doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.033

河套灌区控制排水对油葵生长与养分利用的影响

窦　旭[1,2]　史海滨[1,2]　李瑞平[1,2]　苗庆丰[1,2]　田　峰[1,2]　于丹丹[1,2]

(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: 为系统地从土壤水分、盐分、养分和油葵生长的变化来揭示不同排水方式的调控效应,设置 4 个处理,生育期暗管控制排水深度分别为 40 cm(K1)、70 cm(K2)、100 cm(K3),春灌排水深度均为 100 cm,选择明沟排水(深度 150 cm)作为对照处理(CK),开展了田间试验。结果表明:K1 处理自油葵开花期到收获 1 m 土层平均储水量比 K2、K3 处理提高了 0.01% ~4.53%,为作物生长后期提供了有效的水分。K1 处理稳定了土壤水消耗的速率,削弱了水平方向土壤水分的消耗差异。春灌后 K1、K2、K3 处理平均脱盐率分别为 49.02%、50.43%、49.70%,处理间无显著差异,而明沟排水仅为 35.52%。暗管排水处理暗管中间点与暗管上土壤盐分淋洗率相差 7.1 ~8.2 个百分点,处理间无显著差异。CK 处理盐分淋洗差异性相对较小,距明沟 0.4 m 处与明沟中间点相差 2.8 个百分点。至生育后期(开花期)不同处理存在土壤返盐情况,K1、K2、K3、CK 较春灌前平均返盐率分别为 28.63%、24.20%、20.83%、22.07%。K1、K2 处理返盐程度相对较高,但其含盐量不影响油葵后期正常生长。K1 处理在现蕾期铵态氮含量显著高于其他处理($P<0.05$),较 K2、K3、CK 处理高 30.43%、45.90%、14.83%;开花期铵态氮含量由大到小依次为 K1、CK、K2、K3,差异性小于成熟期;成熟期 K1、K2 处理铵态氮含量与 CK 处理无显著差异。硝态氮含量在现蕾期、开花期和成熟期含量 K1 处理最高,K1 处理较 K2、K3、CK 处理分别高 13.62% ~30.80%、14.33% ~53.09%、7.17% ~28.10%($P<0.05$)。K1 处理可减小地下水位波动,使氮素以稳定形态存在,减少硝态氮流失。暗管排水可以提高油葵出苗率 2.5 ~2.7 个百分点。K1 处理增加有效株占比 2.3 ~5.0 个百分点;油葵出苗 50 d 后能显著增加株高 5.10% ~14.87%、茎粗 6.29% ~22.46%;提高水分利用效率 1.16% ~10.8%;提高氮磷钾肥料偏生产力 7.69% ~11.16%;增产 4.52% ~11.14%;并且有效地提高了叶片光合能力。从对土壤控盐、保肥、稳产与水肥利用效率多角度综合分析,春灌排水深度 100 cm,生育期控制排水深度 40 cm(K1)的控制排水方式是适宜的选择。

关键词: 油葵; 盐渍化灌区; 中度盐渍化土壤; 养分利用; 控制排水

中图分类号: S287; S276.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)12-0313-11　　**OSID**:

Effect of Controlled Drainage on Oil Sunflower Growth and Nutrient Utilization in Hetao Irrigation District

DOU Xu[1,2]　SHI Haibin[1,2]　LI Ruiping[1,2]　MIAO Qingfeng[1,2]　TIAN Feng[1,2]　YU Dandan[1,2]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural 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: Aiming to systematically reveal the regulatory effects of different drainage methods from the growth of oil sunflowers and the changes in soil moisture, salinity and nutrients, four treatments were set up, i.e., the control drainage depth during the growth period was 40 cm (K1), 70 cm (K2), 100 cm (K3), and the spring irrigation drainage depth was 100 cm. Open ditch drainage (depth 150 cm) was selected as the control treatment (CK), and field trials were carried out. The results showed that the average water storage of 1m soil layer from the flowering period of the oil sunflower to the harvest of K1 treatment was increased by 0.01% ~4.53% compared with that of K2 and K3 treatments, which

收稿日期: 2020-12-21　修回日期: 2021-01-30

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(zdzx2018059)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

provided effective water for the later stage of crop growth. K1 treatment stabilized the rate of soil water consumption and weakened the difference in soil water consumption in the horizontal direction. After spring irrigation, the average desalination rates of K1, K2, and K3 treatments were 49.02%, 50.43%, and 49.70%, respectively, and there was no significant difference between treatments, but the open ditch drainage was only 35.52%. The desalination rate was inversely proportional to the horizontal distance from the concealed pipe (open ditch). The intermediate point of the concealed pipe drainage treatment and the soil salt leaching effect on the concealed pipe were 7.1 ~ 8.2 percentage points, and there was no significant difference between treatments. Salt leaching difference of CK treatment was relatively small, the difference between 0.4 m from the open ditch and the middle point of the open ditch was 2.8 percentage points. In the late growth period (flowering period), the soil salinity return was more serious. In the late growth period (flowering period), different treatments had soil salt return. The average salt return rates of K1, K2, K3, and CK were 28.63%, 24.20%, 20.83%, and 22.07%, respectively. K1 and K2 treatments had relatively high salinity return, but their content did not affect the normal growth of oil sunflower in the later stage. The content of ammonium nitrogen in the control drainage 40 cm (K1) during the budding stage was significantly higher than that of other treatments ($P < 0.05$), and was 30.43%, 45.90%, 14.83% higher than that of K2, K3, and CK treatments. The ammonium nitrogen content in the flowering stage was K1, CK, K2, and K3 in descending order, and the difference was smaller than that in the mature stage; there was no significant difference in ammonium nitrogen content between K1 and K2 treatments at maturity stage and CK treatment. The content of nitrate nitrogen was the highest in the budding stage, flowering stage and maturity stage of K1 treatment, which was 13.62% ~30.80%, 14.33% ~53.09%, 7.17% ~28.10% higher than that of K2, K3 and CK treatments, respectively ($P < 0.05$). Controlled drainage can reduce groundwater level fluctuations, make nitrogen exist in a stable form, and reduce the loss of nitrate nitrogen. Controlled drainage can increase the seedling rate of oil sunflower by 2.5 ~ 2.7 percentage points. K1 treatment increased the percentage of effective plants by 2.3 ~ 5.0 percentage points, oil sunflower can significantly increase plant height by 5.10% ~14.87% and stem thickness by 6.29% ~22.46% after 50 days of unearthed, increase water use efficiency by 1.16% ~ 10.8%, increase the partial productivity of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers by 7.69% ~11.16%, increase production by 4.52% ~11.14%, and effectively improve the photosynthetic capacity of the leaves. From the comprehensive analysis of soil salt control, fertilizer preservation, stable production and water and fertilizer use efficiency, the controlled drainage method of spring irrigation and drainage depth of 100 cm and controlled drainage depth during growth period of 40 cm (K1) was a suitable choice.

Key words: oil sunflower; salinized irrigation area; moderately saline soil; nutrient utilization; controlled drainage

0 引言

水资源短缺已经成为制约干旱区、半干旱区经济发展以及生态环境健康的关键因素,破解“水危机”的关键是实现农业高效用水[1]。在干旱区,暗管排水对控制作物根区盐分和防止土壤剖面盐分积累起着至关重要的作用[2-4],然而暗管排水系统通常为连续排水而设计,不考虑养分流失和对作物生产的影响[5]。农田排水沟/管加快了水分运动,排水淋洗出盐分的同时携带养分、农药等化学物质进入水体[6-7],污染环境的同时造成作物因缺少养分而减产。控制排水已被认定为一种可持续的管理方式,可以节省更多的土壤水分,改善水资源利用,提高灌溉水、养分利用效率,同时减少养分的流失[8]。

早在 20 世纪 90 年代,张蔚臻等[9-11]就对暗管排水中的氮素流失进行了研究,并且对不同作物的排水模数进行了研究,提出了控制排水的排水方式。近年来,有关控制排水的研究不断增多。罗纨等[12]对宁夏银南灌区稻田的控制排水过程进行了研究,表明控制排水明显节水和减少农业排水非点源污染,可减少地下排水量 50% 左右。袁念念等[13-14]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,暗管排水量随控制排水出口埋深减小而减少,较自由暗管排水减少 61.3% ~86.9%。殷国玺等[15]以控制排水氮浓度和土壤入渗量为目标函数,探讨了最优的地表控制排水时间。国外对控制排水的研究相对较早[16-17],也相对较多,AYARS 等[5]研究表明,在干旱区控制排水的过程中维持田间水盐平衡是研究的关键。LUO 等[18]利用 DRAINMOD - NⅡ模型,模拟了控制排水过程中硝态氮流失以及作物产量,表明控制排水不会对作物产量造成明显影响,

并且减少了氮素流失，对环境污染较小。NEGM 等[8]利用 DRAINMOD－DSSAT 耦合模型对农田排水中水文水质特性及作物生长情况进行预测研究，模型能很好地模拟与预测不同排水方式作物生长、氮素流失以及产量。河套灌区作为典型的盐渍化灌区，仍然缺乏控制排水条件下综合作物和土壤水、盐、肥指标的系统研究，无法全面了解暗管排水条件下控制排水的调控响应。

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[19－23]，所倡导的理念是按需精量排水[24]。河套灌区土壤盐渍化严重，造成土壤渗透性很差，一般油葵生育后期，不能进行灌溉，否则会造成严重的死苗现象，油葵生育后期处于水分亏缺状态，因此采用控制排水为油葵生长后期提供适宜的水分和养分。本研究重点探讨河套灌区不同排水方式对油葵生长情况、光合作用以及土壤水分、盐分、氮素运移规律的影响，通过春季灌溉淋洗盐分后，在生育期采用控制排水方式，以期达到最佳的水分和养分供应与盐分的控制效果，深入了解“土壤－作物”系统对排水方式的响应规律，进一步分析排水方式对作物产量、水肥利用效率的影响，以寻求农田最佳排水方式，实现水分和肥料高效利用，保持土壤水分、盐分、养分利用之间的平衡。

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（北纬 40°45′28″、东经 108°38′16″，海拔 1 018.88 m），为暗管排水综合试验区。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。试验区多年平均气温 6～8℃；多年平均降雨量 196～215 mm、蒸发量为 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。试验区属于典型的干旱地区。试验于 2020 年 5—10 月进行，油葵生育期（5—9 月）有效降雨量为 227.85 mm（图 1）。

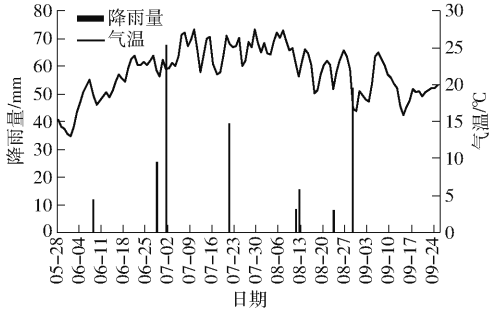


图 1　2020 年油葵生育期降雨量和气温

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在室内试验测量土壤容重、饱和（质量）含水率、田间持水率、饱和导水率，共 5 层（0～20 cm、20～40 cm、40～60 cm、60～80 cm、80～100 cm），各剖面取 3 个重复点。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[25]，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。对土壤（0～40 cm）养分进行了测定，并按照“第二次土壤普查养分分级标准”划分养分级别后的地力条件如表 2 所示。

表 1　试验区土壤物理性质

Tab. 1　Soil physical quality in experimental area

土层深度/cm	土壤容重/(g·cm^{-3})	饱和含水率/%	田间持水率/%	饱和导水率/(cm·s^{-1})	土壤类型
0～20	1.426～1.464	35.2～35.4	21.9～23.0	3.939×10^{-5}	粉土
20～40	1.468～1.472	36.0～36.5	23.8～24.2	3.798×10^{-5}	粉质壤土
40～60	1.470～1.476	34.6～35.1	24.0～24.6	1.238×10^{-5}	粉土
60～80	1.483～1.488	34.0～34.7	22.9～23.4	2.073×10^{-5}	粉土
80～100	1.485～1.490	34.8～35.3	23.9～24.1	5.176×10^{-5}	粉土

表 2　土壤基础地力划分

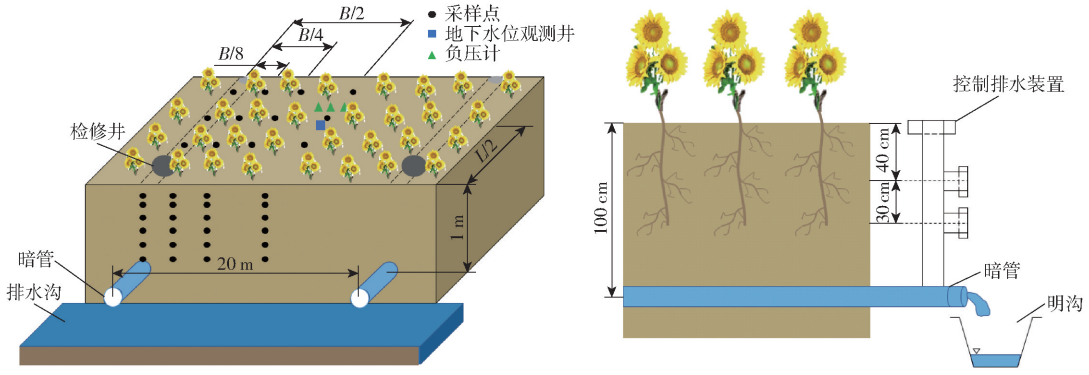
Tab. 2　Division of soil basic fertility

指标	有机质质量比/(g·kg^{-1})	全氮质量比/(g·kg^{-1})	有效氮质量比/(mg·kg^{-1})	有效磷质量比/(mg·kg^{-1})	速效钾质量比/(mg·kg^{-1})
数值	13.54	0.85	86	9.432	218
分级	4 级	4 级	4 级	4 级	1 级

1.3　试验设计

试验选择田间小区进行，设置 4 个处理，每个小区设置 3 个重复，共 12 个小区，生育期控制排水深度分别为 40 cm（K1）、70 cm（K2）、100 cm（K3），春灌排水深度均为 100 cm，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。试验区已在 2019 年进行了激光平地和盐碱地改良,试验区土壤中加入脱硫石膏(30 t/hm^2)置换土壤吸附的有害钠离子;施加细沙(沙丘沙,85.05 m^3/hm^2)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 处,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(图中 B 为暗管间距、L 为暗管长度)所示。



(a) 小区布设 (b) 控制排水装置

图 2 田间布置示意图

Fig. 2 Field layout diagrams

2020 年 5 月 20 日春灌,灌水量为 2 050 m^3/hm^2,6 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^2,磷酸二铵(含 N 18%、P_2O_5 44%)290 kg/hm^2,硫酸钾(含 K_2O 50%)150 kg/hm^2,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^{4}株/hm^2。7 月 18 日油葵现蕾期灌水 900 m^3/hm^2,追肥尿素 130 kg/hm^2,9 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

出苗率及生育指标:在 6 月上旬于试验田实际调查出苗率,采用手持计数器记录每个小区中点籽区出苗数。收获时计数各小区实际油葵株数。从出苗开始,对油葵株高、茎粗进行监测,每 10 d 测量 1 次,测量工具为卷尺和游标卡尺。

油葵光合特性:采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 型光合仪,在油葵现蕾期、开花期、成熟期监测油葵叶片光合特性,09:00—11:00 监测各小区具有代表性的植株,每棵植株的相同部位选取生长正常的向阳叶片测定叶净光合速率 P_n、蒸腾速率 T_r、气孔导度 G_s、胞间 CO_2 浓度 C_i,单个样片数据记录 3~5 次。

土壤盐分、含水率与养分:采用土钻采集土壤 1 m 深度,共 6 层(0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm)带回实验室利用雷磁 DDS-307A 型电导率仪测定土水质量比为 1∶5的土壤浸提液电导率,采用干燥法测定土壤含水率。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。

产量: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。

1.5 数据计算及分析方法

1.5.1 数据计算方法

(1)出苗率及有效株占比

出苗率为单位面积出苗数占种植密度百分比,有效株占比为单位面积有效株数占种植密度百分比。

(2)叶片水分利用率

叶片水平上的水分利用率(LWUE)一般采用光合速率 P_n 与蒸腾速率 T_r 的比值来反映,计算公式为

$$LWUE = \frac{P_n}{T_r} \tag{1}$$

(3)土壤储水量

土壤储水量计算式为

$$W = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i d_i \theta_i \times 10 \tag{2}$$

式中 W——土壤储水量,mm

γ_i——第 i 层土壤容重,g/cm^3

d_i——第 i 层土壤厚度,cm

θ_i——第 i 层土壤质量含水率,%

(4)土壤脱盐率

脱盐率是指试验小区土壤盐分含量的减小值占

初始值的比例，它可以评价淋洗和暗管协同作用下土壤层的脱盐效果。土壤脱盐率计算公式为

$$N=\frac{S_1-S_2}{S_1}\times 100\% \quad (3)$$

式中　N——脱盐率，%

S_1——灌溉前土壤盐分含量，dS/m

S_2——灌溉后土壤盐分含量，dS/m

(5)水分利用效率

土壤水分利用效率(WUE)计算公式为

$$WUE=\frac{Y}{ET} \quad (4)$$

其中

$$ET=P+I+G-L-D-\Delta W \quad (5)$$

式中　WUE——土壤水分利用效率，kg/(hm^2·mm)

Y——作物籽粒产量，kg/hm^2

ET——油葵生育期的耗水量，mm

P——降水量，mm　　I——灌水量，mm

G——地下水补给量，mm

L——深层渗漏量，mm

D——侧向排水量，mm

ΔW——试验开始及结束时 0 ~ 100 cm 土壤层中土壤平均储水量的变化量，mm

根据田间负压计实测土壤水势数据确定土壤水分的流向，利用达西定律计算地下水补给量和深层渗漏量。

(6)肥料偏生产力

肥料偏生产力是指施用某一特定肥料下的作物产量与施肥量的比值，计算公式为

$$PFP=\frac{Y}{F} \quad (6)$$

式中　PFP——肥料偏生产力，kg/kg

F——特定肥料纯养分(N、P_2O_5、K_2O)的投入量，kg/hm^2

1.5.2　数据分析方法

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。用 sufer 12 软件绘制土壤盐分剖面分布图。

2　结果与分析

2.1　排水方式对农田土壤水分的影响

2.1.1　农田土壤储水量

图 3 为不同排水条件下土壤 1 m 土层储水量的变化过程，K1 处理在油葵开花期之后的土壤储水量均不同程度的高于其他处理，因为 K1 处理在生育期排水深度为 40 cm，只有少量的水分排出土体。油葵生育后期处于亏水状态，K1 处理为油葵生长后期提供了较好的水肥条件，增加了作物的蒸腾量，从而增大耗水量，缩小了油葵生长后期 K1 处理与其他处理之间 1 m 土层储水量的差异。K1 处理从油葵开花期到收获期 1 m 土层平均储水量较 K2 处理提高了 0.01% ~ 1.94%，较 K3 处理提高了 1.98% ~4.53%。

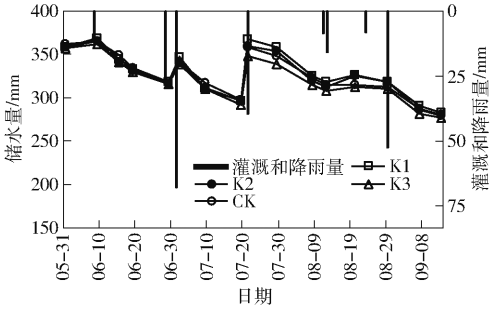


图 3　土壤储水量动态变化

Fig. 3　Soil water storage dynamics

2.1.2　农田水分消耗过程

图 4(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)，下同)为油葵生育期灌水后 7 d 的耗水量及耗水强度，油葵耗水量可通过水量平衡求得，灌溉后 K1 处理耗水量显著大于其他处理，因为 K1 处理具有较好的保水保肥效应，在生长中后期需要消耗更多的水分为作物提供良好的生长环境，其蒸腾作用相对较大，同时根系吸水较多。K1 较 K2、K3、CK 处理耗水量提高 1.58% ~ 6.71%、1.32% ~ 2.56%、3.81% ~8.75%。由于距离暗管(明沟)越近，水分流失相对越大，各处理距暗管(明沟)越远，耗水量越大，K3 处理变化幅度最大，在暗管 $B/2$ 处与 0 m 处相差 2.91 mm，K2 在距暗管 $B/2$ 处与 0 m 处相差 1.29 mm，CK 处理在距明沟 $B/2$ 处与 0.4 m 处相差 2.69 mm，K1 处理在距离暗管不同处理其耗水量几乎相同。综上，生育期控制排水深度 40 cm (K1)稳定了土壤水消耗的速率，削弱了水平方向土壤水分的消耗差异，改善了油葵生长中后期土壤水分状况，有利于光合生理活动的进行。

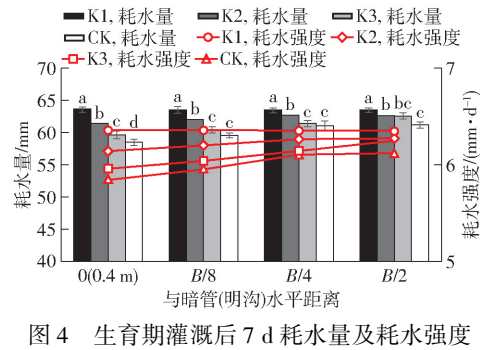


图 4　生育期灌溉后 7 d 耗水量及耗水强度

Fig. 4　Total water storage consumption and water consumption intensity at 7 d intervals after irrigation during growth period

2.2 排水方式对农田土壤剖面盐分的影响

图 5 为不同排水方式下与暗管(明沟)不同水平距离土壤盐分(以 EC 表示,单位 dS/m)剖面分布图,图中可以反映出灌溉后土壤盐分水平与垂直方向运移规律,暗管排水改变了土壤水分分布规律,其盐分也随之改变。春灌前由于强烈的蒸发作用,土壤返盐情况严重,盐分呈现显著的表聚型,主要积聚在 0 ~ 60 cm 土层范围内。经过 2 次灌溉后,土壤脱盐率在土体中自上而下降低。土壤平均脱盐效果由大到小表现为 K3、K2、K1、CK,平均脱盐率分别为 27.09%、26.05%、25.72%、18.54%。春灌的目的主要是淋洗土壤中的盐分,暗管排水处理排水深度均为 100 cm,淋洗效果较好,K1、K2、K3 处理平均脱盐率分别为 49.02%、50.43%、49.70%,处理间无显著差异,而 CK 处理仅为 35.52%,显著低于 K1、K2、K3 处理($P < 0.05$)。脱盐率与距暗管(明沟)水平距离成反比,K1、K2、K3 处理在暗管上部(0 m)平均土壤脱盐率高达 53.62%、53.13%、53.59%,

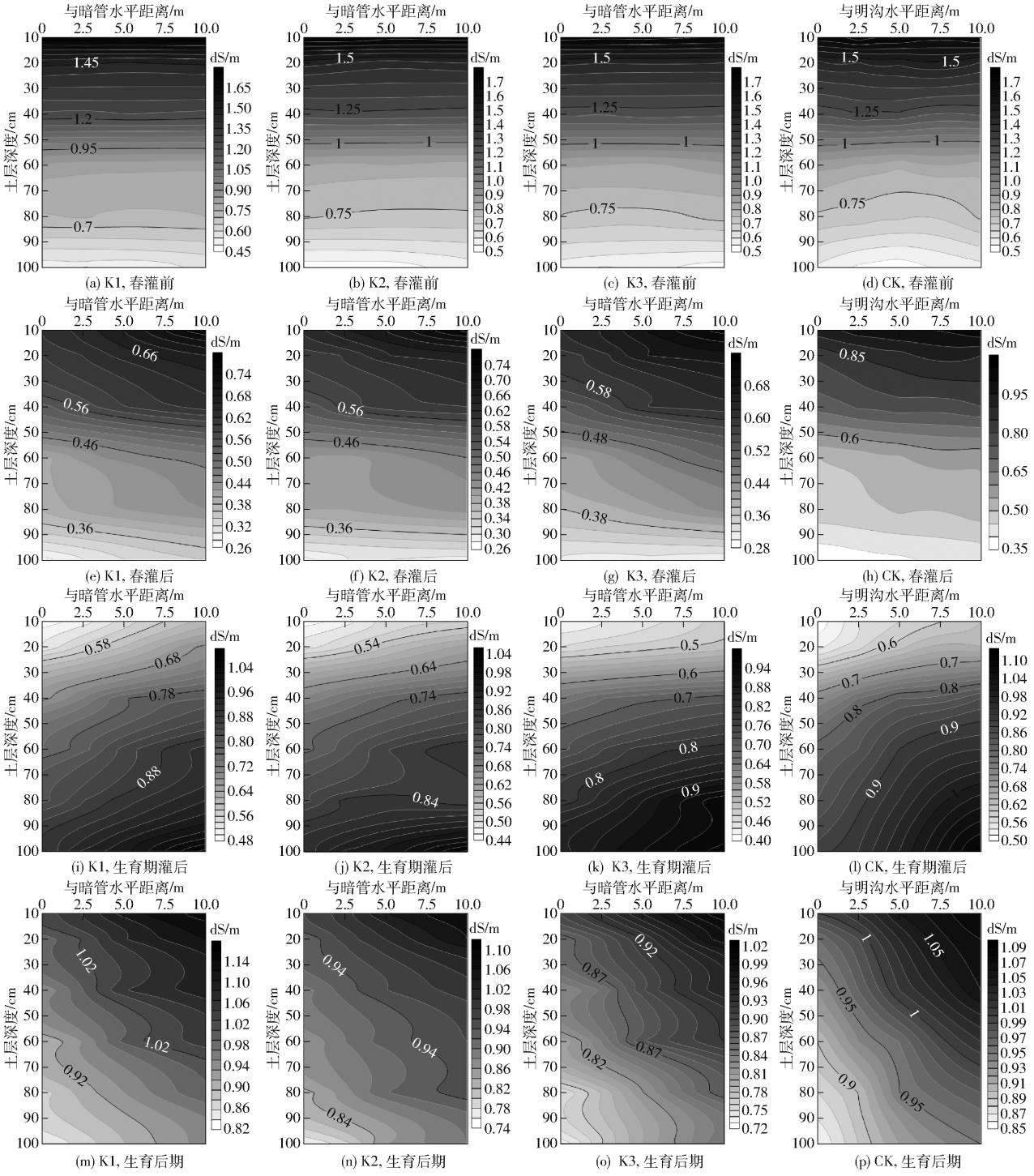


图 5 不同排水方式下与暗管(明沟)水平距离土壤盐分剖面分布

Fig. 5 Distributions of soil salinity profile from different drainage methods to dark pipe (drainage ditch) horizontal distance

CK 处理距明沟 0.4 m 处土壤脱盐率为 35.48%。暗管(明沟)中间点的脱盐效果最差,分别为 45.46%、48.67%、46.46%、32.67%。暗管排水处理空间上具有较大差异,距离暗管远处与暗管上土壤盐分淋洗率相差 7.1 ~ 8.2 个百分点,处理间无显著差异。CK 处理差异性相对较小,距明沟 0.4 m 处与明沟中间点相差 2.8 个百分点。春灌后盐分由表聚型向均匀型变化,K1、K2、K3、CK 处理 EC 分别为 0.26 ~ 0.76 dS/m、0.27 ~ 0.75 dS/m、0.30 ~ 0.73 dS/m、0.36 ~ 1.05 dS/m。

生育期灌溉目的是为作物生长提供充足的水分和养分,满足作物生长条件,因此对土壤盐分淋洗效果较弱,由于灌水量较小,土壤排水也相对较少,K3 处理生育期灌溉脱盐率最大,仅为 3.85%,K1 处理由于生育期排水深度较小,盐分大部分向深层土壤运移,60 ~ 100 cm 土壤盐分增加 3.34%,K2、K3、CK 处理 60 ~ 100 cm 土层土壤脱盐率分别为 -3.34%、-2.96%、-2.59%、-3.09%。至生育后期(开花期)不同处理存在土壤返盐情况,K1、K2、K3、CK 较春灌前平均返盐率分别为 28.63%、24.20%、20.83%、22.07%。K1、K2 处理返盐程度相对较高,但其含量不影响油葵后期正常生长,作物生长后期,随着植株不断生长,对水分和养分的需求量较大,因此控制排水处理能为作物生长后期提供更适宜的水分和养分。

2.3　排水方式对土壤中氮素的影响

根层土壤是油葵的养分主要吸收层,铵态氮和硝态氮是植株重要的氮素来源[26-27]。对生育期灌溉后至收获根层(0 ~ 40 cm)土壤中铵态氮与硝态氮进行分析,结果如图 6 所示。如图 6a 所示,0 ~ 40 cm 土层铵态氮质量比在 8.29 ~ 22.76 mg/kg 之间,生育期灌溉之后,大量尿素被水解为铵态氮,在油葵现蕾期达到最大值,随着油葵根系的吸收作用,田间土壤氨挥发以及土壤内持续的硝化作用开始逐渐降低。K1 处理在现蕾期铵态氮含量显著高于其他处理($P < 0.05$),较 K2、K3、CK 处理高 30.43%、45.90%、14.83%;开花期铵态氮含量由大到小依次为 K1、CK、K2、K3,差异性小于成熟期;成熟期 K1、K2 处理铵态氮含量与 CK 处理无显著差异,说明 K1 处理土壤中的铵态氮在开花期被油葵吸收利用量较多,导致成熟期各处理土壤铵态氮含量差异性减小。

图 6b 为根层(0 ~ 40 cm)土壤硝态氮含量,硝态氮含量显著高于铵态氮含量,硝态氮质量比在 22.53 ~ 54.99 mg/kg 之间,灌水后尿素被迅速水解转化为铵态氮,进而再通过硝化作用转化为硝态氮。

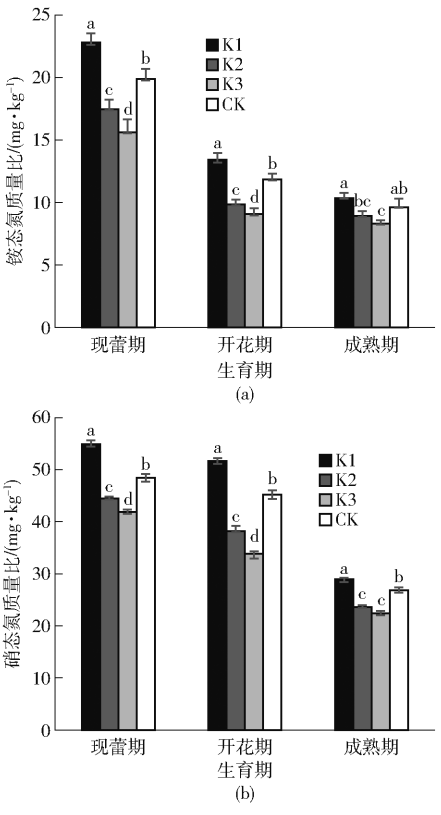


图 6　不同排水方式下 0 ~ 40 cm 土层氮素含量动态变化

Fig. 6　Dynamic changes of nitrogen content in 0 ~ 40 cm soil layer under different drainage methods

由于硝态氮易随水分淋失[28],K2、K3 处理将土壤中部分硝态氮淋洗出土体,土壤中的硝态氮含量较低,作物吸收利用较少,在现蕾期、开花期和成熟期含量均显著低于 K1 处理($P < 0.05$),K1 处理较 K2、K3、CK 处理分别高 13.62% ~ 30.80%、14.33% ~ 53.09%、7.17% ~ 28.10%。K1 处理可减小地下水位波动,使氮素以稳定形态存在,减少硝态氮流失,同时硝态氮保留在土体内,土壤渗透性能相对较小,土壤中硝态氮在 0 ~ 40 cm 土层较多,能满足作物充分吸收与利用。开花期硝态氮含量差异性最明显。成熟期含量差异性明显减小,K1 处理向提高作物吸氮量、减少氮素流失与土壤残留的方向发展,对节约水氮用量和环境保护起到积极作用。

2.4　排水方式对油葵生长的影响

2.4.1　油葵出苗率及收获有效株数

由表 3 可知,暗管排水方式可以提高油葵出苗率 2.5 ~ 2.7 个百分点,对保苗效果有促进作用,因为春灌后暗管排水对土壤的盐分淋洗效果较好,油葵出苗不受盐分胁迫的影响,而明沟排水春灌脱盐率较低,受盐分的影响出苗率相对较低。K1 处理可显著提高收获时对籽粒产量有贡献的有效株占比($P < 0.05$),分别较 K2、K3、CK 处理提高 2.3、2.5、5.0 个百分点。

表 3 出苗率及有效株占比

Tab. 3 Seedling emergence rate and effective plant percentage

处理	种植密度/(株·hm^{-2})	出苗数/(株·hm^{-2})	收获有效株数/(株·hm^{-2})	出苗率/%	有效株占比/%
K1	4.95×10^4	4.467×10^{4a}	4.311×10^{4a}	90.2^a	87.1^a
K2	4.95×10^4	4.462×10^{4a}	4.199×10^{4b}	90.1^a	84.8^b
K3	4.95×10^4	4.469×10^{4a}	4.188×10^{4b}	90.3^a	84.6^b
CK	4.95×10^4	4.336×10^{4b}	4.063×10^{4c}	87.6^b	82.1^c

注:同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平,下同。

2.4.2 油葵株高、茎粗

油葵株高对不同排水方式响应不同(图 7a),各处理油葵随时间延后而呈现先增长后稳定态势,在出苗后 30 ~ 60 d,各处理株高快速增大,K1、K2、K3、CK 处理出苗后 60 d 较 30 d 株高增长率分别为 280%、292.16%、290%、272.34%,其中暗管排水处理株高显著高于明沟排水处理($P<0.05$)。K2、K3、CK 处理在出苗后 60 d 株高达到最大值,分别为 195、190、175 cm,趋于稳定并开始缓慢下降。而 K1 处理在出苗后 80 d 株高达到最大值,为205 cm。在出苗后 50 ~ 100 d,K1 处理株高显著高于其他处理($P<0.05$),K1 处理平均株高分别比 K2、K3、CK 处理高 9.5、14、25.3 cm。K1 处理可以增高油葵株高,且能有效延长油葵增高时间,油葵出苗 50 d 后能显著增加株高 5.10% ~ 14.87%。

不同排水方式对生育阶段油葵茎粗的影响如图 7b所示,茎粗变化规律与株高变化规律相似,随着时间的增加不同处理油葵茎粗先增大后减小。出苗后到 50 d,茎粗迅速增长,K1、K2、K3、CK 处理茎粗增长率分别为 180%、170%、160%、144.44%。其中暗管排水处理茎粗显著高于明沟排水处理($P<0.05$)。从 50 d 开始,K1 处理茎粗显著大于其他处理($P<0.05$),茎粗平均值分别是 K2、K3、CK 处理的 1.06、1.10、1.21 倍。综上表明,暗管排水处理对油葵茎粗增加有积极作用,K1、K2、K3 处理在油葵出苗 50 d 后能有效增加茎粗,其中 K1 处理增大幅度最大,油葵出苗 50 d 后能显著增加茎粗 6.29% ~ 22.46%。

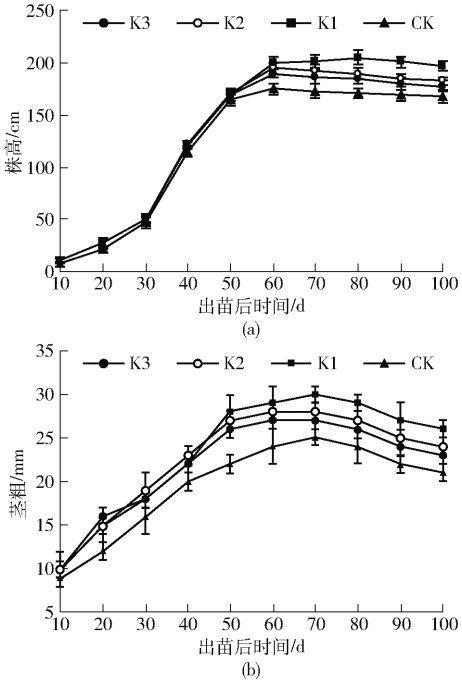


图 7 不同排水方式下油葵株高和茎粗变化曲线

Fig. 7 Variations of plant height and stem thickness of oil sunflower under different drainage methods

2.4.3 油葵叶片光合特性

图 8 对比了现蕾期、开花期、成熟期油葵叶片光合特性,暗管排水处理在各时期 P_n、T_r、G_s 均显著大于明沟排水处理($P<0.05$),P_n、T_r、G_s 分别提高了 7.68% ~ 22.02%、2.67% ~ 7.27%、12.35% ~ 29.67%;C_i 显著小于明沟排水处理($P<0.05$),下降了 2.76% ~ 8.18%。暗管排水处理叶片水分利用效率(LWUE)比明沟排水平均高 0.34 μmol/mmol。生育期控制排水深度 40 cm(K1 处理)提高了开花期和成熟期的 P_n、T_r、G_s($P<0.05$),分别较 K2、K3 处理提高了 7.78% ~ 14.16%、0.92% ~ 3.91%、7.27% ~ 13.75%,C_i 降低了 0.78% ~ 3.31%($P<0.05$),LWUE 比 K2 和 K3 处理开花期分别提高了 0.18、0.29 μmol/mmol,成熟期分别提高了 0.28、0.41 μmol/mmol。

2.5 排水方式对油葵产量及水肥利用效率的影响

表 4 为不同处理油葵作物产量与水分利用效率,K1 能显著提高油葵产量($P<0.05$),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%,因为 K2、K3 处理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。从水分利用效率来看,最高的是 K1 处理,由大到小依次为 K1、K2、K3、CK,K1 处理较 K2、K3、CK 处理显著增加 1.16%、4.57%、10.8%。如表 5 所示,K1 处理提高氮磷钾肥料偏生产力 7.69% ~ 11.16%,提高了养分吸收量。综上,生育期控制排水深度 40 cm(K1)不仅能提高作物产量,还提高了水肥利用效率。

3 讨论

干旱、半干旱区农田排水的主要目的是淋洗土壤中的盐分,利用春灌进行压盐适用于油葵等播种

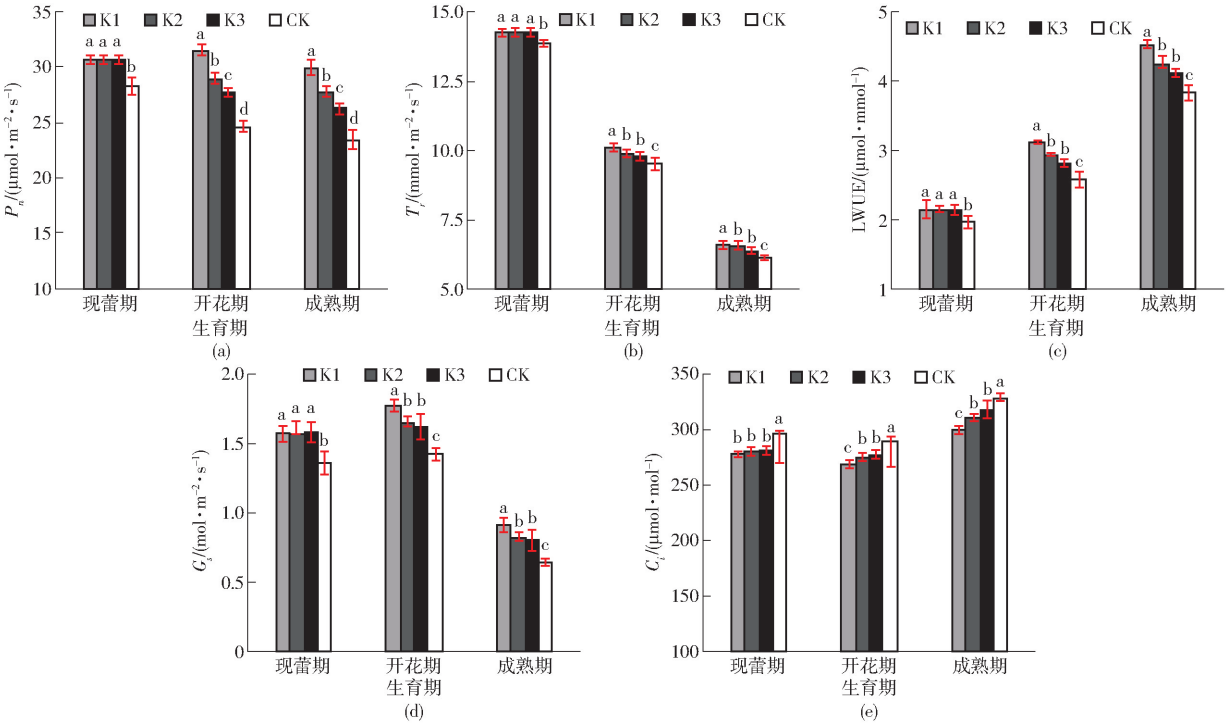


图 8　油葵叶片光合指标对比

Fig. 8　Comparison of photosynthetic indexes of oil sunflower leaves

表 4　油葵产量及水分利用效率

Tab. 4　Yield and water use efficiency

处理	产量/(kg·hm⁻²)	作物耗水量/mm	水分利用效率/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)
K1	3 836. 11[a]	258. 01[a]	14. 87[a]
K2	3 670. 33[b]	253. 46[b]	14. 70[b]
K3	3 562. 10[c]	250. 56[c]	14. 22[c]
CK	3 451. 50[d]	257. 19[a]	13. 42[d]

表 5　肥料偏生产力

Tab. 5　Partial productivity of fertilizer　kg/kg

处理	N	P_2O_5	K_2O
K1	22. 33[a]	30. 06[a]	51. 15[a]
K2	21. 36[b]	28. 76[b]	48. 94[b]
K3	20. 73[c]	27. 92[c]	47. 49[c]
CK	20. 09[d]	27. 05[d]	46. 02[d]

时间较晚的作物，暗管排水具有较好的脱盐效率，油葵出苗时不受盐分限制，提高出苗效率。在生育期控制排水，能较好地为作物生长发育提供充足的水分和养分，增加作物产量，这与 NEGM 等[8]得出的结论一致。张金龙等[29]研究认为，利用暗管淋洗盐分具有较好的作用，经过 3 次淋洗之后，脱盐率在 70. 93% ~73. 40% 之间，认为利用大水淋洗土壤水资源浪费较大。本文主要通过春灌和秋浇进行盐分淋洗，脱盐率在 52. 57% ~56. 66% 之间，明沟排水脱盐率较小，在 37. 22% ~38. 87% 之间，盐分均向均质型变化。脱盐率均小于文献[29]研究结果，主要原因为本研究灌水量相对较小，并且脱盐率还与土质、离子组成等土壤理化性质密切相关，须增加淋洗周期来改良盐渍化土壤，减少水资源浪费。

农田过度排水会造成田间氮素流失，造成农田面源污染，高学睿等[30]利用 DrainMOD 模型很好地模拟了土壤氮素流失，表明排水及氮素的流失不仅造成了田间水肥的浪费，同时也对周围环境产生污染。肖梦华等[31]认为作物生育期地表水和地下水铵态氮和硝态氮浓度在较高水平，需要采取合理的控制排水措施，避免造成肥料流失以及面源污染。有较多的学者研究表明，生育期自由排水导致土壤中氮素流失较多[21,30]，不仅影响作物生长，而且对环境造成较大的污染。在生育期进行控制排水不仅能为作物提供充足的养分，也能减少对环境的污染。本文通过对土壤中的铵态氮和硝态氮含量研究表明，控制排水可以增加氮素稳定性，减少硝态氮流失，对环境污染较小，这与袁念念等[14]研究结果一致。控制排水提高了氮磷钾肥料偏生产力7. 69% ~11. 16%，有利于养分的吸收利用。下一步应对控制排水条件下最佳灌水量和施肥量进行研究，进一步为灌区节水节肥提供科学依据。

本研究表明控制排水对油葵生育期有显著影响，显著增加了株高和茎粗。对油葵的光合作用也有显著提升，提高了叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度，降低了胞间 CO_2 浓度，控制排水对作物生长起到积极作用。总的来说，控制排水是平衡水分、

盐分、养分的重要技术,是实现水肥高效利用的重要措施,在当前水资源紧缺、井灌区地下水超采严重、化肥使用不合理的严峻形势下,将会有广阔的应用前景。

4 结论

(1)对于中度盐渍化土壤和河套灌区普遍采用的暗管排水工程,暗管排水方式可以提高油葵出苗率 2.5 ~2.7 个百分点。生育期控制排水深度 40 cm(K1)增加有效株占比 2.3 ~5.0 个百分点;油葵出苗 50d 后能显著增加株高 5.10% ~14.87%、茎粗 6.29% ~ 22.46%;提高水分利用效率 1.16% ~ 10.8%;提高氮磷钾肥料偏生产力 7.69% ~ 11.16%;增产 4.52% ~11.14%;并且有效地提高了叶片光合能力。

(2)生育期控制排水深度 40 cm(K1)从油葵开花期到收获期 1 m 土层平均储水量比其他处理提高了 0.01% ~4.53%。春灌后生育期控制排水深度 40 cm(K1)、70 cm(K2)、100 cm(K3)处理平均脱盐率分别为 49.02%、50.43%、49.70%,处理间无显著差异,而明沟排水仅为 35.52%。暗管排水处理暗管中间点与暗管上土壤盐分淋洗率相差 7.1 ~ 8.2 个百分点,处理间无显著差异。明沟排水处理差异性相对较小,距明沟 0.4 m 处与明沟中间点相差 2.8 个百分点。

(3)生育期控制排水深度 40 cm(K1)在现蕾期铵态氮含量显著高于其他处理($P < 0.05$),较生育期控制排水深度 70 cm(K2)、100 cm(K3)和 CK 处理高 30.43%、45.90%、14.83%;开花期铵态氮含量差异性大于成熟期;成熟期 K1、K2 处理铵态氮含量与 CK 处理无显著差异。生育期控制排水深度 40 cm(K1)处理硝态氮含量较生育期控制排水深度 70 cm(K2)、生育期控制排水深度 100 cm(K3)、明沟排水(CK)处理分别高 13.62% ~30.80%、14.33% ~53.09%、7.17% ~28.10%。从对土壤控盐、保肥、稳产与水肥利用效率多角度综合分析,春灌排水深度 100 cm、生育期控制排水深度 40 cm(K1)的控制排水方式是适宜的选择。

参 考 文 献

[1] 康绍忠,霍再林,李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金,2016,30(3):208 -212.
KANG Shaozhong, HUO Zailin, LI Wanhong. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: advance and future strategies[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2016, 30(3): 208 - 212. (in Chinese)

[2] SIETAN C. Drainage for salinity control in semi-arid irrigated region-performance assessment[C]// Proceedings of the 19th Congress on Irrigation and Drainage, 2005: 185 - 186.

[3] 张金龙,刘明,钱红,等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征[J]. 农业工程学报,2018,34(6):98 -103.
ZHANG Jinlong, LIU Ming, QIAN Hong, et al. Spatial-temporal variation characteristics of water-salt movement in coastal saline soil improved by flooding and subsurface drainage[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 98 - 103. (in Chinese)

[4] 王振华,衡通,李文昊,等. 滴灌条件下排水暗管间距对土壤盐分淋洗的影响[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):253 -261.
WANG Zhenhua, HENG Tong, LI Wenhao, et al. Effects of drainage pipe spacing on soil salinity leaching under drip irrigation condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 253 - 261. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170829&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.029. (in Chinese)

[5] 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 -2): 128 - 139.

[6] SKAGGS R W, BREVE 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.

[7] 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)

[8] 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.

[9] 张蔚榛,张瑜芳. 有关农田排水标准研究的几个问题[J]. 灌溉排水,1994,13(1):1 -6.
ZHANG Weizhen, ZHANG Yufang. Some problem concerning the research needs on criteria for land drainage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1994, 13(1): 1 - 6. (in Chinese)

[10] 张瑜芳,张蔚榛,沈荣开,等. 淹灌稻田的暗管排水中氮素流失的试验研究[J]. 灌溉排水,1999,18(3):12 -16.
ZHANG Yufang, ZHANG Weizhen, SHEN Rongkai, et al. Experimental study of leaching losses of nitrogen in effluent from drained paddy rice field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 1999, 18(3): 12 - 16. (in Chinese)

[11] 张蔚榛,张瑜芳,沈荣开. 排水条件下化肥流失的研究——现状与展望[J]. 水科学进展,1997,8(2):101 -108.
ZHANG Weizhen, ZHANG Yufang, SHEN Rongkai. Study of losses of fertilizaer in drained agricultural lands: present status and prospect[J]. Advances in Water Science, 1997, 8(2): 101 - 108. (in Chinese)

[12] 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)
[13] 袁念念,黄介生,谢华,等. 暗管控制排水棉田 NO_3^--N 和 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)
[14] 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)
[15] 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)
[16] GILLIAM J W, SKAGGS R W, WEED S B. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields[J]. Journal of Environmental Quality, 1979, 8(1): 137 – 140.
[17] WILLARDSON L S, MEEK B D, GRASS L B, et al. Nitrate reduction with submerged drains[J]. Transaction of the ASAE, 1997, 15(1): 84 – 85, 90.
[18] LUO W, SANDS G R, YOUSSEF M, et al. Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern corn-belt with DRAINMOD – NⅡ[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 389 – 398.
[19] 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, 2012, 103(1): 150 – 161.
[20] 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: 54 – 66.
[21] 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)
[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] 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)
[24] SKAGGS R W, FAUSEY N R, EVANS R O. Drainage water management[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 67(6): 167 – 172.
[25] 王尊亲,祝寿泉,俞仁培. 中国盐渍土[M]. 北京:科学出版社,1993.
[26] 王振华,权丽双,郑旭荣,等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(10):91 – 100.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 91 – 100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013. (in Chinese)
[27] 张忠学,李铁成,齐智娟,等. 控制灌溉下秸秆还田对稻田土壤氮素组成的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):229 – 238.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of straw returning on nitrogen composition in paddy soil under controlled irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 229 – 238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20191126&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.026. (in Chinese)
[28] 张忠学,陈鹏,聂堂哲,等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):210 – 219.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, NIE Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation models on nitrogen distribution and availability in paddy soils[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 210 – 219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20181125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025. (in Chinese)
[29] 张金龙,张清,王振宇,等. 排水暗管间距对滨海盐土淋洗脱盐效果的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(9):85 – 89.
ZHANG Jinlong, ZHANG Qing, WANG Zhenyu, et al. Effect of subsurface drain spacing on elution desalination for coastal saline soil[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(9): 85 – 89. (in Chinese)
[30] 高学睿,董斌,秦大庸,等. 用 DrainMOD 模型模拟稻田排水与氮素流失[J]. 农业工程学报,2011,27(6):52 – 58.
GAO Xuerui, DONG Bin, QIN Dayong, et al. Simulation of drainage process and nitrogen loss in paddy field using DrainMOD [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 52 – 58. (in Chinese)
[31] 肖梦华,俞双恩,章云龙. 控制排水条件下淹水稻田田面及地下水氮浓度变化[J]. 农业工程学报,2011,27(10):180 – 186.
XIAO Menghua, YU Shuang'en, ZHANG Yunlong. Changes of nitrogen concentration for surface and groundwater in flooding paddy field under controlled drainage[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 180 – 186. (in Chinese)