

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.11.034

# 河套灌区控制排水对氮素流失与利用的影响

窦旭<sup>1,2</sup> 史海滨<sup>1,2</sup> 李瑞平<sup>1,2</sup> 苗庆丰<sup>1,2</sup> 田峰<sup>1,2</sup> 于丹丹<sup>1,2</sup>

(1. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2. 高效节水技术装备与水土环境效应内蒙古工程研究中心, 呼和浩特 010018)

**摘要:** 为探求控制排水对油葵农田土壤氮素流失、氮肥利用效率以及产量的影响, 设置生育期控制排水深度分别为 40 cm (K1)、70 cm (K2)、100 cm (K3) 3 个处理, 选择明沟排水作为对照处理 (CK), 开展了田间试验。结果表明: K1 处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量 (质量比) 最高, 平均值为 20.17 mg/kg, 显著高于其他各处理 ( $P < 0.05$ ), 较 K2、K3、CK 处理高 31.36%、46.16%、15.22%。不同处理间土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量差异性大于  $\text{NH}_4^+$ -N。生育期灌溉后 0~40 cm 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量由大到小依次为 K1、CK、K2、K3。不同处理  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量均大于  $\text{NH}_4^+$ -N, K1、K2、K3、CK 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量较  $\text{NH}_4^+$ -N 分别高 60%、52.63%、30.77%、58.82%。暗管排水处理, 出口埋深越小, 排水量越小, 氮素流失量越小, 控制排水稳定了地下水埋深变化。控制排水处理 (K1、K2) 提高氮肥偏生产力 3.04%~11.15%, 提高了养分吸收量。K1 处理氮肥偏生产力最大, 分别较 K2、K3、CK 处理增加 4.54%、7.72%、11.15% ( $P < 0.05$ )。K1 处理能显著提高玉米产量 ( $P < 0.05$ ), 较 K2、K3、CK 处理分别增加 4.52%、7.69%、11.14%。油葵收获后, 各处理 0~100 cm 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量为 0.98~8.13 mg/kg, 随着土层深度的增加土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量减少, 0~40 cm 土层 CK 处理土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最大, 较 K1、K2、K3 处理分别大 11.65%、14.55%、18.19% ( $P < 0.05$ )。相同处理相同土层  $\text{NO}_3^-$ -N 含量明显高于  $\text{NH}_4^+$ -N 含量; 生育期灌溉后, 0~10 cm 土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 均随水向深层土壤运移, 而 K1 处理将大多  $\text{NO}_3^-$ -N 聚集在 20~40 cm 土层中。在生长中后期, 20~40 cm 土层为油葵根系旺盛层, K1 处理对土壤中氮素利用相对较高。综合油葵产量、土壤氮素变化规律、氮肥利用效率及氮素流失情况, 适宜的排水方式为生育期控制排水深度 40 cm (K1)。

**关键词:** 控制排水; 铵态氮; 硝态氮; 氮素流失与利用; 油葵

中图分类号: S287; S276.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)11-0315-08

OSID: 

## Effect of Controlled Drainage on Loss and Utilization of Nitrogen in Hetao Irrigation District

DOU Xu<sup>1,2</sup> SHI Haibin<sup>1,2</sup> LI Ruiping<sup>1,2</sup> MIAO Qingfeng<sup>1,2</sup> TIAN Feng<sup>1,2</sup> YU Dandan<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Huhhot 010018, China

2. High Efficiency Water-saving Technology and Equipment and Soil Water Environment

Engineering Research Center of Inner Mongolia Autonomous Region, Huhhot 010018, China)

**Abstract:** To explore the effect of controlling drainage on soil nitrogen loss, nitrogen fertilizer use efficiency and yield in oil sunflower farmland, the growth period control drainage depth was set to be 40 cm (K1), 70 cm (K2), and 100 cm (K3), open ditch drainage was chosen as the control treatment (CK), and field trials were carried out. The results showed that the soil  $\text{NH}_4^+$ -N content of K1 treatment was the highest, with an average value of 20.17 mg/kg, which was significantly higher than that of other treatments ( $P < 0.05$ ), and was 31.36%, 46.16%, 15.22% higher than that of K2, K3 and CK treatments. The  $\text{NO}_3^-$ -N content of 0~40 cm soil after irrigation during the growth period showed the trend from large to small as K1, CK, K2 and K3. The loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in different treatments was greater than that of  $\text{NH}_4^+$ -N. The loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in K1, K2, K3 and CK treatments was 60%, 52.63%, 30.77% and 58.82% higher than  $\text{NH}_4^+$ -N, respectively. For the subsurface drainage treatment, the

收稿日期: 2020-12-01 修回日期: 2020-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879132, 51769024)、内蒙古科技重大专项(zdx2018059)和内蒙古水利科技重大专项(nsk2018-M5)

作者简介: 窦旭(1994—), 男, 博士生, 主要从事灌溉排水理论与新技术研究, E-mail: 1161927928@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: shi\_haibin@sohu.com

smaller the outlet depth was, the smaller the drainage and the nitrogen loss were, and the control of drainage stabilized the change of groundwater depth. The controlled drainage treatment (K1, K2) increased the partial productivity of nitrogen fertilizer by 3.04% ~ 11.15%, and increased nutrient absorption. The partial productivity of nitrogen fertilizer in K1 treatment was the largest, which was increased by 4.54%, 7.72% and 11.15% compared with K2, K3 and CK treatments respectively ( $P < 0.05$ ). K1 treatment can significantly increase corn yield ( $P < 0.05$ ), which was 4.52%, 7.69% and 11.14% higher than that of K2, K3 and CK treatments, respectively. After the oil sunflower was harvested, the  $\text{NH}_4^+$ -N content of 0 ~ 100 cm soil in each treatment was 0.98 ~ 8.13 mg/kg, and the soil  $\text{NH}_4^+$ -N content was decreased with the increase of soil depth, the soil  $\text{NH}_4^+$ -N content in 0 ~ 40 cm soil layer of CK treatment was the largest, which was 11.65%, 14.55% and 18.19% larger than that of K1, K2 and K3, respectively ( $P < 0.05$ ). The  $\text{NO}_3^-$ -N content in the same soil layer under the same treatment was significantly higher than the  $\text{NH}_4^+$ -N content. After irrigation during the growth period, the  $\text{NO}_3^-$ -N in the 0 ~ 10 cm soil would flow to the deep soil with water, while most of the  $\text{NO}_3^-$ -N in the K1 treatment would be accumulated in the 20 ~ 40 cm soil layer. In the middle and late stages of growth, the 20 ~ 40 cm soil layer was the vigorous oil sunflower root layer, and the K1 treatment had relatively high nitrogen utilization in the soil. Considering oil sunflower yield, soil nitrogen change law, nitrogen fertilizer use efficiency and nitrogen loss, the suitable drainage method was to control the drainage depth of 40 cm during the growth period (K1).

**Key words:** controlled drainage;  $\text{NH}_4^+$ -N;  $\text{NO}_3^-$ -N; nitrogen loss and utilization; oil sunflower

## 0 引言

暗管排水技术得到广泛认可,并且有着悠久的历史<sup>[1-4]</sup>。农田暗管排水使原本潮湿而无法耕种的土壤变得适宜农业生产,并且使得该地区农业长期可持续发展<sup>[5]</sup>。随着科技的进步,暗管排水在干旱地区的应用越来越广泛,该技术提高土壤通透性,确保植物生长<sup>[6]</sup>,较明沟排水技术排水效果好,并且提高了田间土地利用效率,改善了田间交通能力,为进行耕作、种植和收获等实地作业提供了通道<sup>[7]</sup>。暗管排水强度的增加使排出的水体中富含大量的氮素,对地表水水质产生不利影响,使得排水中养分浓度过高<sup>[8]</sup>,尤其在农田灌溉时期,将土壤中的养分排出土体,降低了肥料利用,导致作物生长受限<sup>[9-10]</sup>。因此,利用控制排水系统减轻不必要的养分流失和减小环境污染是农业可持续发展的重要措施<sup>[11-12]</sup>。控制排水通过调整排水出口的高程,来控制水位和出流量,从而减少土壤中水分和养分流失<sup>[13-14]</sup>,控制排水技术已成为减少农田氮素损失的有效方法<sup>[15-17]</sup>。

有关控制排水的研究在国内外不断增多。国外学者利用暗管控制排水技术对土壤氮素<sup>[18]</sup>、作物产量<sup>[19]</sup>以及排水量<sup>[7,18-20]</sup>进行了大量研究。国内也有较多关于控制排水的研究<sup>[21-23]</sup>,袁念念等<sup>[21]</sup>研究表明,分生育阶段进行控制排水可减小田间地下水位波动,能稳定田间氮素形态、减少氮素流失。殷国玺等<sup>[23]</sup>研究表明,控制排水措施有效地降低了排水中氮浓度,减少了排水量,从而减少了氮流失量

39.1% ~ 53.2%。并且以控制排水氮浓度和土壤入渗为目标函数,建立了既减少氮流失又防止涝渍的多目标控制排水模型,探讨了最优的地表控制排水时间。

控制排水是一种新型农田排水管理措施,大量研究结果表明通过该措施可以减少农田排水量,从而减少氮素流失量<sup>[19-23]</sup>。河套灌区土壤盐渍化严重,造成土壤渗透性很差,一般油葵生长后期,不能进行灌溉,否则会造成严重的死苗现象,因此,采用控制排水可为油葵生长后期提供适宜的水分和养分。北方地区不同于南方地区的暗管排水降渍,水盐从淋洗入渗到进入暗管再到排出暗管的运移过程也不同于南方地区,同时河套灌区受到水资源短缺和土壤次生盐渍化的双重威胁,如何实现脱盐排盐的同时提高水分、养分利用效率,并减少对环境的污染,是灌区农业生产面临的最大挑战。本研究重点探讨河套灌区中度盐渍化土壤不同排水方式对土壤中氮素含量、氮素流失、氮素吸收利用的影响,深入了解排水方式对“土壤-作物-环境”系统的响应规律,进一步分析作物产量、氮肥利用效率及作物收获后土壤中氮素残留等的影响,以寻求农田最佳排水方式,减少环境污染的同时提高肥料利用效率。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验田位于河套灌区下游乌拉特灌域内(40°45'28"N,108°38'16"E,海拔1018.88 m),为暗管排水综合试验区。试验于2020年5—10月进行,

试验区地处中温带大陆性气候区,气温多变,干燥多风,日照充足,光能丰富,降水少,蒸发强,无霜期较短。多年平均气温 6~8℃;多年平均降雨量 196~215 mm、蒸发量 2 172.5 mm、无霜期 130 d、风速 2.5~3 m/s、日照时数 3 230.9 h;最大冻土深度为 1.2 m。属于典型的干旱地区。油葵生育季(5—9月)有效降雨量为 227.8 mm(图 1)。

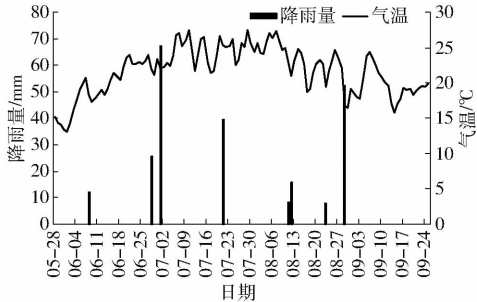


图 1 2020 年油葵生育期降雨量和气温

Fig. 1 Rainfall and temperature during growth period of oil sunflower in 2020

## 1.2 土壤性质

利用环刀在 1 m 土层内土壤剖面上取原状土后在室内试验测土壤容重、饱和(质量)含水率、田间持水率、饱和导水率,共 6 层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm),各剖面取 3 个重复。初始土壤剖面(0~100 cm)平均质量含水率约为 22.57%,电导率( $EC_{1:5}$ )为 1.27 dS/m,pH 值为 8.8 左右,根据土壤盐渍化等级划分标准<sup>[24]</sup>,属于中度盐渍化土壤。试验区土壤基本物理性质如表 1 所示。土壤基础肥力为有机质、全氮、有效氮、有效磷、速效钾质量比分别为 13.54 g/kg、0.85 g/kg、86 mg/kg、9.432 mg/kg、218 mg/kg。

## 1.3 试验设计

试验选择田间小区进行,设置 4 个试验小区,生育期控制排水深度分别为 40 cm(K1)、70 cm(K2)、100 cm(K3),选择明沟排水作为对照处理(CK)。其中暗管排水试验区,每个小区布设 2 根暗管,暗管

表 1 试验区土壤物理性质

Tab. 1 Soil physical properties in experimental area

土层深度/cm	土壤容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和导水率/( $cm \cdot s^{-1}$ )	土壤类型
0~20	1.426~1.464	0.352~0.354	0.219~0.230	$3.939 \times 10^{-5}$	粉土
20~40	1.468~1.472	0.360~0.365	0.238~0.242	$3.798 \times 10^{-5}$	粉质壤土
40~60	1.470~1.476	0.346~0.351	0.240~0.246	$1.238 \times 10^{-5}$	粉土
60~80	1.483~1.488	0.340~0.347	0.229~0.234	$2.073 \times 10^{-5}$	粉土
80~100	1.485~1.490	0.348~0.353	0.239~0.241	$5.176 \times 10^{-5}$	粉土

埋深 100 cm,间距 20 m,管径为 80 mm,坡度为 0.1%。试验小区长 40 m,宽 30 m,每个试验小区间隔 10 m,并在小区周围设有保护带,埋设 1 m 深聚氯乙烯塑料布隔离,防止相互干扰。对照选择当地常规明沟排水,当地常规排水沟深 1.5 m,间距 100 m。播种前对试验区进行了激光平地 and 盐碱地改良,试验区土壤中加入脱硫石膏(30 t/hm<sup>2</sup>)置换土壤吸附的有害钠离子;施加细沙(沙丘沙,85.05 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>)改善土壤通透性,改变土壤性质。暗管排水小区土壤采样点位布设在距暗管 0、2.5、5、10 m,对照区土壤采样点位布设在距排水沟 0.4、12.5、25、50 m 处。每个点取 3 次重复,每隔 10 d 采集 1 次,灌水与降雨前后加测。具体布设如图 2(B 为暗管间距、L 为暗管长度)所示。

2020 年 5 月 20 日春灌,灌水量为 2 050 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,6 月 1 日人工施底肥播种,供试作物为油料向日葵(简称油葵),品种为澳 33,行距 60 cm,株距 20 cm,施肥量为尿素(含 N 46%)130 kg/hm<sup>2</sup>,磷酸二铵(含 N 18%、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 44%)290 kg/hm<sup>2</sup>,硫酸钾(含 K<sub>2</sub>O 50%)150 kg/hm<sup>2</sup>,施肥后立即覆盖地膜进行人工点播,播种后穴口用细砂覆盖,种植密度 4.95 × 10<sup>4</sup> 株/hm<sup>2</sup>。

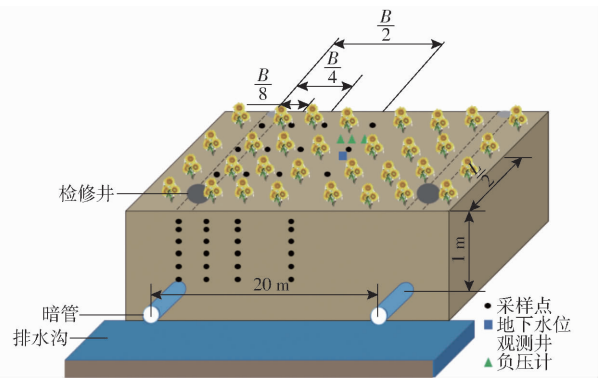


图 2 田间布置示意图

Fig. 2 Field layout diagram

7 月 18 日油葵现蕾期灌水 9 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,追肥尿素 130 kg/hm<sup>2</sup>,9 月 29 日收获,油葵生育期划分为:苗期(6 月 10 日—7 月 12 日)、现蕾期(7 月 13 日—8 月 4 日)、开花期(8 月 5—26 日)、成熟期(8 月 27 日—9 月 28 日)、收获期(9 月 29 日)。灌溉水为黄河水,矿化度约为 0.67 g/L,灌溉水通过水泵抽取,灌水量用水表计量与控制。

## 1.4 数据采集与测定方法

### 1.4.1 土壤铵态氮和硝态氮含量

土壤养分主要测定硝态氮、铵态氮含量,实验室

内采用氯化钾溶液提取—分光光度计法测定。

#### 1.4.2 产量及植株氮素含量

油葵成熟时,在各小区非边行选取标准样株 20 株,单独收获考种测产。用  $H_2SO_4-H_2O_2$  消煮,靛酚蓝比色法测定油葵植株氮素含量<sup>[25]</sup>,计算公式为

$$N_{HI} = \frac{G_N}{P_N} \times 100\% \quad (1)$$

$$P_{FPN} = \frac{Y}{F} \quad (2)$$

式中  $N_{HI}$ ——氮收获指数, %

$G_N$ ——籽粒吸氮量,  $kg/hm^2$

$P_N$ ——植株吸氮量,  $kg/hm^2$

$P_{FPN}$ ——氮肥偏生产力,  $kg/kg$

$Y$ ——油葵产量,  $kg/hm^2$

$F$ ——肥料纯养分 N 的投入量,  $kg/hm^2$

#### 1.5 数据计算及分析方法

采用 Excel 整理数据和制图,利用 SPSS 17.0 软件进行方差分析,多重比较采用 LSD 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 排水方式对土壤氮素含量的影响

图 3 为油葵生育期灌水前到收获时的  $NH_4^+-N$  含量,如图 3a 所示,灌溉后 0~40 cm 土层  $NH_4^+-N$  含量迅速上升,变化幅度为 8.2~55.37 mg/kg。其中 K1 处理  $NH_4^+-N$  含量最高,平均值为 20.17 mg/kg,显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ),较 K2、K3、CK 处理高 31.36%、46.16%、15.22%, $NH_4^+-N$  含量由大到小依次为 K1、CK、K2、K3。各处理灌溉后  $NH_4^+-N$  含量变化趋势基本一致,在灌溉施肥 3 d 左右达到最大值,K1 处理相对较大,为 55.37 mg/kg,整个高峰期持续 6 d 左右,随后逐渐降低,并且保持较低水平。

如图 3b 所示,随着土壤深度的增加, $NH_4^+-N$  含量逐渐降低,对于 40~100 cm 土壤而言,灌溉后各处理  $NH_4^+-N$  含量均有所上升,但升幅小于 0~40 cm,最大值出现延迟,大约在灌溉施肥 5 d 后达到最大值,K1、K2、K3、CK 处理最大值分别为 20.13、17.83、15.86、17.03 mg/kg。灌水后,田间尿素水解成  $NH_4^+-N$ ,深层土壤由于没有  $NH_4^+-N$  转化来源且  $NH_4^+-N$  本身随水迁移能力较弱,导致深层土壤  $NH_4^+-N$  含量较低。控制排水处理 (K1、K2)  $NH_4^+-N$  含量显著高于自由排水 (K3) 和明沟排水 (CK) 处理 ( $P < 0.05$ ),由大到小表现为 K1、K2、CK、K3。

图 4 为油葵生育期灌溉后不同处理  $NO_3^- -N$  含量变化曲线。由于  $NO_3^- -N$  易随水分淋失,且控制排

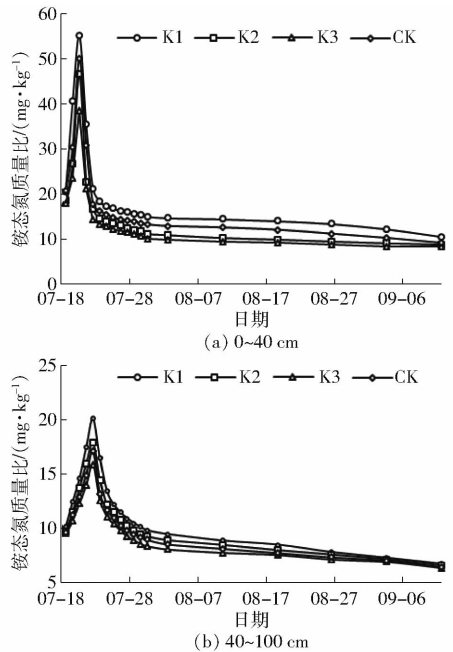


图 3 不同处理土壤铵态氮含量变化曲线  
Fig. 3 Changes of soil ammonium nitrogen content in different treatments

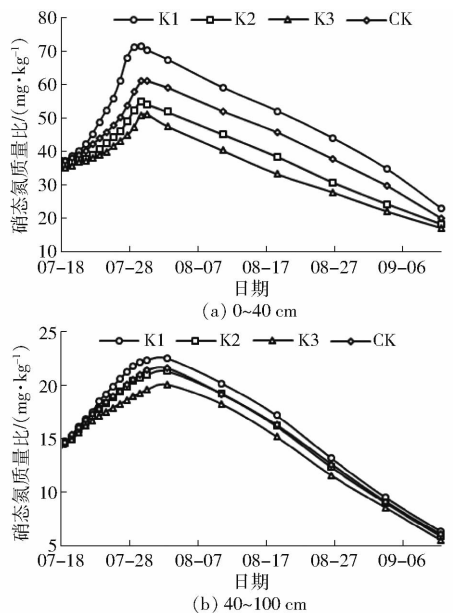


图 4 不同处理土壤硝态氮含量变化曲线  
Fig. 4 Changes of nitrate nitrogen content in different treatments

水能保存更多的水分,为硝化作用创造有利条件,不同处理间  $NO_3^- -N$  含量差异性大于  $NH_4^+-N$ 。如图 4a 所示, $NO_3^- -N$  含量在灌溉后波动较为剧烈,0~40 cm 土壤  $NO_3^- -N$  含量变化幅度为 17.10~71.11 mg/kg,灌溉施肥后,土壤  $NO_3^- -N$  含量逐渐增大,各处理达到峰值时间基本一致,持续一段时间开始逐渐下降。其中控制排水 (K1、K2) 具有较好的保肥效应,0~40 cm 土壤  $NO_3^- -N$  含量平均值分别为 51.74、41.11 mg/kg,明沟排水由于排水较少,0~40 cm 土

壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量也相对较高,平均值为 45.45 mg/kg, K3 处理排水较多,养分流失相对较严重,0~40 cm 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量平均值为 38.38 mg/kg。生育期灌溉后 0~40 cm 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量由大到小依次为 K1、CK、K2、K3, K1 处理较 K2、K3、CK 处理分别高 25.84%、34.8%、13.83% ( $P < 0.05$ )。

如图 4b 所示,40~100 cm 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 峰值比 0~40 cm 出现时间相对较晚, K1、K2、K3、CK 处理峰值分别为 22.45、21.23、20.00、21.52 mg/kg。平均含量由大到小为 K1、CK、K2、K3,但差异性小于 0~40 cm,表明 K2、K3 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 易迁移到土壤深层。

综上所述,  $\text{NH}_4^+$ -N 在土壤垂直剖面上运移并不明显,而含量随时间波动明显。K1 处理对阻止  $\text{NO}_3^-$ -N 下渗污染地下水有一定作用,能较好地把土壤中的氮素保持在作物根层(0~40 cm)。到油葵生长中后期,土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 处理间的差异明显减小,说明 K1 对作物后期土壤氮素吸收有促进作用。

## 2.2 排水方式对氮素流失的影响

图 5(图中不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ))为不同排水方式生育期灌溉施肥后土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量。由图可以看出,不同处理  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量均大于  $\text{NH}_4^+$ -N, K1、K2、K3、CK 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量较  $\text{NH}_4^+$ -N 分别高 60%、52.63%、30.77%、58.82%,并且暗管排水处理在生育期灌溉施肥后呈现控制排水深度越深  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量越大的态势。

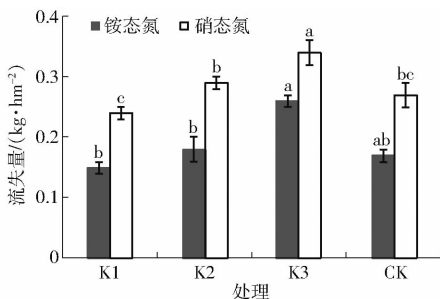


图 5 不同处理铵态氮和硝态氮流失量

Fig. 5 Ammonium nitrogen and nitrate nitrogen losses in different treatments

各处理  $\text{NH}_4^+$ -N 流失量差异性较小,只有 K1、K2 与 K3 处理间存在显著 ( $P < 0.05$ ),这是因为  $\text{NH}_4^+$ -N 极易被带负电荷的土壤胶体所吸附,随水运移能力较弱。其中生育期控制排水深度 40 cm (K1)  $\text{NH}_4^+$ -N 流失量最小,为 0.15 kg/hm<sup>2</sup>,分别较 K2、K3、CK 处理低 21.05%、42.31%、11.76%。而  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量在处理间存在较大差异,流失量由大到小为 K3、K2、CK、K1,其中 K1、K2、K3 处理间差异

显著 ( $P < 0.05$ ), K1、K2 处理较 K3 分别降低 24.41%、14.71%,明沟排水处理(CK)由于排水量较小,  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量也相对较小。而暗管自由排水(K3)由于排水深度较深,排水量相对较大,因此  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量较大,生育期灌溉施肥后  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量为 0.34 kg/hm<sup>2</sup>。

暗管排水处理,出口埋深越小,排水量越小,氮素流失量越小,与 K3 处理相比, K1 处理稳定了地下水埋深变化,从而降低了径流的水力梯度,排水流速随之减小,水流携带氮素的能力相对减弱,并且控制排水延长了土壤水分在农田中的滞留时间,使  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量减少。生育期控制排水深度 40 cm (K1)能显著减少  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量 ( $P < 0.05$ ),并且能保持根层土壤(0~40 cm)有充足的养分供作物生长发育。

## 2.3 排水方式对氮素吸收利用与作物产量的影响

由表 2 可以看出,不同排水方式植株吸氮量存在不同差异,暗管排水处理随着生育期控制排水深度的增加,植株吸氮量明显减少,其中 K1 处理植株吸氮量最大,较 K2、K3、CK 处理显著增加 17.54%、39.08%、23.47% ( $P < 0.05$ ), K2 处理较 K3 处理显著增加 18.33% ( $P < 0.05$ )。CK 处理植株吸氮量较 K1、K2 处理低 19.00%、4.80%,与 K1 处理存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。K3 处理由于排水量和氮素流失相对较大,导致植株吸氮量较小。不同排水方式对氮收获指数的影响与植株吸氮量相比差异性较小,其中 K1、K2 处理氮收获指数显著高于 K3 处理和 CK 处理, K1、K2 处理较 K3、CK 处理高 15.82%~29.83% ( $P < 0.05$ )。K1、K2 处理对促进氮收获指数增加有积极作用。

表 2 不同排水方式氮素利用效率及产量

Tab. 2 Nitrogen utilization efficiency and yield of different drainage methods

处理	植株吸氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	氮收获 指数/%	氮肥偏生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
K1	142.14 <sup>a</sup>	35.53 <sup>a</sup>	22.33 <sup>a</sup>	3 836.11 <sup>a</sup>
K2	120.93 <sup>b</sup>	33.01 <sup>a</sup>	21.36 <sup>b</sup>	3 670.33 <sup>b</sup>
K3	102.20 <sup>c</sup>	28.50 <sup>b</sup>	20.73 <sup>c</sup>	3 562.10 <sup>c</sup>
CK	115.12 <sup>b</sup>	27.43 <sup>b</sup>	20.09 <sup>d</sup>	3 451.50 <sup>d</sup>

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平,下同。

氮肥偏生产力由大到小依次为 K1、K2、K3、CK,控制排水处理(K1、K2)提高氮肥偏生产力 3.04%~11.15%,提高了养分吸收量。其中 K1 处理氮肥偏生产力最大,显著高于其他处理,分别较 K2、K3、CK 处理增加 4.54%、7.72%、11.15% ( $P < 0.05$ )。不

同排水方式对作物产量具有较大的影响(表2),K1能显著提高玉米产量( $P < 0.05$ ),较K2、K3、CK处理分别增加4.52%、7.69%、11.14%,同时K2处理产量显著高于K3、CK处理( $P < 0.05$ ),分别较K3、CK处理高3.04%、6.34%,K2、K3处理由于生育期灌水流失大量水分和养分导致作物减产,春灌明沟排水(CK)对盐分淋洗不充分,油葵受盐分胁迫,影响出苗以及生长,导致产量较低,这也是导致植株吸氮量、氮收获指数、氮肥偏生产力较低的主要原因。综上,生育期控制排水不仅能提高作物产量,还提高了植株利用效率、氮收获指数和氮肥偏生产力。对作物生长和氮素的吸收利用具有促进作用。其中在生育期控制排水深度40 cm(K1)效果更加明显,对于本研究K1处理对氮肥的利用效率较好。

## 2.4 排水方式对土壤中氮素残留的影响

图6a为油葵收获后各层土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量,各处理0~100 cm土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量为0.98~8.13 mg/kg,随着土层深度的增加土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量减少,0~40 cm土层CK处理土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量最大,较K1、K2、K3处理分别大11.65%、14.55%、18.19% ( $P < 0.05$ ),其余处理由大到小依次为K1、K2、K3,但处理间无显著差异。对于深层土壤而言,K3处理在60~80 cm土层范围内 $\text{NH}_4^+$ -N含量最大,较K1、K2、CK处理分别高21.19%、10.42%、19.17% ( $P > 0.05$ ),K1、K2、CK处理间无显著差异。80~100 cm各土层土壤 $\text{NH}_4^+$ -N含量几乎相同,在0.98~1.11 mg/kg之间。

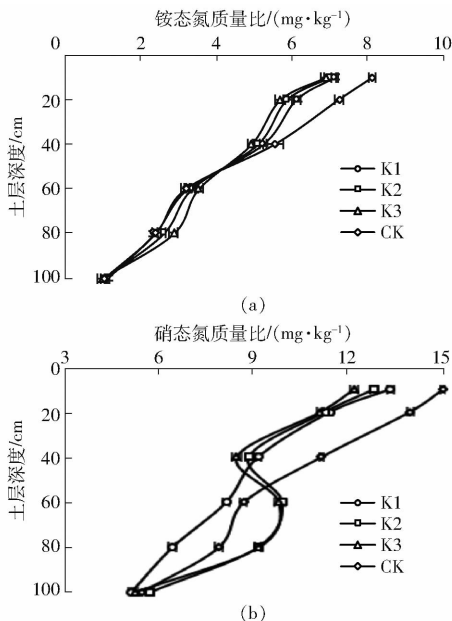


图6 不同处理不同土层土壤氮素含量变化曲线  
 Fig. 6 Variation curves of soil nitrogen content in different soil layers under different treatments

如图6b所示,油葵收获后,相同处理相同土层 $\text{NO}_3^-$ -N含量明显高于 $\text{NH}_4^+$ -N含量,且差异性较 $\text{NH}_4^+$ -N含量大,0~40 cm CK处理 $\text{NO}_3^-$ -N含量显著大于其他各处理,较其他处理大12.52%~25.71% ( $P < 0.05$ )。表层土壤(0~10 cm)K1处理 $\text{NO}_3^-$ -N含量较大,但与K2、K3处理均无显著性差异,生育期灌溉后,0~10 cm土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N均随水向深层土壤流动,而K1处理将大多 $\text{NO}_3^-$ -N聚集在20~40 cm土层中。在生长中后期,20~40 cm土层为油葵根系旺盛层,K1处理对土壤中氮素利用相对较高,因此20~40 cm土壤 $\text{NO}_3^-$ -N含量在K1、K2、K3处理间无显著性差异,K1较K2、K3处理分别仅高3.17%和8.07%。60~100 cm土层中K2、K3处理 $\text{NO}_3^-$ -N含量相对较高,K2、K3处理由于排水深度较深,在灌溉后 $\text{NO}_3^-$ -N向深层土壤迁移较多,导致 $\text{NO}_3^-$ -N在60~100 cm聚积,且分别显著高于K1处理28.68%、24.52% ( $P < 0.05$ )。CK处理 $\text{NO}_3^-$ -N在土壤中残留量相对较多,对土壤和地下水造成较大威胁。

## 3 讨论

### 3.1 控制排水对土壤中 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N流失的影响

研究表明,提高控制排水的出口高度可以提高反硝化率并且降低硝化率<sup>[15]</sup>,从而提高土壤和地下水中 $\text{NH}_4^+$ -N含量,但大多在淹水时间较长的水稻田中。同时,随着排水深度的减小,排水流量也随之减少,这也增加了土壤中 $\text{NH}_4^+$ -N浓度<sup>[15]</sup>。本研究处于干旱地区,在生育前期,土壤有氧的条件有利于 $\text{NH}_4^+$ -N的硝化作用, $\text{NO}_3^-$ -N在土壤中逐渐累积<sup>[26]</sup>;生育期灌溉后并没有提高其反硝化率,因为灌溉后水分很快渗入地下水中,抬升地下水位,充足的水分和氧气反而提高硝化作用。同时由于灌溉后面田较湿润,且试验区土壤渗透系数较小,有机碳和有机氮矿化能力加强,有机质减少,土壤对 $\text{NH}_4^+$ -N的吸附能力降低<sup>[27]</sup>;这也是试验区土壤中 $\text{NH}_4^+$ -N含量相对较小,与 $\text{NO}_3^-$ -N含量差异较大的原因。

由于 $\text{NH}_4^+$ -N随水的迁移能力较弱,因此在灌溉后土壤中的 $\text{NH}_4^+$ -N含量变化差异较小,排水中 $\text{NH}_4^+$ -N含量相对于 $\text{NO}_3^-$ -N较小,这与许多研究结果一致<sup>[18,28-29]</sup>。研究表明在水稻中此差异性小于旱地<sup>[18]</sup>,其原因可能为水稻中淹水时间过长,限制了 $\text{NH}_4^+$ -N的硝化作用并且提升了反硝化作用。本研究位于河套灌区,蒸发强烈,灌水后很难产生淹水条件,因此排水中的 $\text{NH}_4^+$ -N含量小于 $\text{NO}_3^-$ -N,其处

理间的差异性小于  $\text{NO}_3^-$ -N。

### 3.2 控制排水对土壤中 $\text{NO}_3^-$ -N 和 $\text{NO}_3^-$ -N 流失的影响

控制排水可以有效增加土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量, 并且减少  $\text{NO}_3^-$ -N 流失<sup>[15,17-18]</sup>。乔欣等<sup>[17]</sup>研究表明, 控制排水较自由排水可以增加氮素含量, 同时提高养分利用效率; SUNOHARA 等<sup>[30]</sup>研究表明, 控制排水较自由排水  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量减少  $1.85 \times 10^{-2} \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。这与本研究结果一致, 在灌溉后, 随着控制排水深度逐渐减小, 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量增加, 控制排水为作物提供了较好的保肥作用。同时随着控制排水深度的减小, 土壤中的水明显增加, 也为作物生长提供了充足的水分。

$\text{NO}_3^-$ -N 的流失规律与  $\text{NH}_4^+$ -N 流失规律相似, 土壤中的  $\text{NO}_3^-$ -N 流失必不可少, 同时由于易随水迁移的特点, 大量的  $\text{NO}_3^-$ -N 被排出土体, 造成环境污染, 因此提高排水出口高度能有效缓解这一问题<sup>[15]</sup>。 $\text{NO}_3^-$ -N 损失对控制排水的响应取决于排水的  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和排水量, 因此控制排水对  $\text{NO}_3^-$ -N 损失的影响不同。本研究表明, 自由排水 (K3) 在生育期灌溉施肥后,  $\text{NO}_3^-$ -N 流失程度较大, 较控制排水深度 40 cm (K1) 增加 41.67%。原因可能为在土壤灌溉之后, 由于试验区土壤相对较黏, 水分下渗速率较慢, 在土壤中存在时间较长, 溶解了较多的  $\text{NO}_3^-$ -N, 因此将携带较多的  $\text{NO}_3^-$ -N 排出土体。同时由于试验区养分含量相对较小, 在排出盐分的同时尽量减少养分流失, 使得作物能有较充足的养分供其生长。因此, 减小控制排水的深度对于农业生产以及环境污染具有重大意义。

### 3.3 控制排水对作物产量的影响

控制排水对不同作物产量有着不同的影响<sup>[13]</sup>, 大多数都有着积极的影响<sup>[12,18,29]</sup>, 但有的研究也表明控制排水导致作物产量减少或者增产不显著<sup>[31]</sup>, 可能是因为控制排水高度设置过高, 或者与土壤中盐分含量等因素有关。TOLMIO 等<sup>[13]</sup>研究表明, 玉米对控制排水的响应最积极, 控制排水技术使玉米产量提高了 26.3%, 在干旱年份, 当作物受到干旱胁迫时, 控制排水效果更明显。NEGM 等<sup>[32]</sup>利用 DRAINMOD-DSSAT 模型很好地预测了作物产量, 研究表明控制排水条件下作物产量明显高于自由排水。SUNOHARA 等<sup>[33]</sup>研究表明, 玉米控制排水较自由排水产量平均增长率为 4%, 差异不显著, 大豆控制排水较自由排水产量平均增长率为 3%, 差异不显著。

适当的控制排水, 可以促进作物有效地吸收养

分和水分, 有利于根系生长, 促进干物质积累, 从而进一步影响籽粒产量<sup>[18]</sup>。本研究中, 控制排水深度 40 cm (K1) 较自由排水 (K3) 显著增加了植株吸氮量、氮收获指数、氮肥偏生产力和产量, 原因可能为试验区高蒸发量和土壤肥力较差, 使得作物生长中后期需要大量的水分和养分, 控制排水深度 40 cm (K1) 正好为作物生长提供了所需要的条件, 使得其氮素利用率提高并且为作物干物质积累提供了有利因素。同时收获后土壤中氮素残留情况进一步说明, 控制排水残留在土壤中的氮素大部分被作物吸收和利用, 最终使得作物增产。

## 4 结论

(1) 生育期灌溉后, 生育期控制排水深度 40 cm (K1) 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最高, 平均值为 20.17 mg/kg, 显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ ), 较 K2、K3、CK 处理高 31.36%、46.16%、15.22%。不同处理间  $\text{NO}_3^-$ -N 含量差异性大于  $\text{NH}_4^+$ -N。生育期灌溉后 0~40 cm 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量由大到小依次为 K1、CK、K2、K3。生育期控制排水深度 40 cm (K1) 对阻止  $\text{NO}_3^-$ -N 下渗污染地下水有一定作用, 能较好地把土壤中的氮素保持在作物根层 (0~40 cm)。到油菜生长中后期, 土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 处理间的差异明显减小, 说明生育期控制排水深度 40 cm (K1) 对作物后期土壤氮素吸收有促进作用。

(2) 不同处理  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量均大于  $\text{NH}_4^+$ -N, K1、K2、K3、CK 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量较  $\text{NH}_4^+$ -N 分别高 60%、52.63%、30.77%、58.82%。生育期控制排水 40 cm (K1) 延长了土壤水分在农田中的滞留时间, 使  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 流失量减少。

(3) 控制排水处理 (K1、K2) 提高氮肥偏生产力 3.04%~11.15%, 提高了养分吸收量。生育期控制排水深度 40 cm (K1) 氮肥偏生产力最大, 显著高于其他处理, 分别较 K2、K3、CK 处理增加 4.54%、7.72%、11.15% ( $P < 0.05$ )。生育期控制排水深度 40 cm (K1) 能显著提高玉米产量 ( $P < 0.05$ ), 较 K2、K3、CK 处理分别增加 4.52%、7.69%、11.14%。

(4) 油菜收获后 0~40 cm 土层 CK 处理  $\text{NH}_4^+$ -N 含量最大, 较 K1、K2、K3 处理分别大 11.65%、14.55%、18.19% ( $P < 0.05$ )。0~10 cm 土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 均随水向深层土壤运移, 而 K1 处理将大多  $\text{NO}_3^-$ -N 聚集在 20~40 cm 土层中。在生长中后期, 20~40 cm 土层为油菜根系旺盛层, K1 处理对土壤中氮素利用相对较高。综合油菜产量、土壤氮素变化规律、氮肥利用效率及氮素流失情况, 适宜的排水方式为生育期控制排水深度 40 cm (K1)。

## 参考文献

- [1] SKAGGS R W, BRAVE M A, GILLIAM J W. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1994, 24(1): 1-32.
- [2] SKAGGS R W, BRAVE M A, GILLIAM J W. Predicting effects of water table management on loss of nitrogen from poorly drained soils[J]. *European Journal of Agronomy*, 1995, 4(4): 441-451.
- [3] EVANS R O, SKAGGS R W, GILLIAM J W. Controlled versus conventional drainage effects on water quality[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1995, 121(4): 271-276.
- [4] FISHER M J, FAUSEY N R, SUBLER S E, et al. Water table management, nitrogen dynamics, and yields of corn and soybean[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(6): 1786-1795.
- [5] MADRAMOOTOO C A, DODDS G T, DAPADOPOULOS A. Agronomic and environmental benefits of water-table management[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1993, 119(6): 1052-1065.
- [6] AYARS J E, CHRISTEN E W, HORNBuckle J W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1): 128-139.
- [7] YOUSSEF M A, ABDELBAKI A M, NEGM L M, et al. DRAINMOD-simulated performance of controlled drainage across the U. S. Midwest[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 197(3): 54-66.
- [8] WILLIAMS M R, KING K W, FAUSEY N R. Drainage water management effects on tile discharge and water quality[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 148(5): 43-51.
- [9] 罗纨, 贾忠华, 方树星, 等. 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(5): 608-612, 618. LUO Wan, JIA Zhonghua, FANG Shuxing, et al. Effect of drainage control on salt and water balance in rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5): 608-612, 618. (in Chinese)
- [10] 袁念念, 黄介生, 谢华, 等. 暗管控制排水棉田  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 运移转化试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 13-18. YUAN Niannian, HUANG Jiesheng, XIE Hua, et al. Experiment of the nitrogen transformation and transportation in controlled pipe-drainage cotton field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(3): 13-18. (in Chinese)
- [11] 罗纨, 李山, 贾忠华, 等. 兼顾农业生产与环境保护的农田控制排水研究进展[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(16): 1-6. LUO Wan, LI Shan, JIA Zhonghua, et al. Advances in research of controlled drainage for crop production and environmental protection[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(16): 1-6. (in Chinese)
- [12] 景卫华, 罗纨, 温季, 等. 农田控制排水与补充灌溉对作物产量和排水量影响的模拟分析[J]. *水利学报*, 2009, 40(9): 1140-1146. JING Weihua, LUO Wan, WEN Ji, et al. Analysis on the effect of controlled drainage and supplemental irrigation on crop yield and drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40(9): 1140-1146. (in Chinese)
- [13] TOLOMIO M, BORIN M. Controlled drainage and crop production in a long-term experiment in North-Eastern Italy[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 222(30): 21-29.
- [14] WOLI K P, DAVID M B, COOKE R A, et al. Nitrogen balance in and export from agricultural fields associated with controlled drainage systems and denitrifying bioreactors[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(11): 1558-1566.
- [15] HE Y P, ZHANG J Y, YANG S H, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221(8): 231-237.
- [16] DRURY C F, TAN C S, GAYNOR J D, et al. Water table management reduces tile nitrate loss in continuous corn and in a soybean-corn rotation[J]. *The Scientific World Journal*, 2001, 1: 163-169.
- [17] 乔欣, 邵东国, 刘欢欢, 等. 节灌控排条件下氮磷迁移转化规律研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 862-868. QIAO Xin, SHAO Dongguo, LIU Huanhuan, et al. Study on the moving and transforming law of N and P under water-saving irrigation and controlled drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(7): 862-868. (in Chinese)
- [18] WANG Z Y, SHAO G C, LU J, et al. Effects of controlled drainage on crop yield, drainage water quantity and quality: a meta-analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106253.
- [19] LUO W, SANDS G R, YOUSSEF M A, et al. Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern corn-belt with DRAINMOD - NII[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 97(3): 389-398.
- [20] FANG Q X, MALONE R W, MA L, et al. Modeling the effects of controlled drainage, N rate and weather on nitrate loss to subsurface drainage[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 103: 150-161.
- [21] 袁念念, 黄介生, 黄志强, 等. 控制排水和施氮量对旱地土壤氮素运移转化的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 106-112. YUAN Niannian, HUANG Jiesheng, HUANG Zhiqiang, et al. Effects of controlled drainage and nitrogen fertilizer application on nitrogen migration and transformation in dryland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(13): 106-112. (in Chinese)
- [22] 孙怀卫, 杨金忠, 王修贵, 等. 大棚控制排水对土壤水氮变化的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 37-45. SUN Huaiwei, YANG Jinzhong, WANG Xiugui, et al. Effects of controlled drainage on soil water and nitrogen changes in greenhouse[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(5): 37-45. (in Chinese)
- [23] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 减少氮流失的田间地表控制排水措施研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 926-931. YIN Guoxi, ZHANG Zhanyu, GUO Xiangping, et al. Effect of drainage controlling devices on nitrogen losses in surface runoff of farmland[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(8): 926-931. (in Chinese)
- [24] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [25] 周慧, 史海滨, 徐昭, 等. 有机无机肥配施对盐渍土供氮特性与作物水氮利用的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(4): 299-307. ZHOU Hui, SHI Haibin, XU Zhao, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen supply and crop water and nitrogen utilization in salinized soils [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(4): 299-307. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200434&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200434&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.034. (in Chinese)



119(3): 603 – 609.

- [19] AMMAR A, BENNACEUR H, CHAARI I, et al. Relaxed Dijkstra and A\* with linear complexity for robot path planning problems in large-scale grid environments[J]. *Soft Computing*, 2016, 20(10): 4149 – 4171.
- [20] HAN J H, CHOI D J, PARK S U, et al. Hyper parameter optimization using a genetic algorithm considering verification time in a convolutional neural network[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2020, 15(2): 721 – 726.
- [21] SEONGGI L, SEJONG O, SEONGWOOK C, et al. Numerical analysis on aerodynamic performances and characteristics of quad tilt rotor during forward flight[J]. *Journal of the Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 2018, 46(3): 197 – 209.
- [22] 王雷, 石鑫. 基于改进蚁群算法的移动机器人动态路径规划[J]. *南京理工大学学报*, 2019, 43(6): 700 – 707.  
WANG Lei, SHI Xin. Dynamic path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2019, 43(6): 700 – 707. (in Chinese)
- [23] 孙波, 姜平, 周根荣, 等. 改进遗传算法在移动机器人路径规划中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2019, 55(17): 162 – 168.  
SUN Bo, JIANG Ping, ZHOU Genrong, et al. Application of improved genetic algorithm in path planning of mobile robots[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2019, 55(17): 162 – 168. (in Chinese)

(上接第 322 页)

- [26] 袁念念, 黄介生, 谢华, 等. 暗管控制排水棉田氮素流失规律试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 8 – 13.  
YUAN Niannian, HUANG Jiasheng, XIE Hua, et al. Experimental study of nitrogen leaching pattern in controlled pipe-drainage cotton field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(9): 8 – 13. (in Chinese)
- [27] APARICIO V, COSTA J L, ZAMORA M. Nitrate leaching assessment in a long-term experiment under supplementary irrigation in humid Argentina[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(12): 1 361 – 1 372.
- [28] 高世凯, 俞双恩, 王梅, 等. 旱涝交替下控制灌溉对稻田节水及氮磷减排的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 122 – 128.  
GAO Shikai, YU Shuang'en, WANG Mei, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on saving water and reducing nitrogen and phosphorus loss in paddy field under alternate drought and flooding condition[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(5): 122 – 128. (in Chinese)
- [29] NG H Y F, TAN C S, DRURY C F, et al. Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 90(1): 81 – 88.
- [30] SUNOHARA M D, GOTTSCHALL N, CRAIOVAN E, et al. Controlling tile drainage during the growing season in Eastern Canada to reduce nitrogen, phosphorus, and bacteria loading to surface water[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 178(1): 159 – 170.
- [31] WESSTRÖM I, JOEL A, MESSING I. Controlled drainage and subirrigation—a water management option to reduce non-point source pollution from agricultural land[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 198(3–4): 74 – 82.
- [32] NEGM L M, YOUSSEF M A, JAYNES D B. Evaluation of DRAINMOD – DSSAT simulated effects of controlled drainage on crop yield, water balance, and water quality for a corn-soybean cropping system in central Iowa[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 57 – 68.
- [33] SUNOHARA M D, CRAIOVAN E, TOPP E, et al. Comprehensive nitrogen budgets for controlled tile drainage fields in eastern Ontario, Canada[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43(2): 617 – 630.