

暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响

祁茜, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 高晓瑜, 范理权, 郝云凤

引用本文:

祁茜, 史海滨, 闫建文, 李仙岳, 高晓瑜, 范理权, 郝云凤. 暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 559–567.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0840>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄腐酸改性膨润土对氮素淋失和氮肥利用率的影响

孔柏舒, 焦树英, 李永强, 沈玉文, 李烨, 张子胥, 付春雨

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2371–2379 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0838>

化肥减量替代对华北平原小麦-玉米轮作产量及氮流失影响

秦雪超, 潘君廷, 郭树芳, 翟丽梅, 王洪媛, 武淑霞, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1558–1567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1364>

稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应

朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 穆静, 蒋东, 章力干, 邵红建

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1935–1943 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0104>

牛粪化肥配施对稻田下渗水氮素流失和水稻氮素积累的影响

李敏, 王春雪, 舒正文, 王昭, 陈建军, 李元, 祖艳群, 张克强

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 903–911 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0695>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

祁茜, 史海滨, 闫建文, 等. 暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 559–567.

QI Q, SHI H B, YAN J W, et al. Effects of different types of fertilizer on sunflower growth and soil nitrogen distribution in subsurface farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 559–567.



开放科学 OSID

暗管农田不同类型肥料对向日葵生长及土壤氮素分布的影响

祁茜¹, 史海滨¹, 闫建文^{1*}, 李仙岳¹, 高晓瑜¹, 范理权¹, 郝云凤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. 巴彦淖尔市农牧业科学研究院, 内蒙古 巴彦淖尔 015400)

摘要:为了探明暗管排水条件下不同肥料对作物生长和土壤氮素环境的影响,明确盐渍化暗管排水农田合理的施肥模式,采用田间试验,设置普通尿素(CK)、控释肥(CF)和有机硅水溶性缓释肥(OF)3个处理,在保证施纯氮量均为225 kg·hm⁻²的情况下,对各处理向日葵生育期间的生长状况、产量和氮肥利用效率,以及土壤、排水中的氮素含量进行分析。结果表明:与CK相比,CF和OF处理均可提高向日葵各生育期株高、叶面积指数、光合速率及产量。其中,CF增产效果最为显著,两年内较OF、CK分别提高了14.07%和40.54%。此外,CF处理有利于0~40 cm土层土壤氮素的持续有效供应,可增加植株氮素积累量、氮肥偏生产力及氮收获指数,更好地促进作物对养分的吸收利用。与CK、OF相比,CF可有效减少向日葵收获后期0~160 cm土层NO₃⁻-N残留量,降幅分别为14.92%和7.87%。两年试验中各处理之间的暗管排水量、排盐量较接近,但NO₃⁻-N及NH₄⁺-N流失量差异明显,其中OF、CK处理下的NO₃⁻-N流失量分别是CF的1.25、1.50倍,NH₄⁺-N流失量分别是CF的1.22、1.95倍。研究表明,控释肥可以更好地促进作物对养分的吸收利用,提高氮肥利用率,显著增加作物产量,同时还可以降低土壤中氮素的深层淋洗,减少氮素流失量,是暗管排水条件下较为适宜的肥料品种。

关键词:暗管排水;作物生长;控释肥;氮素;向日葵

中图分类号:S565.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)03-0559-09 doi:10.11654/jaes.2021-0840

Effects of different types of fertilizer on sunflower growth and soil nitrogen distribution in subsurface farmland

QI Qian¹, SHI Haibin¹, YAN Jianwen^{1*}, LI Xianyu¹, GAO Xiaoyu¹, FAN Liqun¹, HAO Yunfeng²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Bayannur Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Bayannur 015400, China)

Abstract: To clarify the effects of various fertilizers on crop growth and soil nitrogen environment under subsurface drainage conditions and determine the reasonable fertilization mode suitable for saline subsurface drainage farmland, under the condition of 225 kg·hm⁻² pure nitrogen application, a field experiment with three fertilizer treatments was conducted. These treatments included common urea fertilizer (CK), controlled-release fertilizer (CF) and silicone water-soluble slow-release fertilizer (OF), and the sunflower growth, yield, and nitrogen usage efficiency, as well as the nitrogen content in soil and drainage were measured. The results showed that the plant height, leaf area index, photosynthetic rate and crop yield in CF and OF were greater than that in CK during the growing period. The yield in CF

收稿日期:2021-07-24 录用日期:2021-10-14

作者简介:祁茜(1996—),女,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事灌溉排水及农田水土环境变化研究。E-mail:1144576552@qq.com

*通信作者:闫建文 E-mail:baotouyan13579@163.com

基金项目:内蒙古自然科学基金项目(2020MS05052);内蒙古科技重大专项(ZDZX2018059);内蒙古农业大学“双一流”学科建设人才培养项目(NDSC2018-12);国家自然科学基金项目(51879132)

Project supported: The Natural Science Foundation of Inner Mongolia, China (2020MS05052); The Key Program of Science and Technology of Inner Mongolia, China (ZDZX2018059); Talent Cultivation Project of “Double First-Class” Discipline Construction in Inner Mongolia Agricultural University (NDSC2018-12); The National Natural Science Foundation of China (51879132)

increased most significantly over the two years, which was increased by 14.07% and 40.54% compared to OF and CK, respectively. In addition, CF was conducive to the continuous and effective supply of soil nitrogen in 0~40 cm soil layer, which could increase the plant nitrogen accumulation, nitrogen partial productivity and nitrogen harvest index, and promote the absorption and utilization of nutrients by the crops. CF could effectively reduce the NO_3^- -N residue in 0~160 cm soil layer after harvest, which was 14.92% and 7.87% lower than CK and OF, respectively. In the two-year experiment, the subsurface drainage and salt discharge of each treatment were relatively close, but the NO_3^- -N and NH_4^+ -N losses were significantly different. The NO_3^- -N losses in OF and CK were 1.25 and 1.50 times of that in CF, and the NH_4^+ -N losses were 1.22 and 1.95 times of that in CF, respectively. In summary, compared to the other fertilizers, CF can better promote the absorption and utilization of nutrients by crops, improves the utilization rate of nitrogen fertilizer, and significantly increases the crop yield. At the same time, it can also reduce the deep leaching of nitrogen in the soil and reduce nitrogen loss. Therefore, it is a suitable fertilizer variety under the condition of subsurface drainage.

Keywords: subsurface drainage; crop growth; controlled release fertilizer; nitrogen; sunflower

内蒙古河套灌区是中国3个特大型灌区之一,目前全灌区盐渍化耕地面积约39.4万 hm^2 ,占总耕地面积的68.65%^[1]。由于灌区大面积灌溉、明沟排水不健全且塌坡严重,造成灌区排水及排盐能力较差,因此建立完善的排水体系成为灌区盐碱地改良的关键。暗管排水由于具有节省耕地、排盐效果好、有效控制地下水位等优点而成为研究热点。然而由于暗管的作用缩短了渗流的路径、加快了入渗速度,因而也显著增加了地下径流量和排水出流中营养物质的含量,改变了土壤养分分布,进而影响了作物的生长和产量^[2]。目前对于暗管排水大多是基于关键工程技术参数的研究^[3-5],而与肥料组合进行源头调控的试验较少。因此在暗管排水条件下开展不同类型肥料施肥模式的筛选研究对促进作物生长、提高肥料利用率、降低环境污染风险具有重要意义。

氮素是植物生长的必需营养元素之一。以往研究表明^[6-7],氮肥的适量施用在一定程度上能显著提高作物产量。近年来河套灌区的向日葵通常施用普通氮肥,普通氮肥没有控制养分释放的能力,容易造成养分流失。控释肥料由于具有控制养分释放速率、肥效长、氮素流失率低等特点而被广泛应用^[8]。大田试验证明,相比于传统一次性全量基施,控释肥的施加可以显著提高作物的光合速率、提高作物产量与氮肥利用率^[9];同时,还可以减少氮素的流失和气体挥发,减轻对环境的污染^[10-11]。有机硅水溶性缓释肥也

是近几年研发的一种多功能营养型全水溶/长效复合肥,可同时解决肥料水溶性与缓释性矛盾的问题,也被大量推广和使用^[12]。研究表明^[13-14],施用有机硅水溶性缓释肥料在促进作物生长、改变土壤中氮素分布等方面也具有一定优势。因此通过研究暗管排水条件下不同肥料对向日葵生长、土壤氮素分布及氮素流失的响应关系,筛选出适合暗管排水农田向日葵种植的肥料,可为暗管排水工程大面积实施后肥料的配套和污染源头的防治提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区巴彦淖尔市农牧业科学研究院暗管排水试验场(40°79'N, 107°28'E)。试验地属于中温带半干旱大陆性气候,年平均降雨量138.8 mm,蒸发量2 096.4 mm;地下水埋深在1.6~2.2 m之间变化;平均气温6.8℃,昼夜温差大,无霜期为130~150 d。试验田属于轻度盐渍化土壤,主要土质为粉土及粉壤土。试验区土壤理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验设计暗管排水条件下3个不同施肥处理,分别为普通尿素(CK)、控释肥(CF)及有机硅水溶性缓释肥(OF)。每个处理试验面积约为25 000 m^2 (500 m×50 m),由于处理面积较大,故选取3个测试点,每

表1 试验区土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the test area

土壤盐碱程度 Soil salinization degree	全盐量 Total salt content/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	含水率 Moisture content/%	全氮 Total N/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	水解氮 Hydrolytic N/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available P/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
中度	2.52	9.40	15.92	1.13	105.24	18.45	259.68	28.01

个测试区域面积约为2 670 m²。暗管采用南北布设的方式,埋深1.2~1.7 m,间距25 m,坡度为0.1%。每个处理小区铺设3根暗管,选取中间暗管控制范围内进行监测与取样,以消除不同暗管排水的影响;小区1 m深土体四周以2层塑料薄膜相隔,防止水分和肥料侧渗。

供试作物为食葵,品种为“SH361”,2019年播种日期为5月31日,收获日期为10月2日,2020年播种日期为5月30日,收获日期为9月28日。采用1膜2行的常规种植模式,株距0.3 m、行距0.7 m,种植密度为28 000株·hm⁻²。试验区每年在春灌和秋浇时进行大面积的漫灌压盐,灌水量为当地优化灌溉定额(春灌约2 500 m³·hm⁻²、秋浇约3 000 m³·hm⁻²),现蕾期进行一次灌水,灌水量约为1 250 m³·hm⁻²;灌溉利用黄河水(用梯形量水堰计量),矿化度约为0.54 g·L⁻¹。各处理纯氮施用量均为225 kg·hm⁻²,其中普通尿素由鄂尔多斯市亿鼎生态农业开发有限公司生产(含N 46%)、控释肥由天津芦阳化肥股份有限公司提供(芦阳6代,含N 28%)、有机硅水溶性缓释肥由河北硅谷肥业有限公司生产(含N 18%)。控释肥、有机硅水溶性缓释肥和磷肥(磷酸二铵,含P₂O₅ 46%)于耕作前作为基肥一次性施入,追肥选用尿素,于向日葵现蕾期施入。各处理具体施氮量见表2。

表2 各试验处理施氮量(kg·hm⁻²)

Table 2 Nitrogen application rate of experimental treatments (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	基肥 Basal dressing	追肥 Top dressing	总计 Total
CK	75	150	225
CF	225	0	225
OF	150	75	225

1.3 测定指标与方法^[15-17]

1.3.1 向日葵生长指标及产量测定

生长指标测定:在每个小区随机选取10株长势良好的向日葵进行定株,分别在向日葵的主要生育期,即播前(5月25—31日)、苗期(6月15日—7月5日)、现蕾期(7月6—31日)、开花期(8月1日—9月5日)和成熟期(9月6日—10月10日)进行观测。用卷尺对株高进行测量,用长宽系数法(本试验中系数取值为0.75)测量每株向日葵所有叶片面积,并计算叶面积指数(LAI)。

光合指标测定:采用LI-6400便携式光合仪,于

向日葵现蕾期晴朗无风天气的上午9:00—11:00,选择生长良好、主茎上正数第3片展开功能叶片测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(Tr)和胞间CO₂浓度(C_i),每小区测定10株向日葵。

产量测定:于成熟期在每个小区随机选取长势均匀的10株向日葵,脱粒、自然晾干后测定百粒质量和籽粒产量。

干物质及植株全氮测定:将测产10株向日葵地上各部分器官粉碎,于105℃杀青30 min,75℃烘干至质量恒定后测定干物质量。采用H₂SO₄-H₂O₂法消煮、凯氏定氮法测定各器官含氮量。

1.3.2 土壤无机氮测定

于向日葵各生育期用土钻法沿土壤剖面垂直方向进行0~160 cm土样的采集,共分为7层:0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~120 cm和120~160 cm。将采集的土样自然风干碾碎后过1 mm筛备用。用2 mol·L⁻¹的KCl溶液(水土比5:1)浸提,紫外分光光度计测定土样中NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量。

1.3.3 排水水样中电导率及氮素测定

分别于春灌、追肥及秋浇灌水后在排水口取样,最初1周取样间隔为1 d,而后取样间隔为5 d,同时在排水口安装水表,每日进行读数统计排水量,直至无排水为止。用电导率仪测定水样电导率,用双波长比色法和纳氏光度法测定水样中NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量。

1.4 计算方法^[18-19]

(1)氮肥偏生产力

$$N_p=Y/F$$

式中: N_p 为氮肥偏生产力,kg·kg⁻¹;F为氮肥施用量,kg·hm⁻²;Y为产量,kg·hm⁻²。

(2)氮收获指数

$$N_H=G_N/P_N\times 100\%$$

式中: N_H 为氮收获指数,%; G_N 为籽粒吸氮量,kg·hm⁻²;P_N为植株吸氮量,kg·hm⁻²。

(3)收获指数

$$R=Y/B\times 100\%$$

式中: R 为收获指数,%;Y为经济产量,kg·hm⁻²;B为生物产量,kg·hm⁻²。

(4)硝态氮残留量

$$A=h\times a\times d\times 10/100$$

式中:A为土壤硝态氮残留量,kg·hm⁻²;h为土层深度,cm;a为土壤容重,g·cm⁻³;d为土壤硝态氮含量,mg·kg⁻¹。

(5)排水氮素流失量

$$D_N = \sum_{i=1}^n \frac{e_i f_i}{10^3}$$

式中: D_N 为排水氮素流失量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; e_i 为第 i 次排水量, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; f_i 为第 i 次排水中氮素浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.5 数据处理与分析

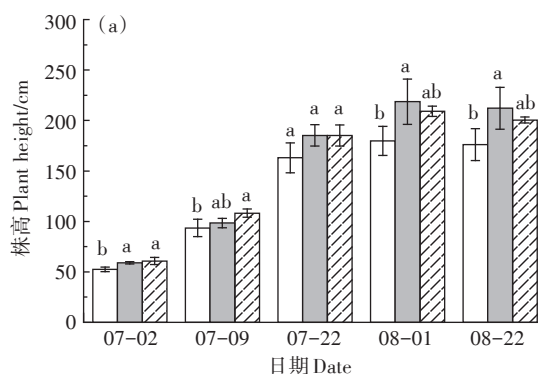
采用 Origin 2018 和 SPSS 26.0 对试验数据进行整理统计, 利用 LSD 法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对向日葵株高、叶面积的影响

从图 1(a) 可以看出, 不同时期向日葵株高整体表现为 $\text{OF} > \text{CF} > \text{CK}$, 且随着时间的推移呈先增加后减小的趋势。从 7 月 2 日至 7 月 22 日, 各处理株高增长明显, OF 、 CF 、 CK 处理下日增长速率分别达到 6.31、6.21、5.53 $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。8 月 1 日各处理株高达到全生育期最高, OF 、 CF 分别为 218.67、209.17 cm , 较 CK 增加 21.61%、15.46%。后期向日葵生殖生长旺盛, 大量养分转移到花盘供作物籽实发育, 导致株高无明显变化。综上所述, 暗管排水条件下施用控释肥和有机硅水溶缓释肥在各生育期均不同程度促进了向日葵植株生长。

由图 1(b) 分析可得, 不同时期向日葵叶片 LAI 整体表现为 $\text{CF} > \text{OF} > \text{CK}$, 但各处理之间无显著差异 ($P > 0.05$)。前期 LAI 迅速增加, 至 8 月 1 日, 各处理下 LAI 达到峰值, CF 、 OF 分别较 CK 提高 18.46%、10.42%。随着时间的推移, 向日葵逐渐进入灌浆期, LAI 开始减小, 但仍以 CF 最高; 与 OF 、 CK 相比, 增幅分别为 6.23%、21.33%。可见施用控释肥更加有利于向日葵的光合作用和籽粒灌浆, 丰产潜力较大。



□ CK ■ OF ▨ CF

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$)

图 1 不同处理下向日葵株高与 LAI 的变化

Figure 1 Changes of plant height and LAI of sunflower under different treatments

2.2 不同施肥处理对向日葵光合性能的影响

有研究表明, 向日葵现蕾期的光合作用是各个参数与 P_n 相关性最高的时期, G_s 、 T_r 等因素的变化与 P_n 随光强变化最为协调, 有利于光合作用合成更多的有机物质。因此, 本试验测定了现蕾期不同施肥处理对向日葵光合指标的影响。

从表 3 分析可得, 现蕾期 3 种施肥模式下, 向日葵叶片的 P_n 、 T_r 、 G_s 均表现为 $\text{CF} > \text{OF} > \text{CK}$, 其中 CF 处理下 P_n 、 T_r 与 CK 之间均存在显著差异, 较其分别增加了 13.85% 和 19.21%。CF 处理下 G_s 最大, 为 0.69 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 三个处理之间差异均显著。OF 与 CF 处理的 C_i 显著低于 CK , 降幅分别为 12.05% 和 16.71%。综上所述, 暗管排水条件下施用控释肥能更好地促进向日葵的光合作用, 有利于有机物的积累。

2.3 不同施肥处理对向日葵产量和构成因素的影响

由表 4 可以看出, 相同施氮量下, 两年试验百粒质量的变化范围在 20.15~27.20 g 之间, CF 与 OF 、 CK

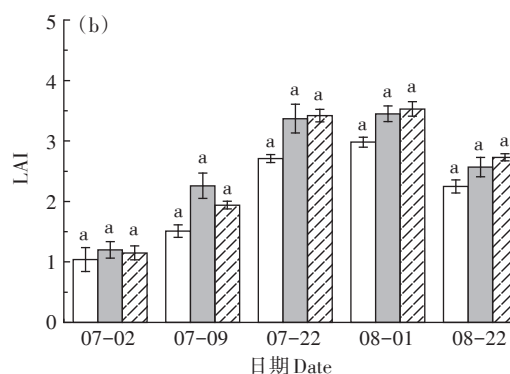
表 3 不同处理下向日葵的光合参数

Table 3 Photosynthetic parameters of sunflower under different treatments

处理 Treatment	净光合速率 P_n ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
CK	39.71b	365a	4.06b	0.53c
OF	42.53ab	321b	4.42ab	0.61b
CF	45.21a	304b	4.84a	0.69a

注: 表中数据为 3 个重复的平均值, 同列不同字母表示各处理之间的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: The data in the table are the average values of three replicates, and different letters in the same column indicate the significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.



之间存在显著差异。从产量来看,两年均以CF最高,分别为4 917.84、4 657.42 kg·hm⁻²,OF次之,二者较CK分别平均增产34.14%、20.72%。CF、OF的植株吸氮量较CK平均增加了47.47%、27.3%。从氮收获指数来看,各处理之间无显著差异,整体表现为CF>OF>CK,说明施用控释肥更有利于向日葵籽粒对氮素的吸收。

氮肥偏生产力可以用来表征氮肥的利用效率。两年试验期间各处理的氮肥偏生产力整体表现为CF>OF>CK,CF较OF、CK平均提高了11.13%、34.18%。从收获指数来看,2019年收获指数的变化范围为23.71%~26.75%,其中CF、CK较OF分别增加了12.82%、12.57%;2020年收获指数的变化范围为22.27%~25.40%。综上所述,同等施氮量下施用控释肥可以在一定程度上提高作物的氮肥偏生产力和收获指数,促进作物对养分的吸收利用,保证作物高产。

2.4 不同施肥处理下土壤氮素动态变化

土壤表面以下0~40 cm土层为向日葵的主要根系活动区,因此对该土层内NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量的动态变化进行了分析(图2)。2019年和2020年各处理NH₄⁺-N含量随时间的变化均形成了较为明显的“峰-谷-峰-谷”4个层次。春灌施肥后,各处理中肥料肥力逐渐释放,至7月初期NH₄⁺-N含量呈上升趋势,两年NH₄⁺-N含量均以OF处理最高,其次为CK,OF、CK较CF分别平均高出33.11%、22.76%。随着向日葵对养分需求的增加和温度的升高,土壤中NH₄⁺-N转化速率加快,7月中旬追肥灌水后NH₄⁺-N含量达到最低值。由于NH₄⁺-N带正电荷,被土壤胶粒吸附后移动性减小,因此前期未被吸收利用的氮素仍残留在土壤中。且7—8月期间发生多次少量降雨,土壤中残留的NO₃⁻-N经反硝化作用转化为NH₄⁺-N,至8月中旬,NH₄⁺-N含量再次升高,与CK相比,CF、OF增幅度分别为26.63%、12.33%(2019年)和22.89%、4.78%

(2020年)。后期各处理NH₄⁺-N含量均呈下降趋势,主要消耗途径为作物吸收利用、氨挥发及硝化反应。

植物可利用氮素主要来源于NO₃⁻-N。试验数据显示,生育前期各处理土壤NO₃⁻-N含量无明显差异。7月中旬追肥灌水后,CK、CF处理下土壤NO₃⁻-N含量达到峰值,两年平均分别为11.90、13.95 mg·kg⁻¹,较OF处理分别提高了5.65%、7.7%。后期向日葵处于生殖旺盛期,尿素施入后养分释放较快,且由于NO₃⁻-N为阴离子,不能进行交换吸收而存在于土壤溶液中,部分养分不能及时被作物吸收利用而淋失在深层土壤中并由暗管排出,极易造成后期供氮不足。控释肥通过控制养分释放速率保证了向日葵后期的氮素供应,因此至成熟期土壤中NO₃⁻-N含量持续大幅度下降,整体仍表现为CF>OF>CK。

2.5 不同施肥处理对土壤NO₃⁻-N残留的影响

同等施氮量下,2019年0~160 cm土层范围内土壤NO₃⁻-N残留量的大小依次为CK>OF>CF,分别为157.33、144.61、131.65 kg·hm⁻²(表5)。与CK处理相比,CF、OF处理降幅分别为16.32%、8.08%。各处理下80~160 cm土层中NO₃⁻-N残留量的占比均达到总残留量的60%以上,其中以CK处理最高,为95.16 kg·hm⁻²,OF处理次之,较CF分别增加14.78%、10.25%。2020年NO₃⁻-N残留量整体表现与2019年相似,CF处理下80~160 cm土层内土壤NO₃⁻-N残留量较CK、OF处理显著降低,降幅分别为15.92%和15.60%,说明施用控释肥能显著降低土体中NO₃⁻-N的残留积累,减少其向深层淋失。

2.6 不同施肥处理下氮素流失量分析

由表6分析可得,2019年和2020年试验中,在灌水量与施氮量均保持一致的情况下,CK、CF、OF处理之间暗管排水量和排盐量较接近。但排水中NO₃⁻-N及NH₄⁺-N流失量差异显著,说明氮素流失量与施肥类型存在紧密联系。两年试验中,NH₄⁺-N流失量均以CK

表4 不同处理下向日葵的干物质量及产量

Table 4 Dry matter quality and yield of sunflower under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	干物质量 Dry matter/ (kg·hm ⁻²)	百粒质量 100-grain weight/g	产量 Yield/ (kg·hm ⁻²)	增产率 Growth rate/%	植株吸氮量 Plant N uptake/ (kg·hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%	氮肥偏生产力 N partial factor productivity/(kg·kg ⁻¹)	氮收获指数 N harvest index/%
2019年	CK	14 040.00b	21.46c	3 744.98b	—	180.52c	26.69a	15.77b	55.96a
	CF	18 390.24a	27.20a	4 917.84a	31.32	291.86a	26.75a	20.71a	61.65a
	OF	19 140.03a	24.67b	4 535.83a	21.12	239.70b	23.71b	19.10a	58.49a
2020年	CK	13 934.16b	20.15b	3 400.90c	—	190.48b	24.42ab	17.00c	58.30a
	CF	18 342.99a	22.77a	4 657.42a	36.95	253.81a	25.40a	23.29a	63.44a
	OF	18 384.30a	20.6b	4 091.45b	20.31	232.05a	22.27b	20.46b	58.79a

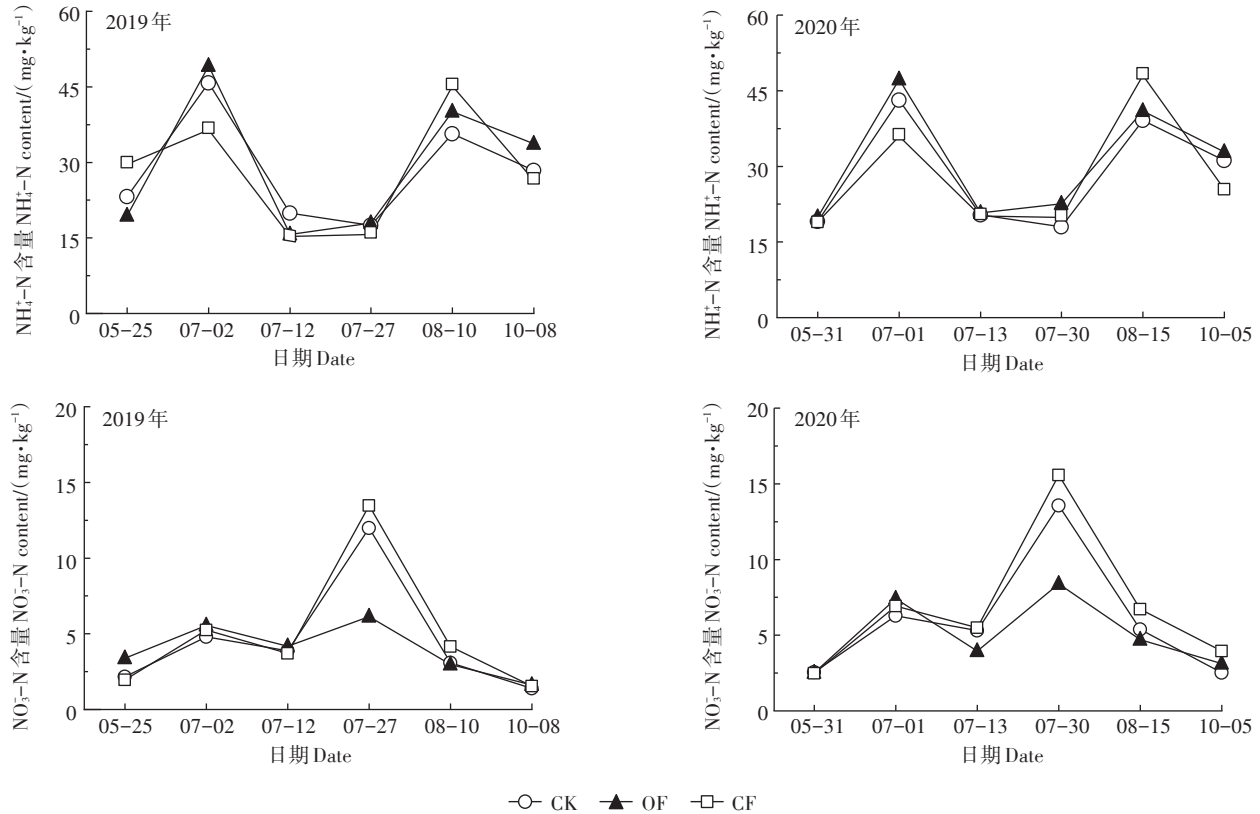


图2 不同施肥处理下0~40 cm 土层氮素动态变化

Figure 2 Dynamic changes of inorganic nitrogen in 0~40 cm soil layer under different fertilization treatments

表5 不同施肥模式对土壤剖面中NO₃-N残留的影响(kg·hm⁻²)

Table 5 Effects of different fertilization patterns on NO₃-N residue in soil profile(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	2019年			2020年		
	0~160 cm	0~80 cm	80~160 cm	0~160 cm	0~80 cm	80~160 cm
CK	157.33a	62.17a	95.16a	170.78a	67.67a	103.11a
CF	131.65b	48.74b	82.91b	147.71b	61.02b	86.69b
OF	144.61ab	53.20b	91.41ab	158.43ab	55.72b	102.71a

最高,分别为0.50、0.65 kg·hm⁻²,CF、OF与之相比平均减少48.62%、37.23%。不同处理下NO₃-N流失量均高于NH₄-N,主要是由于NH₄-N极易被带负电荷的土壤胶体所吸附,随水运移能力较弱,这也表明NO₃-N的大量流失是暗管条件下造成水体污染的主要原因。

两年试验中CF处理下NO₃-N流失量分别为0.63、0.76 kg·hm⁻²,较CK处理减少35.71%、30.28%,较OF处理减少26.74%、10.59%。这主要是由于尿素释放较快,土壤中NO₃-N含量在短时间内迅速增加,灌溉后随水由暗管大量排出,不利于土壤中氮素的长久固持。而控释肥是通过控制养分在土壤中的释放速率来降低土壤中氮素的淋失,进而减少了排水中氮

素流失量,起到降低环境污染风险的作用。

3 讨论

暗管排水技术是盐碱地改良、涝渍区排水、养分管理的重要技术之一。暗管在排水排盐的过程中,也存在淋失土壤养分的情况,并且受到土壤质地的限制^[20]。合适的肥料可以促进作物对养分的吸收,提高肥料利用效率,同时更好地从源头减少氮素的流失。

本试验中控释肥处理下向日葵在现蕾期的光合作用最为强烈。究其原因,主要是由于控释氮肥具有控制氮素养分释放速率、实现氮肥后移的特性,能有效地对光合特性进行生理调节,延长作物的光合功能

表6 不同施肥模式下暗管排水中氮素流失量

Table 6 N loss in the drainage of concealed pipes under different fertilization modes

处理 Treatment	2019年				2020年			
	排水量 Displacement/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	排盐量 Salt discharge/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量 $\text{NO}_3\text{-N loss}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量 $\text{NH}_4\text{-N loss}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	排水量 Displacement/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	排盐量 Salt discharge/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量 $\text{NO}_3\text{-N loss}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NH}_4\text{-N}$ 流失量 $\text{NH}_4\text{-N loss}/$ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	315.07ab	1 389.83ab	0.98a	0.50a	449.70a	1 889.81b	1.09a	0.65a
CF	333.71a	1 505.61a	0.63c	0.26c	498.72a	2 194.62a	0.76b	0.33c
OF	299.71b	1 307.13b	0.86b	0.32b	484.48a	2 010.69ab	0.85b	0.40b

期,延缓叶片衰老。因此本研究中控释肥处理下的叶面积指数较其他处理也有所提高。但本试验中有机硅水溶性缓释肥使植株增高效果明显,可能是由于硅(Si)在增强对生物和非生物胁迫的抗性中起重要作用,因此该肥料在促进植物根系生长的同时形成了硅化细胞使作物茎秆挺直^[21],这与徐宁等^[22]的研究结果一致。然而也有研究发现施用硅肥可以有效降低向日葵株高^[23],这可能是由于本试验采用的暗管排水技术改善了土壤的通气状况,提高土壤矿化率,促进了潜在养分的转化,最终促进了作物的生长^[24]。

作物氮素吸收是光合产物的基础,与作物产量密切相关。王玉雯等^[25]的研究表明,较高的产量需要叶片保持持久的光合活性,而这大多依赖于后期氮累积和氮转运的平衡,因而在本研究中控释肥处理下向日葵的产量和百粒质量均显著高于有机硅水溶性缓释肥和普通尿素,与YANG等^[26]的研究结果基本一致。也是由于控释肥缓慢的养分释放速率可以保持作物旺盛生长,灌浆期促进干物质积累并向籽粒转运,进而有效提高了作物的百粒质量和产量。另外,有研究发现调控作物后期吸收的氮向籽粒中转运也是提高氮肥利用率的重要措施^[27]。本试验中,播前一次性基施控释肥可使收获后向日葵植株吸氮量、氮肥偏生产力和氮收获指数均有显著提高,这与张建军等^[28]和郑圣先等^[29]的研究结果相符。

土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 作为植株吸收利用的主要氮素形式,其丰缺程度可有效表征土壤供氮状况。本研究结果显示,控释肥的施用会使向日葵生育后期耕层土壤氮素含量保持在较高的水平,这与张林等^[30]的研究结果相符合。其主要原因是在北方旱作模式下,普通尿素施入土壤后会很快水解成 $\text{NH}_4\text{-N}$,1~2周就会在氨氧化微生物的作用下完全被氧化成 $\text{NO}_3\text{-N}$ ^[31],且在转化过程中很容易挥发至空气中和淋洗至土壤深层,导致土壤耕层氮素含量降低。即使有机硅水溶性缓释肥与普通尿素相比具有营养释放速度缓慢、肥

效长的特点,但在释放时还会受土壤pH值、微生物活动、土壤类型等许多外界因素的影响^[10],使释放速率和作物的营养需求无法同步。而控释氮肥通过控制氮素释放速率与不同生育阶段的氮素需求速率基本同步,使向日葵生育中后期土壤耕层氮素含量提高的同时,促进作物吸收并减少氮的挥发和深层淋洗,降低氮素损失。因此在本试验中,施用控释肥也可以减少收获后期0~160 cm土层中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量,这与郑利芳等^[32]和ZHENG等^[33]的研究结果一致。与此同时,暗管排水中控释肥处理下的氮素流失量较普通尿素和有机硅水溶性缓释肥也有显著降低,其中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 流失量均大于 $\text{NH}_4\text{-N}$,主要是由于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 带负电荷,易随水流失,窦旭等^[3]的研究也证明了这一点。

本研究探讨了暗管排水条件下不同源头肥料对作物生长及土壤氮素分布的影响。控释氮肥通过控制氮素养分的缓慢释放来实现氮肥后移,提高产量和氮肥利用效率,并且控释肥明显提高耕层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量并降低深层剖面累积量,减弱了淋失风险。本研究可为暗管排水工程大面积实施后肥料的配套和污染源防治提供依据。然而暗管排水条件下土壤渗透性、暗管埋深及间距等因素对土壤养分特征的影响仍有待深入研究。

4 结论

(1)两年试验中,施纯氮量相同条件下控释肥和有机硅水溶性缓释肥均有利于促进向日葵的生长,其中控释肥通过控制养分的释放速率来实现氮肥后移,其一次性基施有利于0~40 cm土层氮素持续有效供应,同时还可增加植株氮素积累量、提升氮肥偏生产力和氮收获指数,更好地促进作物对养分的吸收利用,增产效果显著。

(2)向日葵收获后0~160 cm土层范围内有较高的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留,其中80~160 cm土层中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残留量的占比达到总残留量的60%以上。与普通尿素和有

机硅水溶性缓释肥相比,施用控释肥更能降低土体中 NO_3^- -N的残留积累量,减少其向深层淋失。

(3)不同处理下 NO_3^- -N流失量均高于 NH_4^+ -N,且暗管排水条件下控释肥的施用降低了土壤中氮素的淋洗,使氮素流失量减少。综合作物生长、氮素分布及流失等情况,控释肥稳产增效、降低环境污染风险的效果最佳,是中度盐渍化土壤暗管排水条件下较为适宜的肥料品种。

参考文献:

- [1] 雷廷武, ISAAC S, 袁普金, 等. 内蒙古河套区有效灌溉及盐碱控制的战略思考[J]. 农业工程学报, 2001, 17(1): 48-52. LEI T W, ISAAC S, YUAN P J, et al. Strategic thoughts on effective irrigation and saline alkali control in in Hetao irrigation area of Inner Mongolia [J]. *Transactions of the CSAE*, 2001, 17(1): 48-52.
- [2] 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): 197-204. ZHANG W Z, ZHANG Y F, SHEN R K. Study of losses of fertilizer in drained agricultural lands: Present status and prospect[J]. *Advances in Water Science*, 1997, 8(2): 197-204.
- [3] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 河套灌区控制排水对氮素流失与利用的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 315-322, 420. DOU X, SHI H B, LI R P, et al. Effect of controlled drainage on the loss and utilization of nitrogen in Hetao irrigation district[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 315-322, 420.
- [4] 曾文治, 黄介生, 谢华, 等. 不同暗管布置下棉田排水的硝态氮流失量分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 89-93. ZENG W Z, HUANG J S, XIE H, et al. Analysis of nitrate-nitrogen loss under different underground pipe layout[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4): 89-93.
- [5] 杨黎, 魏占民, 徐大为, 等. 膜下滴灌不同水氮组合对向日葵生长及水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 50-55. YANG L, WEI Z M, XU D W, et al. Growth and water-nitrogen use efficiency of sunflower under mulched drip fertigation with different water-nitrogen ratios[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(3): 50-55.
- [6] TILMAN D, BALZER C, HILL J, et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): 20260-20264.
- [7] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783. ZHU Z L. Study on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778-783.
- [8] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536-545. ZHAO B Q, ZHANG F S, LIAO Z W, et al. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2004, 10(5): 536-545.
- [9] 邓先亮, 屠晓, 李军, 等. 缓控释肥一次性基施对小麦产量及其形成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 87-93. DENG X L, TU X, LI J, et al. Effect of complete basal application of slow and controlled release fertilizer on wheat yield and its formation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(3): 87-93.
- [10] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. 环境科学, 2017, 38(12): 5326-5332. HOU P F, XUE L X, YU Y L, et al. Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy fields[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12): 5326-5332.
- [11] BAH A, HUSNI M, TEH C, et al. Reducing runoff loss of applied nutrients in oil palm cultivation using controlled-release fertilizers[J]. *Advances in Agriculture*, 2014: 1-9.
- [12] 朱瑾. 有机硅提高草地早熟禾苗期耐水分胁迫的效应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018: 11-12. ZHU J. Effects of silicone on the seedling growth of kentucky bluegrass under drought stress[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018: 11-12.
- [13] 宋利强, 刘莹. 有机硅水溶缓释肥对小麦-玉米轮作的增产效应[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(4): 640-644. SONG L Q, LIU Y. The yield-increasing effect in applying slow-release organic silicon water soluble fertilizer on wheat-corn rotation[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(4): 640-644.
- [14] TRIPATHI P, NA C I, KIM Y. Effect of silicon fertilizer treatment on nodule formation and yield in soybean (*Glycine max* L.) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2021, 122: 126172.
- [15] 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.
- [16] 刘宇飞, 焦晓亮, 王坤, 等. 排土场中不同处理对不同种植模式向日葵生长特性和光合作用的影响[J]. 现代农业科技, 2020(12): 3-7, 9. LIU Y F, JIAO X L, WANG K, et al. Effects of different treatments and patterns on growth characteristics and photosynthesis of *Helianthus annuus* in surface mine dump[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020(12): 3-7, 9.
- [17] 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 等. 盐分与有机无机肥配施对土壤氮素矿化的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 295-304. ZHOU H, SHI H B, GUO J W, et al. Effect of salt and organic-inorganic fertilizer application on soil nitrogen mineralization[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(5): 295-304.
- [18] 侯坤, 荣湘民, 韩磊, 等. 速效氮与缓控释氮配比一次性侧深施对双季稻产量、氮素利用率及氮素损失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1923-1934. HOU K, RONG X M, HAN L, et al. Effects of one-time deep application of available nitrogen and slow and controlled-release nitrogen on rice yield, nitrogen use efficiency, and nitrogen loss[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1923-1934.
- [19] 周雯雯, 贾浩然, 张月, 等. 不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 657-668. ZHOU W W, JIA H R, ZHANG Y, et al. Effects of different new types of fertilizer on yield, nitrogen use efficiency and economic benefit of double cropping rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(4): 657-668.
- [20] TAN C S, DRURY C F, REYNOLDS W D, et al. Effect of long-term

- conventional tillage and no-tillage systems on soil and water quality at the field scale[J]. *Water Science & Technology*, 2002, 46(6/7):183-190.
- [21] DEVRIM C, BRITTO D T, HUYNH W Q, et al. The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7(e51877).
- [22] 徐宁, 张方园, 曹娜, 等. 硅叶面肥对夏玉米生长发育、产量和品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(14):74-77. XU N, ZHANG F Y, CAO N, et al. Influences of silicon foliar fertilizer on growth, yield and quality of summer maize[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(14):74-77.
- [23] 祁建勋. 几种新型肥料对向日葵生理特性及产质量影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017:18-19. QI J X. Effects of new fertilizers on physiological characteristics yield and quality of sunflower[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017:18-19.
- [24] 陆建贤, 张蚕生, 王国峰, 等. 浙江低洼圩区农田暗管排水对土壤性状和供肥的影响[J]. *浙江农业科学*, 1992(1):24-29. LU J X, ZHANG C S, WANG G F, et al. Effect of drainage of dark pipe on soil properties and fertilizer supply in low-lying polder area of northern Zhejiang[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 1992(1):24-29.
- [25] 王玉雯, 郭九信, 孔亚丽, 等. 氮肥优化管理协同实现水稻高产和氮肥高效[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5):1157-1166. WANG Y W, GUO J X, KONG Y L, et al. Nitrogen optimize management achieves high grain yield and enhances nitrogen use efficiency of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5):1157-1166.
- [26] YANG Y, ZHANG M, LI Y C, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, activities of leaf enzymes, and rice yield[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6):2307-2317.
- [27] KICHEY T, HIREL B, HEUMEZ E, et al. In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(1):22-32.
- [28] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2):170-177. ZHANG J J, DANG Y, ZHAO G, et al. Effects of application of controlled-release nitrogen on yield and water and fertilizer use efficiency of maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2):170-177.
- [29] 郑圣先, 聂军, 戴平安, 等. 控释氮肥对杂交水稻生育后期根系形态生理特征和衰老的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(2):2188-2194. ZHENG S X, NIE J, DAI P A, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on the morphological and physiological characteristics and senescence of root system during late growth stages of hybrid rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(2):2188-2194.
- [30] 张林, 武文明, 陈欢, 等. 氮肥运筹方式对土壤无机氮变化、玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4):126-134. ZHANG L, WU W M, CHEN H, et al. Effect of nitrogen management on dynamic changes of soil inorganic nitrogen, yield, nitrogen uptake and utilization of maize[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4):126-134.
- [31] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. *生态环境学报*, 2003, 12(1):24-28. JU X T, ZHANG F S. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(1):24-28.
- [32] 郑利芳, 吴三鼎, 党廷辉. 不同施肥模式对春玉米产量、水分利用效率及硝态氮残留的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4):221-227. ZHENG L F, WU S D, DANG T H. Effects of different fertilization modes on spring maize yield, water use efficiency and nitrate nitrogen residue[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4):221-227.
- [33] ZHENG W, LIU Z, ZHANG M, et al. Improving crop yields, nitrogen use efficiencies, and profits by using mixtures of coated controlled-released and uncoated urea in a wheat-maize system[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205(2):106-115.