

化肥减量和有机替代对重度盐渍土水盐特性 及向日葵水氮利用效率的影响

程煜^{1,2,3}, 乔若楠^{1,2,3}, 丁运韬^{1,2,3}, 董勤各^{1,3,4}, 冯浩^{1,3,4}, 张体彬^{1,3,4*}

(1 旱区农业水土工程教育部重点实验室/西北农林科技大学, 陕西杨凌 712100; 2 西北农林科技大学水利与
建筑工程学院, 陕西杨凌 712100; 3 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
4 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】研究有机肥氮替代化肥氮对盐渍化农田土壤水盐特性及作物生长的影响, 为河套灌区盐渍化农田作物生产的高质量发展提供理论依据和技术支撑。【方法】本研究针对河套灌区重度盐渍土于 2019—2020 年开展连续 2 年的田间试验。在同一施氮量 ($N\ 180\ kg/hm^2$) 下, 设置不施有机肥 (OF0) 及有机肥氮分别替代化肥氮施用量的 50% (OF1) 和 100% (OF2) 处理, 以不施肥为对照 (CK)。测定不同时期土壤容重、质量含水率及饱和浸提液电导率 (ECe), 同时在向日葵收获后测定籽粒产量及产量性状。【结果】有机替代可以降低土壤容重和提高土壤孔隙度, 经过两年的田间试验后, OF1 和 OF2 处理 0—40 cm 土层土壤容重分别为 1.46 和 $1.43\ g/cm^3$, 较 2019 年播种前分别降低了 3.97% 和 5.92%, 土壤孔隙度较 2019 年播种前分别提高了 4.94% 和 7.90% ($P < 0.05$)。有机替代显著改善盐渍土水盐特性, OF1 和 OF2 处理显著提高了土壤含水率, OF1 处理土壤含水率分别较 OF0、OF2 和 CK 提高了 5.34%、3.65% 和 10.55% ($P < 0.05$)。两季向日葵生育末期 OF2 处理 0—100 cm 土层土壤 ECe 均值均为 $6.77\ dS/m$, 分别较 OF0、OF1 处理降低了 44.10%、11.61% ($P < 0.05$)。有机替代提高了向日葵籽粒产量及水分利用效率, OF1 处理较 OF0、OF2 和 CK 分别增产 9.47%、7.52% 和 62.90% ($P < 0.05$), 分别提高净收益 7.02%、23.12% 和 65.00% ($P < 0.05$); OF1 处理水分利用效率较 OF0、OF2 和 CK 分别提高了 17.50%、9.52% 和 73.82% ($P < 0.05$)。此外, OF1 处理较 OF0 与 OF2 处理显著提高了氮素偏生产力和氮素农学效率 ($P < 0.05$)。【结论】有机肥替代化肥能够改良河套灌区重度盐渍土土壤结构, 改善作物根区土壤水盐环境, 提高产量及水氮利用效率。但是有机肥全部替代化学氮肥降低了向日葵的生产效益, 也没有显著提高向日葵的水肥利用效率。在当前推荐的氮磷钾肥基础上 ($N\ 180\ kg/hm^2$), 有机肥氮替代 50% 化肥氮在河套灌区重度盐渍土上是可行的施肥措施。

关键词: 有机替代; 土壤水盐; 向日葵产量; 水氮利用效率; 重度盐渍土

Effects of chemical fertilizer reduction and organic substitution on water and salt characteristics of high salinity soil and water and nitrogen use efficiency of sunflower

CHENG Yu^{1,2,3}, QIAO Ruo-nan^{1,2,3}, DING Yun-tao^{1,2,3}, DONG Qin-ge^{1,3,4}, FENG Hao^{1,3,4}, ZHANG Ti-bin^{1,3,4*}

(1 Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education/Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3 Institute of Water-saving Agriculture in Arid Area of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objectives】The effects of different organic fertilizer ratios in total nutrient input on improving soil fertility and crop growth in heavily salinized farmland were studied for efficient and sustainable agricultural

收稿日期: 2021-04-02 接受日期: 2021-09-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0403303); 国家自然科学基金项目 (51879224); 陕西省重点研发计划一般项目 (2019NY-001)。

联系方式: 程煜 E-mail: 15235363506@163.com; * 通信作者 张体彬 E-mail: zhangtb@ms.iswc.ac.cn

production in Hetao Irrigation District. **【 Methods 】** A two-year field experiment was conducted from 2019 to 2020 in high salinity soil in Hetao Irrigation District, taking sunflower as test crop. On the basis of recommended total N input (180 kg/hm²) for sunflower, organic fertilizer was used to replace chemical N by ratio of 0 (OF0), 50% (OF1) and 100% (OF2) respectively, while no fertilizer was taken as control (CK). The soil bulk density, moisture content and electrical conductivity of saturated extract (ECe) were measured before the experiment and during the main growth stages of sunflower in 2019 and 2020. The seed yields and yield traits of sunflower were measured at harvest. **【 Results 】** Application of organic fertilizers reduced soil bulk density and increased soil porosity significantly. After harvest in 2020, the soil bulk density of 0–40 cm depth treated with OF1 and OF2 was 1.46 and 1.43 g/cm³, respectively, which were 3.97% and 5.92% lower than that before sowing in 2019. The soil porosity was 4.94% and 7.90% higher than that before sowing in 2019 ($P < 0.05$). Organic fertilizer significantly increased the water storage and decreased ECe values of saline soil. The soil water content in OF1 was 5.34%, 3.65%, and 10.55% higher than in OF0, OF2 and CK, respectively ($P < 0.05$). The mean ECe of 0–100 cm depth at harvest of the two growing seasons in OF2 was 6.77 dS/m, which was 44.10% and 11.61% lower than those in OF0 and OF1, respectively ($P < 0.05$). The seed yield under OF1 was 9.47%, 7.52%, and 62.90% higher than that in OF0, OF2 and CK, respectively ($P < 0.05$). The net income was 7.02%, 23.11%, and 65.00% higher than that in OF0, OF2 and CK, respectively ($P < 0.05$). The water use efficiency was 17.50%, 9.52%, and 73.82% higher than that in OF0, OF2 and CK, respectively ($P < 0.05$). In addition, OF1 significantly increased the partial factor productivity and agronomic efficiency of applied nitrogen compared with OF0 and OF2 ($P < 0.05$). OF2 and OF0 had similar yield and water use efficiency, but OF2 had lower fertilizer efficiency and net income compared with OF0. **【 Conclusions 】** Organic fertilizer could improve soil structure and decrease salt content of high salinity soil, ameliorate soil water and salt environment in root zone. However, organic fertilizer could substitute about 50%, not 100% of chemical fertilizers for high sunflower yield, water and nitrogen use efficiency and economic benefit of high salinity soils in Hetao Irrigation District.

Key words: organic substitution; soil water and salt; sunflower yields; water and nitrogen use efficiency; high salinity soil

土壤盐碱化问题已经成为全球变化研究框架下的重要内容^[1]。河套灌区是我国重要的商品粮油生产基地,同时也是盐渍化发育的典型地区,灌区70%的耕地存在着不同程度的土壤盐渍化问题^[2]。向日葵作为河套灌区的经济作物,土壤盐渍化制约着向日葵的正常生长,严重阻碍了农业发展。为了实现增产,化肥施用量逐年增加^[3]。化肥尤其是氮肥的过度施用^[4]和土壤盐渍化已成为限制河套灌区作物生产力提升的重要因素。

化肥的大量施用会引发一系列环境问题,如水体富营养化和土壤退化^[5];施用有机肥可提高土壤肥力,增强土壤养分循环^[6]。然而,仅施用有机肥通常会导致产量下降^[6]。大量研究表明,有机肥替代化肥有利于改善盐渍土理化性质并提高作物产量^[7–10]。朱海等^[7]在滨海盐渍化农田上的研究发现,在施氮量225 kg/hm²条件下有机肥氮代替1/4化肥氮施入对降低土壤盐分和玉米养分吸收利用效果最好。周慧等^[8]

选取河套灌区轻度和中度盐渍化农田进行研究,发现盐分水平为0.460 dS/m时,有机肥替代50%化肥可获得最高产量及水分利用效率;盐分水平为0.951 dS/m时,有机肥替代100%化肥处理产量最高和水分利用效率较高。颜安等^[9]在南疆重度盐碱地的试验结果表明,有机肥氮替代15%化肥氮的增产效果明显,在保证棉花稳产的同时减少了化肥的施用量。Liu等^[10]对亚热带地区85个地点的74篇关于水稻施用有机肥的文献进行了综合3水平Meta分析,发现有机肥在减少化肥施用量的同时,具有增加水稻产量的潜力。前人研究表明,采用有机肥替代化肥,以实现化肥减量,是减轻土壤氮素污染、改良盐渍化农田的有效措施,可以综合改善土壤物理、化学、生物特性^[11],但有机肥替代化肥比例和利用效果因土壤类型和作物而异。当前,关于有机肥替代化肥的研究大都集中在玉米^[7–8]、水稻^[10–12]和小麦^[13–14]等粮食作物上,在向日葵上,尤其是其在河套灌区重

度盐碱地上的应用研究相对较少。

鉴于以上研究结果, 本研究选取河套灌区重度盐渍化农田为对象, 进行连续两年的田间试验, 在有机肥替代化肥条件下, 拟对土壤结构、水盐特性及向日葵产量形成等方面进行系统的分析, 旨在揭示有机肥氮替代不同比例化肥氮对土壤水分、盐分特性及作物水氮利用的影响差异, 为河套灌区盐渍化农田作物生产的高质量发展提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2019 和 2020 年向日葵生育期内(6—9 月份)进行。试验地处内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区合济试验站(107°16'E, 40°44'N, 海拔约 1044 m), 位于河套灌区中部。试验区属黄河中上游半干旱—半荒漠盐渍区^[15], 多年平均年降水量为 135 mm, 多年平均年蒸发量在 2350 mm, 蒸降比大于 10, 而且雨量多集中在夏季 7、8 月份, 约占全年降水量的 60% 左右。全年无霜期为 135~150 天^[16]。试验区每年春季播种前采用引黄河水漫灌压盐, 灌水定额约 120 mm。

试验地土壤属于黄河灌淤土。0—40 cm 深度土壤饱和浸提液电导率(ECe)平均值为 13.69 dS/m, pH 平均值为 8.15, 属于重度盐渍化水平^[17]。0—40 cm 深度土壤容重为 1.52 g/cm³, 硝态氮含量 44.06 mg/kg, 铵态氮含量 2.04 mg/kg。试验站设有气象站和地下水监测井, 分别对气象数据和地下水位进行监测。2019 和 2020 年向日葵生育期内有效降雨量分别为 40.8 和 120.2 mm。试验区地下水位主要受周边农田灌溉影响, 周年波动较大, 一般在 2.0~3.5 m。

1.2 试验设计

试验设置不同比例有机肥氮替代化肥氮处理。总施肥量按照纯 N 180 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm² 执行。按照纯 N 施用量, 设置不施有机

肥和有机肥分别替代化肥(尿素)氮施用量的 50% 和 100%, 依次记为 OF0、OF1、OF2, 以不施肥为对照(CK), 具体施肥设计详见表 1。共计 4 个处理, 重复 3 次, 共 12 个小区, 采用随机区组设计布置。小区面积 80 m² (8 m×10 m)。每个小区之间间隔 1 m。

供试作物为向日葵, 品种为杂交品种 AD6199。采用“一膜双行”的宽窄行种植方式, 地膜为高压聚乙烯地膜(厚度 8 μm、宽度 70 cm), 膜内为窄行距 30 cm, 膜间为宽行距 70 cm。覆膜后点播, 播种深度 5 cm, 株距 60 cm, 播种密度 33200 株/hm²。2 年田间试验具体播种日期分别为 2019 年 6 月 5 日和 2020 年 6 月 6 日, 收获日期分别为 2019 年 9 月 13 日和 2020 年 9 月 15 日。作物生育期灌水 3 次进行: 播种后立即灌水 40 mm, 现蕾期灌水 40 mm, 开花期灌水 40 mm (2020 年生育后期降雨较多, 无此次灌溉)。其他措施与当地常规农事操作一致。

所施化肥为尿素(含纯 N 46%)、磷酸二铵(NH₄)₂HPO₄(含纯 N 21%, P₂O₅ 53.8%)、硫酸钾 K₂SO₄(含 K₂O 54%)。有机肥为陕西杨凌霖科生态有限公司与国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心共同研制, 具体养分含量如下: 有机碳 79.23%、N 6.68 %、P₂O₅ 2.25%、K₂O 0.316%、Cd 0.16 mg/kg、Hg 0.036 mg/kg、Pb 1.28 mg/kg、Cr 10.70 mg/kg、As 1.58 mg/kg。按照当地传统施肥习惯, 有机肥和化肥于耕作前作为基肥一次性施用, 按照小区均匀撒施之后, 拖拉机翻耕(深度 20 cm)。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤含水率 分别在向日葵播种前(2019 年 5 月 3 日和 2020 年 5 月 5 日)、播种期(2019 年 6 月 5 日和 2020 年 6 月 6 日)、苗期(2019 年 7 月 1 日和 2020 年 7 月 2 日)、现蕾期(2019 年 7 月 30 日和 2020 年 8 月 1 日)、开花期(2019 年 8 月 21 日和 2020 年 8 月 23 日)、成熟期(2019 年 9 月 13 日和 2020 年 9 月 15 日)取土。土壤取样位置均位于膜下 0—100 cm, 取样间隔为 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm, 3 次重复。

表 1 各处理肥料施用量
Table 1 Application amount of fertilizers in each treatment

处理 Treatment	有机肥氮比例 (%) Organic N percentage	有机肥 (kg/hm ²) Organic fertilizer	尿素 (kg/hm ²) Urea	磷酸二铵 (kg/hm ²) (NH ₄) ₂ HPO ₄	硫酸钾 (kg/hm ²) K ₂ SO ₄
CK	0	0	0	0	0
OF0	0	0	328	140	278
OF1	50	1129	164	140	278
OF2	100	2258	0	140	278

用烘干法测定土壤质量含水率, 土壤体积含水率=土壤质量含水率×土壤容重。土层贮水量计算公式:

$$W = \sum (\omega_i \times \rho_{bi} \times h_i) \quad (1)$$

式中: W —土壤贮水量 (mm); ω_i —第 i 层土壤质量含水率 (%); ρ_{bi} —第 i 层土壤容重 (g/cm^3); h_i —第 i 层土壤厚度 (mm)。

1.3.2 土壤盐分 取样日期与位置同土壤含水率测定, 土壤盐分测定采用调制饱和泥浆的方法^[18]。40 g 土样加少量水经过夜浸泡, 然后调制成饱和泥浆, 离心 (4000 r/min, 30 min) 获得浸提液。采用电导率仪 (DDS-11A, 上海济成分析仪器有限公司) 测定 2019 和 2020 年向日葵播种前、苗期及成熟期土壤饱和浸提液的电导率 (EC_e)。测定深度及重复次数同土壤含水率测定。

1.3.3 土壤容重及孔隙度 在 2019 年播种前和 2020 年收获后采样 (0—40 cm), 取样间隔为 10 cm, 采用环刀法测定各处理土壤容重, 然后计算孔隙度:

$$f = (1 - \rho_b / \rho_s) \times 100\% \quad (2)$$

式中: f —土壤孔隙度 (%); ρ_b —土壤容重 (g/cm^3); ρ_s —土壤密度, 取 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

1.3.4 作物产量及水分利用效率 在向日葵收获期, 选取各小区连续 2 行, 每行 10 株, 共 20 株, 用常规方法测定株高、茎粗, 盘径、单盘籽粒重及百粒重。

将作物蒸散量 (ET) 作为实际耗水量, 采用水量平衡法计算:

$$ET = \Delta W + P + I + K - R \quad (3)$$

作物水分利用效率计算公式:

$$WUE = Y/ET \quad (4)$$

式中: ET —作物生育期内的蒸散量 (mm); ΔW —生育初、末期取样 0—100 cm 土层贮水量变化 (mm); P —生育期内有效降雨量 (mm); I —生育期灌溉量 (mm); K —地下水的补给量 (mm), 向日葵生育期内地下水位埋深 2 m 左右, 超过主要根系层 (0—60 cm) 1 m 以上, 补给量可忽略^[15]; R —地表径流量, 本研究地势平坦且处理之间设有隔离畦埂, 此项忽略; Y —作物产量 (kg/hm^2)。

1.3.5 氮素利用效率 计算公式^[19]如下:

$$\text{氮素农学效率}(\text{AE}_N, \text{kg/kg}) = (\text{施氮区产量} - \text{对照区产量}) / \text{施氮量} \quad (5)$$

$$\text{氮素偏生产力}(\text{PFP}_N, \text{kg/kg}) = \text{施氮区产量} / \text{施氮量} \quad (6)$$

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据处理和分析, 采用 LSD (least significant difference) 法进行单因素方差分析和差异显著性检验 ($\alpha=0.05$), 同时采用 SigmaPlot 14.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 试验期间降雨与气温

2019 与 2020 年向日葵生育期内有效降雨量分别为 40.8 和 120.2 mm (图 1), 与 1990—2010 年同期平均降雨量 92 mm^[20]相比, 2019 年为干旱年, 2020 年为湿润年。与 2019 年生长期降雨量相比, 2020 年向日葵苗期降雨量基本不变, 而现蕾期至成熟期降雨量显著增加。2019 与 2020 年生长期平均气温分别为 21.56°C 和 21.67°C 。

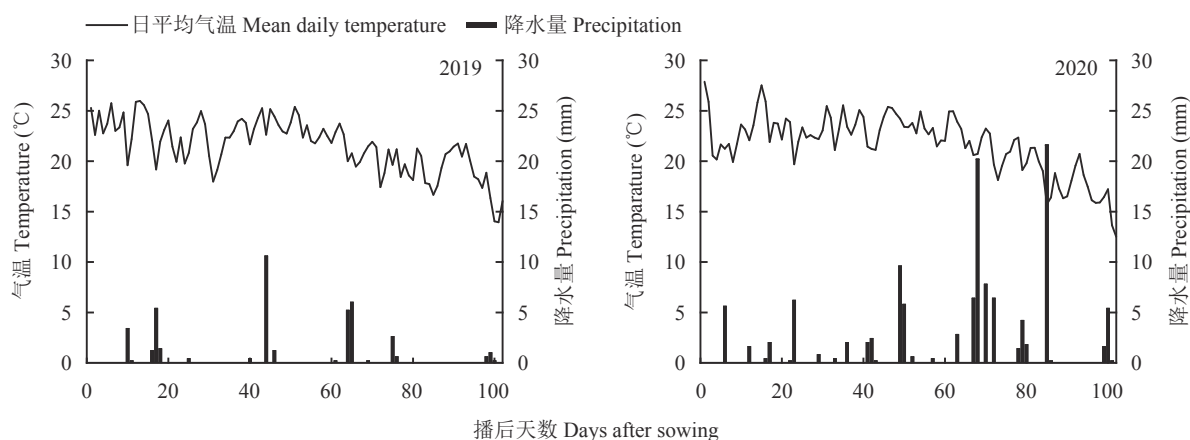


图 1 2019 和 2020 年向日葵生育期日平均气温与降水量

Fig. 1 Mean daily temperature and precipitation during growing seasons of sunflower in 2019 and 2020

2.2 施用不同比例有机肥对土壤容重及孔隙度的影响

由图 2 可知, 经过两个生长期, 在 2020 年成熟期各处理土壤容重和孔隙度较 2019 年播种前均有不同程度的变化。OF1 和 OF2 处理在 0—40 cm 土层的平均土壤容重分别为 1.46 和 1.43 g/cm³, 比 2019 年播种前分别降低了 3.97% 和 5.92%; 而 CK 和 OF0 处理分别较 2019 年播种前增加 2.14% 和 4.55% ($P < 0.05$)。各土层 OF2 处理土壤容重最小。在 10—20 cm 土层, CK 处理容重 (1.57 g/cm³) 最大, 较 2019 年播种前增加了 3.29%; 其余土层均为 OF0 处理容重最大。0—40 cm 土层 CK 与 OF0 处理平均孔隙度较 2019 年播种前分别减小了 0.38% 和 0.77%; 而 OF1 与 OF2 处理较 2019 年播种前分别增加了 4.94% 和 7.90% ($P < 0.05$)。这表明添加有机肥处理能够降低土壤容重, 使耕层土壤孔隙状况得到改善。

2.3 施用不同比例有机肥对土壤水分的影响

2019 与 2020 年各处理土壤体积含水率均随土层深度增加而增大, 其中 40—100 cm 土层土壤体积含水率普遍高于表层 0—40 cm (图 3)。以 2019 年为例, 苗期 OF1 与 OF2 处理在 0—20 cm 土层平均含水率分别为 18.57% 和 19.47%, 显著高于 CK 与 OF0 处理 ($P < 0.05$); CK 在 20—40 cm 土层平均含水率低于 3 个施肥处理, 且有显著性差异 ($P < 0.05$); 其余土层不同处理之间体积含水率无显著性差异。现蕾期根系活动层 0—40 cm 平均含水率从大到小依次为 OF1、OF2、OF0、CK, 且添加有机肥

处理均显著高于 CK 处理。开花期 OF1 处理在 0—60 cm 土层平均含水率显著高于其余处理 ($P < 0.05$)。成熟期 OF1 处理 0—20 cm 土层平均含水率显著高于其余处理; 40—100 cm 土层 OF2 处理平均含水率为 27.10%, 显著高于其余处理 ($P < 0.05$)。与 2019 年不同生育期土壤体积含水率相比, 2020 年苗期 OF1 处理在表层 0—20 cm 及深层 60—100 cm 土壤平均含水率最大; 开花期 OF2 处理在表层 0—10 cm 土壤含水率最大; 其余生育期土壤体积含水率和 2019 年呈相似的规律。综合两年试验结果, OF1 与 OF2 处理显著提高了土壤含水率, OF1 处理土壤含水率分别较 OF0、OF2 处理及 CK 提高了 5.34%、3.65%、10.55% ($P < 0.05$)。

2.4 施用不同比例有机肥对土壤盐分的影响

由图 4 可知, 在 2019 年播种前, 土壤 E_{Ce} 随着土层的加深而逐渐降低。土壤盐分“表聚”现象严重, 0—20 cm 土层 E_{Ce} 平均值为 18.28 dS/m, 极不利于植物的生长。在灌水压盐后, 2019 年向日葵苗期各处理表层 0—20 cm 土壤盐分含量明显降低, 其中 OF2 处理表层土壤盐分下降最为明显, E_{Ce} 下降至 5.05 dS/m, 而 OF0 与 OF1 处理表层土壤盐分无显著性差异; 从 40—100 cm 土层电导率来看, OF2、OF1、OF0 处理分别低于、接近、高于 2019 年播种前 (图 4a)。2019 年成熟期, 各处理表层 0—10 cm 土壤电导率较苗期都有一定的升高, 其余土层电导率从大到小依次为 OF0、OF1、OF2 处理 (图 4b), 表明 OF2 处理对土壤的抑盐效果较好。

2020 年播种前, 除 OF2 处理 10—20 cm 土层

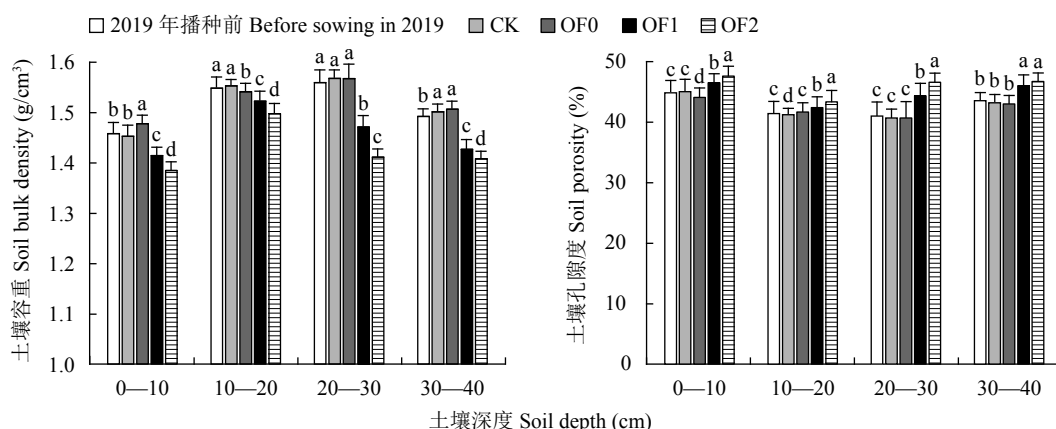


图 2 施用不同比例有机肥处理不同深度土壤的容重和孔隙度

Fig. 2 Bulk density and porosity in different soil depths after organic fertilizer application

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层处理间差异显著 ($P < 0.05$)]

Different small letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same soil layer ($P < 0.05$).]

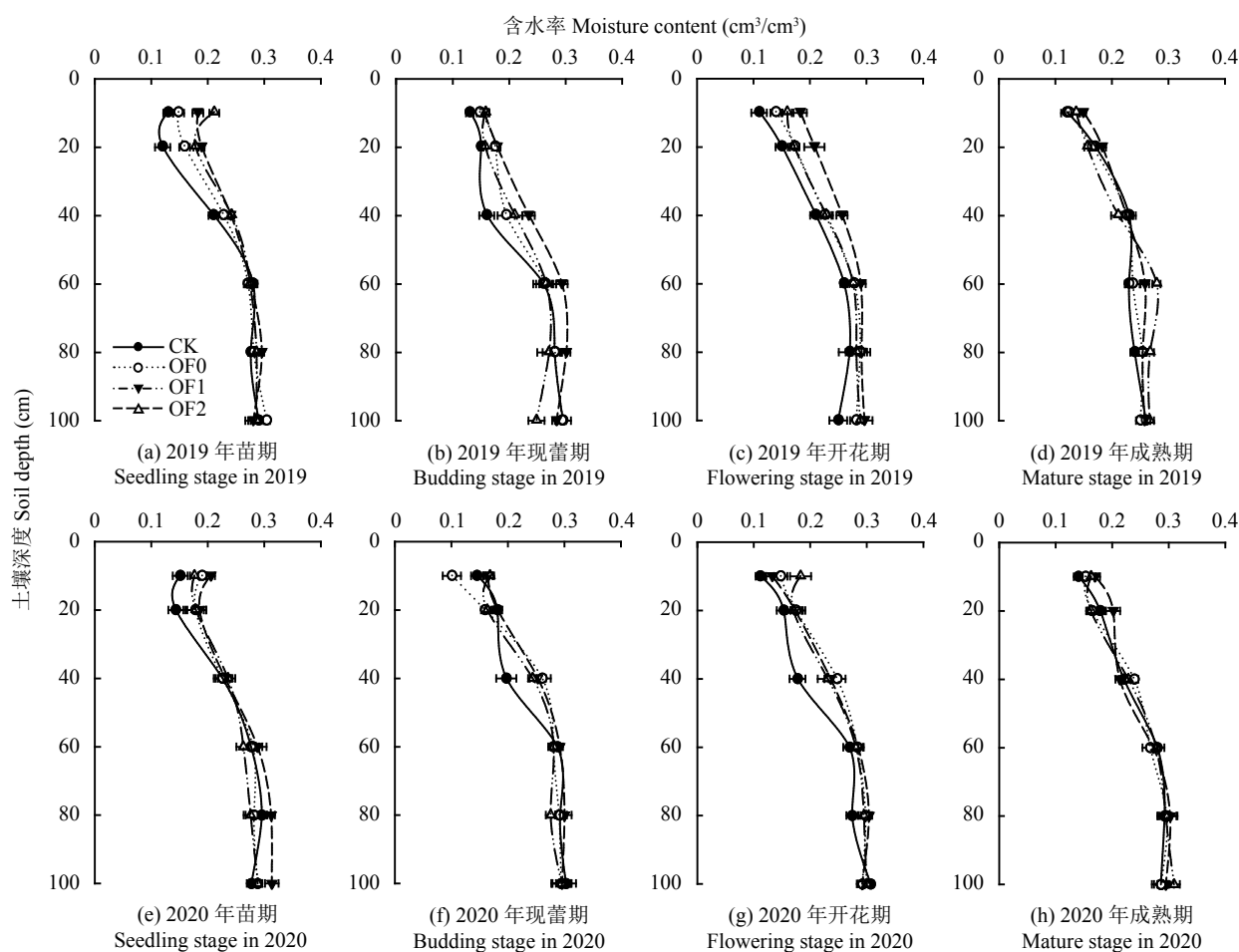


图3 2019和2020年向日葵不同生育期各处理土壤含水量

Fig. 3 Soil moisture contents in each treatment at different growing stages of sunflower in 2019 and 2020

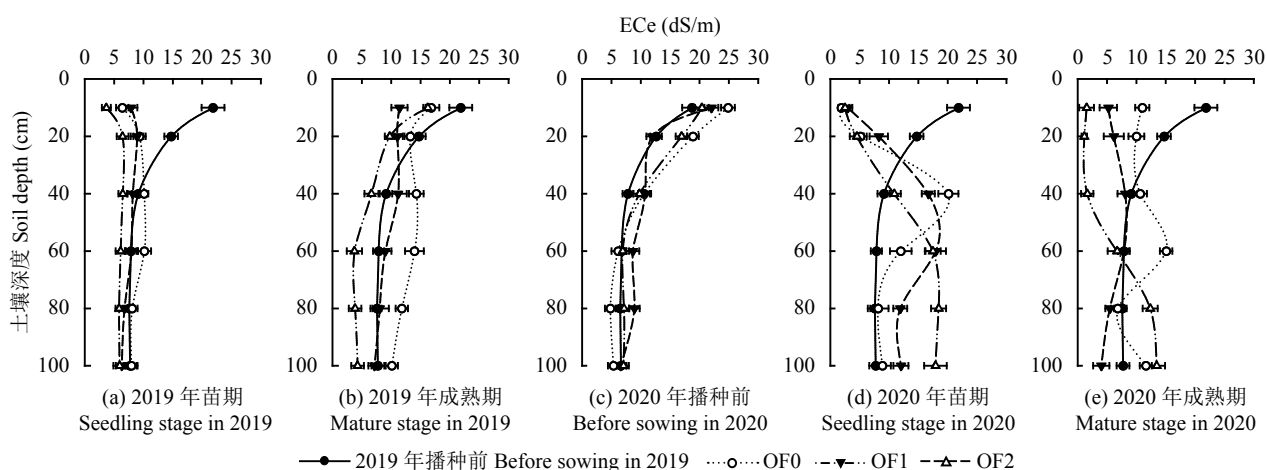


图4 2019和2020年向日葵不同生育期各处理土壤电导率 (ECe)

Fig. 4 Soil ECe values in each treatment at different growing stages of sunflower in 2019 and 2020

ECe 略低于 2019 年播种前外, 其余各处理 0—40 cm 土层 ECe 均高于 2019 年播种前, OF0、OF1、OF2 处理表层 0—40 cm 土层的平均 ECe 分别为 21.11、17.40、18.12 dS/m; 而 OF0 处理在深层

40—100 cm 土壤电导率低于 2019 年播种前 (图 4c)。2020 年苗期, 各处理电导率均随土层深度增加呈先增后减的趋势, OF0、OF1、OF2 处理分别在 20—40、40—60、60—80 cm 达到最大值 (图 4d)。

2020 年成熟期, OF1、OF2 处理 0—40 cm 土层 ECe 较 2019 年成熟期 (图 4b) 显著降低, 且 OF2 处理较 OF1 处理电导率显著降低 ($P < 0.05$), 而 2020 年 OF0 处理电导率较 2019 年无明显变化 (图 4c)。两年度向日葵生育末期 OF2 处理 0—100 cm 土壤电导率均值为 6.77 ds/m, 分别较 OF0、OF1 处理降低 44.10%、11.61% ($P < 0.05$)。

2.5 施用不同比例有机肥对向日葵产量和水氮利用效率的影响

2.5.1 向日葵生长及产量 OF1 与 OF2 处理 2020 年产量分别达到 3966 与 3701 kg/hm², 较 2019 年相应提高 2.67% 与 3.35%; 而 OF0 与 CK 处理 2020 年产量较 2019 年相应减少 2.10% 与 2.06% ($P < 0.05$, 表 2)。2019 与 2020 年 OF1 处理产量均显著高于其余处理, CK 产量均显著低于各施肥处理 ($P < 0.05$)。2019 年 OF0 与 OF2 处理产量之间无显著性差异; 相较于 2019 年, 2020 年 OF2 处理产量显著增加, 而 OF0 处理产量显著降低 ($P < 0.05$), 但 2020 年两处理间产量仍无明显差异, 这可能与有机肥的肥效释放相对缓慢有关。产量最高的 OF1 处理株高、单盘粒质量、百粒重均显著高于其余处理, 这是 OF1 处理增产的主要原因。OF0、OF1 与 OF2 处理盘直径均显著高于 CK ($P < 0.05$), 而各施肥处理之间无显著性差异。综合两年来看, OF1 处理较 OF0、OF2 处理和 CK 分别增产 9.47%、7.52%、62.90% ($P < 0.05$)。

2.5.2 向日葵耗水量与水氮利用效率 2019 年 OF1 和 OF2 处理耗水量较 OF0 处理和 CK 减小且达

到显著水平 ($P < 0.05$); 而 2020 年由于生育末期降水较多, 此时耗水量多用于土壤蒸发, 一定程度上掩盖了不同处理之间的差异, 因此各处理耗水量无显著性差异 (表 3)。由水分利用效率 (WUE) 的结果分析可知, OF1 处理的水分利用效率均显著高于 OF0 与 OF2 处理 ($P < 0.05$), 其中 2019 年 OF1 处理分别比 OF0、OF2 提高了 25.79%、9.45%, 2020 年分别提高了 9.29%、5.18% ($P < 0.05$)。综合两年考虑, OF1 处理水分利用效率较 OF0、OF2 和 CK 分别提高了 17.50%、9.52%、73.82% ($P < 0.05$)。所有处理中氮素农学效率以 OF1 处理最高, 2019 与 2020 年分别为 8.0 和 8.8 kg/kg, 显著高于 OF0 与 OF2 处理 ($P < 0.05$); 在 N 180 kg/hm² 施氮水平下, 随着有机肥占比的增加, 氮素农学效率先增加后降低。与氮素农学效率相似, OF1 处理氮素偏生产力在两年试验中均显著高于 OF0 与 OF2 处理 ($P < 0.05$)。此外, 从收获后土壤贮水量来看, 在降雨量较小的 2019 年, 添加有机肥处理土壤贮水量显著高于单施化肥和不施肥处理 ($P < 0.05$); 在降雨量充足的 2020 年, 各处理土壤贮水量无显著性差异。

2.6 成本效益分析

农民收入与农产品价格密切相关。2019—2020 年度试验区向日葵籽粒价格为 7.5 元/kg; 2020—2021 年度由于气候以及灌区管理粗放的原因, 向日葵籽粒饱满度、皮毛光泽度较差, 价格下跌至 6.3 元/kg^[21]。按照此价格计算, 随着向日葵籽粒价格的下跌, 本研究 2020 年各处理向日葵生产总收入较 2019 年均有所下降: 单施化肥处理 (OF0) 降幅最为

表 2 2019 和 2020 年各处理向日葵产量及产量性状
Table 2 Yield and yield traits of sunflower under each treatment in 2019 and 2020

年份 Year	处理 Treatment	株高 (cm) Plant height	盘直径 (cm) Disc diameter	单盘籽粒重 (g/head) Seed weight per disc	百粒重 (g) 100-seed weight	产量 (kg/hm ²) Yield
2019	CK	120.5 cA	14.4 bA	73.1 cA	15.7 cA	2428 cA
	OF0	128.3 bA	21.1 aA	108.9 bA	18.3 bA	3614 bA
	OF1	136.8 aA	21.6 aA	116.4 aB	20.3 aB	3863 aB
	OF2	127.3 bA	20.9 aA	107.9 bB	17.9 bA	3581 bB
2020	CK	115.0 cB	15.0 bA	71.6 cB	15.6 cA	2378 cB
	OF0	128.5 bA	18.8 aB	106.6 bB	17.5 bB	3538 bB
	OF1	133.4 aB	19.0 aB	119.5 aA	23.7 aA	3966 aA
	OF2	126.0 bA	18.7 aB	111.5 bA	17.9 bA	3701 bA

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一年内处理间差异显著, 不同大写字母表示相同处理两年间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments within the same year, and different capital letters in the same column mean significant difference between two years for the same treatment ($P < 0.05$);

表 3 2019 和 2020 年各处理向日葵水氮利用效率

Table 3 Water and nitrogen use efficiency of sunflower in each treatment in 2019 and 2020

年份 Year	处理 Treatment	播种前贮水量 Water storage before sowing (mm)	灌水量 Irrigation (mm)	降水量 Rainfall (mm)	收获后贮水量 Water storage after harvest (mm)	耗水量 ET (mm)	水分利用效率 WUE [kg/(mm·hm ²)]	氮素农学效率 AE _N (kg/kg)	氮素偏生产力 PFP _N (kg/kg)
2019	CK	398.6 a	120	40.8	348.4 b	211.0 a	11.5 d		
	OF0	395.9 a	120	40.8	350.1 b	206.6 a	17.5 c	6.6 b	20.1 b
	OF1	381.1 a	120	40.8	366.3 a	175.6 b	22.0 a	8.0 a	21.5 a
	OF2	386.2 a	120	40.8	368.9 a	168.1 b	19.4 b	5.7 b	19.2 b
2020	CK	386.4 b	80	120.2	392.5 a	194.1 a	12.3 c		
	OF0	380.1 b	80	120.2	394.4 a	190.9 a	17.7 b	6.4 b	19.7 b
	OF1	401.8 a	80	120.2	396.5 a	205.5 a	19.3 a	8.8 a	22.0 a
	OF2	399.3 a	80	120.2	397.8 a	201.7 a	18.4 b	7.4 b	20.6 b

注 (Note): ET—Evapotranspiration; WUE—Water use efficiency; AE_N—Agronomic efficiency of applied N; PFP_N—Partial factor productivity of applied N. 同一年內同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in the same column of the same year mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

明显, 较 2019 向日葵生产总收入下降了 17.78%; OF1 和 OF2 处理 2020 年向日葵生产总收入较 2019 年分别下降了 13.77% 和 13.19% ($P < 0.05$, 表 4)。不同处理之间生产支出的差异主要体现在施肥管理的氮肥施用方面, OF0、OF1、OF2 处理每年的氮肥成本投入分别为 984.0、2185.5、3387.0 元/hm², 有机肥氮成本投入占氮肥成本投入分别为 0、77.49%、100%。氮肥成本投入差异显著的原因主要是有机肥含氮量 (6.68%) 显著低于尿素 (46%), 在相同施氮条件下, 有机肥施用量较大。以 OF2 处理为例, 需施用 2258 kg/hm² 有机肥 (1.5 元/kg), 其成本较 OF0 处

理显著增加。就净收益而言, OF1 处理较 OF0 和 OF2 处理及 CK 分别增加 7.02%、23.12%、65.00% ($P < 0.05$)。

3 讨论

我国西北旱区盐渍土中盐分阳离子多以 Na⁺ 为主, 容易造成粘土颗粒分散, 遇水易板结, 孔隙度低, 不利于土壤水分入渗, 可耕性差^[22]。有机肥的添加影响着向日葵生育期内土壤容重及孔隙度的变化过程, 对土壤水分及降水的贮存量有直接影响。本研究中, OF1 与 OF2 处理能够降低耕层 (0—40 cm)

表 4 不同处理向日葵生产效益分析

Table 4 Annual benefit of sunflower production under different treatments

处理 Treatment	生产资料成本 Production materials cost (yuan/hm ²)	田间管理成本 Field management cost (yuan/hm ²)	施肥管理成本 Fertilization management cost (yuan/hm ²)	总收入 (yuan/hm ²) Total income			净收益 (yuan/hm ²) Net profit		
				2019	2020	平均值 Mean	2019	2020	平均值 Mean
CK	3800	2950	0	18212d	14982d	16597d	11462d	8532d	9997d
OF0	3800	2950	2684	27107b	22287c	24697c	17673b	13153b	15413b
OF1	3800	2950	3886	28976a	24985a	26981a	18341a	14650a	16495a
OF2	3800	2950	5087	26857c	23314b	25085b	15020c	11777c	13398c

注 (Note): 生产资料包含种子 (2400 元/hm²)、地膜 (600 元/hm²)、灌溉水电费 (700 元/hm²) 及除草剂 (100 元/hm²); 田间管理包含播种前耕作 (450 元/hm²), 灌溉、播种及收获用工或机械 (2300 元/hm²) 及植保措施 (200 元/hm²); 各肥料单价为有机肥 1.5 元/kg、尿素 3 元/kg、磷酸二铵 5 元/kg、硫酸钾 3.6 元/kg。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。The production materials include seeds (2400 yuan/hm²), plastic film (600 yuan/hm²), irrigation water and electricity costs (700 yuan/hm²) and herbicides (100 yuan/hm²). Field management includes pre-sowing tillage (450 yuan/hm²), irrigation, sowing and harvesting labor or machinery (2300 yuan/hm²) and plant protection measures (200 yuan/hm²). The unit price of each fertilizer: organic fertilizer 1.5 yuan/kg, urea 3 yuan/kg, diammonium phosphate 5 yuan/kg, potassium sulfate 3.6 yuan/kg. Values followed by different small letters in the same column mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

土壤容重和提高土壤孔隙度,一方面是由于加入的有机肥本身容重低于耕层土壤^[23],另一方面可能是因为有机无机肥配施能够促进根系增加,根系增加促进土壤中根茬量增加,土壤根茬的增加促进土壤容重的降低^[24]。因此在干旱年(2019年)OF1与OF2处理能够较其余处理显著增加降水贮存量,调节耕层土壤有效水库容,减少土壤毛管水无效蒸发,为后期作物高产创造了有利的水分条件,这与朱海等^[7]和王宪玲等^[23]的研究结果相吻合。

有机无机肥配施处理能够改良土壤结构,维持根区相对低盐适宜生长区,优化作物根区土壤水盐环境。本研究中OF1、OF2处理(有机肥氮替代50%、100%化肥氮)均可以提高土壤含水率,降低电导率,这与前人^[7,9,25-26]的研究结果相一致。OF2处理在4个处理中土壤含盐量最低,相对于CK处理显著降低了土壤容重和提高了土壤孔隙度,有利于利用降水充分向下淋洗耕层;同时在2020年成熟期,OF2处理土壤表层0—40 cm ECE_v值显著低于单施化肥处理(OF0),说明施用有机肥有利于减少和推迟盐分的表聚,降低表层盐分对作物的毒害性。此外,有机质在腐解过程中,可以改善土壤养分^[27]和生物活性^[28],促进作物的地上与地下部分生长,提高蒸发“无效水”向蒸腾“有效水”的转化^[29],因而有机肥中的有机质在提高土壤养分和促进作物生长过程中可能起关键作用。而单施化肥处理(OF0)的表层土壤一直处在较低水分状态,脱盐效果不佳,造成作物在生育中后期受到盐害。

前人研究表明,有机无机肥配施能够显著增加作物产量,提高土壤肥力^[30]。一般而言,旱地作物产量较高时土壤水分的消耗也相应较多^[31]。本研究表明,在重度盐渍化条件下,干旱年添加有机肥处理(OF1、OF2)能够显著增加收获后土壤贮水量,降低耗水量,这是因为有机肥的施入可以显著降低土壤容重和提高土壤孔隙度,土壤对水分的保蓄能力增强,从而提高了土壤含水率^[32];配施有机肥后,土壤贮水量的增加(表3),调节了耕层土壤有效水库容,减少了土壤毛管水无效蒸发^[33],从而使土壤水分的消耗减少^[34];而湿润年各处理收获后土壤贮水量和耗水量差异不明显,这是由于生育末期降水较多,此时耗水量多用于土壤蒸发,一定程度上掩盖了不同处理之间的差异。

本研究中OF1处理产量显著高于其他处理。相较于2019年,2020年OF2处理产量显著增加,而OF0处理产量显著减小($P < 0.05$)。这可能是因为在

第一年(2019年)无机肥的矿质氮供应能力强于有机肥,到第二年(2020年)有机肥中的矿质氮才缓慢释放到土壤中,周慧等^[8]在河套灌区轻度和中度盐渍土上也得到了类似的结果。此外,OF1较OF2处理显著增加了净收益,这是因为OF1处理中有机肥氮替代50%化肥氮,既控制了肥料投入,又保证作物高产;而OF2处理虽然产量与OF0处理持平,但OF2处理有机肥成本投入远远高于OF0处理尿素成本投入,因此OF2处理净收益显著低于OF0处理。已有研究表明,施有机肥可以显著提高作物水分利用效率^[35],这与本研究结果基本一致,这是因为施入有机肥使土壤总孔隙度及土壤养分状况得到明显改善^[36],利于作物生长及水分利用率的提高。本研究结果显示,OF1处理在两年试验中水分利用效率最高;OF2处理在干旱年水分利用效率显著高于OF0处理,而在湿润年两处理水分利用效率没有显著性差异,这是因为湿润年耗水量多用于土壤蒸发,即使OF2处理产量略高于OF0处理,但两处理耗水量没有显著性差异,因而导致WUE没有显著性差异。

氮素农学效率是指单位施氮量所增加的作物籽粒产量;氮素偏生产力是指单位投入的肥料氮所能形成的作物籽粒产量,提高氮素利用效率是实现作物高产高效的主要研究方向之一。本研究中,与OF0与OF2处理相比,OF1处理显著提高了氮素农学效率及氮素偏生产力,这与张璐等^[37]研究结果相一致。这一方面是因为相对于化学氮肥尿素,有机肥携带的氮素不易流失^[38];另一方面有机肥肥效释放相对缓慢^[39],可以保证向日葵生育后期的土壤氮素供应能力^[8]。因此OF1处理获得高产的同时还提高了氮素偏生产力和氮素农学效率。此外,研究表明,由于有机肥中含有较高的Pb、Cr、As等重金属元素,有机肥替代化肥引起了土壤和农产品中重金属含量增加的负面影响^[40-41],因此,长期施用有机肥还需考虑对土壤和作物中重金属累积的影响。

4 结论

相比单施化肥,有机无机肥配施有利于提高河套灌区重度盐渍土0—40 cm土层土壤的孔隙度,降低土壤容重,进而改善作物根区土壤水盐环境,提高向日葵产量和水氮利用效率。在河套灌区重度盐渍土区,综合考虑向日葵产量、水氮利用效率、生育期土壤水盐运移特性及成本效益,在相同施氮量(N 180 kg/hm²)条件下,建议在向日葵生产上采用有机肥氮替代50%化肥氮。

参 考 文 献:

- [1] 杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(S1): 162–170.
Yang J S, Yao R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(S1): 162–170.
- [2] 刘全明, 成秋明, 王学, 等. 河套灌区土壤盐渍化微波雷达反演[J]. 农业工程学报, 2016, 32(16): 109–114.
Liu Q M, Cheng Q M, Wang X, *et al.* Soil salinity inversion in Hetao Irrigation District using microwave radar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(16): 109–114.
- [3] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 63–72.
Cao L H, Wu P T, Zhao X N, *et al.* Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 63–72.
- [4] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783–795.
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(4): 783–795.
- [5] Gu B J, Ju X T, Chang J, *et al.* Integrated reactive nitrogen budgets and future trends in China[J]. PNAS, 2015, 112(28): 8792–8797.
- [6] Zhang X Y, Fang Q C, Zhang T, *et al.* Benefits and trade-offs of replacing synthetic fertilizers by animal manures in crop production in China: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2020, 26(2): 888–900.
- [7] 朱海, 杨劲松, 姚荣江, 等. 有机无机肥配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(3): 441–450.
Zhu H, Yang J S, Yao R J, *et al.* Effects of partial substitution of organic nitrogen for inorganic nitrogen in fertilization on salinity and nitrogen utilization in salinized coastal soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 441–450.
- [8] 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]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 299–307.
Zhou H, Shi H B, Xu Z, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen supply and crop water and nitrogen utilization in salinized soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 299–307.
- [9] 颜安, 吴勇, 徐金虹, 等. 有机氮替代无机氮和土壤改良剂对重度盐碱地棉花产量和土壤养分的影响[J/OL]. 中国土壤与肥料, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20201105.1746.006.html>, [2020-11-06]/(2021-01-06).
Yan A, Wu Y, Xu J H, *et al.* Effects of partial substitution of chemical nitrogen with organic fertilizer and soil amendments on cotton production and soil nutrient in salinization field[J/OL]. Soil and Fertilizer Sciences in China, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20201105.1746.006.html>, [2020-11-06]/(2021-01-06).
- [10] Liu L, Li H, Zhu S, *et al.* The response of agronomic characters and rice yield to organic fertilization in subtropical China: A three-level meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2021, 263: 1–9.
- [11] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区节水灌溉与水肥高效利用研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(11): 1–12.
Shi H B, Yang S Q, Liu R P, *et al.* Water-saving irrigation and utilization efficiency of water and fertilizer in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia: Prospect for future research[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 1–12.
- [12] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3133–3139.
Xu M G, Li D C, Li J M, *et al.* Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3133–3139.
- [13] 张奇茹, 谢英荷, 李廷亮, 等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4866–4878.
Zhang Q R, Xie Y H, Li T L, *et al.* Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(23): 4866–4878.
- [14] 张然, 史雷, 马龙, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量及土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 325–330, 336.
Zhang R, Shi L, Ma L, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on winter wheat yield and soil physical properties in dryland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 325–330, 336.
- [15] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993. 276–282.
Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, *et al.* Salt-affected soils of China [M]. Beijing: Science Press, 1993. 276–282.
- [16] 巴彦淖尔市统计局. 巴彦淖尔市统计年鉴(2012—2013年)[M]. 巴彦淖尔: 巴彦淖尔市统计局, 2013. 253–256.
Bayannur Municipal Bureau of Statistics. Statistical yearbook of Bayannur City (2012–2013)[M]. Bayannur: Bayannur Municipal Bureau of Statistics, 2013. 253–256.
- [17] Ondrasek G, Rengel Z. Environmental salinization processes: Detection, implications & solutions[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 1–23.
- [18] Weil Ray R, Brady Nyle C. The nature and properties of soils (The Fifteenth Edition) [M]. Pearson Education Limited, 2017: 453–454.
- [19] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924.
- [20] Zhou L, Feng H. Plastic film mulching stimulates brace root emergence and soil nutrient absorption of maize in an arid environment[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(2): 540–550.
- [21] 巴彦淖尔市农牧局. 市场行情[EB/OL]. (2021-01-03) <https://nmj.bynr.gov.cn/>
Bayannur Bureau of Agriculture and Animal Husbandry. Market situation[EB/OL]. (2021-01-03) <https://nmj.bynr.gov.cn/>
- [22] Litalien A, Zeeb B. Curing the earth: A review of anthropogenic soil

- salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134235.
- [23] 王宪玲, 赵志远, 马艳婷, 等. 基于CT扫描技术研究有机无机肥长期配施对土壤物理特征的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(9): 1647–1655.
- Wang X L, Zhao Z Y, Ma Y T, *et al.* Study on the effects of long-term application of chemical fertilizer combined with manure on soil physical properties of apple orchard based on CT scanning technology[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1647–1655.
- [24] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (6): 38–42.
- Ma J Y, Cao C Y, Zheng C L, *et al.* Effect of long-term application of chemical fertilizers and organic manure on soil organic carbon and bulk density[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, (6): 38–42.
- [25] 张密密, 陈诚, 刘广明, 等. 适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(10): 91–98.
- Zhang M M, Chen C, Liu G M, *et al.* Suitable utilization of fertilizer and soil modifier to ameliorate physicochemical characteristics of saline-alkali soil and increase crop yields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(10): 91–98.
- [26] 邵孝候, 张宇杰, 常婷婷, 等. 生物有机肥对盐渍土壤水盐动态及番茄产量的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(2): 153–160.
- Shao X H, Zhang Y J, Chang T T, *et al.* Effects of different fertilizer treatments on soil water, salt and crop yield formation in saline soils[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 46(2): 153–160.
- [27] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 314–324.
- Gao J S, Huang J, Dong C H, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314–324.
- [28] 蓝贤瑾, 刘益仁, 侯红乾, 等. 长期有机无机肥配施对红壤性水稻土微生物生物量和有机质结构的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 1–16.
- Lan X J, Liu Y R, Hou H Q, *et al.* Effect of long-term organic manure application combined with chemical fertilizers on soil microbial biomass and organic matter structure in red paddy soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(5): 1–16.
- [29] Liu C A, Li F R, Zhou L M, *et al.* Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 123–132.
- [30] 魏文良, 刘路, 仇恒浩. 有机无机肥配施对我国主要粮食作物产量和氮肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(8): 1384–1394.
- Wei W L, Liu L, Qiu H H. Effects of different organic resources application combined with chemical fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of main grain crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(8): 1384–1394.
- [31] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 144–149.
- Wang X J, Jia Z K, Liang L Y, *et al.* Effects of organic fertilizer application on soil moisture and economic returns of maize in dryland farming[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 144–149.
- [32] 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 320–324.
- Yu X Y, Zhai B N, Jin Z Y, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat yield, water and fertilizer use efficiency and soil fertility in dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 320–324.
- [33] 吕雯, 孙兆军, 陈小莉, 等. 地膜秸秆复合覆盖改善龟裂碱土水盐特性提高油葵产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 133–141.
- Lü W, Sun Z J, Chen X L, *et al.* Plastic film and straw combined mulching improving water and salt characteristics of Takyr Solonchaks and yield of oil sunflower[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(13): 133–141.
- [34] 王兵, 刘文兆, 党廷辉, 等. 长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J]. *植物营养与肥科学报*, 2007, 13(3): 411–416.
- Wang B, Liu W Z, Dang T H, *et al.* Distribution features of soil water content in the profile of rainfed cropland with long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(3): 411–416.
- [35] 张晶, 党建友, 张定一, 等. 不同降水年型下小麦产量、品质及水分利用效率对有机无机肥配施的响应[J]. *植物营养与肥科学报*, 2020, 26(9): 1625–1635.
- Zhang J, Dang J Y, Zhang D Y, *et al.* Response of yield, quality and water use efficiency of wheat to different combinations of organic manures and chemical fertilizers under different yearly precipitations[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1625–1635.
- [36] 霍琳, 王成宝, 逢焕成, 等. 有机无机肥配施对新垦盐碱荒地土壤理化性状和作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33(4): 105–111.
- Huo L, Wang C B, Pang H C, *et al.* Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on physical and chemical properties and crop yields in alkali-saline soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 105–111.
- [37] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 106–112.
- Zhang L, Huang J, Gao J S, *et al.* Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 106–112.
- [38] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. *作物杂志*, 2019, (5): 89–96.
- Ma F F, Xing S L, Gan M Q, *et al.* Effects of organic fertilizer substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019, (5): 89–96.
- [39] 徐福利, 王振, 徐慧敏, 等. 日光温室滴灌条件下黄瓜氮、磷、有机肥肥效与施肥模式研究[J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(1):

- 177–182.
- Xu F L, Wang Z, Xu H M, *et al.* Study on the response and fertilization model of cucumber for nitrogen, phosphorus and manure application in greenhouse under drip irrigation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1): 177–182.
- [40] 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 等. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. 2021, 环境科学, 42(5): 2469–2479
- Xia W J, Zhang L F, Liu Z B, *et al.* Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2469–2479.
- [41] 吴荣, 刘善江, 孙昊, 等. 长期化肥配施不同有机肥对土壤和玉米中重金属累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2010–2019.
- Wu R, Liu S J, Sun H, *et al.* Effects of long-term chemical fertilizer application with different organic fertilizers on accumulation of heavy metals in soil and maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(11): 2010–2019.