌溉与施氮对留茬免耕春小麦耗水规律、产量和水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 169-177.

[35] 于显枫, 张绪成, 方彦杰, 等. 减氮追施和增密对全膜覆盖垄上微沟马铃薯水分利用及生长的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(5): 122-134.

[36] 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[J]. 核农学报, 2019, 33(2): 398-411.

[37] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.

[38] 曹秀霞, 安维太, 钱爱萍, 等. 密度和施肥量对旱地胡麻产量及农艺性状的影响[J]. 陕西农业科学, 2012, 58(1): 87-89.

[39] 姚金保, 马鸿翔, 张平平, 等. 施氮量和种植密度对弱筋小麦宁麦 18 籽粒产量和蛋白质含量的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1507-1510.

[40] 张金汕, 董庆国, 方伏荣, 等. 密度和施氮量对啤酒大麦氮素吸收利用及籽粒蛋白质含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(3): 371-378.