

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.017

# 水氮耦合对冬油菜氮营养指数和光能利用效率的影响

谷晓博 李援农 杜娅丹 周昌明 银敏华 杨 丹  
(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 于2012—2013年和2013—2014年在冬油菜蕾薹期,设置3个施氮水平0、80、160 kg/hm<sup>2</sup>(分别记为N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>和N<sub>2</sub>)和3个灌溉水平0、60、120 mm(分别记为I<sub>0</sub>、I<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>),探究蕾薹期不同灌溉、施氮量对冬油菜氮营养指数(N<sub>NI</sub>)、光能利用效率(R<sub>UE</sub>)、产量、水分利用效率(W<sub>UE</sub>)和氮肥偏生产力(N<sub>PPF</sub>)的影响。2 a田间试验结果表明,灌水且施氮能明显提高冬油菜地上部干物质量、光能利用效率和产量。I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>处理的地上部干物质量比I<sub>1</sub>N<sub>2</sub>、I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>N<sub>2</sub>分别低0.80%、9.18%和11.12%。冬油菜在I<sub>0</sub>N<sub>1</sub>、I<sub>0</sub>N<sub>2</sub>、I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理下,均会出现氮素亏缺状况,不利于油菜生长;在I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>和I<sub>1</sub>N<sub>2</sub>处理下,不同时期的N<sub>NI</sub>均大于1,I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>的N<sub>NI</sub>在1附近波动,I<sub>1</sub>N<sub>2</sub>的N<sub>NI</sub>则远大于1,表明氮素过剩。2 a施氮和灌水处理对R<sub>UE</sub>的影响有显著的交互作用(P<0.05),I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>无论在干旱年(2012—2013年)或降水量较多年份(2013—2014年)均能显著提高冬油菜的R<sub>UE</sub>,而过量灌溉或施氮对冬油菜R<sub>UE</sub>促进作用不明显,甚至有下降趋势。2 a灌溉和施氮处理对冬油菜籽粒产量、耗水量、W<sub>UE</sub>和N<sub>PPF</sub>影响的交互作用均达显著水平(P<0.05),2 a中灌水量为120 mm、施氮量为80 kg/hm<sup>2</sup>(I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>)处理的产量最高,平均产量为3 385 kg/hm<sup>2</sup>,平均耗水量374 mm,平均W<sub>UE</sub>为9.1 kg/(hm<sup>2</sup>·mm),而2 a中灌水量为60 mm、施氮量为80 kg/hm<sup>2</sup>(I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)处理的W<sub>UE</sub>最高,其平均W<sub>UE</sub>比I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>提高8.79%,平均耗水量减少42.5 mm,仅减产3.57%。从节水和生态可持续发展角度出发,灌水60 mm、施氮80 kg/hm<sup>2</sup>为冬油菜蕾薹期较优的灌溉施氮策略。

**关键词:** 冬油菜; 灌溉; 施氮; 蕾薹期; 氮营养指数; 光能利用效率  
**中图分类号:** S565.4    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2016)02-0122-11

## Effects of Water and Nitrogen Coupling on Nitrogen Nutrition Index and Radiation Use Efficiency of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.)

Gu Xiaobo Li Yuannong Du Yadan Zhou Changming Yin Minhua Yang Dan  
(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to determine the reasonable amount of irrigation and nitrogen fertilizer for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) at stem elongation stage, which is significantly important for improving water and nitrogen use efficiency, increasing yield and quality and decreasing environmental pollution, a two-year (2012—2013 and 2013—2014) field experiment was conducted to evaluate the effects of different irrigation and nitrogen applications on aboveground dry biomass accumulation, nitrogen nutrition index (N<sub>NI</sub>), radiation use efficiency (R<sub>UE</sub>), yield, water use efficiency (W<sub>UE</sub>) and nitrogen partial factor productivity (N<sub>PPF</sub>) of winter oilseed rape in Yangling District of Shaanxi Province. There were three irrigation levels (I<sub>0</sub>: 0 mm; I<sub>1</sub>: 60 mm; I<sub>2</sub>: 120 mm, I<sub>2</sub> was approximately equal to local traditional irrigation amount) and three nitrogen levels (N<sub>0</sub>: 0 kg/hm<sup>2</sup>; N<sub>1</sub>: 80 kg/hm<sup>2</sup>; N<sub>2</sub>: 160 kg/hm<sup>2</sup>, N<sub>2</sub> was approximately equal to local traditional nitrogen application amount). The results showed that irrigation and nitrogen could obviously improve aboveground dry biomass, R<sub>UE</sub> and yield. Compared with I<sub>1</sub>N<sub>2</sub>,

收稿日期: 2015-05-13 修回日期: 2015-06-18  
**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA100504)和公益性行业(农业)科研专项(201503105、201503125)  
**作者简介:** 谷晓博(1989—),男,博士生,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: gxb123027@163.com  
**通信作者:** 李援农(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: liyuannong@163.com

$I_2N_1$  and  $I_2N_2$ , the aboveground dry biomass of  $I_1N_1$  was reduced by 0.80%, 9.18% and 11.12%, respectively. Under treatments of  $I_0N_1$ ,  $I_0N_2$ ,  $I_2N_1$  and  $I_2N_2$ , nitrogen deficiency of winter oilseed rape occurred at different days after irrigation and nitrogen treatments, which was unbeneficial for the growth of winter oilseed rape. While the  $N_{NI}$  of  $I_1N_1$  and  $I_1N_2$  were always higher than 1 at different stages, and the  $N_{NI}$  of  $I_1N_1$  was fluctuated around 1, which indicated nitrogen status was optimum, but the  $N_{NI}$  of  $I_1N_2$  was much greater than 1, which indicated nitrogen was excess. Irrigation and nitrogen had significant interaction effects on  $R_{UE}$  in two years ( $P < 0.05$ ), and  $I_1N_1$  could significantly improve  $R_{UE}$  of winter oilseed rape in both drought year (2012—2013) and rainy year (2013—2014). The promotion of  $R_{UE}$  was not obvious or even presented a downward trend when excessive irrigation or nitrogen application was conducted. In 2012—2013, seed yield of  $I_1N_1$  was significantly lower than those of  $I_2N_1$  and  $I_2N_2$  ( $P < 0.05$ ), and it was reduced by 6.02% and 4.76%, respectively. While in 2013—2014, no significant difference was found among  $I_1N_1$ ,  $I_2N_1$  and  $I_2N_2$  ( $P > 0.05$ ). In both years, irrigation and nitrogen had significant interaction effects on crop evapotranspiration ( $ET$ ),  $W_{UE}$  and  $N_{PP}$  ( $P < 0.05$ ). In 2012—2013 and 2013—2014, yield of winter oilseed rape ranged from 1 534 kg/hm<sup>2</sup> to 3 024 kg/hm<sup>2</sup> and from 2 318 kg/hm<sup>2</sup> to 3 746 kg/hm<sup>2</sup>,  $ET$  ranged from 195 mm to 339 mm and from 318 mm to 426 mm,  $W_{UE}$  ranged from 7.9 kg/(hm<sup>2</sup>·mm) to 10.4 kg/(hm<sup>2</sup>·mm) and from 7.2 kg/(hm<sup>2</sup>·mm) to 9.4 kg/(hm<sup>2</sup>·mm). Among all of the irrigation and nitrogen treatments,  $I_2N_1$  achieved the highest seed yield within two years, the average yield,  $ET$  and  $W_{UE}$  of which were 3 385 kg/hm<sup>2</sup>, 374 mm and 9.1 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), respectively. While  $I_1N_1$  achieved the highest  $W_{UE}$  in both years, the average  $W_{UE}$  of which was 9.9 kg/(hm<sup>2</sup>·mm), with average yield of 3 264 kg/hm<sup>2</sup>, average  $ET$  of 333 mm. Therefore, compared with  $I_2N_1$ ,  $I_1N_1$  could save water amount of 42.5 mm, and improve  $W_{UE}$  by 8.79% with yield just reducing by 3.57%. From the perspective of saving water and fertilizer, and simultaneously achieving the goal of increasing yield, the  $I_1N_1$  (irrigation amount was 60 mm and nitrogen application amount was 80 kg/hm<sup>2</sup>) treatment was recommended as an appropriate irrigation and nitrogen fertilization schedule for winter oilseed rape at stem elongation stage.

**Key words:** winter oilseed rape; irrigation; nitrogen application; stem elongation stage; nitrogen nutrition index; radiation use efficiency

## 引言

油菜是我国第一大油料作物<sup>[1]</sup>,其种植面积和总产量均达世界的 30% 左右,油菜籽的产量和品质对我国食用植物油的供给安全有极其重要的影响,加强油菜生产意义重大<sup>[2]</sup>。近年来冬油菜种植北界明显北移,种植地块向高纬度、高海拔地区发展,西北地区油菜生产不断扩展<sup>[3-4]</sup>。蕾薹期是油菜搭好丰产架子,达到春发稳长、枝多薹壮的关键时期<sup>[5]</sup>,而陕西关中地区冬油菜蕾薹期正值频发的春旱时期,为追求油菜高产,当地经常采用大定额春灌,并追施大量氮肥。传统的灌溉施肥方式不仅没有显著提高油菜产量,而且给农田生态环境带来一系列问题。因此,确定合理的蕾薹期灌水量和施氮量,对提高水肥利用效率、实现油菜高产优质及减少环境污染具有重要意义。

水分和氮素既是农业生产最大的限制因素,也是人类最易控制的物质投入,合理的灌水与施氮量

是作物增产优质的主要手段,是实现水肥资源高效利用的重要途径<sup>[6-7]</sup>。水、氮亏缺会导致作物营养生长和生殖生长衰弱,产量降低<sup>[8]</sup>;而水、氮过量会扰乱油菜营养生长和生殖生长间的平衡,使营养生长过盛,导致油菜晚熟并减产<sup>[9]</sup>。大量研究表明,水、氮与作物产量在一定范围内呈正相关,表现为水氮协同效应;水、氮过量则会导致产量降低,出现产量与水、氮负相关<sup>[10-11]</sup>。目前,国内水氮耦合主要对小麦<sup>[12]</sup>、玉米<sup>[13]</sup>、番茄<sup>[6]</sup>、黄瓜<sup>[14]</sup>等作物进行研究,很少涉及冬油菜,而且以前主要针对作物的生理、生长、产量及土壤硝态氮等指标进行研究,对氮营养指数( $N_{NI}$ )和光能利用效率( $R_{UE}$ )的研究鲜有报道。

本文基于 2 a 田间试验,通过分析比较蕾薹期不同灌溉施氮量对冬油菜干物质积累、光能利用效率、氮营养指数、产量和水氮利用效率的影响,以期选择出冬油菜蕾薹期较优的灌溉和施氮量,为冬油菜蕾薹期合理灌溉和施氮提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012—2013 年和 2013—2014 年在陕西杨凌西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田进行。该区地处 34°17'N,108°04'E,海拔高度 521 m,无霜期 210 d,年均日照时数 2 163.8 h,年均气温 13℃,年均降水量 632 mm,年均蒸发量 1 510 mm,属大陆性暖温带季风气候区。试验田土壤为壤土,田间持水率为 24% (质量含水率),土壤干容重 1.40 g/cm<sup>3</sup>。2012—2013 年播前 0~20 cm 耕层土壤基本理化性状为:有机质质量比 12.35 g/kg,全氮质量比 0.95 g/kg,硝态氮质量比 75.31 mg/kg,速效磷质量比 25.34 mg/kg,速效钾质量比 131.92 mg/kg,pH 值 8.12;2013—2014 年播前 0~20 cm 耕层土壤基本理化性状为:有机质质量比 12.78 g/kg,全氮质量比 0.98 g/kg,硝态氮质量比 72.54 mg/kg,速效磷质量比 24.26 mg/kg,速效钾质量比 135.32 mg/kg,pH 值 8.14。

1.2 试验材料与设计

2 a 供试冬油菜品种为甘蓝型“陕油 107 号”,由西北农林科技大学农学院提供;供试氮肥为尿素(含 N 质量分数大于等于 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数大于等于 16%),钾肥为农业用硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 质量分数大于等于 51%),硼肥为硼砂(含 B 质量分数大于等于 11.5%)。

蕾薹期(3 月 1 日)进行灌水施氮处理,设 3 个施氮水平:施纯氮量为 0、80、160 kg/hm<sup>2</sup>,分别记为 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>;3 个灌溉水平:灌水量为 0、60、120 mm,分别记为 I<sub>0</sub>、I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>。N<sub>2</sub>和 I<sub>2</sub>与当地传统施氮量和灌水量相当。油菜播种前基施氮、磷、钾、硼肥分别为 100、90、120、15 kg/hm<sup>2</sup>。试验共 9 个处理,每个处理重复 3 次,共 27 个小区,完全随机排列,小区面积 20 m<sup>2</sup> (5 m×4 m),小区间设 1 m 宽的间隔区。冬油菜按株距 13 cm、行距 50 cm 人工点播,待油菜长出 3 片真叶后(2012 年 9 月 30 日、2013 年 9 月 27 日)按密度 1.2×10<sup>5</sup>株/hm<sup>2</sup>进行间苗、定苗,2012—2013 年在冬油菜越冬期(播种后的 135 d)灌水 60 mm;2013 年 9 月天气干旱,为保证正常出苗,播种后每小区灌水 30 mm,其他田间生产管理措施与当地高产田一致。2012 年 9 月 15 日播种,2013 年 5 月 20 日收获;2013 年 9 月 12 日播种,2014 年 5 月 22 日收获。

1.3 测定项目与方法

冬油菜耗水量计算公式为

$$ET = P + I - \Delta W \tag{1}$$

式中 ET——冬油菜耗水量,mm

P——油菜生育期降水量,mm  
I——灌水量,mm  
 $\Delta W$ ——播种前和收获后土壤储水量的变化量,mm

在油菜播种前和收获后,在各小区中间部位选取 2 个位置分别用土钻取土(0~200 cm),每 10 cm 取 1 次,采用干燥法测定土壤含水率,计算播种前和收获后的土壤储水量。

地上部干物质量:在灌溉施氮处理后,每隔 15 d 在各小区选取 5 株具有代表性的植株,将叶、茎、果壳和籽粒分开,用干燥法测定地上部各器官干物质量,地上部干物质量为各器官干物质量之和。

产量测定:提前在各小区中央划定 1 m<sup>2</sup>的测产区,成熟后单独收获,晒干去壳后测定籽粒产量,在各小区划定的 1 m<sup>2</sup>测产区内随机选取 10 株分别测定其分枝数、单株角果数、每角籽粒数和千粒质量。

光能利用效率计算公式为

$$R_{UE} = \Delta D_M / \sum I_{PAR} \tag{2}$$

式中  $R_{UE}$ ——冬油菜光能利用效率,g/MJ  
 $\Delta D_M$ ——灌溉施肥处理前和收获时地上部干物质的变化量,g/m<sup>2</sup>  
 $\sum I_{PAR}$ ——灌溉施肥处理后到收获时的冠层累积光合有效辐射截获量,MJ/m<sup>2</sup>

$\sum I_{PAR}$ 为冠层上方累积入射光合有效辐射量( $P_{AR1}$ )与透过冠层到达地表的累积光合有效辐射量( $P_{AR2}$ )之差。在灌溉施肥处理后,每隔 7~10 d,选择天气晴朗的 1 d,从 08:00—18:00 每隔 2 h,在小区中间用 SunScan 冠层分析系统分别测定油菜冠层上方 20 cm 及地面以上 10 cm 的光合有效辐射量,每个处理重复 3 次,每个重复测 3 个点。

植株含氮量测定:将各处理的干样分器官粉碎后,过 0.5 mm 筛,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮后,各器官含氮量用凯氏定氮仪(FOSS 2300 型)测定<sup>[15]</sup>。各器官氮素含量为器官含氮量与器官干物质量的乘积,其单位为 kg/hm<sup>2</sup>。所有器官氮素含量相加得地上部植株氮累积量,植株氮浓度为植株氮累积量与植株干物质量的比值,其单位为 g/(100 g)。

氮营养指数计算公式为

$$N_{NI} = N_t / N_c \tag{3}$$

式中  $N_{NI}$ ——油菜氮营养指数  
 $N_t$ ——地上部生物量氮浓度实测值,g/(100 g)  
 $N_c$ ——根据临界氮浓度稀释曲线求得的相同地上部生物量时的氮浓度,g/(100 g),根据公式  $N_c = 4.48 D_M^{-0.25}$  计算<sup>[16]</sup>

水分利用效率计算公式为

$$W_{UE} = Y/ET \tag{4}$$

式中  $W_{UE}$ ——油菜水分利用效率,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$

$Y$ ——油菜籽粒产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

氮肥偏生产力计算公式为

$$N_{PPF} = Y/F_T \tag{5}$$

式中  $N_{PPF}$ ——氮肥偏生产力,  $\text{kg}/\text{kg}$

$F_T$ ——投入的氮肥总量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2010 软件处理试验数据; 采用 PASW Statistics 18.0 软件进行方差分析, 多重比较采用 Duncan 新复极差法, 显著性水平为  $\alpha = 0.05$ ; 利用 OriginPro 8.5 软件作图。

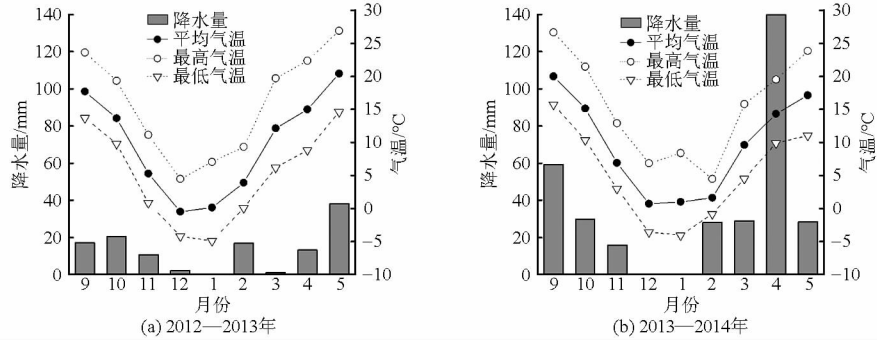


图1 试验站 2012—2013 年和 2013—2014 年冬油菜生育期各月降水量和气温  
Fig.1 Monthly total rainfall and temperature during winter oilseed rape growth seasons of 2012—2013 and 2013—2014 at experimental site

2.2 不同灌溉和施氮处理对油菜干物质积累的影响

蕾薹期不同灌水施氮处理对冬油菜生育后期干物质积累有一定的影响, 2012—2013 年灌水施氮处理后各处理的干物质积累随生育进程的变化趋势见图 2。由图 2 分析可知, 在灌水施氮后, 各处理茎、叶的干物质质量迅速增加, 在灌水施氮后 15 ~ 30 d 茎、叶的干物质质量增加速度最快, 30 ~ 45 d 增加速度降低, 45 ~ 60 d 茎的干物质质量基本保持不变, 叶的干物质质量则呈降低趋势。各处理在灌水施氮后 30 d 开始有角果出现, 之后, 角壳和籽粒的干物质质量迅速增加。在灌溉施氮后 75 d, 各处理不同器官的干物质质量表现为: 茎  $\approx$  角壳  $>$  籽粒  $>$  叶。

由图 2 分析可知, 在相同灌水量情况下,  $N_1$  和  $N_2$  处理的地上部干物质质量基本相等, 远大于  $N_0$  处理。在相同施氮量情况下, 灌水量  $I_1$  和  $I_2$  处理的地上部干物质质量远大于  $I_0$ ,  $I_2$  地上部干物质质量略大于  $I_1$ , 但二者差异不明显。 $I_1$  和  $I_2$  处理在灌溉施氮后 75 d 的平均地上部干物质质量较  $I_0$  分别提高 30.99% 和 45.62%;  $N_1$  和  $N_2$  处理在灌溉施氮后 75 d 的平均地上部干物质质量较  $N_0$  分别提高 21.55% 和 22.95%。

总体来看, 灌水且施氮处理  $I_1 N_1$ 、 $I_1 N_2$ 、 $I_2 N_1$  和

2 结果

2.1 冬油菜生育期内降水量与气温分布

2012—2013 年和 2013—2014 年冬油菜生育期各月降水量和气温见图 1。除 2014 年 2 月的最高气温外, 2 a 油菜生育期各月的最高、最低和平均气温变化趋势基本相同。2 a 的降水量有很大差别, 2013—2014 年油菜生育期总降水量 (335.8 mm) 远大于 2012—2013 年 (119.6 mm), 近 5 a 年冬油菜生育期平均总降水量为 371.6 mm。在油菜蕾薹期和花期 (3—4 月份) 的降水量, 2012—2013 年比 2013—2014 年少 156.4 mm, 2012—2013 年属于干旱年。

$I_2 N_2$  能明显提高冬油菜地上部干物质质量,  $I_1 N_1$  处理的地上部干物质质量比  $I_1 N_2$ 、 $I_2 N_1$  和  $I_2 N_2$  分别低 0.80%、9.18% 和 11.12%。可见,  $I_1 N_1$  处理能够有效提高冬油菜地上部干物质的积累, 再增加灌水量或施氮量对冬油菜地上部干物质质量的促进作用不明显, 可能会造成资源浪费。

2.3 不同灌溉和施氮处理对油菜氮营养指数的影响

氮营养指数 ( $N_{NI}$ ) 可以直观地反映作物的氮素营养状况。若  $N_{NI} = 1$ , 表明氮素营养适宜;  $N_{NI} > 1$ , 表明氮素营养过剩;  $N_{NI} < 1$ , 表明氮素营养不足。2 a 不同灌溉施氮处理下冬油菜的  $N_{NI}$  随生育进程的变化趋势见图 3。在蕾薹期 (灌水施氮) 前, 冬油菜生长缓慢, 2 a 冬油菜的  $N_{NI}$  均小于 1, 且不同灌水量下不施氮 ( $N_0$ ) 处理各时期的  $N_{NI}$  均远小于 1, 可见, 在蕾薹期有施氮必要。施氮后, 除 2012—2013 年  $I_0$  处理外, 不同灌水处理  $N_{NI}$  迅速增加。

不同灌水量处理下各施氮处理的  $N_{NI}$  随生育进程呈现一定的波动状态,  $N_{NI}$  均随施氮量的增加而增加, 由于 2 a 降水量不同, 造成 2 a 不同处理冬油菜  $N_{NI}$  的变化趋势略有差别。施氮后,  $I_0$  处理下  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $N_{NI}$  在 2 a 间变化趋势不同, 这可能是由于

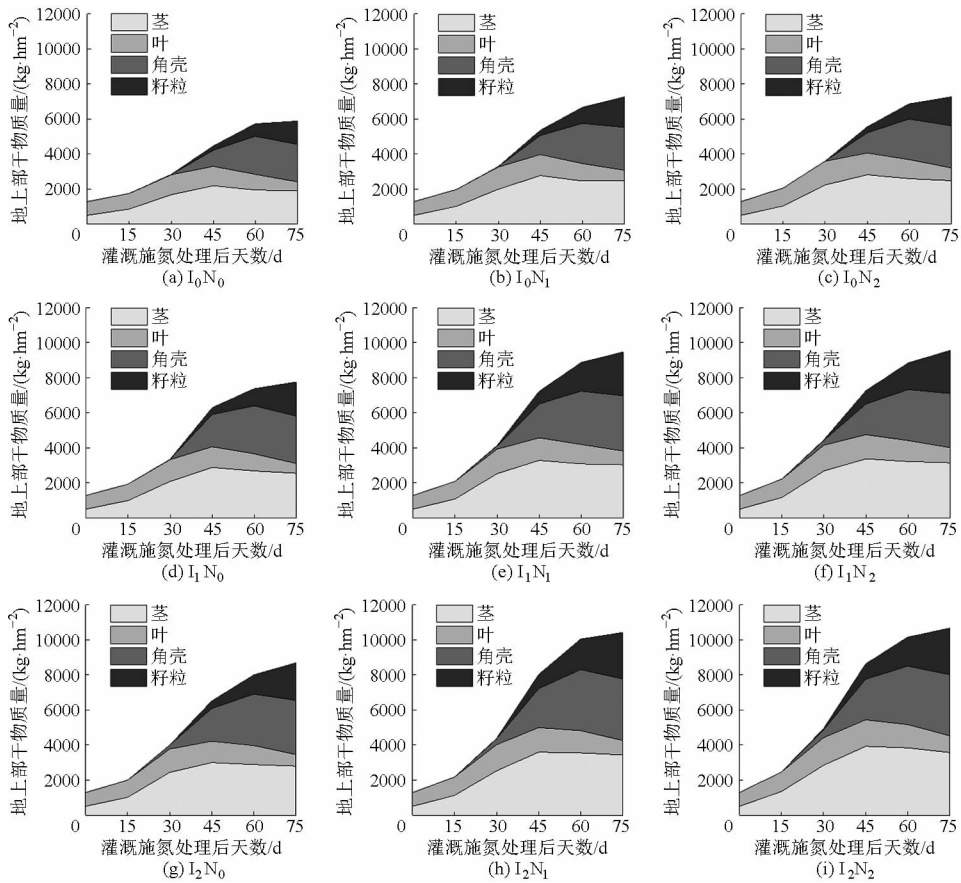


图 2 不同灌溉和施氮量对冬油菜地上部累积干物质质量的影响

Fig. 2 Effects of different irrigation and nitrogen amounts on accumulated aboveground dry biomass of winter oilseed rape

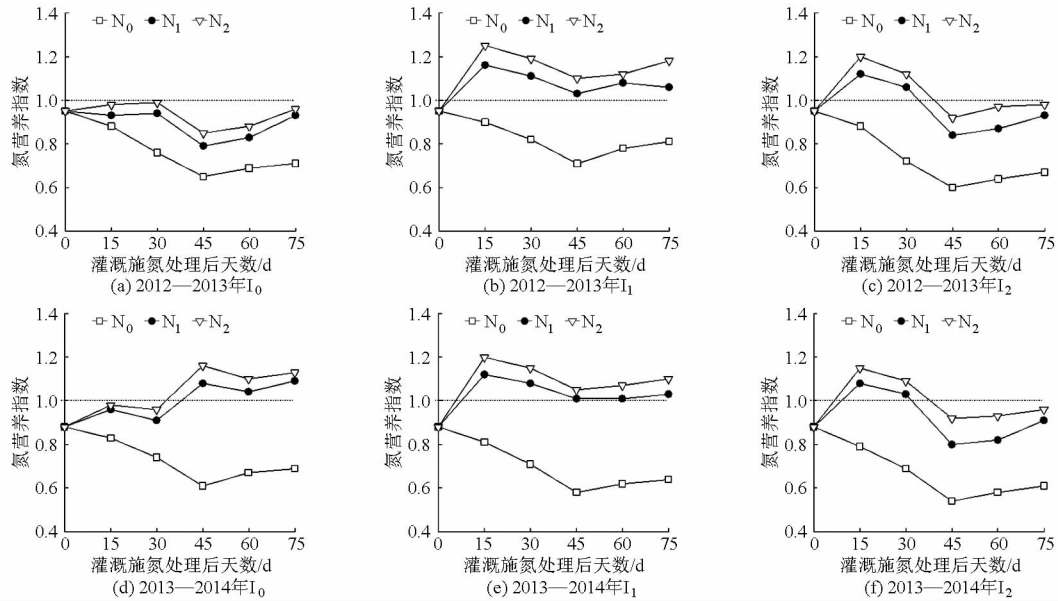


图 3 不同灌溉和施氮量对冬油菜氮营养指数的影响

Fig. 3 Effects of different irrigation and nitrogen amounts on nitrogen nutrition index ( $N_{NI}$ ) of winter oilseed rape

2 a 冬油菜生育后期降水量的差异引起的,2012—2013 年降水量少,土壤含水率低,抑制作物对养分的吸收,其  $N_{NI} < 1$ ;而 2013—2014 年施氮后,由于前期降水量少,土壤含水率较低,不利于作物对养分的吸收,其  $N_{NI} < 1$ ,土壤中剩余养分较多,随着后期降水量增多,土壤含水率升高,土壤中的养分被作物吸

收,其  $N_{NI} > 1$ ;施氮后, $I_1$ 、 $I_2$ 处理下  $N_1$  和  $N_2$  的  $N_{NI}$  在 2 a 间均表现为  $N_2 > N_1$ ,但  $I_1$ 、 $I_2$ 处理下  $N_1$  和  $N_2$  的  $N_{NI}$  变化范围不同, $I_1$ 处理下  $N_1$  和  $N_2$  的各时期  $N_{NI}$  均表现为: $N_2$  大于  $N_1$  且都大于 1, $I_2$ 处理下  $N_1$  和  $N_2$  的  $N_{NI}$  在施氮后 30 d 前大于 1,之后可能由于过量灌溉使冬油菜营养生长和生殖生长过盛,油菜对氮素需

求量大,土壤中的养分不能满足油菜生长,氮素营养不足,其  $N_{NI} < 1$ 。可见,过量施氮会造成资源浪费,而过量灌溉不仅浪费水资源,还可能由于水分促增长效应造成植株缺氮现象。

综合分析各处理的  $N_{NI}$ ,  $I_1N_1$  处理能在不浪费资源的前提下,保证冬油菜充足的氮素营养。

2.4 不同灌溉和施氮处理对油菜光能利用效率的影响

光能利用效率( $R_{UE}$ )通常用来量化生物量和截获辐射量之间的关系<sup>[17]</sup>。作物的  $R_{UE}$  通常表述为地上生物量与截获的辐射量之比<sup>[18]</sup>。2 a 不同灌溉施氮处理对地上部干物质变化量、累积有效辐射量和  $R_{UE}$  的影响见表 1。

2 a 灌溉和施氮量对冬油菜地上部干物质变化量的影响有显著的交互作用 ( $P < 0.05$ ), 2012—2013 年交互作用达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。在灌水

量相同时,  $N_1$  和  $N_2$  处理的地上部干物质变化量均显著大于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ),  $N_2$  处理略大于  $N_1$ , 但二者不存在显著差异。在施氮量相同时, 2012—2013 年  $I_2$  处理的地上部干物质变化量显著大于  $I_1$  ( $P < 0.05$ ), 且  $I_1$  显著大于  $I_0$  ( $P < 0.05$ ), 2013—2014 年  $I_1$  和  $I_2$  的地上部干物质变化量均显著大于  $I_0$  ( $P < 0.05$ ),  $I_2$  略大于  $I_1$ , 但二者不存在显著差异。

2 a 灌溉或施氮量单一因子对冬油菜累积有效辐射截获量有极显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 2012—2013 年灌溉和施氮量对冬油菜累积有效辐射截获量的影响有极显著的交互作用 ( $P < 0.01$ ), 2013—2014 年其交互作用达显著水平 ( $P < 0.05$ )。在相同灌水量下,  $N_1$  和  $N_2$  处理的累积有效辐射截获量均显著大于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ), 且  $N_1$  和  $N_2$  处理间不存在显著差异; 在相同施氮量下,  $I_2$  处理的累积有效辐射截获量显著大于  $I_1$  ( $P < 0.05$ ), 且  $I_1$  显著大于  $I_0$  ( $P < 0.05$ )。

表 1 不同灌溉和施氮处理对油菜累积有效辐射截获量和光能利用效率的影响  
Tab. 1 Effects of different irrigation and nitrogen treatments on aboveground dry matter at harvest, accumulated intercepted photosynthetically active radiation and radiation use efficiency of winter oilseed rape

| 灌溉处理  | 施氮处理  | 2012—2013 年              |                          |                       | 2013—2014 年              |                          |                       |
|-------|-------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------|
|       |       | 地上部干物质                   | 累积有效辐射截                  | 光能利用效率/               | 地上部干物质                   | 累积有效辐射截                  | 光能利用效率/               |
|       |       | 变化量/( $g \cdot m^{-2}$ ) | 获量/( $MJ \cdot m^{-2}$ ) | ( $g \cdot MJ^{-1}$ ) | 变化量/( $g \cdot m^{-2}$ ) | 获量/( $MJ \cdot m^{-2}$ ) | ( $g \cdot MJ^{-1}$ ) |
| $I_0$ | $N_0$ | 422 <sup>e</sup>         | 449 <sup>f</sup>         | 0.94 <sup>c</sup>     | 585 <sup>d</sup>         | 402 <sup>e</sup>         | 1.46 <sup>c</sup>     |
|       | $N_1$ | 529 <sup>d</sup>         | 503 <sup>e</sup>         | 1.05 <sup>b</sup>     | 764 <sup>c</sup>         | 477 <sup>d</sup>         | 1.60 <sup>b</sup>     |
|       | $N_2$ | 545 <sup>d</sup>         | 505 <sup>e</sup>         | 1.08 <sup>b</sup>     | 779 <sup>c</sup>         | 483 <sup>d</sup>         | 1.62 <sup>b</sup>     |
| $I_1$ | $N_0$ | 551 <sup>d</sup>         | 568 <sup>d</sup>         | 0.97 <sup>c</sup>     | 791 <sup>c</sup>         | 504 <sup>cd</sup>        | 1.57 <sup>c</sup>     |
|       | $N_1$ | 819 <sup>b</sup>         | 660 <sup>b</sup>         | 1.24 <sup>a</sup>     | 1064 <sup>a</sup>        | 572 <sup>b</sup>         | 1.86 <sup>a</sup>     |
|       | $N_2$ | 836 <sup>b</sup>         | 691 <sup>b</sup>         | 1.21 <sup>a</sup>     | 1078 <sup>a</sup>        | 592 <sup>b</sup>         | 1.82 <sup>a</sup>     |
| $I_2$ | $N_0$ | 641 <sup>c</sup>         | 605 <sup>c</sup>         | 1.06 <sup>b</sup>     | 810 <sup>c</sup>         | 523 <sup>c</sup>         | 1.55 <sup>c</sup>     |
|       | $N_1$ | 914 <sup>a</sup>         | 731 <sup>a</sup>         | 1.25 <sup>a</sup>     | 1131 <sup>a</sup>        | 631 <sup>a</sup>         | 1.79 <sup>a</sup>     |
|       | $N_2$ | 967 <sup>a</sup>         | 738 <sup>a</sup>         | 1.31 <sup>a</sup>     | 1156 <sup>a</sup>        | 635 <sup>a</sup>         | 1.82 <sup>a</sup>     |
| F 值   |       |                          |                          |                       |                          |                          |                       |
| 灌溉    |       | 75.9 <sup>**</sup>       | 85.4 <sup>**</sup>       | 4.4 <sup>*</sup>      | 3.2 <sup>*</sup>         | 62.3 <sup>**</sup>       | 4.8 <sup>*</sup>      |
| 施氮    |       | 52.1 <sup>**</sup>       | 56.3 <sup>**</sup>       | 14.5 <sup>**</sup>    | 68.7 <sup>**</sup>       | 45.7 <sup>**</sup>       | 20.4 <sup>**</sup>    |
| 灌溉×施氮 |       | 9.2 <sup>**</sup>        | 5.3 <sup>**</sup>        | 3.5 <sup>*</sup>      | 2.7 <sup>*</sup>         | 4.3 <sup>*</sup>         | 3.1 <sup>*</sup>      |

注:不同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平差异显著。\* 表示在  $P < 0.05$  水平(双侧)上显著相关,\*\* 表示在  $P < 0.01$  水平(双侧)上极显著相关。下同。

2 a 灌溉和施氮处理对冬油菜光能利用效率( $R_{UE}$ )的影响有显著的交互作用 ( $P < 0.05$ ), 2 a 灌水量对冬油菜  $R_{UE}$  有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 施氮量对冬油菜  $R_{UE}$  的影响极显著 ( $P < 0.01$ )。在相同灌水量下,  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $R_{UE}$  均显著大于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ),  $N_1$  和  $N_2$  处理间不存在显著差异。在施氮量  $N_0$  下, 2012—2013 年  $I_2$  处理的  $R_{UE}$  显著大于  $I_0$  和  $I_1$  ( $P < 0.05$ ),  $I_0$  和  $I_1$  处理间不存在显著差异, 2013—2014 年可能由于降水量过多, 消弱了灌水量对  $R_{UE}$  的影响,  $I_0$ 、 $I_1$  和  $I_2$  3 个处理的  $R_{UE}$  不存在显著差异; 在施氮量  $N_1$  和  $N_2$  处理下,  $I_1$  和  $I_2$  的  $R_{UE}$  均显著大于  $I_0$

( $P < 0.05$ ),  $I_1$  和  $I_2$  处理间不存在显著差异。

$I_1$  和  $I_2$  处理 2 a 的平均  $R_{UE}$  分别较  $I_0$  提高 11.87% 和 13.29%;  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $R_{UE}$  分别较  $N_0$  提高 16.42% 和 17.35%。总体来看,  $I_1N_1$  无论在干旱年(2012—2013 年)或降水量较多年份(2013—2014 年)均能显著提高冬油菜的  $R_{UE}$ , 过量灌溉或施氮对冬油菜  $R_{UE}$  促进作用不明显, 甚至还有降低趋势。

2.5 不同灌溉和施氮处理对油菜产量与水氮利用效率的影响

2.5.1 不同灌溉和施氮处理对油菜产量构成的影响  
蕾薹期不同灌溉施氮量对冬油菜产量及产量构

成要素有显著影响( $P < 0.05$ )(图4、表2)。灌溉或施氮处理的单株分枝数、单株角果数、每角籽粒数、单位面积籽粒数、千粒质量和籽粒产量均显著大于不灌溉不施氮( $I_0N_0$ )处理( $P < 0.05$ )。2013—2014年后期降水量较多,使2013—2014年各处理的产量及产量构成要素均明显大于2012—2013年相应处理。

2a灌溉和施氮量对冬油菜每角籽粒数和千粒质量影响的交互作用均不显著(表2),2a灌水量对冬油菜每角籽粒数的影响均达极显著水平( $P < 0.01$ ),2012—2013年施氮量对冬油菜每角籽粒数的影响达显著水平( $P < 0.05$ ),2013—2014年施氮量对冬油菜每角籽粒数的影响达极显著水平( $P < 0.01$ )。2a灌溉或施氮量单一因子对冬油菜千粒质量的影响均达显著水平( $P < 0.05$ )。灌水 $I_2$ 处理下,除2013—2014年千粒质量外, $N_0$ 、 $N_1$ 和 $N_2$ 3个施氮处理的每角籽粒数和千粒质量均不存在显著差异(图4)。灌水 $I_1$ 处理下,除2012—2013年千粒质

量外, $N_1$ 和 $N_2$ 处理的每角籽粒数和千粒质量均显著大于 $N_0$ ( $P < 0.05$ ), $N_1$ 和 $N_2$ 处理间差异不显著。灌水 $I_0$ 处理下, $N_1$ 和 $N_2$ 处理的每角籽粒数和千粒质量均显著大于 $N_0$ ( $P < 0.05$ ), $N_1$ 和 $N_2$ 处理间差异不显著。施氮 $N_1$ 和 $N_2$ 处理下, $I_1$ 和 $I_2$ 处理的每角籽粒数均显著大于 $I_0$ ( $P < 0.05$ ), $I_1$ 和 $I_2$ 处理的每角籽粒数差异不显著; $I_0$ 、 $I_1$ 和 $I_2$ 3个灌水处理的千粒质量不存在显著差异。施氮 $N_0$ 处理下, $I_1$ 和 $I_2$ 处理的每角籽粒数和千粒质量均显著大于 $I_0$ ( $P < 0.05$ ), $I_1$ 和 $I_2$ 处理的每角籽粒数差异不显著。

2a灌溉或施氮量单一因子对冬油菜单株分枝数、单株角果数、单位面积籽粒数和籽粒产量的影响达极显著水平( $P < 0.01$ ),2a灌溉和施氮量对冬油菜单株分枝数、单株角果数、单位面积籽粒数和籽粒产量影响的交互作用达显著水平( $P < 0.05$ )(表2)。在灌水量相同的情况下, $N_1$ 和 $N_2$ 处理的单株分枝数、单株角果数、单位面积籽粒数和籽粒产量均显著大于 $N_0$ ( $P < 0.05$ ), $N_1$ 和 $N_2$ 处理间差异均不

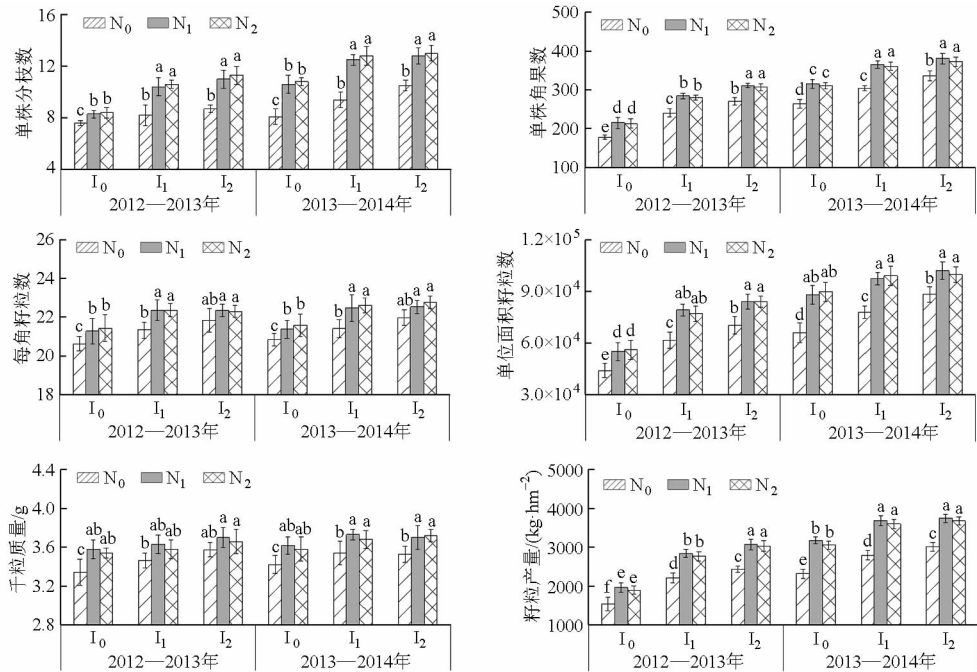


图4 不同灌溉和施氮量对冬油菜产量及产量构成的影响

Fig.4 Effects of different irrigation and nitrogen amounts on yield and yield components of winter oilseed rape

表2 不同灌溉和施氮处理下油菜产量及产量性状的方差分析( $F$ 值)

| 指标      | 2012—2013 年 |          |        | 2013—2014 年 |           |        |
|---------|-------------|----------|--------|-------------|-----------|--------|
|         | 灌溉          | 施氮       | 灌溉×施氮  | 灌溉          | 施氮        | 灌溉×施氮  |
| 单株分枝数   | 41.94 **    | 35.49 ** | 3.12 * | 40.20 **    | 72.54 **  | 4.64 * |
| 单株角果数   | 252.05 **   | 52.90 ** | 5.09 * | 90.54 **    | 63.73 **  | 5.79 * |
| 每角籽粒数   | 12.31 **    | 6.93 *   | 0.33   | 16.13 **    | 10.16 **  | 0.40   |
| 单位面积籽粒数 | 90.69 **    | 27.93 ** | 6.38 * | 22.54 **    | 42.16 **  | 7.27 * |
| 千粒质量    | 5.85 *      | 8.38 *   | 0.34   | 4.03 *      | 6.33 *    | 0.13   |
| 籽粒产量    | 177.06 **   | 56.63 ** | 7.03 * | 80.80 **    | 149.43 ** | 6.51 * |

显著(图 4)。在施氮量相同的情况下,除 2013—2014 年单位面积籽粒数外,2 a 的 I<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>处理单株分枝数、单株角果数、单位面积籽粒数和籽粒产量均显著大于 I<sub>0</sub>( $P<0.05$ ),I<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>处理间差异不显著。

2 a 中不施氮或不灌溉处理的籽粒产量均显著小于灌溉且施氮处理( $P<0.05$ )(图 4),可见,蕾薹期灌溉施氮能有效促进冬油菜增产。在相同灌水量下,施氮处理 N<sub>1</sub>的籽粒产量最高;在相同施氮量下,灌水处理 I<sub>2</sub>的籽粒产量最高。2012—2013 年(干旱年)I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>处理的籽粒产量显著低于 I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理( $P<0.05$ ),I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>比 I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>N<sub>2</sub>处理分别减产 6.02%和 4.76%;2013—2014 年(降水较多)I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>的籽粒产量高于 I<sub>2</sub>N<sub>2</sub>,低于 I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>,但三者差异不显著,I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>的籽粒产量比 I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>低 1.63%。

2.5.2 不同灌溉和施氮处理对油菜耗水量、水分利用效率和氮肥偏生产力的影响

蕾薹期不同灌溉施氮处理对冬油菜耗水量(ET)、水分利用效率( $W_{UE}$ )和氮肥偏生产力( $N_{PPF}$ )

的影响显著(表 3)。2 a 降水量的差异使 2 a 冬油菜 ET、 $W_{UE}$ 和  $N_{PPF}$ 也有一定的差异。

2 a 不同处理播种前的储水量均不存在显著差异。2 a 灌水和施氮处理对冬油菜收后储水量的影响有显著交互作用( $P<0.05$ )。在灌水量相同的情况下,N<sub>0</sub>处理收后储水量均显著大于 N<sub>1</sub>和 N<sub>2</sub>处理( $P<0.05$ )。在施氮量相同的情况下,2013—2014 年收后储水量均表现为 I<sub>2</sub>显著大于 I<sub>1</sub>( $P<0.05$ ),且 I<sub>1</sub>显著大于 I<sub>0</sub>( $P<0.05$ );2012—2013 年,在施氮处理 N<sub>1</sub>和 N<sub>2</sub>下,3 个灌水处理 I<sub>0</sub>、I<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>的收后储水量间差异不显著;在施氮处理 N<sub>0</sub>下,I<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>处理收后储水量显著大于 I<sub>0</sub>( $P<0.05$ ),但 I<sub>1</sub>和 I<sub>2</sub>处理间不存在显著差异。

2 a 灌水量对冬油菜耗水量有极显著影响( $P<0.01$ ),2013—2014 年灌水和施氮量对冬油菜耗水量的影响有显著交互作用( $P<0.05$ )。在灌水量相同的情况下,N<sub>1</sub>和 N<sub>2</sub>处理的耗水量均显著大于 N<sub>0</sub>( $P<0.05$ ),N<sub>1</sub>和 N<sub>2</sub>处理间差异均不显著。在相同

表 3 不同灌溉和施氮处理油菜的耗水量、水分利用效率和氮肥偏生产力

| Tab.3 Crop evapotranspiration, water use efficiency and nitrogen partial factor productivity of winter oilseed rape under different irrigation and nitrogen treatments |                |                |                  |                    |                     |                                                      |                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|----------------|------------------|--------------------|---------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 年份                                                                                                                                                                     | 灌溉处理           | 施氮处理           | 播前储水量/<br>mm     | 收后储水量/<br>mm       | 耗水量/<br>mm          | 水分利用效率/<br>( kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup> ) | 氮肥偏生产力/<br>( kg·kg <sup>-1</sup> ) |
| 2012—2013 年                                                                                                                                                            | I <sub>0</sub> | N <sub>0</sub> | 488 <sup>a</sup> | 463 <sup>b</sup>   | 205 <sup>f</sup>    | 7.9 <sup>c</sup>                                     | 15.3 <sup>b</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>1</sub> | 483 <sup>a</sup> | 442 <sup>c</sup>   | 221 <sup>e</sup>    | 8.8 <sup>b</sup>                                     | 10.9 <sup>c</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>2</sub> | 485 <sup>a</sup> | 436 <sup>c</sup>   | 229 <sup>e</sup>    | 8.9 <sup>b</sup>                                     | 7.3 <sup>e</sup>                   |
|                                                                                                                                                                        | I <sub>1</sub> | N <sub>0</sub> | 490 <sup>a</sup> | 475 <sup>a</sup>   | 255 <sup>d</sup>    | 9.0 <sup>b</sup>                                     | 22.1 <sup>a</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>1</sub> | 495 <sup>a</sup> | 447 <sup>bc</sup>  | 280 <sup>c</sup>    | 10.4 <sup>a</sup>                                    | 15.8 <sup>b</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>2</sub> | 494 <sup>a</sup> | 446 <sup>bc</sup>  | 288 <sup>c</sup>    | 10.0 <sup>a</sup>                                    | 10.7 <sup>c</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        | I <sub>2</sub> | N <sub>0</sub> | 494 <sup>a</sup> | 484 <sup>a</sup>   | 310 <sup>b</sup>    | 8.1 <sup>c</sup>                                     | 24.3 <sup>a</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>1</sub> | 491 <sup>a</sup> | 451 <sup>bc</sup>  | 340 <sup>a</sup>    | 9.2 <sup>b</sup>                                     | 17.1 <sup>b</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>2</sub> | 503 <sup>a</sup> | 454 <sup>bc</sup>  | 349 <sup>a</sup>    | 8.8 <sup>b</sup>                                     | 11.7 <sup>c</sup>                  |
| 2013—2014 年                                                                                                                                                            | I <sub>0</sub> | N <sub>0</sub> | 462 <sup>a</sup> | 510 <sup>c</sup>   | 318 <sup>e</sup>    | 7.2 <sup>c</sup>                                     | 23.2 <sup>b</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>1</sub> | 457 <sup>a</sup> | 449 <sup>c</sup>   | 374 <sup>c</sup>    | 8.5 <sup>ab</sup>                                    | 17.7 <sup>d</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>2</sub> | 453 <sup>a</sup> | 451 <sup>c</sup>   | 368 <sup>c</sup>    | 8.0 <sup>b</sup>                                     | 11.8 <sup>f</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        | I <sub>1</sub> | N <sub>0</sub> | 455 <sup>a</sup> | 536 <sup>b</sup>   | 329 <sup>d</sup>    | 8.1 <sup>b</sup>                                     | 27.9 <sup>a</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>1</sub> | 452 <sup>a</sup> | 486 <sup>d</sup>   | 392 <sup>b</sup>    | 9.4 <sup>a</sup>                                     | 20.5 <sup>c</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>2</sub> | 453 <sup>a</sup> | 481 <sup>d</sup>   | 397 <sup>b</sup>    | 9.1 <sup>a</sup>                                     | 13.8 <sup>e</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        | I <sub>2</sub> | N <sub>0</sub> | 456 <sup>a</sup> | 566 <sup>a</sup>   | 375 <sup>c</sup>    | 8.0 <sup>b</sup>                                     | 30.1 <sup>a</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>1</sub> | 464 <sup>a</sup> | 533 <sup>b</sup>   | 417 <sup>a</sup>    | 9.0 <sup>a</sup>                                     | 20.8 <sup>c</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        |                | N <sub>2</sub> | 457 <sup>a</sup> | 517 <sup>c</sup>   | 426 <sup>a</sup>    | 8.6 <sup>ab</sup>                                    | 14.1 <sup>e</sup>                  |
| F 值                                                                                                                                                                    |                |                |                  |                    |                     |                                                      |                                    |
| 2012—2013 年                                                                                                                                                            | 灌溉             |                |                  | 5.1 <sup>*</sup>   | 629.2 <sup>**</sup> | 15.2 <sup>**</sup>                                   | 6.7 <sup>*</sup>                   |
|                                                                                                                                                                        | 施氮             |                |                  | 4.6 <sup>*</sup>   | 7.3 <sup>*</sup>    | 11.1 <sup>**</sup>                                   | 5.6 <sup>*</sup>                   |
|                                                                                                                                                                        | 灌溉×施氮          |                |                  | 2.6 <sup>*</sup>   | 1.7                 | 4.2 <sup>*</sup>                                     | 3.3 <sup>*</sup>                   |
| 2013—2014 年                                                                                                                                                            | 灌溉             |                |                  | 19.4 <sup>**</sup> | 131.6 <sup>**</sup> | 6.3 <sup>*</sup>                                     | 7.1 <sup>**</sup>                  |
|                                                                                                                                                                        | 施氮             |                |                  | 14.2 <sup>**</sup> | 181.4 <sup>**</sup> | 5.4 <sup>*</sup>                                     | 16.5 <sup>**</sup>                 |
|                                                                                                                                                                        | 灌溉×施氮          |                |                  | 3.2 <sup>*</sup>   | 3.8 <sup>*</sup>    | 4.7 <sup>*</sup>                                     | 3.4 <sup>*</sup>                   |

注:播前和收后的储水量为 0~200 cm 土壤深度的储水量,2 a 数据的方差分析是单独的。



施氮量情况下,  $I_1$  和  $I_2$  处理的耗水量均显著大于  $I_0$  ( $P < 0.05$ ),  $I_1$  和  $I_2$  处理间差异不显著。

2 a 灌水和施氮量对冬油菜  $W_{UE}$  的影响有显著交互作用 ( $P < 0.05$ )。2012—2013 年在灌水量相同的情况下,  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $W_{UE}$  均显著大于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ),  $N_1$  和  $N_2$  处理间差异不显著。2013—2014 年在  $I_0$  和  $I_1$  处理下,  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $W_{UE}$  均显著大于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ),  $N_1$  和  $N_2$  间差异不显著; 在  $I_2$  下,  $N_1$  处理的  $W_{UE}$  显著大于  $N_0$  ( $P < 0.05$ ),  $N_2$  与  $N_0$ 、 $N_1$  处理间差异均不显著。2 a  $W_{UE}$  最高的处理均为  $I_1N_1$ , 分别为  $10.4/9.4 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ , 2 a 产量最高的处理均为  $I_2N_1$ , 其  $W_{UE}$  分别为  $9.2/9.0 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ ,  $I_1N_1$  与其相比, 产量平均降低 3.59%, 耗水量平均减少 42.5 mm, 2 a 的  $W_{UE}$  分别提高 13.04% 和 4.44%, 2 a 平均  $W_{UE}$  提高 8.79%。

氮肥偏生产力 ( $N_{PPF}$ ) 是反映当地土壤基础养分水平和氮肥施用量综合效应的指标。2 a 灌水和施氮量对冬油菜  $N_{PPF}$  的影响有显著交互作用 ( $P < 0.05$ )。在相同灌水量情况下, 施氮处理  $N_0$  的  $N_{PPF}$  均为最大, 均显著大于  $N_1$  和  $N_2$ , 且  $N_1$  显著大于  $N_2$  ( $P < 0.05$ )。在相同施氮量情况下, 灌水处理  $I_2$  的  $N_{PPF}$  均为最大,  $I_1$  和  $I_2$  的  $N_{PPF}$  均显著大于  $I_0$  ( $P < 0.05$ ), 且  $I_1$  和  $I_2$  间差异不显著。与  $N_1$  处理的  $N_{PPF}$  相比, 在  $I_0$  下,  $N_0$  处理的  $N_{PPF}$  平均提高 34.89%,  $N_2$  处理的  $N_{PPF}$  平均降低 33.36%; 在  $I_1$  下,  $N_0$  处理的  $N_{PPF}$  平均提高 38.80%,  $N_2$  处理的  $N_{PPF}$  平均降低 32.48%; 在  $I_2$  下,  $N_0$  处理的  $N_{PPF}$  平均提高 43.76%,  $N_2$  处理的  $N_{PPF}$  平均降低 31.87%。

### 3 讨论

#### 3.1 灌溉和施氮量对氮营养指数的影响

作物氮素状况是提高产量和改善品质的重要指标<sup>[19]</sup>, 氮营养指数 ( $N_{NI}$ ) 是 Lemaire 等<sup>[20]</sup> 基于临界氮浓度提出的, 具有合理的生物学意义, 能定量、动态地描述作物氮营养状况的变化。大量研究<sup>[21-22]</sup> 表明,  $N_{NI}$  在作物动态生长过程中呈现一定的波动状态, 在低氮水平下,  $N_{NI}$  较低, 随着施氮量的增加,  $N_{NI}$  增加, 当施氮量超过一定数量后, 作物氮素营养过剩, 但产量并未明显增加, 甚至有所下降。这与本研究相似, 2 a 不同灌水量处理下的  $N_{NI}$  均随施氮量的增加而增加。但前人关于灌水处理下不同施氮量的  $N_{NI}$  变化趋势的研究较少, 本研究中, 不同灌水量处理下各施氮量处理的  $N_{NI}$  变化趋势不同, 2 a 不灌水 ( $I_0$ ) 处理下  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $N_{NI}$  变化趋势差异最大, 2 a 中  $N_1$  和  $N_2$  处理在灌溉、施氮后 30 d 内的  $N_{NI}$  变化趋势基本相同, 但 30 d 后, 2012—2013 年  $N_{NI}$  继续

降低, 2013—2014 年  $N_{NI}$  呈增加趋势, 这可能是由于 2 a 降水量不同所致, 2013—2014 年降水量较大, 土壤含水率高, 有利于作物对土壤中养分的吸收。2 a 中  $I_2$  处理下 45 d 后  $N_1$  和  $N_2$  处理的  $N_{NI}$  均小于 1, 出现氮素亏缺, 这可能是由于灌水量过多, 后期油菜营养生长和生殖生长均比较旺盛, 造成  $N_{NI} < 1$ 。2 a 中只有  $I_1$  处理下  $N_1$  和  $N_2$  处理各时期的  $N_{NI}$  均大于 1, 但  $N_2$  处理的  $N_{NI}$  远大于 1, 出现氮素过剩情况, 造成资源浪费。

#### 3.2 灌溉和施氮量对光能利用效率的影响

油菜的产量和品质主要取决于光能资源的质量和油菜对光能的利用率。油菜对光能的利用率高, 光合作用合成的有机物多, 在籽粒中积累的油脂多, 产量就高<sup>[5]</sup>。氮主要是通过影响叶片伸长、叶片功能的持续时间来影响作物的光能利用效率 ( $R_{UE}$ ), 作物的  $R_{UE}$  与叶氮含量正相关<sup>[23-24]</sup>, 小麦  $R_{UE}$  随施肥量的增加由  $0.85 \text{ g}/\text{MJ}$  增加到  $1.07 \text{ g}/\text{MJ}$ , 施肥小麦比不施肥小麦的  $R_{UE}$  高 10% 左右<sup>[25]</sup>。本研究中, 在灌水量相同的情况下, 除 2012—2013 年  $I_0$  处理外, 施氮量  $80 \text{ kg}/\text{hm}^2$  ( $N_1$ ) 和  $160 \text{ kg}/\text{hm}^2$  ( $N_2$ ) 处理的  $R_{UE}$  均显著大于不施氮 ( $N_0$ ) 处理 ( $P < 0.05$ ), 这是由于施氮使叶绿素含量发生变化进而导致光合效率增加; 但  $N_1$ 、 $N_2$  处理间不存在显著差异, 甚至  $N_2$  的  $R_{UE}$  小于  $N_1$ , 这可能是由于施氮过多时维持呼吸和冠层消光系数增加, 最终降低了作物的  $R_{UE}$ 。高阳等<sup>[26]</sup> 对不同水氮处理下玉米-大豆间作光能利用效率的研究发现, 水分状况比氮肥处理对作物  $R_{UE}$  的影响更明显, 这与本研究结果基本相似, 2 a 灌溉处理对  $R_{UE}$  的影响达极显著水平 ( $P < 0.01$ ), 2012—2013 年施氮量对  $R_{UE}$  的影响达显著水平 ( $P < 0.05$ )。Javad 等<sup>[27]</sup> 通过研究不同水氮处理对冬油菜  $R_{UE}$  的影响, 表明高水和中水、高氮和中氮处理间的  $R_{UE}$  差异不显著, 但均显著大于低水和低氮处理, 这与本研究结果基本相似, 但其不同水氮处理下冬油菜  $R_{UE}$  均明显小于本研究中的不同水氮处理  $R_{UE}$ , 这可能是由于试验地点、供试冬油菜品种和灌水方式不同造成的。本研究中, 在施氮量相同时, 灌水量  $60 \text{ mm}$  ( $I_1$ ) 和  $120 \text{ mm}$  ( $I_2$ ) 处理的  $R_{UE}$  显著大于不灌水 ( $I_0$ ) 处理 ( $P < 0.05$ ),  $I_1$ 、 $I_2$  处理间不存在显著差异。可见, 蕾薹期适当灌水施氮能使油菜生长后期保持较高的  $R_{UE}$ , 为油菜高产奠定基础。

#### 3.3 灌溉和施氮量对籽粒产量和水氮利用效率的影响

增施氮肥并结合灌水可以显著地提高作物产量, 施氮而不灌水也有一定的增产作用, 但肥水配合增产作用更为显著。这可能是由于施氮并结合灌水

促进了作物对氮素等养分的吸收所致<sup>[28]</sup>。姜东燕等<sup>[12]</sup>研究表明,灌水和施氮量对小麦籽粒产量和蛋白质含量均存在调控和互补效应,水分和氮素配合不仅有利于提高冬小麦产量,也有利于提高小麦蛋白质含量,但超量灌溉,不仅无益于小麦增产,而且会降低小麦蛋白质含量,继续增施氮肥,虽然可缓解小麦蛋白质含量降低幅度,但浪费水资源,增加生产成本。谢英荷等<sup>[13]</sup>研究表明,当灌水量超过900 mm、施氮量超过150 kg/hm<sup>2</sup>时,玉米产量、产量构成因素(穗粒数、百粒质量及穗粒质量)和收获指数等均没有发生显著变化;水分利用效率和氮肥偏生产力随氮肥用量的增加呈明显降低趋势;岳文俊等<sup>[29]</sup>研究发现甜瓜产量随灌水量和施氮量的增加而提高,但在高水和高氮条件下略有下降。这与本研究结果相似,本研究中,在灌水量相同的情况下,施氮量80 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>1</sub>)和160 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>2</sub>)处理的产量及产量构成要素均显著大于不施氮(N<sub>0</sub>)处理( $P < 0.05$ )。2 a中N<sub>1</sub>和N<sub>2</sub>处理的平均产量与N<sub>0</sub>相比分别提高28.90%和25.68%,平均水分利用效率相比N<sub>0</sub>分别增加13.55%和9.65%,平均氮肥偏生产力相比N<sub>0</sub>分别降低7.93%和30.18%。可见,N<sub>2</sub>处理的产量、水分利用效率和氮肥偏生产力相比N<sub>1</sub>均有下降趋势,多施氮肥不仅没有增加产量,而且还可能造成土壤剖面中大量残留的硝态氮在强灌水或降水作用下淋洗到根层以下而污染地下水。在施氮量相同的情况下,灌水量60 mm(I<sub>1</sub>)和120 mm(I<sub>2</sub>)处理的产量及产量构成要素均显著大于不灌水(I<sub>0</sub>)处理( $P < 0.05$ ),2012—2013年I<sub>2</sub>处理的产量显著大于I<sub>1</sub>( $P < 0.05$ ),但2013—2014年二者不存

在显著差异,这可能是由于2 a降水量不同造成的。2 a中I<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>处理的平均产量比I<sub>0</sub>分别提高28.39%和35.43%,平均水分利用效率比I<sub>0</sub>分别增加14.40%和4.87%,平均氮肥偏生产力比I<sub>0</sub>分别提高28.53%和36.13%。可见,I<sub>2</sub>处理与I<sub>1</sub>处理相比,虽然其产量和氮肥利用效率有增加趋势,但其水分利用效率降低较多,在水资源严重紧缺的情况下,在冬油菜蕾薹期不宜采用I<sub>2</sub>处理。

## 4 结论

(1)蕾薹期灌水量60 mm、施氮量80 kg/hm<sup>2</sup>(I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)能有效提高冬油菜地上部干物质量,增加灌水量或施氮量对冬油菜地上部干物质量的提升作用不明显。I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>处理能在不浪费资源的前提下,保证冬油菜充足的氮素营养,并显著提高冬油菜的光能利用效率。

(2)蕾薹期灌水施氮能有效促进冬油菜增产,灌水量120 mm、施氮量80 kg/hm<sup>2</sup>(I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>)可获得最高籽粒产量,2 a平均产量3385 kg/hm<sup>2</sup>,平均耗水量374 mm,平均水分利用效率9.1 kg/(hm<sup>2</sup>·mm);而灌水量60 mm、施氮量80 kg/hm<sup>2</sup>(I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>)处理能够得到最高的水分利用效率,2 a平均水分利用效率为9.9 kg/(hm<sup>2</sup>·mm),平均产量为3264 kg/hm<sup>2</sup>,平均耗水量为333 mm。I<sub>1</sub>N<sub>1</sub>处理与I<sub>2</sub>N<sub>1</sub>相比,在耗水量减少42.5 mm、水分利用效率提高8.79%的前提下,仅减产3.57%。全面考虑节水节肥并达到增产的目的,本试验中较优的冬油菜蕾薹期灌溉施氮制度为灌水量60 mm、施氮量80 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 贾明珍,官春云. 油菜抗寒性生理生化机制及基因工程研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(5): 556–561.  
Jia Mingzhen, Guan Chunyun. Review of physiology, biochemistry and gene engineering on cold resistance of rapeseed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2012, 34(5): 556–561. (in Chinese)
- 2 王汉中. 我国油菜产需形式分析及产业发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1): 101–105.  
Wang Hanzhong. Strategy for rapeseed industry development based on the analysis of rapeseed production and demand in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2007, 29(1): 101–105. (in Chinese)
- 3 张树杰,王汉中. 我国油菜生产应对气候变化的对策和措施分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 114–122.  
Zhang Shujie, Wang Hanzhong. Policies and strategies analyses of rapeseed production response to climate change in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2012, 34(1): 114–122. (in Chinese)
- 4 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 Yan, Liao Xing, Yu Bo, et al. Regional distribution evolvement and development tendency of Chinese rapeseed production[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2010, 32(1): 147–151. (in Chinese)
- 5 官春云. 优质油菜生理生态和现代栽培技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- 6 刘世全,曹红霞,杨慧,等. 水氮供应与番茄产量和生长性状的关联性分析[J]. 中国农业科学, 2014, 47(22): 4445–4452.  
Liu Shiquan, Cao Hongxia, Yang Hui, et al. The correlation analysis between tomato yield, growth characters and water and nitrogen supply[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4445–4452. (in Chinese)
- 7 刘晓冰,王光华,金剑,等. 作物根际和产量生理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 8 Tewolde H, Fernandez C J. Vegetative and reproductive dry weight inhibition in nitrogen and phosphorus-deficient Pima cotton[J]. Journal of Plant Nutrition, 1997, 20(2–3): 219–232.

- 9 Hamzei J. Seed, oil, and protein yields of canola under combinations of irrigation and nitrogen application[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(4): 1152–1158.
- 10 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13): 98–105.  
Song Na, Wang Fengxin, Yang Chenfei, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(13): 98–105. (in Chinese)
- 11 金梁, 胡克林, 李保国, 等. 作物生长与土壤水氮运移联合模拟的研究 II—模型验证与应用[J]. *水利学报*, 2007, 38(8): 972–979.  
Jin Liang, Hu Kelin, Li Baoguo, et al. Coupled simulation on crop growth and soil water-heat-nitrogen transport II. model validation and application[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(8): 972–979. (in Chinese)
- 12 姜东燕, 于振文, 许振柱. 灌溉量和施氮量对冬小麦产量和土壤硝态氮含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 364–368.  
Jiang Dongyan, Yu Zhenwen, Xu Zhenzhu. Effects of irrigation amount and nitrogen fertilization rate on wheat yield and soil nitrate content[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 364–368. (in Chinese)
- 13 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): 1354–1361.  
Xie Yinghe, Su Li, Hong Jianping, 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): 1354–1361. (in Chinese)
- 14 李银坤, 武雪萍, 吴会军, 等. 水氮条件对温室黄瓜光合日变化及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(增刊1): 122–129.  
Li Yinkun, Wu Xueping, Wu Huijun, et al. Effects of water and nitrogen conditions on the diurnal variation of photosynthesis and yield of cucumber in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(Sup.1): 122–129. (in Chinese)
- 15 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 16 Colnenne C, Meynard J M, Reau R, et al. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape[J]. *Annals of Botany*, 1998, 81(2): 311–317.
- 17 Sinclair T R, Muchow R C. Radiation use efficiency[J]. *Advances in Agronomy*, 1999, 65: 215–265.
- 18 Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 18(3–4): 267–288.
- 19 Zhao D L, Raja R K, Vijaya G K, et al. Nitrogen deficiency effects on plant growth, leaf photosynthesis, and hyper spectral reflectance properties of sorghum[J]. *European Journal of Agronomy*, 2005, 22(4): 391–403.
- 20 Lemaire G, Gastal F. N uptake and distribution in plant canopies[M] // Lemaire G. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Berlin: Springer, 1997: 3–43.
- 21 薛晓萍, 周治国, 张丽娟, 等. 棉花花后临界氮浓度稀释模型的建立及在施氮量调控中的应用[J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 1781–1791.  
Xue Xiaoping, Zhou Zhiguo, Zhang Lijuan, et al. Development and application of critical nitrogen concentration dilution model for cotton after flowering[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1781–1791. (in Chinese)
- 22 王新, 马富裕, 刁明, 等. 滴灌番茄临界氮浓度、氮素吸收和氮营养指数模拟[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 99–108.  
Wang Xin, Ma Fuyu, Diao Ming, et al. Simulation of critical nitrogen concentration, nitrogen uptake and nitrogen nutrition index of processing tomato with drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(18): 99–108. (in Chinese)
- 23 Albrizio R, Steduto P. Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea I. radiation use efficiency [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(3–4): 254–268.
- 24 Green D S, Erickson J E, Kruger E L. Foliar morphology and canopy nitrogen as predictors of light-use efficiency in terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 115(3–4): 163–171.
- 25 Caviglia O P, Sadras V O. Effect of nitrogen supply on crop conductance, water and radiation-use efficiency of wheat[J]. *Field Crops Research*, 2001, 69(3): 259–266.
- 26 高阳, 申孝军, 杨林林, 等. 不同水氮处理对玉米-大豆间作群体内作物光能截获、竞争和利用的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 815–822.  
Gao Yang, Shen Xiaojun, Yang Linlin, et al. Effects of water and nitrogen on interception, competition and utilization of radiation in a maize-soybean intercropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(3): 815–822. (in Chinese)
- 27 Javad H, Jalal S. Deficit irrigation of rapeseed for water-saving: effects on biomass accumulation, light interception and radiation use efficiency under different N rates[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 155: 153–160.
- 28 石维, 同延安, 赵营, 等. 灌溉施肥对冬小麦土壤氮素盈亏的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(2): 93–97.  
Shi Wei, Tong Yan'an, Zhao Ying, et al. Effect of N fertilizer and irrigation on apparent budget of soil N in winter wheat in anthrosol[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(2): 93–97. (in Chinese)
- 29 岳文俊, 张富仓, 李志军, 等. 水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 88–96.  
Yue Wenjun, Zhang Fucang, Li Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 88–96. (in Chinese)