

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013

# 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响

王振华<sup>1,2</sup> 权丽双<sup>1,2</sup> 郑旭荣<sup>1,2</sup> 裴磊<sup>1,2</sup>

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000; 2. 石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室, 石河子 832000)

**摘要:** 为了解新疆北部石河子地区水氮耦合对滴灌复播油葵的氮素累积、转运分配与吸收利用及土壤硝态氮累积动态的影响, 以大田试验为基础, 结合室内试验, 以当地油葵主栽早熟品种“新葵杂五号”为供试材料, 在滴灌条件下进行水氮二因素三水平完全处理小区试验。结果表明, 不同水氮组合的滴灌复播油葵各器官氮素累积生育前期均以叶片为主, 生育后期均以花盘为主。水氮组合对滴灌复播油葵各器官在各生育期对氮素的累积、分配、转运与吸收利用及油葵产量均具有显著 ( $p < 0.05$ ) 或极显著 ( $p < 0.01$ ) 的互作效应。适当范围内 (施纯氮量小于等于  $232 \text{ kg/hm}^2$ 、灌水量小于等于  $3000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) 增水增氮可以促进油葵各器官对氮素的有效累积, 促进油葵氮素的转运与吸收利用, 达到促进油葵高产的目的。水氮耦合对滴灌复播油葵土壤硝态氮累积量影响显著。随施氮量增加,  $0 \sim 80 \text{ cm}$  土壤硝态氮累积量增加; 随灌水量增加, 土壤硝态氮累积量在  $0 \sim 40 \text{ cm}$  土层降低, 在  $40 \sim 80 \text{ cm}$  土层增加; 收获后, 随灌水量和施氮量增加, 土壤硝态氮相对累积量在  $40 \sim 80 \text{ cm}$  土层增加, 在  $0 \sim 40 \text{ cm}$  土层降低。结合油葵产量与植株对氮素吸收转运的表现, 该试验最佳花盘全氮增加量为  $2.16 \text{ g/株}$ , 产量为  $3597.11 \text{ kg/hm}^2$ , 最优水氮组合为灌水  $3000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ , 施纯氮  $232 \text{ kg/hm}^2$ 。

**关键词:** 油葵; 滴灌复播; 水氮耦合; 氮素吸收; 土壤硝态氮累积

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)10-0091-10

## Effects of Water – Nitrogen Coupling on Nitrogen Uptake and Nitrate Accumulation in Soil of Oil Sunflower in Drip-irrigated Multiple Cropping System

Wang Zhenhua<sup>1,2</sup> Quan Lishuang<sup>1,2</sup> Zheng Xurong<sup>1,2</sup> Pei Lei<sup>1,2</sup>

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production and Construction Group, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** In order to understand the effects of water – nitrogen coupling on nitrogen accumulation, transportation and distribution, absorption and utilization, and dynamics of nitrate accumulation in soil of drip-irrigation multiple cropping oil sunflower in Shihezi area in the northern Sinkiang, based on field experiment, and combined with laboratory experiment, local early maturing variety “new No. 5 hybrid oil sunflower” was taken as test materials, and a three-level complete treatment plot experiment of two factors of water and nitrogen under drip irrigation was conducted. Results showed that nitrogen accumulations of all organs of drip-irrigation multiple cropping oil sunflowers of different water – nitrogen combinations were centered by blades at earlier growth stage and by flower disc at late growth stage. Water – nitrogen combination had prominent ( $p < 0.05$ ) or extremely prominent ( $p < 0.01$ ) interaction effect on accumulation, distribution, transportation, absorption and utilization of nitrogen and production of oil sunflowers of all their organs at each growth stage. Appropriate water and nitrogen augment (pure nitrogen amount no more than  $232 \text{ kg/hm}^2$ , irrigation amount no more than  $3000 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) can promote

收稿日期: 2016-05-17 修回日期: 2016-07-19

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2015BAD20B03)、石河子大学高层次人才项目(RCZX201433)和兵团中青年科技创新领军人才项目(2015BC001)

作者简介: 王振华(1979—),男,教授,博士,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究, E-mail: wzh2002027@163.com

effective nitrogen accumulation of each organ of oil flowers and transportation and utilization of nitrogen of oil sunflowers, thus the goal of high production of oil sunflowers was realized. Water and nitrogen coupling significantly affected the nitrate accumulation in soil. With the increase of nitrogen application, the accumulation amount of nitrate in 0 ~ 80 cm soil layer was increased; with the increase of irrigation water, the nitrate accumulation of 0 ~ 40 cm soil layer was decreased, and that of 40 ~ 80 cm soil layer was increased; after harvest, with the increase of irrigation water and nitrogen application, the relative accumulation of nitrate in 40 ~ 80 cm soil layer was increased, and that of 0 ~ 40 cm soil layer was decreased. Combining production of oil sunflowers and performance of plants absorbing and transporting nitrogen, the best nitrogen increase in faceplate was 2.16 g/plant and yield was 3 597.11 kg/hm<sup>2</sup>, the best water - nitrogen combination of this experiment was irrigated with water of 3 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> and irrigation with pure nitrogen of 232 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** oil sunflower; drip-irrigation multiple cropping; water - nitrogen coupling; nitrogen uptake; nitrate accumulation in soil

## 引言

油葵是世界广泛种植的四大油料作物之一。在新疆,油葵是最主要的油料作物,近几年每年新增种植油葵面积 13 ~ 17 万 hm<sup>2</sup>,占新疆油料作物种植面积的 60% 以上,占新疆农作物总种植面积的 3.5% 左右<sup>[1]</sup>。施氮是新疆滴灌复播油葵获得高产重要技术手段,但是新疆地处西北干旱区,水资源严重不足,灌溉水利用系数不足 50%<sup>[1]</sup>。水分短缺限制了氮肥发挥,在节水条件下,研究水氮耦合效果十分关键。

近年来,不少学者在干旱半干旱地区围绕水氮互作研究做了不少工作,但大多集中于棉花<sup>[2]</sup>、小麦<sup>[3]</sup>、玉米<sup>[4]</sup>等作物。关于复播油葵水氮耦合方面的研究,只有少数学者涉猎,葛宇等<sup>[5]</sup>在 2012 年通过研究不同滴灌灌水量下的复播油葵耗水特性,初步得出滴灌油葵适宜的灌溉定额范围为 285.19 ~ 287.67 mm。王振华等<sup>[6]</sup>在 2013 年对北疆滴灌复播油葵耗水和生长的影响效应做了进一步研究,表明复播油葵现蕾期和开花期 2 个生育期的耗水量占全生育期耗水量 57% 以上,是油葵的 2 个需水关键期,滴灌复播油葵的灌溉定额为 286 mm。邓力群等<sup>[7]</sup>研究表明施用氮肥对复播油葵有明显的增产效应。

不少学者就灌水量和施氮量对土壤氮素变化动态影响做了探究。刘小刚等<sup>[8-9]</sup>研究认为交替隔沟灌溉使土壤氮的吸收增加 21%。SKINNER 等<sup>[10]</sup>研究表明交替沟灌并将肥料施于干沟内可减少肥料淋溶的可能性。BENJAMIN 等<sup>[11]</sup>研究认为在干旱年份氮肥施在不灌水沟,氮肥吸收降低 50%。大量研究发现,水分不足会限制氮肥肥效的发挥,水分过多易导致氮肥的淋溶损失<sup>[12]</sup>。当年施入的氮肥并不能被作物完全吸收利用,部分被淋洗到深层土壤<sup>[13-14]</sup>,甚至到地下水<sup>[15-16]</sup>,土壤中硝态氮的累积

量随化学氮肥用量的增加而增加<sup>[17-18]</sup>,肥料氮的土壤残留率可达到 10% ~ 35%<sup>[17,19]</sup>。滴灌条件下,通过滴灌带将水和氮肥同时输送到作物根部,水氮之间存在着明显的耦合作用<sup>[20-22]</sup>。在西北灌溉区等干旱半干旱地区,农业生产中也存在氮素淋移损失问题<sup>[23-24]</sup>。朱兆良等<sup>[25-26]</sup>通过大量大田试验研究总结黄土高原地区主产粮食作物的氮肥利用率不超过 41%。

综上,目前关于新疆滴灌复播油葵的研究均是围绕灌水制度,以及其生长、生理生态、产量等方面展开的,关于土壤氮素变化动态研究,大多学者只考虑灌水量或施氮量,就两者的交互作用并未做深入的探讨。因此,本文试图探讨水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收及土壤硝态氮累积动态的影响,为干旱区复播油葵节水灌溉高产施肥技术提供有价值的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2014 年 7—10 月份在现代节水灌溉兵团重点实验室试验基地暨石河子大学节水灌溉试验站进行。试验站位于石河子市西郊石河子大学农试场二连(85°59'47"E、44°19'28"N),海拔高度 412 m,平均地面坡度为 6%。年均日照时间为 2 865 h,多年平均降水量为 207 mm,平均年蒸发量为 1 660 mm,其中大于 10℃ 年积温为 3 463.5℃,大于 15℃ 积温为 2 960.0℃,年无霜期为 170 d。年平均风速为 1.5 m/s,静风占 32%,偏南风占 22%,偏北风占 15%,偏东风占 14%,偏西风占 17%。试验田地下水埋深在 5 m 以下,土壤质地为中壤土,0 ~ 120 cm 土壤平均干容重为 1.53 g/cm<sup>3</sup>,田间持水量为 31.62%。

## 1.2 供试材料

试验选取当地油葵主栽早熟品种“新葵杂五号”, 播种深度为 3~4 cm, 播种方式采用一管一行, 株距 25 cm, 行距 60 cm, 毛管间距 60 cm, 油葵行与毛管间距 5 cm。7 月 5 日播种, 7 月 11 日出苗, 10 月 12 日收获, 全生育期 94 d。试验共 9 个处理, 3 次重复, 试验小区面积为 83.7 m<sup>2</sup> (18.6 m × 4.5 m)。每个处理单独设置施肥罐, 滴灌带选用单翼迷宫式滴灌带(新疆天业节水灌溉股份有限公司, 单翼迷宫式), 外径 16 mm, 壁厚 0.3 mm, 滴头间距 30 cm, 供水系统以水泵加压, 管道前部设有压力表监测管道内水压力, 支管闸阀开闭程度调节控制管道内压力至 0.06 MPa, 此时滴头流量在 1.2 L/h 左右。

## 1.3 试验设计

试验肥料有尿素 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> (含 N 质量分数 46.4%) 和磷酸二氢钾 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 质量分数 51.5%)。试验采用滴灌水、氮二因素三水平完全处理。参照葛宇等<sup>[5]</sup> 和王振华等<sup>[6]</sup> 研究的灌水制度、当地的常规施肥量及相关文献<sup>[24]</sup>, 试验设纯氮 3 个水平: 162、232、302 kg/hm<sup>2</sup> (分别标记为 N1、N2、N3, 表示低氮、中氮、高氮); 灌水设置 3 个水平: 灌溉定额分别为 2 100、3 000、3 900 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> (分别标记为 W1、W2、W3, 表示低水、中水、高水), 磷、钾肥以磷酸二氢钾形式作基肥在苗期第 1 次灌水时一次性施入, 各处理均为 165 kg/hm<sup>2</sup>。

各处理全生育期灌水次数均为 6 次, 利用各处理的单独施肥罐, 随水施肥, 氮肥共施入 5 次, 各生育期具体灌水施肥情况如表 1 所示。

表 1 复播油葵各生育期灌水及施肥处理

Tab. 1 Irrigation and fertilization treatments of multiple cropping oil sunflower at different growth stages

生育期	灌水次数	施肥次数	尿素比例/%
苗期(07-11-08-10)	1		
现蕾期(08-11-08-27)	2	2	50
开花期(08-28-09-10)	2	2	25
灌浆期(09-11-09-27)	1	1	25
成熟期(09-28-10-12)			
全生育期(07-11-10-12)	6	5	100

## 1.4 测定项目及方法

### 1.4.1 不同器官干物质量及全氮含量测定

每个处理选取长势均匀的 3 株植株, 割取地上部分, 把叶片、茎秆、盘(现蕾后)分别装入有标记的信封中, 然后放入干燥箱中, 在 105℃ 杀青 1 h, 调至 80℃ 干燥至质量恒定, 冷却称其质量, 为干物质量, 每个生育期取样 1 次。各器官干燥粉碎后经 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 采用奈氏比色法<sup>[27]</sup> 测定全氮含量。

### 1.4.2 土样采取及土壤养分测定

采用土钻取土, 观测深度为 1 m, 每个处理于复播油葵不同生育阶段末采取土样, 即播前、苗期末、现蕾期末、开花期末、灌浆期末、成熟期末共取土 6 次, 取土位置均为滴灌带下及两株油葵植株中间。取土深度分别为 0、10、20、30、40、60、80、100 cm。

土壤硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N) 和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) 含量采用 SmartChem140 全自动化学分析仪<sup>[26]</sup> 测定。

### 1.4.3 计算方法与统计分析

为便于定量分析, 依据文献[20, 22, 28] 建立以下计算公式。

器官全氮累积量(g/株)

$$M_N = DC/100 \quad (1)$$

式中  $D$ ——器官干物质量, g/株

$C$ ——器官全氮含量, g/株

全氮转运量(g/株)

$$T = M_{FN} - M_{MN} \quad (2)$$

式中  $M_{FN}$ ——开花期各器官全氮累积量, g/株

$M_{MN}$ ——成熟期各器官全氮累积量, g/株

转运率(%)

$$P_T = M_T/M_{FN} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $M_T$ ——转运量, g/株

分配率(%)

$$P_D = M_{SN}/M_{PN} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $M_{SN}$ ——某器官氮素累积量, g/株

$M_{PN}$ ——植株氮素累积量, g/株

花盘氮增加量

$$M_{FIN} = M_{FMN} - M_{FFN} \quad (5)$$

式中  $M_{FMN}$ ——成熟期花盘全氮累积量

$M_{FFN}$ ——开花期花盘全氮累积量

土壤硝态氮绝对累积量(kg/hm<sup>2</sup>)

$$S_{ANO_3^-} = h\gamma S_{NO_3^-}/10 \quad (6)$$

式中  $h$ ——土层厚度, cm

$\gamma$ ——土壤容重, g/cm<sup>3</sup>

$S_{NO_3^-}$ ——土壤硝态氮含量, kg/hm<sup>2</sup>

土壤硝态氮相对累积量(%)

$$S_{RNO_3^-} = S_{SANO_3^-}/S_{AANO_3^-} \times 100\% \quad (7)$$

式中  $S_{SANO_3^-}$ ——某一土层硝态氮绝对累积量, kg/hm<sup>2</sup>

$S_{AANO_3^-}$ ——整个剖面的硝态氮累积量, kg/hm<sup>2</sup>

数据采用 Excel、Origin 和 SPSS 软件进行处理与统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同器官全氮累积动态对水氮耦合的响应

叶片、茎秆和花盘的氮素累积量是油葵植株氮

素养分同化、代谢与再利用的主要指标<sup>[29]</sup>。根据油葵叶片、茎秆、花盘的单位干质量全氮含量以及干物质量,计算出相应的全氮累积量以及在不同生育期的分配率,分析其全氮累积动态及对水氮耦合的响应。

油葵整株叶片的全氮累积量如图1a所示(同一生育期不同小写字母表示在 $p < 0.05$ 水平差异显著,下同),在各个生育期的分配率如表2所示。试验结果表明,整个生育期不同水氮组合处理的叶片全氮累积量均随生育进程呈现先上升后下降的趋势,开花期前呈上升趋势,开花期的全氮累积量最大,

为 $0.58(W3N1) \sim 1.48 g/株(W2N2)$ ,说明在油葵营养生长阶段,叶片对氮素的吸收较多,此时叶片对氮肥的需求量较大;开花期后呈下降趋势,说明虽然对油葵进行了人工追肥处理,但是叶片中的氮素在生殖生长过程中逐渐向花盘转运,致使叶片全氮累积量降低,成熟期叶片全氮累积量为 $0.07(W1N1) \sim 0.16 g/株(W2N2)$ 。水氮处理对油葵不同生育期的叶片全氮累积量影响均达到显著水平( $p < 0.05$ )。其中W2N2处理的叶片全氮累积量在4个生育期均显著高于其他处理,分别为 $0.79、1.48、0.61、0.16 g/株$ ,在成熟期,W1N1处理最低,只有 $0.07 g/株,W3N1$

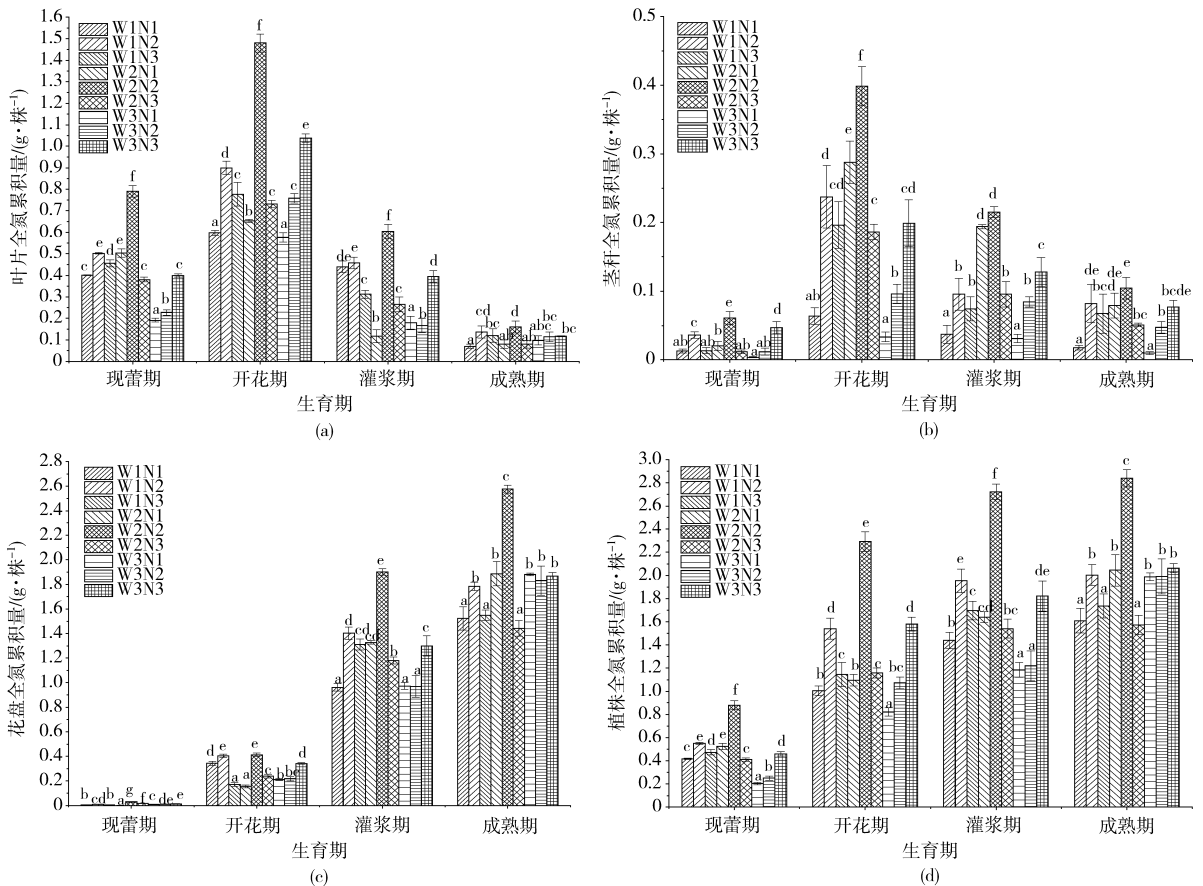


图1 不同水氮组合的叶片、茎秆、花盘及植株全氮累积量

Fig.1 Cumulative N in leaf, stems, faceplate and plant of different combinations of water and nitrogen

表2 不同生育期叶片、茎秆及花盘的氮素分配

Tab.2 Nitrogen distribution of leaf, stem and faceplate at different growth stages

%

处理	现蕾期			开花期			灌浆期			成熟期		
	叶片	茎秆	花盘	叶片	茎秆	花盘	叶片	茎秆	花盘	叶片	茎秆	花盘
W1N1	95.82 <sup>e</sup>	3.04 <sup>ab</sup>	1.14 <sup>b</sup>	59.44 <sup>a</sup>	6.34 <sup>b</sup>	34.21 <sup>g</sup>	30.57 <sup>e</sup>	2.59 <sup>a</sup>	66.84 <sup>a</sup>	4.35 <sup>ab</sup>	1.08 <sup>a</sup>	94.57 <sup>c</sup>
W1N2	91.57 <sup>bc</sup>	6.57 <sup>c</sup>	1.86 <sup>c</sup>	58.39 <sup>a</sup>	15.40 <sup>e</sup>	26.21 <sup>f</sup>	23.42 <sup>d</sup>	4.88 <sup>b</sup>	71.70 <sup>b</sup>	6.84 <sup>c</sup>	4.10 <sup>e</sup>	89.07 <sup>a</sup>
W1N3	96.18 <sup>e</sup>	2.87 <sup>ab</sup>	0.95 <sup>b</sup>	67.84 <sup>d</sup>	17.13 <sup>c</sup>	15.03 <sup>b</sup>	18.42 <sup>c</sup>	4.37 <sup>b</sup>	77.22 <sup>cd</sup>	6.94 <sup>c</sup>	3.87 <sup>c</sup>	89.18 <sup>ab</sup>
W2N1	96.02 <sup>e</sup>	3.87 <sup>b</sup>	0.10 <sup>a</sup>	59.54 <sup>a</sup>	26.24 <sup>f</sup>	14.22 <sup>a</sup>	7.13 <sup>a</sup>	11.84 <sup>f</sup>	81.03 <sup>ef</sup>	3.89 <sup>a</sup>	3.87 <sup>c</sup>	92.24 <sup>bc</sup>
W2N2	89.71 <sup>b</sup>	6.90 <sup>e</sup>	3.38 <sup>e</sup>	64.58 <sup>bc</sup>	17.39 <sup>e</sup>	18.03 <sup>c</sup>	22.22 <sup>d</sup>	7.90 <sup>d</sup>	69.88 <sup>b</sup>	5.65 <sup>bc</sup>	3.67 <sup>c</sup>	90.68 <sup>ab</sup>
W2N3	92.83 <sup>cd</sup>	2.84 <sup>ab</sup>	4.32 <sup>f</sup>	63.23 <sup>b</sup>	16.08 <sup>e</sup>	20.69 <sup>d</sup>	17.20 <sup>c</sup>	6.20 <sup>c</sup>	76.60 <sup>c</sup>	5.09 <sup>ab</sup>	3.23 <sup>b</sup>	91.68 <sup>a</sup>
W3N1	93.91 <sup>d</sup>	1.84 <sup>a</sup>	4.24 <sup>f</sup>	70.21 <sup>e</sup>	4.06 <sup>a</sup>	25.73 <sup>f</sup>	15.19 <sup>b</sup>	2.61 <sup>a</sup>	82.20 <sup>f</sup>	4.94 <sup>ab</sup>	0.49 <sup>a</sup>	94.57 <sup>c</sup>
W3N2	90.69 <sup>b</sup>	4.74 <sup>b</sup>	4.57 <sup>g</sup>	70.72 <sup>e</sup>	8.95 <sup>c</sup>	20.33 <sup>d</sup>	13.66 <sup>b</sup>	6.91 <sup>cd</sup>	79.43 <sup>de</sup>	5.75 <sup>bc</sup>	2.38 <sup>b</sup>	91.87 <sup>abc</sup>
W3N3	87.01 <sup>a</sup>	10.22 <sup>d</sup>	2.77 <sup>d</sup>	65.68 <sup>cd</sup>	12.59 <sup>d</sup>	21.73 <sup>e</sup>	21.68 <sup>d</sup>	7.02 <sup>cd</sup>	71.30 <sup>b</sup>	5.65 <sup>bc</sup>	3.73 <sup>c</sup>	90.62 <sup>ab</sup>

处理相对较低,其值为 0.09 g/株,其他处理处于中等水平,说明不同水氮组合在不同程度上显著影响叶片的全氮累积量,只有适宜的水氮比例与用量才能促进油葵叶片对氮素的吸收。

油葵整株茎秆的全氮累积量如图 1b 所示,在各个生育期的分配率如表 2 所示。试验数据显示,不同水氮组合的茎秆全氮累积量均明显低于叶片,说明茎秆对氮素的需求低于叶片。其整体变化趋势与叶片全氮累积量相似,即在整个生育期呈单峰曲线变化,在开花期最大,其值范围为 0.03 (W3N1) ~ 0.40 g/株 (W2N2),由大到小依次表现为:开花期、灌浆期、成熟期、现蕾期。此变化不仅受到开花期前用于油葵营养生长的氮素吸收利用,开花期后茎秆全氮累积量向花盘转移的影响,还受到水氮处理的显著影响 ( $p < 0.05$ )。W2N2 处理的茎秆全氮累积量在各个生育期均显著最大,分别为 0.06、0.40、0.22、0.10 g/株,在成熟期,W3N1 和 W1N1 处理最低,只有 0.01 g/株和 0.02 g/株,W2N3 与 W3N2 处理处于中等水平,全氮含量值均为 0.05 g/株,其他处理相对较高,说明不同水氮组合处理对茎秆全氮累积量影响显著,施氮量过低满足不了茎秆对氮素的吸收,灌水过多不仅会带走部分氮素流向土壤,而且抑制茎秆对氮素的吸收,W2N2 最有益于茎秆的氮素累积。

油葵整株花盘的全氮累积量如图 1c 所示,在各个生育期的分配率如表 2 所示。可以看出,不同水氮组合的花盘全氮累积量随着油葵生育进程呈现直线上升趋势,由大到小依次为:成熟期、灌浆期、开花期、现蕾期,现蕾期前花盘刚形成,全氮累积量很小,其值范围为 0.001 (W2N1) ~ 0.03 g/株 (W2N2),开花期后伴随油葵生殖生长的进程,叶片和茎秆氮素的转移以及受水氮组合处理影响显著,花盘全氮累积量快速增长,成熟期的花盘全氮累积量范围为 1.44 (W2N3) ~ 2.57 g/株 (W2N2)。同一生育期的不同水氮组合处理之间存在显著性差异 ( $p < 0.05$ )。与叶片和茎秆全氮累积量一样,W2N2 处理的花盘全氮累积量在 4 个生育期均显著高于其他处理,分别为 0.03、0.41、1.90、2.58 g/株,在成熟期,W1N1、W2N3 与 W1N3 处理相对较低,分别为 1.52、1.44、1.54 g/株,说明水氮配比不合理,将抑制油葵叶片和茎秆氮素向花盘的转运以及花盘自身对氮素的利用。

油葵植株的全氮累积量如图 1d 所示,不同生育期叶片、茎秆及花盘的氮素分配情况如表 2 所示,各个处理的油葵植株全氮累积动态随生育期均呈上升趋势。成熟期植株全氮累积量为 1.57 (W2N3) ~ 2.84 g/株 (W2N2)。从油葵叶片、茎秆及花盘在不

同生育期的氮素分配率可以得出,在油葵的生育前期,油葵对氮素的吸收以叶片和茎秆为主,但是基本以叶片为主导,茎秆的氮素累积量明显低于叶片,叶片的全氮累积量在开花期最大,占整株油葵全氮累积量的 87.01% ~ 96.18%,进入开花期,开始逐渐下降,茎秆的全氮累积量从现蕾期到开花期一直上升,在开花期茎秆的全氮累积量占整株油葵全氮累积量的 4.06% ~ 26.24%,开花期后急剧下降,显然与在生殖生长后期籽粒开始形成,叶片与茎秆中的氮素向籽粒转运有关,而花盘在接受叶片与茎秆氮素的转移后全氮累积量一直上升,成熟期花盘的全氮累积量占整株油葵全氮累积量的 89.07% ~ 94.57%。不同水氮组合处理对油葵不同生育期的植株全氮累积量影响均达到显著水平 ( $p < 0.05$ )。与叶片、茎秆和花盘的全氮累积量表现一致,W2N2 处理的植株全氮累积量在各个生育期均最高,分别为 0.88、2.29、2.72、2.84 g/株,在成熟期,W1N1 和 W2N3 最低,分别为 1.61、1.57 g/株,其他处理相对较低,说明氮肥施入过少满足不了油葵植株生长的需求,氮肥施入过多会抑制植株对氮素的吸收,灌水量过少达不到向植株充分运输氮素的作用,灌水量过多反而会将氮素带入土壤,使氮素流失。因此只有适宜的水氮配合才有利于油葵植株对氮素的吸收利用和生长。

## 2.2 氮素转运与吸收利用对水氮耦合的响应

滴灌复播油葵的叶片、茎秆随生育进程将氮素向花盘转运以用于籽粒的形成,叶片和茎秆氮素的转运情况直接影响着油葵的产量和品质,分析不同水氮组合处理的叶片、茎秆的全氮转运量与转运率以及花盘全氮的增加量和产量,结果如表 3 所示。由表可见,不同水氮组合的油葵开花期至成熟期叶片的氮素转运量与转运率均明显高于茎秆,叶片的转运量范围为 0.48 ~ 1.32 g/株,转运率范围为 82.97% ~ 89.16%,茎秆的转运量范围为 0.02 ~ 0.29 g/株,转运率范围为 50.68% ~ 73.85%,这与油葵生长前期氮素吸收利用以叶片为主有关。不同水氮组合在叶片、茎秆全氮转运量、转运率和花盘全氮增加量、产量等方面的影响皆表现出显著性水平。低水 (W1N1、W1N2、W1N3) 和中水 (W2N1、W2N2、W2N3) 处理下的叶片、茎秆转运量、花盘全氮增加量和产量均表现为在同一灌水条件下随着施氮量的增加呈先增长后降低趋势,高水 (W3N1、W3N2、W3N3) 处理下,随着施氮量的增加,花盘的全氮增加量显著的减少,说明适当的增施氮肥对植株对氮素的吸收和产量形成有促进作用,但当增施氮量过多反而起到反效果。低氮 (W1N1、W2N1、W3N1) 和

中氮(W1N2、W2N2、W3N2)处理下,叶片、茎秆转运量、花盘全氮增加量和产量均表现为,在同一施氮条件下,随着灌水量的增加呈先增长后降低趋势;高氮(W1N3、W2N3、W3N3)处理下,花盘的全氮增加量和产量随着灌水量的增加显著的减少,说明适当的

增加灌水量可以促进植株对氮素的吸收和高产,但当灌水量过多反而造成抑制的效果。水氮在叶片和茎秆氮素转运、花盘全氮增加量及产量等方面皆存在显著或极显著的互作效应,在W2N2处理下,油菜生长、养分吸收以及产量效果最佳。

表3 水氮耦合对叶片和茎秆氮素转运、花盘全氮增加量及产量的影响

Tab.3 Effects of water - nitrogen coupling on nitrogen translocation of leaf and stem, and N increase in faceplate and yield

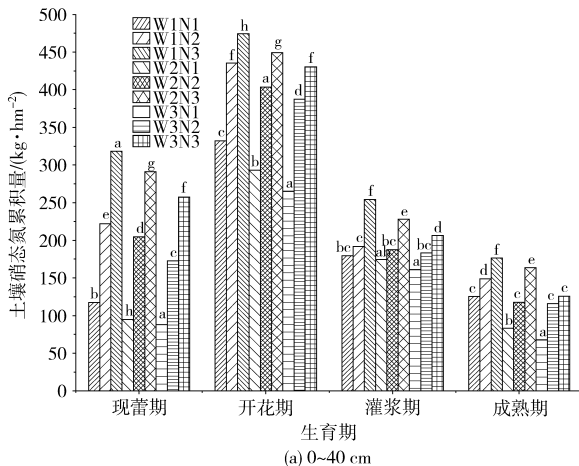
处理	叶片		茎秆		花盘全氮增加量/ (g·株 <sup>-1</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
	转运量/(g·株 <sup>-1</sup> )	转运率/%	转运量/(g·株 <sup>-1</sup> )	转运率/%		
W1N1	0.53 <sup>b</sup>	88.28 <sup>bc</sup>	0.05 <sup>b</sup>	72.64 <sup>cd</sup>	1.18 <sup>a</sup>	2783.52 <sup>a</sup>
W1N2	0.76 <sup>c</sup>	84.77 <sup>abc</sup>	0.16 <sup>d</sup>	65.42 <sup>bc</sup>	1.38 <sup>b</sup>	3386.18 <sup>bc</sup>
W1N3	0.66 <sup>d</sup>	84.47 <sup>ab</sup>	0.13 <sup>c</sup>	65.67 <sup>bcd</sup>	1.37 <sup>b</sup>	3013.84 <sup>ab</sup>
W2N1	0.57 <sup>c</sup>	87.80 <sup>bc</sup>	0.21 <sup>e</sup>	72.50 <sup>cd</sup>	1.73 <sup>e</sup>	3066.27 <sup>ab</sup>
W2N2	1.32 <sup>f</sup>	89.16 <sup>c</sup>	0.29 <sup>f</sup>	73.85 <sup>d</sup>	2.16 <sup>f</sup>	3597.11 <sup>c</sup>
W2N3	0.65 <sup>d</sup>	89.06 <sup>bc</sup>	0.14 <sup>cd</sup>	72.72 <sup>cd</sup>	1.20 <sup>a</sup>	2818.79 <sup>a</sup>
W3N1	0.48 <sup>a</sup>	82.97 <sup>a</sup>	0.02 <sup>a</sup>	70.70 <sup>cd</sup>	1.67 <sup>de</sup>	2720.00 <sup>a</sup>
W3N2	0.64 <sup>d</sup>	84.91 <sup>abc</sup>	0.05 <sup>b</sup>	50.68 <sup>a</sup>	1.61 <sup>cd</sup>	2770.79 <sup>a</sup>
W3N3	0.92 <sup>f</sup>	88.78 <sup>bc</sup>	0.12 <sup>c</sup>	61.33 <sup>b</sup>	1.53 <sup>c</sup>	2840.63 <sup>a</sup>
水	784.25 <sup>**</sup>	26.31 <sup>*</sup>	308.96 <sup>**</sup>	346.33 <sup>**</sup>	117.24 <sup>**</sup>	7.58 <sup>**</sup>
氮	2520.04 <sup>**</sup>	3.88 <sup>*</sup>	71.87 <sup>**</sup>	160.27 <sup>**</sup>	88.93 <sup>**</sup>	9.17 <sup>**</sup>
水×氮	1386.99 <sup>**</sup>	18.16 <sup>*</sup>	72.81 <sup>**</sup>	87.07 <sup>**</sup>	76.20 <sup>**</sup>	3.54 <sup>*</sup>

注: \*表示在 $p < 0.05$ 水平显著, \*\*表示在 $p < 0.01$ 水平极显著。

### 2.3 土壤硝态氮累积动态对水氮耦合的响应

对滴灌复播油菜各生育期土壤硝态氮累积量分析表明(图2),滴灌复播油菜的耕层为0~40 cm土层,是油菜对养分的主要吸收层。不同水氮组合0~40 cm(图2a)、40~80 cm(图2b)土壤硝态氮累积量均随生育期呈先上升后下降趋势,全生育期0~40 cm耕层土壤硝态氮累积值范围为67.78~474.38 kg/hm<sup>2</sup>,40~80 cm下层土壤硝态氮累积值范围为31.12~290.62 kg/hm<sup>2</sup>。开花期时土壤硝态氮出现累积峰,耕层累积量高达474.38 kg/hm<sup>2</sup>,耕层以下40~80 cm累积量亦达290.62 kg/hm<sup>2</sup>。

不同水氮组合处理对土壤硝态氮累积量具有显



著影响( $p < 0.05$ )。油菜全生育期内,同一灌水条件下,随施氮量的增加,耕层和下层土壤硝态氮累积量呈增加趋势,同一施氮量条件下,随灌水量的增加,耕层土壤硝态氮累积量降低,下层土壤硝态氮累积量增加,可见耕层土壤硝态氮累积量的减少不仅与作物对土壤硝态氮的消耗有关,更受作用于土壤硝态氮累积量的下移,此现象明显表明,随灌水量和施氮量的增加,土壤硝态氮累积量表现出明显的淋移趋势。成熟期,N1、N2和N3的0~80 cm土壤硝态氮累积量在W1条件下分别为156.63、221.62、277.89 kg/hm<sup>2</sup>,在W2条件下分别为120.58、197.89、268.45 kg/hm<sup>2</sup>,在W3条件下分别为

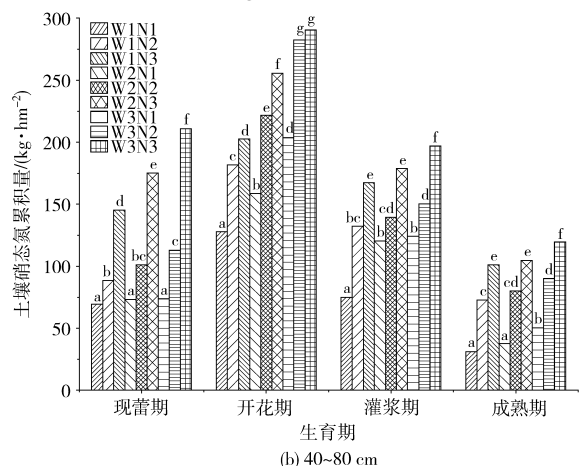


图2 水氮耦合对各生育期土壤硝态氮累积量的影响

Fig.2 Effects of water - nitrogen coupling on nitrate-N accumulation in soil at different growth stages

118.17、205.92、245.16 kg/hm<sup>2</sup>, 0~80 cm 土壤硝态氮累积量随施氮量增加而增加; W1、W2 和 W3 的 0~80 cm 土壤硝态氮累积量, 在 N1 条件下分别为 156.63、120.58、118.17 kg/hm<sup>2</sup>, 在 N2 条件下分别为 221.62、197.89、205.92 kg/hm<sup>2</sup>, 在 N3 条件下分别为 277.89、268.45、245.16 kg/hm<sup>2</sup>, 在同一施氮条件下, 不同灌水处理之间土壤硝态氮累积量差异较小。低氮和高氮水平下, 0~80 cm 土壤硝态氮累积量随灌水量增加而下降; 而在中氮水平下, 0~80 cm 土壤硝态氮累积量随灌水量增加呈先下降后上升趋势。

滴灌复播油葵土壤硝态氮相对累积量分析结果

表 4 水氮耦合对各生育期土壤相对硝态氮累积量的影响

Tab. 4 Effects of water - nitrogen coupling on relative nitrate-N accumulation in soil at different growth stages %

生育期	土层深度/cm	W1N1	W1N2	W1N3	W2N1	W2N2	W2N3	W3N1	W3N2	W3N3
现蕾期	0~40	62.85	71.50	68.66	56.36	66.94	62.44	54.49	60.50	54.94
	40~80	37.15	28.50	31.34	43.64	33.06	37.56	45.51	39.50	45.06
开花期	0~40	72.20	70.58	70.07	64.89	64.54	63.74	56.58	57.83	59.69
	40~80	27.80	29.42	29.93	35.11	35.46	36.26	43.42	42.17	40.31
灌浆期	0~40	70.61	59.22	60.30	59.13	57.36	56.06	56.44	54.93	51.19
	40~80	29.39	40.78	39.70	40.87	42.64	43.94	43.56	45.07	48.81
成熟期	0~40	80.13	67.12	63.54	68.80	60.96	59.51	57.36	56.26	51.25
	40~80	19.87	32.88	36.46	31.20	39.04	40.49	42.64	43.74	48.75

### 3 讨论

作物植株各生育器官通过自身对土壤中养分的吸收累积、转运与分配是产量形成的前提与基础。本文研究表明, 油葵在生长前期即营养生长阶段, 氮素累积以叶片和茎秆为主, 尤其以叶片为中心, 叶片的氮素累积量显著高于茎秆和花盘, 在生长后期即生殖生长阶段, 以花盘为主, 叶片和茎秆的氮素向籽粒转运, 促进产量形成。这一研究结论与张维琴等<sup>[30]</sup>、张君<sup>[31]</sup>、李晓慧等<sup>[32]</sup>和王蓉等<sup>[33]</sup>的结果一致。水氮耦合对滴灌复播油葵各器官的氮素累积、分配、吸收利用、转运以及产量的影响均存在显著或极显著性水平。在低水和中水灌溉条件下, 一定范围内(施纯氮量小于等于 232 kg/hm<sup>2</sup>) 增施氮肥可以促进各器官氮素的累积以及叶片和茎秆氮素向花盘的转运, 花盘氮素累积量显著增多, 油葵产量显著提高, 此结论符合汪德水<sup>[34]</sup>的论著, 并与孟凯等<sup>[35]</sup>研究结果一致; 在低氮和中氮施肥条件下, 一定范围内(灌水量小于等于 3 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>) 增加灌水量有助于叶片和茎秆氮素向花盘的转运, 花盘氮素累积量显著增多, 油葵产量显著提高; 在中水中氮灌溉施肥条件下的各器官氮素累积, 叶片茎秆氮素转运, 产量均达到最佳。以上油葵各器官在不同水氮组合处理下的氮素累积、转运变化趋势充分反映了以肥调水、

显示(表 4), 成熟期, N1、N2 和 N3 的 40~80 cm 土壤硝态氮相对累积量在 W1 水平下分别为 19.87%、32.88%、36.46%, 在 W2 水平下分别为 31.20%、39.04%、40.49%, 在 W3 水平下分别为 42.64%、43.74%、48.75%; W1、W2 和 W3 的 40~80 cm 土壤硝态氮相对累积量在 N1 水平下分别为 19.87%、31.20%、42.64%, 在 N2 水平下分别为 32.88%、39.40%、43.74%, 在 N3 水平下分别为 36.46%、40.49%、48.75%。随灌水量和施氮量增加, 40~80 cm 土壤硝态氮相对累积量呈增加趋势, 0~40 cm 土壤硝态氮相对累积量呈下降趋势。

以水促肥、水肥协调的生物学效应<sup>[36]</sup>, 只有合理的灌水量和施氮量、合理的水氮配比, 才最有利于氮素的累积、转运与吸收利用, 极大限度地提高油葵产量。

耕层是油葵的养分主要吸收层。不同水氮组合耕层、下层土壤硝态氮累积量均随生育期呈先上升后下降趋势, 开花期土壤硝态氮出现累积锋。全生育期内, 随施氮量增加, 0~80 cm 土层土壤硝态氮累积量增加; 随灌水量增加, 施纯氮 162 kg/hm<sup>2</sup> 和 302 kg/hm<sup>2</sup> 处理的 0~80 cm 土壤硝态氮累积量下降, 而纯施氮 232 kg/hm<sup>2</sup> 处理先下降后上升, 与前人的研究结论一致, 高水和高氮水平下, 土壤硝态氮淋失量并未达到最大值<sup>[20,37]</sup>。随施氮量的增加, 耕层和下层土壤硝态氮累积量呈增加趋势; 随灌水量的增加, 耕层土壤硝态氮累积量降低, 下层土壤则增加。随灌水量和施氮量增加, 下层土壤硝态氮相对累积量呈增加趋势, 耕层呈下降趋势。可见, 耕层土壤硝态氮累积量的减少不仅与作物对土壤硝态氮的消耗有关, 更受作用于土壤硝态氮累积量的下移, 此现象表明, 随灌水量和施氮量的增加, 土壤硝态氮累积量表现出明显的淋移趋势。这与刘小刚等<sup>[38-39]</sup>对玉米的土壤氮素研究结论相似。

新疆气候干燥、云量少、晴天多、光资源十分丰富, 全年日照时数达 2 500~3 550 h, 作物生长季

(4—9月份)日照1 500~1 950 h,年平均日照百分率为60%~75%,最高值多出现在9月份或10月份,其值为70%~80%,太阳辐射充足,全年太阳辐射总量为5 000~6 490 MJ/m<sup>2</sup>,其中,6—11月份的太阳总辐射量为2 700~3 650 MJ/m<sup>2</sup>[40]。春播作物收获后,如果不再复播作物,则严重浪费了7—10月份的光热资源。因此,研究滴灌复播油葵在相同外界环境下,植株对光的响应特征很有意义,可使其充分利用新疆地区的光照资源,促使滴灌复播油葵的高产。水资源是新疆作物种植的第一限制因素,所以利用这部分光热资源,必须考虑水资源的承载力,在具有水资源富裕和灌溉条件的地区,充分利用这部分光热资源进行复播是很有必要的,如果水资源紧张,则不宜再进行复播种植。不同的种植密度的油葵对光的反应特征不一,油葵的光合有效辐射截获量能很好地指示油葵的生长状况,灌浆初期的光合有效辐射截获量可以预测油葵籽粒产量<sup>[41]</sup>。在此基础上,应该进一步研究不同种植密度对滴灌复播油葵光反应的影响,寻找最适的种植密度。探究新疆滴灌复播油葵对光热利用的最大限能,此问题的解决,将为提高滴灌复播油葵产量提供一条有利途径。

## 4 结论

(1)水氮耦合条件下,滴灌复播油葵各器官氮素累积生育前期均以叶片为主,占植株氮素比例高达96.18%,生育后期均以花盘为中心,占植株氮素比例高达94.57%;各器官各生育期对氮素的累积、分配及生育后期氮素转运与吸收利用间均存在协同性,且水氮呈显著( $p < 0.05$ )或极显著( $p < 0.01$ )的互作效应。适当范围内(施纯氮量小于等于232 kg/hm<sup>2</sup>、灌水量小于等于3 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)增水增氮可以促进油葵各器官对氮素的有效累积,促进油葵氮素的转运与吸收利用,达到促进油葵高产的目的。

(2)水氮耦合对滴灌复播油葵土壤硝态氮累积量影响显著。随施氮量增加,0~80 cm土壤硝态氮累积量增加;随灌水量增加,土壤硝态氮累积量在0~40 cm土层降低,在40~80 cm土层增加;收获后,随灌水量和施氮量增加,土壤硝态氮相对累积量在40~80 cm土层增加,在0~40 cm土层降低。

(3)该试验条件下,最佳花盘全氮增加量为2.16 g/株,产量为3 597.11 kg/hm<sup>2</sup>,最优水氮组合为灌水3 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,施纯氮232 kg/hm<sup>2</sup>。

## 参 考 文 献

- 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2012:217-219.
- 张振华,蔡焕杰,杨润亚,等. 膜下滴灌棉花产量和品质与作物缺水指标的关系研究[J]. 农业工程学报,2005,21(6):26-29. ZHANG Zhenhua, CAI Huanjie, YANG Runya, et al. Relationships between yield, quality and CWSI of cotton under drip irrigation with mulch[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 26-29. (in Chinese)
- 栗丽,洪建平,王宏庭,等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):291-296. LI Li, HONG Jianping, WANG Hongting, et al. Effects of water and nitrogen interaction on water consumption characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 291-296. (in Chinese)
- 王云奇,陶洪斌,黄收兵,等. 施氮模式对夏玉米氮肥利用和产量效益的影响[J]. 核农学报,2013,27(2):219-224. WANG Yunqi, TAO Hongbin, HUANG Shoubing, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen utilization and yield of summer maize[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(2): 219-224. (in Chinese)
- 葛宇,何新林,王振华,等. 滴灌灌水量对复播油葵耗水特性和产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2012,31(3):111-113. GE Yu, HE Xinlin, WANG Zhenhua, et al. Effect of drip irrigation on water consumption characteristics and yield of oil sunflower[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(3): 111-113. (in Chinese)
- 王振华,郑旭荣,宋常吉. 滴灌对北疆复播油葵耗水和生长的影响效应[J]. 核农学报,2014,28(5):919-928. WANG Zhenhua, ZHENG Xurong, SONG Changji. Drip irrigation on the northern oversowing effect of water consumption and growth of oil sunflower[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(5): 919-928. (in Chinese)
- 邓力群,刘兆普,沈其荣,等. 不同施氮水平对滨海盐土上油葵产量与品质的影响[J]. 土壤肥料,2002(6):24-28. DENG Liqun, LIU Zhaopu, SHEN Qirong, et al. Effects of different nitrogen levels on yield and quality of sunflower in coastal saline soil[J]. Soils and Fertilizers, 2002(6): 24-28. (in Chinese)
- 刘小刚,张富仓,田育丰,等. 水氮处理对玉米根区水氮迁移和利用的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(11):19-24. LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, TIAN Yufeng, et al. Effects of water and nitrogen treatment on water and nitrogen transport and utilization in maize root zone[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 19-24. (in Chinese)
- LEHRSCHE G A, SOJKA R E, WESTERMANN D T. Nitrogen placement, row spacing, and furrow irrigation water positioning effects on corn yield[J]. Agronomy Journal, 2000, 92(6): 1266-1275.
- SKINNER R H, HANSON J D, BENJAMIN J G. Root distribution following spatial separation of water and nitrogen supply in furrow irrigated corn[J]. Plant and Soil, 1998, 199(2): 187-194.
- BENJAMIN J G, PORTER I K, DUKE H R, et al. Corn growth and nitrogen uptake with furrow irrigation and fertilizer bands



- [J]. *Agronomy Journal*, 1997, 89(4): 609–612.
- 12 翟丙年, 李生秀. 水氮配合对冬小麦产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 26–32.  
ZHAI Bingnian, LI Shengxiu. Effects of water and nitrogen on yield and quality of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(1): 26–32. (in Chinese)
- 13 JOLLEY N D, PIERRE W H. Profile accumulation of fertilizer-derived nitrate and total nitrogen recovery in two long-term nitrogen-rate experiments with corn[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(2): 373–378.
- 14 BENBI D K, BISWAS C R, KALKAT J S. Nitrate distribution and accumulation in an Ustochrept soil profile in a long term fertilizer experiment [J]. *Fertilizer Research*, 1991, 28(2): 173–177.
- 15 SPALDING R F, EXNER M E. Occurrence of nitrate in groundwater—a review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22(3): 392–402.
- 16 HOOKER M L, GWIN R E, HERRON G M, et al. Effects of long-term, annual applications of N and P on corn grain yields and soil chemical properties[J]. *Agronomy Journal*, 1983, 75(1): 94–99.
- 17 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 197–204.  
WANG Xi'na, WANG Zhaohui, LI Shengxiu. Effects of nitrogen application rate on yield of summer maize and soil water and nitrogen dynamics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 197–204. (in Chinese)
- 18 范丙全, 胡春芳, 平建立. 灌溉施肥对壤质潮土硝态氮淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 16–21.  
FAN Bingquan, HU Chunfang, PING Jianli. Effects of irrigation and fertilization on nitrate leaching in soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(1): 16–21. (in Chinese)
- 19 KUMAR K, GOH K M. Recovery of <sup>15</sup>N-labelled fertilizer applied to winter wheat and perennial ryegrass crops and residual <sup>15</sup>N recovery by succeeding wheat crops under different crop residue management practices[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 62(2): 123–130.
- 20 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 33–39.  
YE Youliang, LI Long. Effects of water and nitrogen on nitrate accumulation and water and nitrogen use efficiency in wheat/maize intercropping soil[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1): 33–39. (in Chinese)
- 21 SCHAHRAM B, SHARYAR B, PETER W, et al. Improvement of water use and N fertilizer efficiency by subsoil irrigation of winter wheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, 28(1): 1–7.
- 22 叶优良, 孙建好, 李隆, 等. 灌水对大麦/玉米带田土壤矿质氮影响的研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 107–111.  
YE Youliang, SUN Jianhao, LI Long, et al. Study on barley/maize intercropping soil mineral nitrogen affected irrigation[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(3): 107–111. (in Chinese)
- 23 ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Ecosystems and Environment*, 1996, 59(3): 223–231.
- 24 张维理, 田哲旭, 张宁, 等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 80–87.  
ZHANG Weili, TIAN Zhexu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution of groundwater in the north of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2): 80–87. (in Chinese)
- 25 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 1–6.  
ZHU Zhaoliang. Loss of nitrogen fertilizer in farmland and its countermeasures[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(1): 1–6. (in Chinese)
- 26 JAYNES D B, DRONES D L, MEEK D W, et al. Using the late spring nitrate test to reduce nitrate loss within a watershed [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2): 669–677.
- 27 谢志良, 田长彦. 膜下滴灌水氮耦合对棉花干物质积累和氮素吸收及水氮利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 160–165.  
XIE Zhiliang, TIAN Changyan. Effects of irrigation and nitrogen coupling on dry matter accumulation and nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of cotton [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 160–165. (in Chinese)
- 28 谭贺. 不同水氮运筹对春玉米干物质积累及氮吸收分配的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.  
TAN He. Effects of different water and nitrogen application on dry matter accumulation and nitrogen uptake and distribution of spring maize [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 29 王丽梅, 李世清, 邵明安. 水、氮供应对玉米冠层营养器官干物质和氮素累积、分配的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2697–2705.  
WANG Limei, LI Shiqing, SHAO Ming'an. Effects of N and water supply on dry matter and N accumulation and distribution in maize (*Zea mays* L.) leaf and straw-sheath[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2697–2705. (in Chinese)
- 30 张维琴, 路立平, 马彦昆, 等. 向日葵对氮、磷、钾营养素的吸收、运转和分配规律的研究[J]. *吉林农业科学*, 1998(4): 62–64.
- 31 张君. 油用型向日葵养分积累分配规律及施肥肥效研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.  
ZHANG Jun. Oil used sunflower nutrient accumulation and distribution of fertilizer and fertilizer research [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 32 李晓慧, 何文寿, 白海波, 等. 宁夏向日葵不同生育期吸收氮、磷、钾养分的特点[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(5): 167–175.  
LI Xiaohui, HE Wenshou, BAI Haibo, et al. Absorption of nitrogen, phosphorus and potassium nutrient in different growth stages

- of Ningxia sunflower [J]. Journal of Northwest Agriculture, 2009, 18 (5): 167 - 175. (in Chinese)
- 33 王蓉,何文寿,马玉波,等. 氮素用量对油菜氮磷钾养分吸收积累及产量的影响[J]. 中国油料作物学报,2014,36(4):494 - 501.  
WANG Rong, HE Wenshou, MA Yubo, et al. Effects of nitrogen application rate on nutrient uptake and accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium and yield of oil sunflower [J]. Journal of Chinese Oil Crops, 2014, 36(4): 494 - 501. (in Chinese)
- 34 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与耦合模式[M]. 北京:气象出版社,1999:82 - 85.
- 35 孟凯,张兴义,隋跃宇,等. 黑土农田水肥条件对作物产量及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2005,13(2): 119 - 121.  
MENG Kai, ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, et al. Soil water and fertilizer on crop yield and water use efficiency [J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2005, 13(2): 119 - 121. (in Chinese)
- 36 吕刚,史东梅. 三峡库区春玉米水肥耦合效应研究[J]. 水土保持学报,2005,19(3):192 - 195.  
LÜ Gang, SHI Dongmei. Journal of soil and water conservation of spring maize and the coupling effect of water and fertilizer [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(3): 192 - 195. (in Chinese)
- 37 叶优良,孙建好,李隆,等. 小麦/玉米间作根系相互作用对氮素吸收和土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业工程学报,2005, 21(11):33 - 37.  
YE Youliang, SUN Jianhao, LI Long, et al. Effect of root interaction on nitrogen uptake and nitrate nitrogen content in wheat/maize [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(11): 33 - 37. (in Chinese)
- 38 刘小刚,张富仓,杨启良,等. 调亏灌溉与氮营养对玉米根区土壤水氮有效性的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(2):135 - 141.  
LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, YANG Qiliang, et al. Effects of regulated deficit irrigation and nitrogen nutrition on soil water and nitrogen availability in maize root zone [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 135 - 141. (in Chinese)
- 39 宁堂原,焦念元,李增嘉,等. 施氮水平对不同种植制度下玉米氮利用及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报,2006, 17(12):2332 - 2336.
- 40 刘佳,何清,刘蕊,等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J]. 干旱气象,2008,26(4):61 - 66.  
LIU Jia, HE Qing, LIU Rui, et al. The characteristics of solar radiation and its solar energy resources in Xinjiang [J]. Arid Meteorology, 2008, 26(4): 61 - 66. (in Chinese)
- 41 刘胜利,黄春燕,柳延涛. 油葵冠层光合有效辐射及其截获量的特征分析[J]. 中国油料作物学报, 2013,35(增刊): 371 - 374.  
LIU Shengli, HUANG Chunyan, LIU Yantao. An analysis of the characteristics of the effective radiation and interception in the canopy of oil sunflower[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2013, 35(Supp.): 371 - 374. (in Chinese)

(上接第 130 页)

- 19 宋妮,孙景生,王景雷,等. 基于 Penman 修正式和 Penman - Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. 农业工程学报,2013, 29(19):88 - 97.  
SONG Ni, SUN Jingsheng, WANG Jinglei, et al. Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman - Monteith equations[J]. Transactions of the CASE, 2013, 29(19): 88 - 97. (in Chinese)
- 20 胡永翔,李援农,张莹. 黄土高原区滴灌枣树作物系数和需水规律试验[J]. 农业机械学报,2012,43(11):87 - 91.  
HU Yongxiang, LI Yuannong, ZHANG Ying. Experiment on crop coefficient and water requirement of drip-irrigation Jujube in Loess Plateau of China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 87 - 91. (in Chinese)
- 21 COLDITZ R R, SCHMIDT M, CONRAD C, et al. Land cover classification with coarse spatial resolution data to derive continuous and discrete maps for complex regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3264 - 3275.
- 22 LHERMITTE S, VERBESSELT J, VERSTRAETEN W W, et al. A comparison of time series similarity measures for classification and change detection of ecosystem dynamics[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3129 - 3152.
- 23 段爱旺,孙景生,刘钰,等. 北方地区主要作物灌溉用水定额[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2004.
- 24 蔡学良,崔远来. 基于异源多时相遥感数据提取灌区作物种植结构[J]. 农业工程学报,2009,25(8):124 - 130.  
CAI Xueliang, CUI Yuanlai. Crop planting structure extraction in irrigated areas from multi-sensor and multi-temporal remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8): 124 - 130. (in Chinese)
- 25 LIU Y, TEIXEIRA J L, ZHANG H J, et al. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 1998, 36(3): 233 - 246.
- 26 左余宝,田昌玉,唐继伟,等. 鲁北地区主要作物不同生育期需水量和作物系数的试验研究[J]. 中国农业气象,2009, 30(1):70 - 73.  
ZUO Yubao, TIAN Changyu, TANG Jiwei, et al. Studies on  $ET_c$  and  $K_c$  of main crops in northern Shandong Province [J]. Chinese Journal of Agro-meteorology, 2009,30(1): 70 - 73. (in Chinese)
- 27 ZWART S J, BASTIAANSEN W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. Agricultural Water Management,2004, 69(2): 115 - 133.