

苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响

刘波^{1,2}, 魏全全^{1,2}, 鲁剑巍^{1,2}, 李小坤^{1,2}, 丛日环^{1,2}, 吴礼树^{1,2},
徐维明³, 杨运清³, 任涛^{1,2*}

(1 华中农业大学微量元素研究中心, 湖北武汉 430070; 2 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 湖北武汉 430070;
3 湖北省沙洋县土壤肥料工作站, 湖北沙洋 435400)

摘要:【目的】秋涝是冬油菜生产中的常见限制因子, 本研究通过大田试验研究苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量及氮肥利用率的影响, 以为渍水胁迫下直播冬油菜氮肥合理施用提供理论依据。【方法】选用华油杂 9 号为试验材料, 采用直播栽培方式。两因素裂区试验设计, 主处理为土壤水分状况, 包括排水处理和苗期渍水处理, 副处理为 6 个氮肥水平, 施氮量分别为 0、60、120、180、240 和 300 kg/hm²。研究各试验处理直播冬油菜在苗期、薹期、花期和成熟期的生长状况, 各时期的干物质、氮素累积以及氮肥利用效率, 同时对籽粒产量及其构成因素做了相应调查。【结果】苗期渍水明显抑制了直播冬油菜生长发育和产量形成。相同氮肥水平下, 与排水处理相比, 渍水处理冬油菜各生育期叶片数、叶面积和 SPAD 值均有不同程度下降, 生育期干物质质量降幅为 19.1%~26.5%, 收获指数减少了 5.2 个百分点。渍水处理显著降低了籽粒产量, 减产达 23.6%, 成苗密度和单株角果数下降是引起产量降低的重要原因, 分别下降 7.6% 和 20.4%。此外, 渍水处理明显影响了冬油菜氮素吸收, 渍水处理冬油菜生育期植株氮含量较排水处理下降了 8.0 个百分点, 氮素累积量降幅为 23.2%~32.4%。渍水处理引起了氮肥偏生产力、农学利用率和表观利用率的下降, 降幅分别为 22.8%、20.4% 和 18.6%。氮肥可以缓解苗期渍水造成的产量损失, 并且缓解效应与氮肥投入量存在直接关系。施氮显著提高了冬油菜叶片数、叶面积和 SPAD 值, 增加了冬油菜成苗密度, 提高了冬油菜氮素含量, 改善了群体质量, 进而提高了籽粒产量, 降低了油菜产量的相对受害率 (RIR), 其中产量相对受害率随施氮量增加从 35.3% 下降到 13.8%。高氮量 (240~300 kg/hm²) 水平下各时期干物质质量和氮素累积量的下降幅度显著低于中低施氮量 (0~180 kg/hm²), 其中高氮量水平下平均降幅分别为 9.5% 和 15.0%, 而中低氮水平下的平均降幅分别为 27.6% 和 32.9%。一定范围内增施氮肥对苗期渍水后直播冬油菜生长恢复具有很好的补偿效应。在保证产量 (2500 kg/hm²) 不下降的情况下, 排水处理要比渍水处理节省氮肥 59.2 kg/hm²。【结论】苗期渍水胁迫对油菜生长的抑制不仅作用于渍水期, 其负面效应同样会延伸至整个生育阶段, 最终导致产量损失。施氮可以明显缓解渍害的负面效应, 优化冬油菜群体质量, 实现高产。因此, 合理氮肥用量和实时排水可以达到施氮减渍和排水减氮的双重效果。

关键词: 直播冬油菜; 渍水; 氮肥用量; 干物质积累; 氮素吸收

Effects of waterlogging at the seedling stage and nitrogen application on seed yields and nitrogen use efficiency of direct-sown winter rapeseed (*Brassica napus* L.)

LIU Bo^{1,2}, WEI Quan-quan^{1,2}, LU Jian-wei^{1,2}, LI Xiao-kun^{1,2}, CONG Ri-huan^{1,2}, WU Li-shu^{1,2},
XU Wei-ming³, YANG Yun-qing³, REN Tao^{1,2*}

[1 Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China;
3 Shayang Soil and Fertilizer Work Station, Shayang, Hubei 448200, China]

收稿日期: 2016-02-01 接受日期: 2016-06-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题 (2014BAD11B03); 国家油菜产业技术体系建设专项 (CARS-13); 中央高校基本科研业务费专项 (2662015PY135) 资助。

作者简介: 刘波 (1986—), 男, 山东德州人, 博士, 主要从事作物营养与现代施肥技术研究。E-mail: liubohz@webmail.hzau.edu.cn

* 通信作者 E-mail: rentao@mail.hzau.edu.cn

Abstract: [Objectives] The autumn waterlogging is one of the common constraint factors in winter rapeseed production. In this research, a field experiment was carried out to study effects of water logging at the seedling stage and nitrogen (N) application on seed yields and N use efficiency of direct-sown winter rapeseed, to provide a theoretical foundation for reasonable utilization of N fertilizer in direct-sown winter rapeseed under the waterlogging stress. **[Methods]** The field experiment was conducted by using a local major rapeseed cultivar, Huayouza 9. Direct-sowing was the main cultivation pattern. A split-plot experiment was designed, and the main plots were soil water conditions which consisted drainage treatment and waterlogging treatment at the seeding stage and N application rates were sub-plots at six levels, 0, 60, 120, 180, 240 and 300 kg/hm². Growth characteristics, dry matter and N accumulation, and N utilization were studied at the seedling, budding, flowering and maturity stage, meanwhile, the yield and its components were investigated. **[Results]** The growth of rapeseed and yield were obviously inhibited by waterlogging at seedling stage. Compared with the drainage, waterlogging significantly reduced the number, area and the SPAD values of leaves at different degrees under the same N levels. The dry matter amounts were reduced by 19.1%–26.5%, and the harvest indices were decreased by 5.2 percentage points after the waterlogging. The seed yield was significantly decreased by 23.6% under the waterlogging stress, and the decreased seed yield resulted from a decrease in density at the five leaf stage and the number of siliques per plant, which were reduced by 7.6% and 20.4%, respectively. Moreover, the N content of the plants was decreased by 8.0 percentage points, the N accumulation amounts were reduced by 23.2%–32.4%, and the N partial factor productivity (PFP_N), N agronomy efficiency (AE_N) and N recovery efficiency (RE_N) were declined by 22.8%, 20.4% and 18.6% under the waterlogging stress, respectively. Suitable nitrogen application could alleviate the effect of the waterlogging on the growth and yield of winter rapeseed, and there was a direct relationship between the responses of the yield to the waterlogging stress and N input. The N application significantly enhanced leaf number, leaf area and the SPAD value of leaves, increased density, N content, population quality and the yield, reduced the RIR (relative damage percent) of rapeseed yield which declined from 35.3% to 13.8% with the increment of N application. The decreases of the dry matter and N accumulation amounts were alleviated by the N application under high N levels range from 240 to 300 kg/hm² and decreased by 9.5% and 15.0%, respectively, while they were decreased by 27.6% and 32.9% under the middle or low N levels range from 0 to 180 kg/hm². Therefore, under a certain amount of N fertilization, increasing the N rate could show compensation effect on direct-sown winter rapeseed growth and recovery. Compared with the waterlogging treatment, 59.2 kg/hm² of N fertilizer was reduced in the drainage treatment. **[Conclusions]** The inhibiting effect of the waterlogging on rapeseed not only affected the seedling stage, but also impacted other growth stages, and eventually led to the yield loss. The N application could increase the grain yield to alleviate the negative effects by optimize population quality for rapeseed under the waterlogging stress. So, suitable N fertilization rate and real-time drainage would be feasible and realizable with obtaining on both waterlogging resistance by N rate and N reduction by drainage.

Key words: direct-sown winter rapeseed; waterlogging; N application rate; dry matter accumulation; N uptake

冬油菜是长江流域的主要冬季作物, 常年种植面积和产量占全国的 85% 左右^[1], 该区域油菜栽培上主要采用稻油或稻稻油为主的水旱轮作模式, 作物系统的水旱交替轮换会引起土壤系统季节性的干湿交替变化^[2], 稻田下层土壤黏重压实, 地下水位较高, 导致油菜种植季渍害风险的增加^[3]。同时, 冬油菜作为旱地作物耐渍性较差, 长江流域受季风气候的影响, 秋冬季阶段性持续降水偏多, 常常造成农

田积水, 土壤湿度增大, 渍水情况时有发生^[4]。当前受品种、劳动力和生产水平等因素影响, 油菜栽培方式发生了重大转变, 直播逐渐成为油菜种植的重要发展方式^[5], 直播油菜种植使得前后季作物茬口矛盾凸显, 水稻收获后空余时间缩短, 不能有效降低农田土壤含水量, 进一步加剧了土壤渍水的风险。苗期是直播冬油菜群体发展的重要时期, 植株营养生长及抗性 with 后期产量形成存在着密切关系, 因此

苗期也是油菜渍害的敏感时期^[6-7]。大量研究表明,渍水直接影响了油菜植物生长、生理指标以及营养代谢吸收,进而影响了其生长状况和产量^[7-9],渍害已成为油菜增产和稳产的重要限制因子。

冬油菜种植中开沟厢作可以有效排出或落干土壤水分,达到排水减渍的效果。合理氮肥施用对冬油菜生长和产量具有显著的调控作用^[10-11],氮素不仅可以作为营养元素提高作物产量,而且还能作为刺激因子调控内源激素水平及各种激素间的平衡,增强作物的抗逆性^[12]。目前关于渍水对油菜生长及生理过程的影响已开展了较多的研究,但是对于直播冬油菜菜籽萌发和发育条件下渍水危害程度并不十分清楚,同时对于缓解渍害从而保证油菜稳产、增产所引起的施氮量改变方面的研究相对不足,限制了“施氮减灾”在生产中的应用,为此,本文研究了苗期渍水和排水处理下氮素供应对直播冬油菜产量和氮肥利用率的影响,以期对直播冬油菜苗期逆境生态条件下氮肥管理提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

2012 年 9 月~2013 年 5 月在湖北省沙洋县曾集

镇(30°43' N、112°18' E)布置田间试验,试验田块耕层土壤(0—20 cm)基本理化性状为 pH 6.9、有机质 19.7 g/kg、全氮 1.4 g/kg、碱解氮 133.4 mg/kg、速效磷 16.3 mg/kg、速效钾 166.2 mg/kg。供试油菜品种为华油杂 9 号,前茬作物为水稻。直播冬油菜于 2012 年 9 月 30 日播种,播种量为 3.75 kg/hm²,所有处理于 2013 年 5 月 12 日收获,油菜生育期为 224 天。

1.2 试验设计

采取裂区试验设计,主处理为排水和苗期渍水两种土壤水分状况(表 1);副处理设 6 个氮肥用量水平,分别为 0、60、120、180、240 和 300 kg/hm²,每个处理 3 次重复,完全随机区组排列,小区面积为 20 m²。

直播冬油菜氮肥 40% 作基肥,追肥分别在油菜 5 叶期追施氮肥 20%,越冬期追施氮肥 40%,基肥撒施于地表后旋耕,追肥直接表施。各处理的磷钾硼肥用量相同,分别为 P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm² 和硼砂 15 kg/hm²,所有肥料均作基肥一次性施用,均撒施于地表后旋耕。供施肥料品种分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%)、氯化钾(含 K₂O 60%)和硼砂(含 B 12%)。

除土壤水分状况和施肥措施不同外,其他田间管理均与当地农民习惯保持一致。

表 1 田间试验土壤水分处理措施

Table 1 Details of treatment in the field experiments

土壤水分状况 Soil water condition	正常水分 Drainage treatment	渍水处理 Waterlogging treatment
2012 年 9 月 23 日开始布置试验小区,设置小区宽度为 1.6 m,长度为 12.5 m,此时田间根层土壤依然保持湿润状态 Trial plots (1.6 m × 12.5 m) were arranged on September 23 rd , with moist state in the soil of root layer.	小区两侧开 30 cm × 40 cm 厢沟用于田间水分侧渗,播种时土壤含水量维持在 75% 左右,此为正常水平 Ditches (30 cm × 40 cm) were arranged at both sides of the plot for side leaching. Soil moisture maintained at 75% before sowing	小区两侧预留 30 cm 宽厢沟,处理结束后再开沟,避免水分侧渗,播种时土壤含水量为 85% 左右,播种后一周左右恢复至正常水平 Ditches (30 cm in width) were reserved at both sides of plot to avoid side leaching. Soil moisture maintained at 85% till sowing. Soil moisture was returned to normal level about a week after sowing.
第 1 次降水出现在 2012 年 10 月 15 日至 16 日(即油菜萌发出苗期),降水量为 36.9 mm,厢面出现少量积水 1st precipitation (36.9 mm) occurred on October 15 th –16 th during seed germination. Plot surface was slightly waterlogged.	水分持续 1 d 后落净,土壤含水量达到 95% 以上并持续 2 d,通过侧漏逐渐恢复到正常水平 Soil moisture reached above 95% for 2 days and came back to normal through side leaching gradually.	水分持续 3 d 后落净,此时土壤含水量达到 95% 以上并持续 6 d,主要通过侧漏和蒸发逐渐恢复到正常水平 Soil moisture reached above 95% for 6 days and came back to normal level through side leaching and evaporation.
第 2 次降水出现在 2012 年 10 月 26 日至 29 日(即油菜 4~5 叶期),日降水量 50.0 mm,厢面出现明显积水 2nd precipitation (50.0 mm) occurred on October 26 th –29 th (4–5 leaves unfolded stage). Soil surface was waterlogged.	水分持续 2 d 后落净,土壤含水量达到 95% 以上并持续 4 d,后续恢复到正常水平 Soil moisture reached above 95% for 4 days and came back to normal level subsequently.	水分持续 5 d 后落净,土壤含水量达到 95% 以上并持续 10 d,后续恢复到正常水平。2013 年 1 月 15 日,挖开该处理小区两侧预留厢沟,恢复到和排水处理相同的小区设置 Soil moisture reached above 95% for 10 days and came back to normal level subsequently. On January 15 th in the next year, the reserved ditch was opened at both sides of the plot and return the plot arrangement to the drainage treatment.

1.3 测定项目和方法

土壤样品在油菜基肥施用前采集, 整个田块均匀布点, 取 0—20 cm 耕层土壤, 风干磨细过筛, 测定土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾^[13]。

冬油菜成苗密度调查, 于油菜五叶期(播种后 45 d) 每试验小区统计 1 m² 样方株数。冬油菜生育期内对其个体生长指标进行田间调查, 分别于苗期(播种后 110 d)、薹期(播种后 140 d)、花期(播种后 172 d), 选取 20 株与本小区油菜长势一致的植株, 调查叶片数(完全展开叶)、叶面积^[14](通过测定所选叶片的叶长和叶宽来计算叶面积, 其中叶柄最下一个裂片基部到叶尖的距离定为叶长, 垂直中脉的最大宽度定为叶宽)和叶片 SPAD 值(选取沿主茎自上而下的顶 4 完全展开叶, 从叶片基部开始根据叶片长度划分为基部、中部和顶部, 各占 1/3, 测定 SPAD 值)。在成熟期(播种后 224 d) 选取小区中间密度均匀的 1 m² 样方调查油菜产量构成因素, 调查项目主要包括单株角果数、角粒数和千粒重。

分别在播种后 110、140、172 和 224 d 取样, 选取小区中间位置 0.36 m² 样方植株样, 取样时, 沿植株根茎结合处剪除根系, 苗期和薹期将植株分为茎和叶, 花期分为茎、叶和花, 成熟期分为茎秆、角壳和籽粒, 将取回的样品清洗后于 105℃ 杀青 30 min, 60℃ 烘干至恒重后, 称重、粉碎、混匀, 采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消化^[13], 连续流动分析仪(德国 SEAL, AA3) 测定油菜地上部各器官氮含量。成熟期各小区单打单收, 计产。

1.4 氮肥肥效模型和适宜用量的确定

线性加平台模型^[15]:

$$y = a + bx \quad (x \leq C)$$

$$y = P \quad (x > C)$$

式中, y 为油菜籽粒产量 (kg/hm²), x 为氮肥用量 (kg/hm²), a 为截距, b 为回归系数, C 为直线和平台的交点, P 为平台产量 (kg/hm²)。

1.5 参数计算与统计分析

有关参数计算参考 Cassman 等^[16] 和彭少兵等^[17] 计算方法。

地上部氮素累积量 (Shoot N accumulation, kg/hm²) = 地上部干物质质量 × 地上部干物质含氮量;

氮肥偏生产力 (N partial factor productivity, PFP_N, kg/kg N) = 施氮处理作物产量/氮肥施用量;

氮肥农学利用率 (N agronomy efficiency, AE_N, kg/kg N) = (施氮处理作物产量 - 不施氮处理作物产

量)/氮肥施用量;

氮肥表观利用率 (N recovery efficiency, RE_N) = (施氮处理作物地上部氮素累积量 - 不施氮作物地上部氮素累积量)/氮肥施用量 × 100%;

相对受害率 (Relative damage percent, RIR) = (对照区测定值 - 处理区测定值)/对照区测定值 × 100%;

采用 Microsoft Excel 2010 软件计算和处理试验数据, 用 SPSS 17.0 进行数据统计分析, 用 LSD 法检验处理间 $P < 0.05$ 水平的差异显著性, 并利用 SAS 软件进行线性加平台肥效模型的拟合分析, 采用 Origin 8.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜生长发育的影响

苗期渍水和氮肥用量对冬油菜各时期生长发育均有显著影响(表 2)。渍水明显抑制了油菜生长发育, 相同氮肥水平下, 与排水处理相比, 冬油菜五叶期渍水处理成苗密度从 65.0 plant/hm² 减少到 60.0 plant/hm², 降低了 7.6%。渍水处理在冬油菜苗期、薹期和花期的叶片数、叶面积和 SPAD 值较排水处理均有不同程度下降, 其中叶片数降幅分别为 14.9%、10.7% 和 13.1%, 叶面积降幅分别为 28.6%、25.4% 和 22.0%, SPAD 值降幅分别为 14.7%、3.6% 和 0.4%, 其中叶片数和叶面积在中低氮 (0~180 kg/hm²) 水平下达到显著差异, 但高氮 (240~300 kg/hm²) 水平下无显著差异, 而 SPAD 值只有在苗期施氮 0~120 kg/hm² 下具有显著差异, 超过 120 kg/hm² 下无显著差异, 并且生育中后期各施氮处理亦无显著影响。同一水分处理下, 与不施氮相比, 施氮明显促进了各时期油菜生长, 整体上随着施氮水平提高呈现增加趋势。

2.2 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量和产量构成因素影响

表 3 结果表明, 苗期渍水和氮肥用量对冬油菜产量均有极显著影响。相同氮肥水平下, 与排水处理相比, 渍水处理表现为减产效应, 减产达 23.6%。施氮 0、60、120、180、240 和 300 kg/hm² 油菜产量 RIR 分别为 35.3%、31.1%、26.0%、21.4%、13.7% 和 13.8%。相同水分条件下, 氮肥施用具有一定的增产作用, 籽粒产量随施氮水平提高呈增加趋势, 但在施氮 240 和 300 kg/hm² 处理间无显著差异。

表 2 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜生长发育的影响

Table 2 Effects of the waterlogging at the seedling stage and N application on growth of direct-sown winter rapeseed

土壤水分处理 Soil water condition	氮肥用量 N rate (kg/hm ²)	成苗密度 PD	单株叶片数 (No./plant) No. of leaves per plant			叶面积 (cm ²) Leaf area			SPAD		
			苗期 SS	薹期 BS	花期 FS	苗期 SS	薹期 BS	花期 FS	苗期 SS	薹期 BS	花期 FS
			渍水处理 Water logging	0	48.1 c*	2.7 d**	6.0 d**	6.5 e**	5.6 e**	14.2 d**	8.8 d**
	60	57.4 b*	4.3 c**	7.5 c**	8.3 d**	12.3 d**	25.4 c**	15.7 c**	29.4 c*	45.2 c ^{ns}	48.2 b ^{ns}
	120	60.2 ab*	5.3 b**	8.3 bc**	9.8 c**	22.4 c**	36.8 b**	33.2 b*	36.8 b*	48.3 b ^{ns}	50.0 ab ^{ns}
	180	63.9 a ^{ns}	5.4 b*	8.4 b*	11.3 b*	29.5 b*	45.0 b*	37.1 b*	40.2 ab ^{ns}	49.1 b ^{ns}	51.4 ab ^{ns}
	240	64.8 a ^{ns}	6.2 a ^{ns}	9.8 a ^{ns}	12.1 ab ^{ns}	40.1 a*	55.1 a ^{ns}	45.6 a ^{ns}	42.0 ab ^{ns}	52.1 a ^{ns}	53.5 a ^{ns}
	300	65.7 a ^{ns}	6.4 a ^{ns}	9.9 a ^{ns}	12.8 a ^{ns}	41.3 a*	59.6 a ^{ns}	45.9 a ^{ns}	44.0 a ^{ns}	54.3 a ^{ns}	53.5 a ^{ns}
排水处理 Drainage	0	53.7 c	3.7 d	7.2 e	8.5 e	9.0 d	21.2 d	13.4 e	27.5 c	43.1 d	42.7 d
	60	63.0 b	5.1 c	8.3 d	10.2 d	18.1 c	34.1 c	21.2 d	40.1 b	47.0 c	48.4 c
	120	66.7 a	6.3 b	9.3 c	11.3 cd	35.8 b	53.4 b	39.6 c	44.1 a	49.4 bc	50.4 bc
	180	68.5 a	6.3 b	9.7 bc	12.1 bc	40.2 b	58.2 b	46.5 b	45.3 a	52.1 ab	52.2 ab
	240	68.5 a	6.8 ab	10.4 ab	13.2 ab	49.5 a	69.2 a	53.2 a	44.2 a	53.3 a	54.5 a
	300	69.4 a	6.9 a	10.8 a	13.8 a	50.6 a	74.8 a	58.5 a	46.3 a	53.9 a	53.2 a
方差分析 ANOVA											
土壤水分 Soil water (W)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns
氮肥用量 N rate (N)		**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
W × N		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注 (Note): PD—Plant number per square mete; SS—Seedling stage; BS—Budding stage; FS—Flowering stage; 不同小写字母表示同一土壤水分条件下处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters mean significantly different under the same soil water condition at $P < 0.05$; 上标 *、** 分别表示相同氮水平下不同水分处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著, 上标 ns 则表示不同水分处理间差异不显著 Superscript * and ** indicate the significant difference at the 0.05, 0.01 levels, and superscript ns indicates no significant difference between different soil water conditions under the same N treatment. ns—No signifiant difference; * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$.

从表 3 可以看出, 产量构成因素和收获指数同样受苗期渍水和氮肥双重影响。相同施氮水平下, 渍水处理单株角果数显著低于排水处理, 从 86.7 个减少到 69.0 个, 降低了 20.4%。而渍水处理对每角粒数和千粒重则无明显影响。不同土壤水分条件之间油菜收获指数存在明显差异, 渍水处理冬油菜收获指数较排水处理下降 5.2 个百分点。施氮显著增加了油菜单株角果数, 且随着施氮量增加而增加, 角粒数和千粒重并无显著差异。收获指数随施氮量增加表现为先升高后下降的趋势, 施氮 120 kg/hm² 时达到最大。

2.3 苗期渍水和排水处理下氮肥适宜用量

采用线性加平台氮肥肥效模型对苗期渍水和排水处理油菜籽粒产量和相应氮肥用量进行拟合 (图 1), 两模型均达到极显著水平。根据氮肥肥效模型推算出两种土壤水分状况下油菜氮肥适宜用量, 渍水

处理对应的适宜施氮量为 233.8 kg/hm², 排水处理为 207.5 kg/hm², 理论产量分别为 2503.6 kg/hm² 和 2901.3 kg/hm²。在保证产量基本不下降的情况下, 若实现目标产量 2500.0 kg/hm², 排水处理要比渍水处理节约氮肥 59.2 kg/hm²。

2.4 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜干物质质量的影响

干物质质量是群体数量和个体质量的综合反映, 同时也是产量形成的物质基础。从图 2 可以看出, 苗期渍水和氮肥对冬油菜各时期干物质质量均有极显著影响, 相同氮肥水平下, 渍水显著降低了冬油菜各时期干物质质量, 降幅达 19.1%~26.5%, 且中低氮量和高氮量水平下降幅度表现出显著差异, 在中低氮水平下, 渍水处理在苗期、薹期、花期和成熟期的干物质质量相比于排水处理分别降低了 35.5%、24.5%、24.2% 和 25.9%, 平均降幅为 27.6%, 而高

表 3 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜产量构成因素的影响

Table 3 Effect of the waterlogging at the seedling stage and N application on grain yield and yield components of direct-sown winter rapeseed

土壤水分状况 Soil water condition	氮肥用量 (kg/hm ²) N rate	单株角果数 (No./plant) Pod number	角粒数 (No./pod) Seed number	千粒重 (g) 1000-seed weight	产量 (kg/hm ²) Yield	收获指数 (%) Harvest index
渍水处理 Waterlogging	0	12.3 d [*]	22.0 a ^{ns}	2.85 a ^{ns}	192 e ^{**}	24.9 d [*]
	60	49.1 c [*]	21.8 a ^{ns}	2.75 a ^{ns}	802 d ^{**}	28.0 c [*]
	120	55.7 c [*]	23.3 a ^{ns}	2.65 a ^{ns}	1490 c ^{ns}	33.6 a [*]
	180	86.8 b [*]	22.3 a ^{ns}	2.77 a ^{ns}	1915 b ^{ns}	33.0 ab [*]
	240	103.1 a ^{ns}	22.4 a ^{ns}	2.79 a ^{ns}	2478 a ^{ns}	32.4 b ^{ns}
	300	107.0 a ^{ns}	22.5 a ^{ns}	2.72 a ^{ns}	2529 a ^{ns}	32.5 b ^{ns}
排水处理 Drainage	0	19.7 d	21.3 a	2.89 a	298 e	27.7 d
	60	63.9 c	22.0 a	2.84 a	1164 d	29.5 c
	120	87.6 b	22.0 a	2.67 a	2015 c	35.1 a
	180	100.7 b	22.9 a	2.82 a	2437 b	34.2 ab
	240	122.7 a	22.6 a	2.80 a	2870 a	33.9 ab
	300	125.4 a	22.4 a	2.69 a	2932 a	33.8 b

方差分析 ANOVA

土壤水分 Soil water (W)	**	ns	ns	**	**
氮肥用量 N rate (N)	**	ns	ns	**	**
W × N	ns	ns	ns	ns	ns

注 (Note): 数据后不同小写字母表示同一土壤水分条件下处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters are significantly different under the same soil water condition at $P < 0.05$ level; 上标 *, ** 分别表示相同氮水平下不同水分处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著, 上标 ns 则表示不同水分处理间差异不显著 Superscript * and ** indicate the significant difference at the 0.05, 0.01 levels, and superscript ns indicates no significant difference between different soil water conditions under the same N treatment. ns—No significant difference; * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$

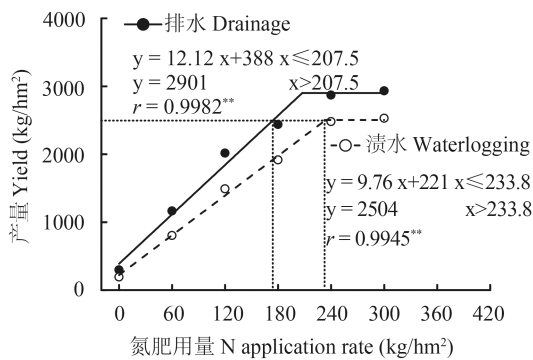


图 1 不同土壤水分状况下氮肥效应方程

Fig. 1 Seed yield response to N fertilization under different soil water conditions

氮水平下分别降低了 8.6%、8.2%、11.7% 和 9.6%，平均降幅为 9.5%。施氮有利于提高两种土壤水分状况下的干物质累积，施氮量低于 180 kg/hm² 时冬油菜干物质累积量随施氮量增加而显著升高；高于该施氮量时，则随施氮量增加差异不显著。

2.5 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜氮含量的影响

由图 3 可以看出，冬油菜氮含量随着生育进程推进呈降低趋势，苗期渍水和氮肥用量显著影响了冬油菜各时期氮素含量，渍水明显抑制了冬油菜氮素养分的吸收，与排水处理相比，渍水处理冬油菜各时期氮素含量平均降低了 8.0 个百分点，其中冬油菜花期及花前，中低氮水平下两者达到显著水平，而苗期施氮 180 kg/hm² 时无显著差异，成熟期两者亦无显著差异。氮肥施用明显增加了两种土壤水分状况下冬油菜氮素含量，且随施氮量增加呈上升趋势，施氮量超过 180 kg/hm² 时无显著差异。

2.6 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜氮素累积量的影响

从油菜各生育期氮素累积量(图 4)可以看出，与干物质类似，冬油菜氮素累积量受到苗期渍水和施氮的显著影响，相同氮肥水平下，不同土壤水分状

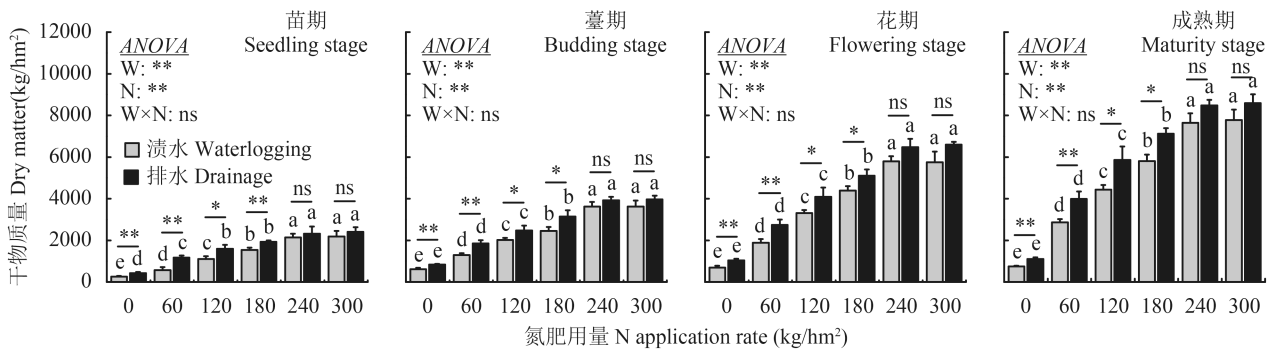


图 2 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜干物质量的影响

Fig. 2 Dry matter of direct-sown winter rapeseed as affected by the N application under the waterlogging at the seedling stage

[注 (Note) : 同一土壤水分条件下不同柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理两个柱子上的符号表示两种土壤水分之间的差异显著性, ns、*和**分别表示无显著差异及在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Under the same soil water condition, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; Under the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between soil water conditions, * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, and ns indicates no significance.]

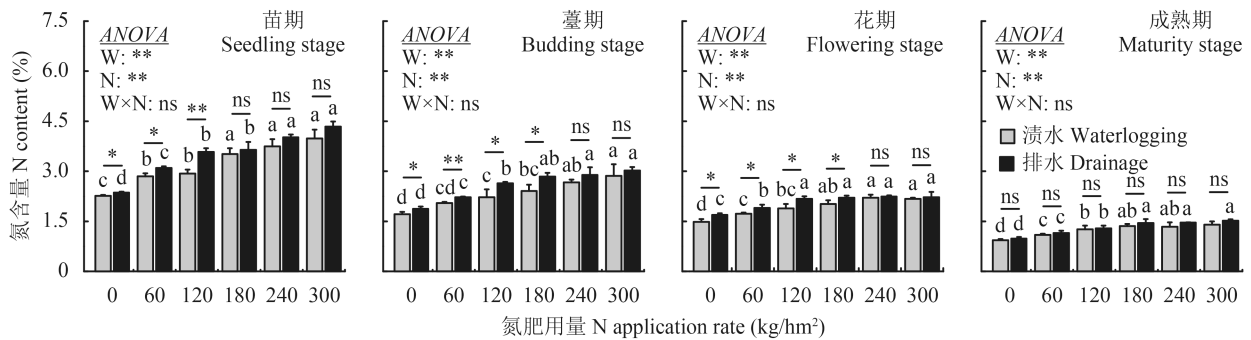


图 3 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜氮含量的影响

Fig. 3 N content of rapeseed affected by the N application under the waterlogging at the seedling stage

[注 (Note) : 同一土壤水分条件下不同柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理两个柱子上的符号表示两种土壤水分之间的差异显著性, ns、*和**分别表示无显著差异及在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Under the same soil water condition, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; Under the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between soil water conditions, * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, and ns indicates no significance.]

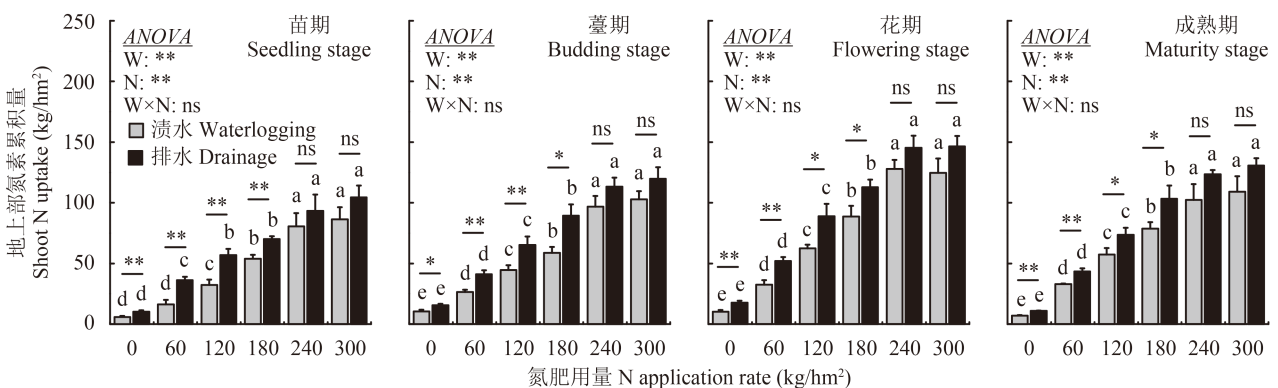


图 4 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜地上部氮素累积量的影响

Fig. 4 Shoot N uptake of rapeseed affected by N application under waterlogging at the seedling stage

[注 (Note) : 同一土壤水分条件下不同柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); 同一处理两个柱子上的符号表示两种土壤水分之间的差异显著性, ns、*和**分别表示无显著差异及在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Under the same soil water condition, the different lowercases above the bars are significantly different at $P < 0.05$; Under the same treatment, the symbols above bars indicate the significant differences between soil water conditions, * indicates $P < 0.05$, ** indicates $P < 0.01$, and ns indicates no significance.]

况下冬油菜氮素累积量存在明显差异, 渍水处理冬油菜各时期氮素累积量相比于排水处理降低 23.2%~32.4%, 且中低氮水平下渍水处理冬油菜各时期氮素累积量分别降低了 40.9%、31.8%、32.4% 和 26.5%, 平均降幅为 32.9%, 而高氮水平下分别降低了 15.4%、14.4%、13.5% 和 16.8%, 平均降幅为 15.0%。氮肥施用有利于冬油菜氮素累积量的增加, 渍水处理和排水处理均表现出相同规律, 氮素累积量随施氮量增加而增加, 超过 180 kg/hm² 时无明显变化。

2.7 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜氮肥利用率的影响

通过氮肥偏生产力、农学利用率和表观利用率来表征苗期渍水和施氮对油菜氮肥利用率的影响(表 4)。相同氮肥水平下, 渍水处理冬油菜氮肥利用率明显低于排水处理, 其中, 氮肥偏生产力和氮肥

农学利用率分别从 14.3 kg/kg 和 12.0 kg/kg 下降到 11.0 kg/kg 和 9.6 kg/kg, 降幅分别为 22.8% 和 20.4%, 氮肥表观利用率从 49.0% 减小到 39.8%, 降幅为 18.6%, 并且中低氮水平下氮肥利用率的降幅显著高于高氮水平。随着施氮量的增加, 渍水和排水处理氮肥偏生产力、农学利用率和表观利用率均表现为降低的趋势。

3 讨论

3.1 苗期渍水对直播冬油菜产量的影响

研究表明, 油菜苗期渍水显著降低了油菜籽粒产量^[9, 18]。而渍水对产量造成损失的关键因素取决于发生渍害生育期、渍水强度以及持续时间^[19]。宋丰萍等^[9]研究发现, 苗期渍水 10 d, 产量无显著下降, 而当渍水超过 20 d, 产量降幅达 30% 左右。Zhou 等^[18]研究也证实, 苗期渍水 30 d 后, 相比对照处理, 产量下降 21.3%。前述研究主要从油菜五叶期进行, 相当于育苗移栽的苗龄, 渍水处理也主要以控水淹没为主。实际生产中, 直播和移栽油菜栽培方式和生产特点存在着很大差异, 直播油菜没有相对温和的苗床, 苗期生长发育完全暴露在自然状态下, 对环境的敏感性明显增大。在稻油轮作中, 水稻收获后土壤通常维持了相对较高的含水量, 而此时(9月下旬到10月中上旬)长江流域冬油菜种植区域往往伴随大量的降雨, 渍水的影响贯穿了菜籽播种到五叶期, 其不仅影响了油菜苗期的生长, 同样影响油菜的萌发和出苗, 因此本研究以水稻收获后土壤相对较高的含水量和降雨复合形成的渍水为研究重点, 契合目前油菜生产的实际。直播油菜个体发育较差, 单株产量低, 产量形成主要依靠群体优势^[20]。本研究表明, 苗期渍水可以显著降低直播冬油菜成苗密度, 加之渍水油菜生育后期单株角果数的显著减少, 削弱了冬油菜群体效应, 导致减产, 与排水处理相比, 籽粒产量下降 23.6%。

苗期渍水不仅抑制油菜苗期的生长, 其负面效应甚至可以延伸到整个生育时期。植物光合能力是决定产量形成的重要参数^[21]。本研究发现, 苗期渍水减少了油菜叶片数, 降低了植株叶面积和 SPAD 值, 显著降低了“源”的光合能力, 不利于光合生产, 导致油菜各生育期地上部干物质累积的下降。同时, 渍水胁迫下收获指数的降低限制了光合产物向籽粒的供应和转运, 阻碍了“库”的形成和生长^[22], 从而进一步影响产量形成。李玲等^[7]和张树杰等^[8]对苗期渍水后冬油菜生长和生理特性的研究表明, 渍

表 4 苗期渍水和氮肥用量对直播冬油菜氮肥利用率的影响

Table 4 Effects of the waterlogging at the seedling stage and the N application on N use efficiencies of direct-sown winter rapeseed

土壤水分状况 Soil water condition	氮肥用量 N rate (kg/hm ²)	氮肥偏 生产力 PFP _N (kg/kg)	氮肥农学 利用率 AE _N (kg/kg)	氮肥表观 利用率 RE _N (%)
渍水处理 Waterlogging	60	13.4 a ^{**}	10.2 a [*]	43.4 a
	120	12.4 a [*]	10.8 a [*]	42.1 a [*]
	180	10.6 b ^{**}	9.6 a [*]	39.9 ab [*]
	240	10.3 b ^{ns}	9.5 a ^{ns}	39.8 ab ^{ns}
	300	8.4 c ^{ns}	7.8 b ^{ns}	34.1 b ^{ns}
排水处理 Drainage	60	19.4 a	14.4 a	54.2 a
	120	16.8 b	14.3 a	52.3 ab
	180	13.5 c	11.9 b	51.4 ab
	240	12.0 c	10.7 b	47.0 b
	300	9.8 d	8.8 c	40.0 c
方差分析 ANOVA				
土壤水分 Soil water (W)		**	**	**
氮肥用量 N rate (N)		**	**	**
土壤水分 × 氮肥用量 W × N		*	ns	**

注 (Note): PFP_N—N partial factor productivity; AE_N—N agronomic efficiency; RE_N—N recovery efficiency. 上标 *、** 分别表示相同氮水平下不同水分处理间在 0.05 和 0.01 水平差异显著, 上标 ns 则表示不同水分处理间差异不显著 Superscript * and ** indicate the significant difference at the 0.05, 0.01 levels, and superscript ns indicates no significant difference between different soil water conditions under the same N treatment.

水条件下油菜根系活力明显下降,影响植株整体生理和代谢过程,导致与氮素营养代谢有关的硝酸还原酶活性降低,从而减少了氮素养分的吸收和利用。由此可见,持续渍水会对油菜的生长造成不可恢复的影响。

3.2 氮肥施用可以缓解苗期渍水冬油菜生长和产量下降的负面效应

优化氮肥施用是改善苗期受渍油菜生长和产量形成的重要措施。苗期渍水后基施氮肥通过淋溶或反硝化途径损失,降低了根层土壤氮素的供应,油菜苗期根系可吸收和利用的养分大大减少^[23],进一步限制了养分吸收。而苗期植株充足的氮素浓度对于维持油菜幼苗生长,提高油菜对逆境胁迫的抗性是非常重要的^[24]。在本研究中,施氮明显提高了油菜苗期植株氮含量,并且在高氮量下表现出显著效果,进而提高了苗期油菜植株抗性和个体生物量^[25],保证了油菜成苗密度。施氮提高了渍水胁迫下叶片数、叶面积和 SPAD 值,降低了植株光合能力的下降幅度,增加了光合物质累积,对油菜生产能力具有一定的补偿效应,加快油菜生长的恢复速度^[26],调控了产量及其构成,从而进一步改善了油菜群体质量,保证产量的形成。

本研究表明,相比排水处理,渍水处理在高氮量下各生育期干物质质量和氮素累积降幅显著低于中低氮量,有利于渍害后油菜生长恢复,较高的生物量和营养补充可以有效弥补渍害造成的产量差距。此外,油菜产量相对受害率伴随着施氮量增加表现出下降的趋势。进一步说明了施氮不仅可以有效缓解渍害,而且缓解效果对施氮量响应的敏感性明显不同,施氮超过 180 kg/hm² 时可以显著减轻产量下降的负面效应。在保证产量不下降的情况下,排水处理要比渍水处理节省氮肥 59.2 kg/hm²,说明适量供氮和排水措施相互作用可以进一步降低渍害油菜产量损失的风险^[27],从而达到施氮减渍和排水减氮的双重效果。

油菜栽培学上很早就重视油菜“秋发”的栽培技术^[28],确保油菜秋、冬生长期充分扩增营养体。“秋发”阶段从油菜播种萌发到苗期稳定生长是油菜获得高产的重要保障。基于上述研究结果,实际农业生产中要更加重视冬油菜苗期土壤渍水逆境的预防工作。及时关注稻油体系中水稻收获后土壤水分状况,如何确定直播油菜籽粒萌发和发育的土壤适宜含水量?苗期连续强降雨情况下,如何有效排水降低渍害程度?本研究氮肥采用基追肥方式施

用,可以推断氮肥运筹中适当增加基肥比例也是降低苗期渍水风险的一种有效措施,如何更好的通过氮肥运筹来预防渍害对油菜生长的影响?渍水土壤氮素损失以及所引发的环境效应问题等诸多方面还有待进一步研究。

4 结论

苗期渍水和氮肥用量对油菜产量和氮肥利用率产生了显著影响。苗期渍水明显抑制了油菜生长,叶片数、叶面积和 SPAD 值均有不同程度下降。渍水胁迫降低了油菜干物质累积,减少了氮素吸收和利用,对油菜生长造成了不可恢复的影响。渍水显著降低了油菜成苗密度,加之单株角果数的减少,削弱了油菜群体效应,导致减产。油菜产量对渍水胁迫的响应与氮肥投入量有直接的关系,合理氮肥施用可以有效缓解渍害的负面效应,尤其是高氮量水平下可以优化直播油菜群体质量,进而提高油菜干物质和氮素累积。同等产量水平下,排水处理能够明显节省氮肥用量。因此,在油菜生产管理中,合理氮肥用量和实时排水措施可以有效缓解渍水胁迫,降低产量损失。

参 考 文 献:

- [1] 殷艳,廖星,余波,等.我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J].中国油料作物学报,2010,32(1):147-151.
Yin Y, Liao X, Yu B, et al. Regional distribution evolution and development tendency of Chinese rapeseed production[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2010, 32(1): 147-151.
- [2] 范明生,江荣凤,张福锁,等.水旱轮作系统作物养分管理策略[J].应用生态学报,2008,19(2):424-432.
Fan M S, Jiang R F, Zhang F S, et al. Nutrient management strategy of paddy rice-upland crop rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 424-432.
- [3] 张学昆,陈洁,王汉中,等.甘蓝型油菜耐湿性的遗传差异鉴定[J].中国油料作物学报,2007,29(2):204-208.
Zhang X K, Chen J, Wang H Z, et al. Genetic difference of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(2): 204-208.
- [4] 张树杰,张春雷.气候变化对我国油菜生产的影响[J].农业环境科学学报,2011,30(9):1749-1754.
Zhang S J, Zhang C L. Influences of climate changes on oilseed rape production in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1749-1754.
- [5] 王寅,鲁剑巍.中国冬油菜栽培方式变迁与相应的养分管理策略[J].中国农业科学,2015,48(15):2592-2966.
Wang Y, Lu J W. The transitional cultivation patterns of winter oilseed rape in China and the corresponding nutrient management strategies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(15): 2592-2966.
- [6] 刘后利.实用油菜栽培学[M].上海:上海科学技术出版社,1987.349-376.

- Liu H L. Applied cultivation science for rape[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1987. 349–376.
- [7] 李玲, 张春雷, 张树杰, 等. 渍水对冬油菜苗期生长及生理的影响[J]. 中国油料作物学报, 2011, 33(3): 247–252.
Li L, Zhang C L, Zhang S J, *et al.* Effects of waterlogging on growth and physiological changes of winter rapeseed seedling (*Brassica napus* L.)[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(3): 247–252.
- [8] 张树杰, 廖星, 胡小加, 等. 渍水对油菜苗期生长及生理特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7382–7389.
Zhang S J, Liao X, Hu X J, *et al.* Effects of waterlogging on the growth and physiological properties of juvenile oilseed rape[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(23): 7382–7389.
- [9] 宋丰萍, 胡立勇, 周广生, 等. 渍水时间对油菜生长及产量的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(1): 170–176.
Song F P, Hu L Y, Zhou G S, *et al.* Effects of waterlogging time on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth and yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(1): 170–176.
- [10] 邹娟, 鲁剑巍, 李银水, 等. 氮、磷、钾、硼肥对甘蓝型油菜籽品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 961–968.
Zou J, Lu J W, Li Y S, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus, potassium and boron fertilization on quality of *Brassica napus*[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 961–968.
- [11] 赵继献, 程国平, 任廷波, 等. 不同氮水平对优质甘蓝型黄籽杂交油菜产量和品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 882–889.
Zhao J X, Cheng G P, Ren T B, *et al.* Effect of different nitrogen rates on yield and quality parameters of high grade yellow seed hybrid rape[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 882–889.
- [12] 郭文琦, 陈兵林, 刘瑞显, 等. 施氮量对花铃期短期渍水棉花叶片抗氧化酶活性和内源激素含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 53–60.
Guo W Q, Chen B L, Liu R X, *et al.* Effects of nitrogen application rate on cotton leaf antioxidant enzyme activities and endogenous hormone contents under short-term waterlogging at flowering and boll-forming stage[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 53–60.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (Third edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] 汪瑞清, 杜兴斌, 颜卫卫, 等. 华杂6号叶面积简易测定方法[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(3): 339–341.
Wang R Q, Du X B, Yan W W, *et al.* Study on an easy measuring method of leaf area of Huaza 6(*Brassica napus* L.)[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2007, 29(3): 339–341.
- [15] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409–413.
Wang S R, Chen X P, Gao X Z, *et al.* Study on simulation of “3414” fertilizer experiments[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 409–413.
- [16] Cassman K G, Peng S, Olk D C, *et al.* Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Research, 1998, 56(1): 7–39.
- [17] 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.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, *et al.* Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095–1103.
- [18] Zhou W, Zhao D, Lin X. Effects of waterlogging on nitrogen accumulation and alleviation of waterlogging damage by application of nitrogen fertilizer and mixtalol in winter rape (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 1997, 16(1): 47–53.
- [19] Malik A I, Colmer T D, Lambers H, *et al.* Short-term waterlogging has long-term effects on the growth and physiology of wheat[J]. New Phytologist, 2002, 153(2): 225–236.
- [20] 宋稀, 刘凤兰, 郑普英, 等. 高密度种植专用油菜重要农艺性状与产量的关系分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1800–1806.
Song X, Liu F L, Zheng P Y, *et al.* Correlation analysis between agronomic traits and yield of rapeseed (*Brassica napus* L.) for high-density planting[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1800–1806.
- [21] Yamori W, Kondo E, Sugiura D, *et al.* Enhanced leaf photosynthesis as a target to increase grain yield: insights from transgenic rice lines with variable Rieske FeS protein content in the cytochrome b_6/f complex[J]. Plant Cell and Environment, 2015, 39(1): 80–87.
- [22] 蔡剑, 姜东. 气候变化对中国冬小麦生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1726–1733.
Cai J, Jiang D. The effect of climate change on winter wheat production in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1726–1733.
- [23] 范亚宁, 李世清, 李生秀. 半湿润地区农田夏玉米氮肥利用率及土壤硝态氮动态变化[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 799–806.
Fan Y N, Li S Q, Li S X. Utilization rate of fertilizer N and dynamic changes of soil NO_3^- -N in summer maize field in semi-humid area of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 799–806.
- [24] Wang Y, Liu B, Ren T, *et al.* Establishment method affects oilseed rape yield and the response to nitrogen fertilizer[J]. Agronomy Journal, 2014, 106(1): 131–142.
- [25] 张卫星, 赵致, 柏光晓, 等. 不同玉米杂交种对水分和氮胁迫的响应及其抗逆性[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1361–1370.
Zhang W X, Zhao Z, Bai G X, *et al.* Response on water stress and low nitrogen in different maize hybrid varieties and evaluation for their adversity-resistance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(7): 1361–1370.
- [26] 武文明, 李金才, 陈洪俭, 等. 氮肥运筹方式对孕穗期受渍冬小麦穗部结实特性与产量的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1888–1896.
Wu W M, Li J C, Chen H J, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on seed-setting characteristics of spike and grain yield in winter wheat under waterlogging at booting stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(10): 1888–1896.
- [27] 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 127–136.
Yu W D, Feng L P, Sheng S X, *et al.* Effect of waterlogging at jointing and tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(13): 127–136.
- [28] 赵合句, 李光明, 李英德, 等. 油菜秋发高产技术[J]. 中国油料作物学报, 1989, 11(3): 60–62.
Zhao H J, Li G M, Li Y D, *et al.* High yielding autumn-luxuriant technique of oilseed rape[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1989, 11(3): 60–62.