

沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响

孙芳芳, 江涛, 成剑波, 何腾兵, 秦松, 汪国英, 洪建明

引用本文:

孙芳芳, 江涛, 成剑波, 何腾兵, 秦松, 汪国英, 洪建明. 沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1327–1336.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1190>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响

刘聪, 郑瑶琪, 刘爽, 刘庆平, 闫立龙

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2528–2536 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1022>

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>

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>

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>

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001–2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙芳芳, 江涛, 成剑波, 等. 沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(6): 1327–1336.

SUN F F, JIANG T, CHENG J B, et al. Effects of biogas slurry application on nitrogen leaching in rape fields with typical yellow soil in Guizhou, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(6): 1327–1336.



开放科学 OSID

沼液施用对贵州典型黄壤油菜地氮淋溶的影响

孙芳芳¹, 江涛¹, 成剑波^{2,3*}, 何腾兵^{1,2,3}, 秦松⁴, 汪国英⁵, 洪建明⁶

(1. 贵州大学农学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学新农村发展研究院, 贵阳 550025; 3. 贵州高原山地畜禽养殖污染控制与资源化技术工程实验室, 贵阳 550025; 4. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 5. 贵州省农业生态与资源保护站, 贵阳 550001; 6. 玉屏县农业农村局, 贵州 铜仁 554330)

摘要: 为了研究西南喀斯特山区沼液灌溉氮淋溶风险, 以及率定沼液还田安全施用量, 以该区域典型土壤——黄壤为供试土壤, 主栽作物油菜为供试作物, 牛场沼液为施用材料, 开展大棚盆栽试验模拟沼液灌溉, 评估沼液灌溉氮淋溶风险, 考察油菜农艺性状响应, 率定沼液安全施用量。设置油菜不施肥(CK)、无作物施沼液(NP480, 施氮量 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、油菜施化肥(CF, $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、油菜沼液低施用量(R120, $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、油菜沼液中施用量(R240, $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、油菜沼液高施用量(R480, $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 6 个处理, 将化肥水溶或沼液稀释后按每 12 d 1 次、每次 25 mm 连续灌入 12 次。结果表明: 沼液灌溉存在氮淋溶风险, 该风险以 NO_3^- -N 负荷为主, NO_3^- -N 淋溶风险随施氮量增加而增大, R480 处理 NO_3^- -N 淋溶量分别是 CK、R120、R240 处理的 2、1.8 倍和 1.4 倍; 同施氮量下, 沼液灌溉氮淋溶风险低于化肥处理, CF 处理 TN 、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 淋溶量分别是 R480 处理的 3.8、2.3 倍和 2.9 倍; R480 处理的氮淋溶风险值得警惕, 但油菜氮素吸收能够降低该风险, 使 TN 、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 淋溶量分别降低 34%、30%、32%; 适量施用沼液(施氮量 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 相对 CF 处理能改善油菜农艺性状, 但过量施用沼液(施氮量 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 不利于油菜生长。研究表明, 西南喀斯特山区油菜黄壤沼液灌溉存在一定氮淋溶风险, 综合考虑氮淋溶风险、油菜农艺性状和沼液消纳需求, 沼液还田施氮量控制在 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以内为宜。

关键词: 沼液还田; 黄壤; 油菜; 氮淋溶; 安全用量

中图分类号: S565.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)06-1327-10 doi:10.11654/jaes.2021-1190

Effects of biogas slurry application on nitrogen leaching in rape fields with typical yellow soil in Guizhou, China

SUN Fangfang¹, JIANG Tao¹, CHENG Jianbo^{2,3*}, HE Tengbing^{1,2,3}, QIN Song⁴, WANG Guoying⁵, HONG Jianming⁶

(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of New Rural Development, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Engineering Research Center for Technologies in Control and Recycling of Livestock and Poultry Breeding Waste in Mountain Area, Guiyang 550025, China; 4. Soil and Fertilizer Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 5. Guizhou Agricultural Ecology and Resources Protection Agency, Guiyang 550001, China; 6. Yuping Agricultural and Rural Bureau, Tongren 554330, China)

Abstract: Biogas slurry is commonly applied through irrigation in the karst mountainous areas of southwest China. However, the resulting leaching of soil nitrogen (N) has yet to be explored, and the environmental threshold of the slurry application rate has yet to be determined. To assess the resulting N leaching and plant growth and the threshold rate of slurry application, a pot experiment was performed in a greenhouse, simulating biogas slurry irrigation using materials including yellow soil, rape, and biogas slurry from a cattle farm. Six

收稿日期: 2021-10-18 录用日期: 2021-12-27

作者简介: 孙芳芳(1995—), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 从事农业资源与环境研究。E-mail: gs.ffmpeg@gzu.edu.cn

*通信作者: 成剑波 E-mail: jbccheng@gzu.edu.cn

基金项目: 贵州省自然科学基金项目(黔科合基础[2020]1Y191); 贵州省科研机构服务企业行动计划项目(黔科合服企[2018]4007(006)); 贵州省国内一流学科建设项目(GNYL[2017]009); 贵州省科技基础条件平台项目([2019]5701)

Project supported: The Natural Science Foundation of Guizhou Province, China ([2020] 1Y191); Guizhou Fund for Scientific Institute Technically Supporting Enterprises ([2018]4007(006)); Construction Program of First-class Discipline in Guizhou (GNYL[2017]009); Guizhou Science and Technology Fund for Basic-condition Platform ([2019]5701)

treatments were employed, including triplicated pots containing rape plants without N fertilization (CK), containing no plants with slurry application at a rate of $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (NP480), pots growing rape plants receiving urea at a rate of $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (CF), fertilized with biogas slurry at rates of $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (R120), $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (R240), and $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (R480). In each treatment, 25 mm of tap water, urea solution, or dilute slurry was applied periodically once every 12 d, for a total of 12 applications. According to our experimental results, biogas slurry irrigation enhanced soil N leaching, predominantly consisting of nitrate ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) leaching. The $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching was accelerated by increasing nitrogen application rates, accounting for a total amount of N in the R480 treatment that was 2, 1.8, and 1.4 times that in the CK, R120, and R240 treatments, respectively. In addition, the slurry resulted in lower N leaching than that with urea, as demonstrated by the TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching in the CF treatment at 3.8, 2.3, and 2.9 times that in of the R480 treatment, respectively. Although biogas slurry application at a rate of $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (R480) triggered N leaching, 34%, 30%, and 32% of the resulting TN, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching was likely reduced by plant uptake, respectively. In addition, biogas slurry applied at a moderate rate (R120) promoted rape growth compared with that under chemical fertilizer application; however, too much slurry application (R480) could undermine rape growth. Applying biogas slurry through irrigation to rape plants in the karst mountainous areas of southwest China may enhance N leaching from yellow soil. Furthermore, a slurry application rate lower than $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ might improve the balance between N leaching control, plant growth enhancement, and slurry recycling.

Keywords: biogas slurry application; yellow soil; rape; nitrogen leaching; application rate threshold

沼液是农牧业有机废弃物经过沼气工程厌氧发酵后的液相残留物,因其污染负荷不易达到排放标准而成为沼气工程持续发展的限制因素。目前,国内外沼液处理方式主要包括达标处理排放和还田消纳利用两种方式,第一种方式成本高且受场地限制,而第二种方式较为经济并广为接受^[1-3]。沼液富含氮、磷、钾等作物生长必需元素,具有较高肥效,王康等^[4]发现,适当喷施沼液使水稻产量较对照处理提高2.5%~15.4%,水稻粗蛋白含量最高提高9.12%;王桂良等^[5]和邵文奇等^[6]发现,沼液替代化肥能够提高小麦产量,增加小麦蛋白质及面团稳定时间;孙小妹等^[7]发现,喷施沼液使小麦产量相比对照处理提高9.7%~21.5%。目前,养殖粪污资源化力度不断加强,沼液还田利用受养殖户、种植户、管理者、科技工作者等相关方的关注程度正在提升。

沼液中各种元素和物质含量较高,在满足作物养分需求的同时,可能影响环境质量安全。在大气环境质量方面,沼液还田氨挥发等风险备受关注,沼液 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量较高且呈碱性,其中6%~12%的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可在还田一周内挥发^[8],这一比例在单作玉米地可达27%~29%^[9],在单作小麦地可达40%^[10]。在土壤环境质量方面,沼液过量施用易导致土壤及马铃薯Cd积累^[11],这可能增加土壤有效Cu和Zn^[12]含量,以及四环素和磺胺类相关基因丰度^[13]。在水环境质量方面,沼液成分可能随径流、壤中流和淋溶水迁移,其还田后的氮淋溶会加剧水体富营养化,沼液中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 占比高(35%~81%),还田后易硝化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 并游离迁移^[14-15]。

相关研究表明,沼液还田后土壤的氮素淋溶量可

以占到施氮量的26%^[16],采用奶牛场沼液连续3 a灌溉梯牧草,淋溶液中硝态氮淋失量可以占到沼液施氮量的12%^[17],单季种植玉米时施用沼液后,淋溶液中硝态氮淋溶量占施氮量的11%^[18],在小麦生长期施用沼液后,淋溶液的硝态氮淋溶量占施氮量的19%^[19],与不施沼液相比,在稻田中两倍施用沼液处理的硝态氮淋溶量增加3倍^[20],土壤淋溶液易通过土壤孔隙进入地下水,而水体中过量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 会减少水体中植物生物量,或引起湖底根系生长的大型植物的过度生长,从而严重干扰生态平衡。饮用水中过量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可能会引起人体青紫婴综合症和胃癌^[21-22]。沼液氮素的淋失是土壤养分损失的主要因素之一^[23]。但目前,西南喀斯特山区沼液灌溉还田施用量及氮淋溶风险有待进一步研究。

本研究以西南喀斯特山区典型土壤——黄壤为供试土壤,主栽作物油菜为供试作物,牛场沼液为施用材料,通过大棚盆栽试验模拟沼液灌溉,以油菜不施肥、无作物施沼液、油菜施化肥为对照,沼液设置不同施氮量处理,监测淋溶液各形态氮素浓度随时间的动态变化,及其淋溶量随施氮量的变化,对比研究沼液灌溉的氮淋溶风险及作物农艺性状的响应,探究沼液灌溉油菜的安全用量,为农业环境保护和沼液还田利用相关工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试土壤与盆栽

供试土壤成土母质为第四纪红色黏土,土壤类型为黄壤,取自贵州省贵阳市贵安新区湖潮乡桐木寨

玉米-油菜轮作地(26°25′56″N, 106°27′6″E; 海拔1 244 m)的0~20 cm土层,采回后,剔除根茬、动物残体和石块等杂物,风干、过4 mm筛,混匀备用,另取部分土壤测得基本理化性质如下:pH 4.99,全氮1.82 g·kg⁻¹,全磷0.25 g·kg⁻¹,有机质34.75 g·kg⁻¹,NH₄⁺-N 36.31 mg·kg⁻¹,NO₃⁻-N 4.15 mg·kg⁻¹,有效磷7.89 mg·kg⁻¹,速效钾85.08 mg·kg⁻¹。

土壤pH值采用2.5:1水土比,电位法^[24]测定;有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法^[24]测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[24]测定;有效磷采用0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠溶液浸提^[24]测定,全氮采用硫酸消煮-水杨酸钠法(ClerverChem380,德国)测定;全磷采用硫酸消煮-钼锑抗法(ClerverChem380,德国)测定;NH₄⁺-N和NO₃⁻-N采用1 mol·L⁻¹氯化钾溶液浸提(ClerverChem380,德国)测定。

风干土按1.20 g·cm⁻³填入底部垫有2 cm厚石英砂层的直径30 cm、高度30 cm的PVC塑料盆,每盆土质量约21 kg,盆底开2 cm孔供淋溶出水。填装后,自来水预饱和土壤并静置24 h,随即移入贵州省农业科学院绿肥试验中心大棚,并按每盆4株移栽长势均匀的苗期油菜(当地主栽品种金油188),待油菜长势稳定后按每盆1株拔除,供试油菜密度(每盆3株)相当于22.5万株·hm⁻²。

1.2 供试沼液

沼液为贵州省贵阳市花溪区石板镇某肉牛养殖场牛粪与养殖污水混合进料厌氧发酵15~20 d所得,采回后自然沉淀,取上部液体过0.149 mm筛,冷藏(4℃)保存备用,其理化性质如下:pH 8.83,总氮(TN)2 895 mg·L⁻¹,铵态氮(NH₄⁺-N)2 020 mg·L⁻¹,亚硝态氮(NO₂⁻-N)8.54 mg·L⁻¹,硝态氮(NO₃⁻-N)75.42 mg·L⁻¹。每次灌溉前,混匀沼液,取部分用自来水按不同倍数稀释备用。沼液测定指标及测定方法主要有:pH值

采用PHS-3C型pH计(雷磁,上海)测定;采用全自动间断分析仪(ClerverChem380,德国)分析沼液TN(HJ636—2012)、NH₄⁺-N(HJ535—192009)、NO₃⁻-N(HJ/T346—2007)、NO₂⁻-N(GB7493—1987)浓度。

1.3 试验设计

设置相同基肥、不同追肥的6个处理,每个处理重复3次。基肥均为磷酸一铵(P₂O₅ 44%)和硫酸钾(K₂O 50%),N、P、K折纯施用量分别为7.8、90、120 kg·hm⁻²。追肥处理包括按不施肥空白对照处理(有作物,CK),按480 kg·hm⁻²追施尿素处理(有作物,CF),按480 kg·hm⁻²追施沼液处理(无作物,NP480),以及分别按120、240、480 kg·hm⁻²追施沼液处理(有作物,R120、R240和R480)。所有追肥随灌溉水(自来水)按每12 d 1次、每次25 mm施入^[25],累计施用12次。试验持续144 d,苗期、蕾薹期、开花期、角果成熟期施氮量比例为5:4:2:1(表1),试验期内大棚温度为5~25℃。处理施氮量见表1。

1.4 采集与分析

每次灌溉的1 d后,测定淋溶出水体积,采用全自动间断分析仪(ClerverChem380,德国)分析淋溶出水TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N浓度,试验结束后,收获油菜,测定株高、主花序有效长度、单株角果数、角果长度。

1.5 氮素淋溶量计算与数据处理分析

利用淋溶液氮素浓度乘以体积获得氮淋溶量。采用Excel 2010、SPSS 25和Origin 2018分析软件对不同施氮量的淋溶结果进行数据整理、统计分析和绘图分析。

2 结果与分析

2.1 各生育期不同处理淋溶液NH₄⁺-N和NO₃⁻-N浓度

试验期内,淋溶液NH₄⁺-N浓度介于0.2~44.8 mg·L⁻¹之间(图1)。CK、R120、R240处理NH₄⁺-N浓度随

表1 油菜各生育期氮素施用量及灌溉次数

Table 1 Nitrogen application rates and irrigation times in rape growth stages

处理 Treatment	总施氮量 Nitrogen application/ (kg·hm ⁻²)	总灌溉次数 Irrigation time	苗期Seedling		蕾薹期Bolting		开花期Flowering		角果成熟期Maturity	
			施氮量 Nitrogen application rate/ (kg·hm ⁻²)	灌溉次数 Irrigation time	施氮量 Nitrogen application/ (kg·hm ⁻²)	灌溉次数 Irrigation time	施氮量 Nitrogen application/ (kg·hm ⁻²)	灌溉次数 Irrigation time	施氮量 Nitrogen application/ (kg·hm ⁻²)	灌溉次数 Irrigation time
CK	0	12	0	5	0	4	0	2	0	1
CF	480	12	200	5	160	4	80	2	40	1
NP480	480	12	200	5	160	4	80	2	40	1
R120	120	12	50	5	40	4	20	2	10	1
R240	240	12	100	5	80	4	40	2	20	1
R480	480	12	200	5	160	4	80	2	40	1

时间推移而降低,R480、NP480、CF则先降低后升高。苗期、蕾薹期、开花期、角果成熟期淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别介于 $1.6\sim 12.6$ 、 $0.8\sim 27.7$ 、 $0.7\sim 14.5$ 、 $0.2\sim 16.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间(图2)。苗期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($12.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于CK、R120、R240处理 ($P<0.05$), 分别是这三个处理的4.1、6.0、7.9倍, 而相同施氮量处理下, 淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度无显著差异 ($P>0.05$); 蕾薹期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 ($27.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 蕾薹期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的35.0、3.4、15.0、12.0、3.1倍, NP480与R480之间以及R120与R240之间无显著差异 ($P>0.05$); 开花期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 ($14.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 是CK、NP480、R120、R240、R480处理的21.0、1.4、7.3、4.0、2.1倍, NP480与R480之间无显著差异 ($P>0.05$); 角果成熟期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($16.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理, CF处理分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的38.0、1.3、28.0、7.2、1.4倍, 相同施氮量条件下, NP480处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($12.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 是R480处理的1.1倍, 而R120与R240之间无

显著差异 ($P>0.05$)。

试验期内, 淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度介于 $1.2\sim 157.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3)。在CK、R120、R240处理中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度随时间推移而降低, CF、NP480、R480则呈波动状。苗期、蕾薹期、开花期、角果成熟期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别介于 $28.6\sim 46.1$ 、 $7.2\sim 112.7$ 、 $2.0\sim 102.2$ 、 $2.2\sim 157.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图4)。

苗期CF处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 ($46.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的1.6、1.3、1.6、1.6、1.5倍, 其余处理之间无显著差异 ($P>0.05$); 蕾薹期CF处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 ($112.74\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的16.0、2.7、9.8、5.8、3.2倍, 相同施氮量处理下, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $\text{CF}>\text{NP480}>\text{R480}$; 开花期CF处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 ($102.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的51.0、2.0、28.0、7.8、3.1倍; 角果成熟期CF处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度 ($157.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著高于其他处理 ($P<0.05$), 分别是CK、NP480、R120、

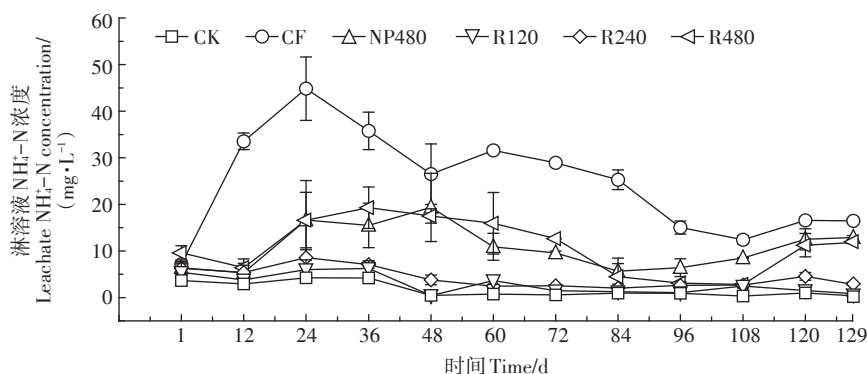
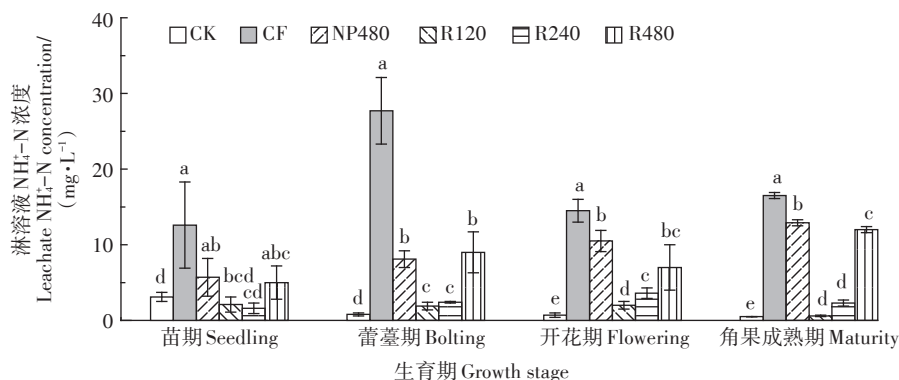


图1 淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间的变化

Figure 1 Temporal changes in leachate $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations



不同小写字母表示处理间的显著差异 ($P<0.05$)。下同

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below

图2 淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在油菜各生育期的平均浓度

Figure 2 The mean concentrations of leachate $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in different plant growth stages

R240、R480处理的73.0、2.4、14.0、12.0、3.1倍。

2.2 各生育期不同处理淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 淋溶量

试验期内,淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量介于 $0.03\sim 4.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间(图5)。苗期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量($4.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于其他处理($P<0.05$),分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的9.8、2.3、7.4、5.1、2.3倍;薹期CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量($3.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于其他处理($P<0.05$),分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的32.0、2.9、16.0、11.0、3.2倍,NP480与R480之间及CK、R120、R240处理之间无显著差异($P>0.05$);角果成熟期相同施氮量(R480、NP480和CF)处理之间 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量差异显著($P<0.05$),与NP480($1.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理相比,CF处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量显著高出26%,R480处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量显著低36%($P<0.05$)。

试验期内,淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 淋溶量介于 $0.3\sim 22.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间(图6)。苗期,各处理之间无显著差异($P>0.05$);薹期CF处理淋溶量($16.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于其他处理($P<0.05$),分别是CK、NP480、R120、R240、

R480处理的19.0、2.7、13.0、7.4、4.2倍,NP480处理($6.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于R480处理($3.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P<0.05$),是R480处理的1.6倍,其余处理之间无显著差异($P>0.05$);开花期CF处理淋溶量($15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于其他处理($P<0.05$),分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的60.0、2.0、33.0、9.4、3.7倍,NP480处理($6.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于R480处理($4.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P<0.05$),是R480处理的1.5倍,CK处理与R120处理之间无显著差异($P>0.05$);角果成熟期CF处理淋溶量($22.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于其他处理($P<0.05$),分别是CK、NP480、R120、R240、R480处理的84.0、2.4、17.0、15.0、4.0倍,NP480处理($9.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)显著高于R480处理($5.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $P<0.05$),是R480处理的1.7倍,其余各处理之间无显著差异($P>0.05$)。

2.3 不同处理各形态氮素淋溶特征

各处理的TN淋溶量介于 $42.7\sim 328.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表2),其中,R480处理低于其他两个同施氮量处理,比CF处理显著降低73%($P<0.05$),比NP480处理显著降低26%($P<0.05$),CK、R120、R240处理间差异不显

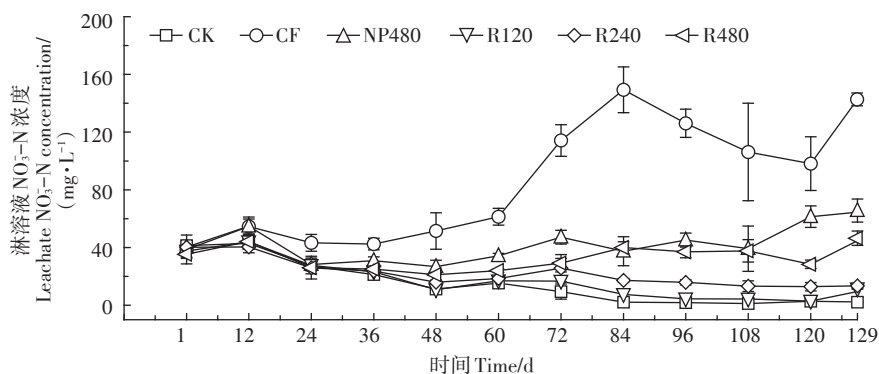


图3 淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度随时间的变化

Figure 3 Temporal changes in leachate $\text{NO}_3^+\text{-N}$ concentrations

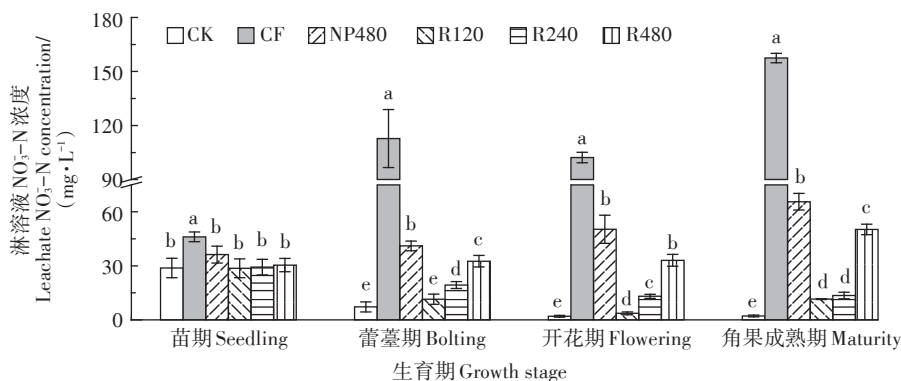


图4 淋溶液 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 在油菜各生育期的平均浓度

Figure 4 The mean concentrations of leachate $\text{NO}_3^+\text{-N}$ in different plant growth stages

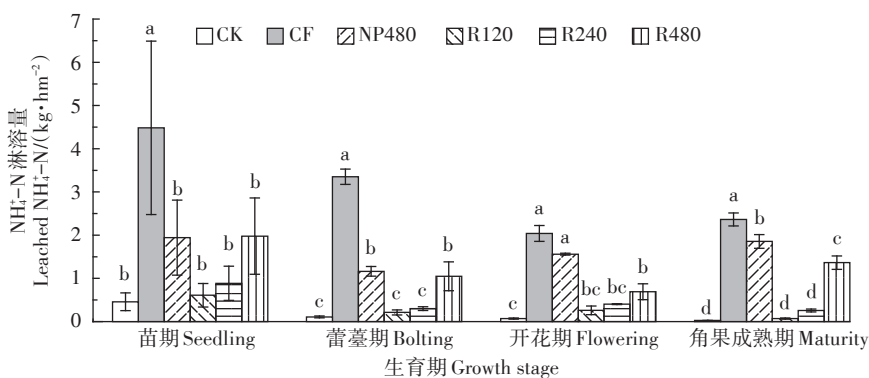


图5 油菜各生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量

Figure 5 Amounts of leached $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in different plant growth stages

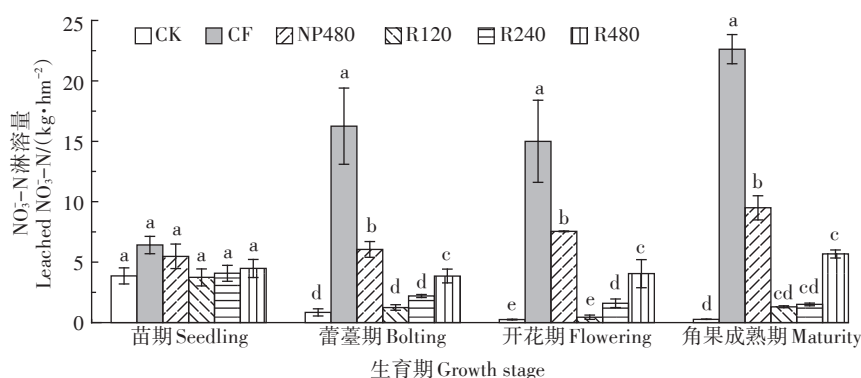


图6 油菜各生育期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量

Figure 6 Amounts of leached $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in different plant growth stages

著 ($P>0.05$)。各处理 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋溶量介于 $23.1\sim128.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占 TN 淋溶量的 $39.2\%\sim60.7\%$, R480 处理低于其他两个同施氮量处理, 比 CF 处理显著降低 64% ($P<0.05$), 比 NP480 处理降低 32% , 其他各处理间差异不显著 ($P>0.05$)。各处理 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量介于 $2.9\sim38.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 占 TN 淋溶量的 $6.6\%\sim20.2\%$, R480 处理低于其他两个同施氮量处理, 比 CF 处理显著降低 57% ($P<0.05$), 比 NP480 处理降低 30% , 比 CK、R120 处理分别升高了 4.8 倍和 2.7 倍。

2.4 不同处理农艺性状

各处理的株高介于 $86.0\sim100.4\text{ cm}$, 处理间无显著差异 (图 7a)。各处理的主花序有效长度介于 $22.0\sim31.7\text{ cm}$, R120 处理主花序有效长度显著高出 R480 和 CF 处理 44% 和 40% ($P<0.05$), 其余处理间差异不显著 ($P>0.05$) (图 7b)。各处理的单株角果数介于 $22\sim35$ 个, R120 处理的单株角果数显著多于 CF 处理 ($P<0.05$), 其余各处理之间无显著差异 (图 7c)。各处理的角果长度在 $22\sim35\text{ mm}$ 之间, R120 处理的角果长度显著高于 CF 处理 ($P<0.05$), 其余各处理之间无显著差异 (图 7d)。

3 讨论

3.1 沼液灌溉存在氮淋溶风险

本文沼液灌溉 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度介于 $0.2\sim44.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度介于 $1.2\sim157.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 淋溶液氮素以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为主, 且在油菜苗期、薹期、开花期和角果成熟期的淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度分别是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的 $3.7\sim18.0$ 、 $4.1\sim9.0$ 、 $2.8\sim7.1$ 、 $9.5\sim11.0$ 倍, 这与相关报道一致, 例如, 黄瓜和茄子的全生育期淋溶液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度为 $8.0\sim54.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于淋溶液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度 ($0.08\sim0.34\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[26]。本研究中, CK、R120、R240 和 R480 处理下, TN 淋溶量为 $42.7\sim87.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中 $53.0\%\sim60.7\%$ 为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $6.6\%\sim19.2\%$ 为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 各形态氮淋溶均随施氮量提高而加剧。施氮量从 0 增至 $480\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 导致 TN 淋溶量增加 1.04 倍, 该趋势与杨荣全等^[26]的报道一致, 露地黄瓜土壤 TN 淋溶量 (y) 与施氮量 (x , 介于 $0\sim340\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 极显著正相关 ($y=0.251x+85.87$, $R^2=0.999\ 3^{**}$)。从 TN 形态结构来看, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($6.6\%\sim19.2\%$) 相对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($53.0\%\sim60.7\%$) 占 TN 的比例较低, 与相关研究一致^[27-29]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 淋溶量随施氮

表2 氮淋溶总量形态构成及处理间差异

Table 2 The total amounts and proportions of N leached as three regular forms and their differences between treatments

氮形态 Nitrogen form	淋溶量 N leached/(kg·hm ⁻²)						占总氮淋溶量比 Proportion in leached TN/%					
	CK	CF	NP480	R120	R240	R480	CK	CF	NP480	R120	R240	R480
TN	42.7c	328.5a	118.3b	44.2c	53.9c	87.4bc	—	—	—	—	—	—
NH ₄ ⁺ -N	2.9d	38.7a	23.9b	4.5d	6.7cd	16.8bc	6.6	11.8	20.2	10.2	12.4	19.2
NO ₃ ⁻ -N	23.1c	128.9a	68.2b	24.7c	32.7c	46.3bc	54.1	39.2	57.7	60.7	60.7	53.0

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

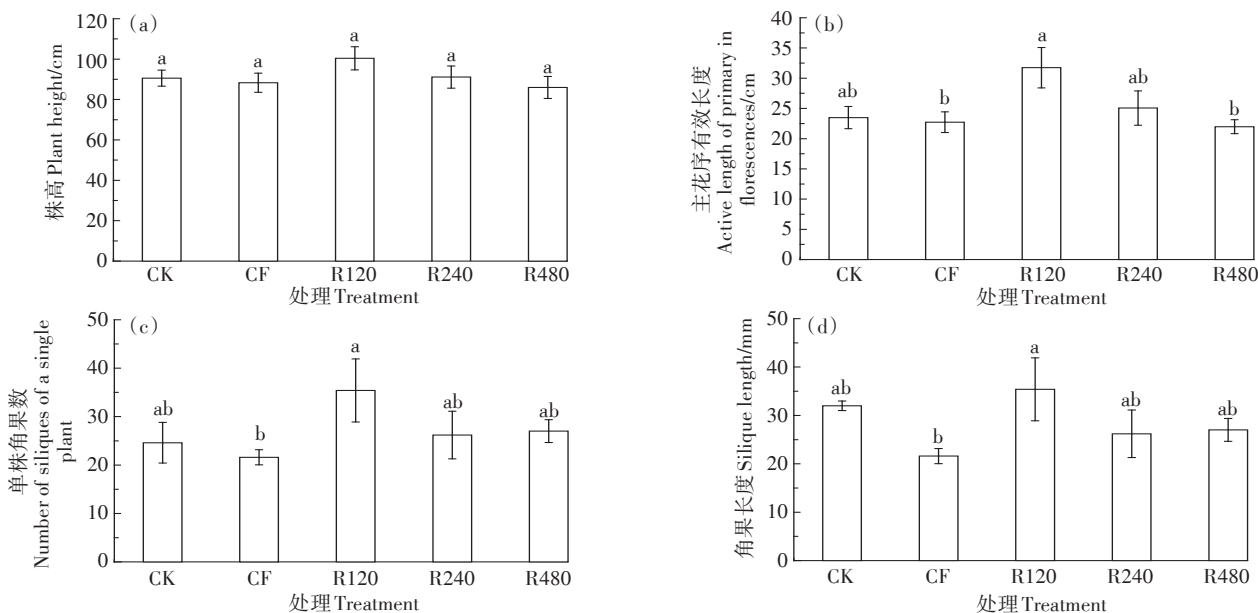


图7 油菜株高、主花序有效长度、单株角果数和角果长度

Figure 7 The height, active length of primary inflorescences, number of siliques, and silique length of rap plants

量增加(从0到480 kg·hm⁻²)而升高83%,与相关研究的有机肥处理一致^[27,30]。本研究中,沼液处理NH₄⁺-N占TN的比例为6.6%~19.2%,高于相关报道传统有机肥处理的2.2%~2.5%^[30],可能与沼液的NH₄⁺-N/TN往往高于传统有机肥有关。NO₃⁻-N淋溶量随施氮量增加(从0到480 kg·hm⁻²)而增加50%,这与相关报道相似^[19,31-36],例如小麦-玉米轮作施氮量从135 kg·hm⁻²增至315 kg·hm⁻²,淋溶液NO₃⁻-N浓度增加79.9%^[34];小麦单作施氮量从0分别增至180、360 kg·hm⁻²,NO₃⁻-N淋溶量由4.6 kg·hm⁻²分别增至12.1、17.1 kg·hm⁻²,而且施氮量与NO₃⁻-N淋溶量显著正相关^[35];甘蓝和白菜施氮量均从225 kg·hm⁻²增至400 kg·hm⁻²,NO₃⁻-N淋溶量分别增加53.9%和61.4%^[36]。综上,在常见施氮量范围0~480 kg·hm⁻²内,沼液灌溉存在氮淋溶风险,该风险以NO₃⁻-N负荷为主。NO₃⁻-N作为主要风险因子,也是耕地氮淋溶的典型特征^[37],一方面,NH₄⁺-N更易被带负电的土壤胶体吸附而难以淋溶,NO₃⁻-N则易

于游离并淋溶;另一方面,沼液NH₄⁺-N进入耕层易硝化为NO₃⁻-N并淋溶^[28-29]。

3.2 沼液灌溉氮淋溶风险低于化肥

施氮量同为480 kg·hm⁻²情况下,沼液处理(R480)各形态氮素淋溶量比化肥处理低56%~73%。其中,TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N淋溶量占施氮量比例在CF处理中分别为68.0%、8.1%、27.0%,在R480处理中分别降低为18.0%、3.5%、9.6%,两个处理的氮淋溶差异与已有报道一致,杨育文等^[38]研究发现,花椰菜和白菜地轮作试验中,化肥处理、有机肥处理TN淋溶量分别为18.47、10.55 kg·hm⁻²,单作辣椒上述处理TN淋溶量依次为126.56、65.81 kg·hm⁻²,花椰菜和白菜轮作及辣椒单作的有机肥处理NO₃⁻-N淋溶量比化肥处理分别降低44.4%、43.6%;骆晓声等^[39]研究发现,相对于40%有机肥+60%化肥处理,100%化肥处理使NO₃⁻-N淋溶量增加11.4%;刘青丽等^[40]开展了长期定位试验,发现单施化肥的无机氮淋溶量比化肥与有机肥混施处

理高39%。综上,在施氮量相对较高的情况下($480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),沼液灌溉氮淋溶风险低于化肥处理,该风险差异的原因可能在于:一方面,本文中,沼液氮素约27%为有机态,相对尿素而言极易水解为 NH_4^+-N ,其分解为 NH_4^+-N 进而硝化为 NO_3^--N 的过程更为缓慢^[41-42];另一方面,化肥氮素以速效态的 NH_4^+-N 或 NO_3^--N 为主,相对于沼液氮素更易直接淋溶或硝化产生 NO_3^--N 进而淋溶。

3.3 施氮量不宜超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 且油菜氮素吸收能降低氮淋溶风险

过量用肥易导致土壤 NO_3^--N 积累及淋溶^[43],产生养分淋溶风险^[44]。本研究中,相对施氮量为0的空白处理,施氮量 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的R240沼液处理的TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 淋溶量分别升高26%、131%、42%,施氮量 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的R480处理TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 淋溶量分别升高105%、479%、100%(表2)。但是,氮素是限制作物生长的首要必需营养元素^[45],油菜氮肥依赖较重^[46], NH_4^+-N 和 NO_3^--N 易被根吸收从而避免淋溶,施氮量同为 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的情况下,油菜R480沼液处理TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 淋溶量比无作物的NP480处理分别低34%、30%、32%,同时在整个试验期内,CK、R120和R240处理的淋溶液 NO_3^--N 的平均浓度分别是 14.9 、 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $21.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中硝酸盐含量水质类别的划分,上述3种处理的淋溶液属于Ⅲ类(以N计,硝酸盐含量 $\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和Ⅳ类(硝酸盐含量 $\leq 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),而R480处理淋溶液 NO_3^--N 平均浓度为 $33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,为Ⅴ类水,不能作为生活用水。综上,为预防氮淋溶风险,施氮量不宜超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施氮量达到 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之后,因作物吸收氮素,氮淋溶风险有所降低,但仍值得警惕。

3.4 适量施用沼液能改善油菜农艺性状

油菜主花序有效长度、单株角果数、角果长度均在施氮量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的沼液处理达到最大,均显著高于施氮量为 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的化肥处理,表明相对于目前常见的过量施用化肥,适量施用沼液能够改善作物农艺性状,这与相关报道一致,沼液相对化肥使水稻和小麦分别增产9%和16%^[47]。沼液肥效优于化肥的原因主要有:一方面,沼液氮素包括速效态和有机态,其中的有机态相对化肥具有缓释特性,更加切合作物动态的氮需求^[48];另一方面,沼液富含氨基酸、矿物质、腐植酸和维生素等,能使作物增产提质^[49]。但是,沼液过量可能降低油菜主花序有效长度(图7),可能与沼液中含有重金属、抗生素、激素等有

关^[50],有待进一步探讨。综上,适量施用沼液(施氮量 $120 \sim 240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)能改善油菜农艺性状,过量则相对不利于油菜生长。

4 结论

(1)在常见施氮量范围 $0 \sim 480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 内,沼液灌溉存在氮淋溶风险,该风险以 NO_3^--N 负荷为主, NO_3^--N 淋溶风险随施氮量增加而增大,在试验期内CK、R120、R240处理淋溶液 NO_3^--N 平均浓度低于R480处理的64.8%、59.4%、48.2%。

(2)在施氮量相对较高且施氮量一致的情况下($480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),沼液灌溉氮淋溶风险低于化肥处理,在试验期内R480处理的淋溶液 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 平均浓度分别低于CF处理55.5%、50.9%。

(3)当氮淋溶硝酸盐含量超过 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会影响人类健康,R240处理的淋溶液 NO_3^--N 平均浓度为 $21.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此预防氮淋溶风险,施氮量不宜超过 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施氮量达到 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之后,由于油菜的氮素吸收作用,该风险降低,但仍值得警惕。

(4)相对于高施氮量的化肥处理,沼液的施氮量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时更能改善油菜农艺性状,沼液过量(施氮量 $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)则不利于油菜生长。

参考文献:

- [1] 李金澄,孙吉翠,杨丽,等.沼液过量还田对土壤环境容量及玉米生长的影响[J].河南农业科学,2021,50(5):49-56. LI J C, SUN J C, YANG L, et al. Effects of excessive biogas slurry returning on soil environmental capacity and maize growth[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(5):49-56.
- [2] 武继承,潘晓莹,杨永辉,等.长期施用沼液对土壤养分含量和酶活性的影响[J].河南农业科学,2021,50(7):76-86. WU J C, PAN X Y, YANG Y H, et al. Effects of long-term application of biogas slurry on soil nutrient content and enzyme activity[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2021, 50(7):76-86.
- [3] 毛正荣,王宏航,童文彬,等.沼液还田消纳的效应及其对策[J].浙江农业科学,2019,60(10):1898-1902. MAO Z R, WANG H H, TONG W B, et al. Effect and countermeasures of disposition of biogas slurry by returning to field[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(10):1898-1902.
- [4] 王康,吴家旺,戴辉,等.沼液叶面肥对水稻生长的影响[J].江苏农业科学,2019,47(15):126-129. WANG K, WU J W, DAI H, et al. Effect of biogas slurry leaf fertilize on growth of rice[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(15):126-129.
- [5] 王桂良,张家宏,王守红,等.沼液替代化肥氮对冬小麦产量、品质及生长发育的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):467-475. WANG G L, ZHANG J H, WANG S H, et al. Effects of chemical fertilizer nitrogen substitution by biogas slurry on yield, quality and

- growth characteristics of winter wheat[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5):467-475.
- [6] 邵文奇, 文廷刚, 唐金陵. 不同沼液施用量对小麦生长及产量的影响[J]. 福建农业学报, 2018, 33(2):144-149. SHAO W Q, WEN T G, TANG J L. Effect of biogas sludge applications on growth and grain yield of wheat[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 33(2):144-149.
- [7] 孙小妹, 陈思瑾, 李翊华, 等. 叶面喷施沼液对玉米叶片光合特性及产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(5):60-67. SUN X M, CHEN S J, LI Y H, et al. Effect of biogas slurry spraying on leaf photosynthetic characteristics of maize[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(5):60-67.
- [8] SÄNGER A, GEISSELER D, LUDWIG B. C and N dynamics of a range of biogas slurries as a function of application rate and soil texture: A laboratory experiment[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2014, 60(12):1779-1794.
- [9] WOLF U, FÜB R, HÖPPNER F, et al. Contribution of N_2O and NH_3 to total greenhouse gas emission from fertilization: Results from a sandy soil fertilized with nitrate and biogas digestate with and without nitrification inhibitor[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100(1):121-134.
- [10] NYORD T, HANSEN M N, BIRKMOSE T S. Ammonia volatilisation and crop yield following land application of solid-liquid separated, anaerobically digested, and soil injected animal slurry to winter wheat [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 160:75-81.
- [11] 罗伟, 赖星, 伍钧, 等. 施用沼液对土壤-马铃薯重金属污染状况研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(10):160-168. LUO W, LAI X, WU J, et al. Study on heavy metal pollution of soil-potato by biogas slurry application[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(10):160-168.
- [12] 董翠敏, 程海翔, 李璐铤, 等. 施用高浓度 Cu、Zn 沼液盆栽对土壤理化性状及重金属含量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(5):1239-1244. DONG C M, CHENG H X, LI L Y, et al. Soil physicochemical properties and heavy metal content affected by application of piggery biogas slurry enriched with Cu and Zn in a pot experiment[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(5):1239-1244.
- [13] 刘兰英, 黄薇, 吕新, 等. 长期施用沼液对土壤中四环素类及磺胺类抗性基因分布的影响[J]. 福建农业学报, 2021, 36(6):699-705. LIU L Y, HUANG W, LÜ X, et al. Effect of long-term biogas slurry fertilization on distribution of tetracycline and sulfonamide resistance genes in soil[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36(6):699-705.
- [14] MÖLLER K, MÜLLER T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2012, 12(3):242-257.
- [15] NKO A. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2):473-492.
- [16] 成剑波. 基于 C/N 调节的沼液灌溉土壤氮淋溶控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016. CHENG J B. Control of soil nitrogen leaching during biogas slurry irrigation by slurry C/N[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.
- [17] 吴树彪, 崔畅, 张笑千, 等. 农田施用沼液增产提质效应及水土环境的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(8):118-125, 179. WU S B, CUI C, ZHANG X Q, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8):118-125, 179.
- [18] SVOBODA N, TAUBE F, WIENFORTH B, et al. Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130:69-80.
- [19] DU H Y, GAO W X, LI J J, et al. Effects of digested biogas slurry application mixed with irrigation water on nitrate leaching during wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213:882-893.
- [20] 史一鸣. 稻田生态系统消解沼液的潜力及风险评估[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. SHI Y M. The potential capacity for paddy field ecosystem to decontaminate biogas slurry and its risks assessment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [21] HOLGER K, JOHNNY J, LARS F, 等. 减少农田硝酸盐淋溶的可能性[J]. *AMBIO-人类环境杂志*, 2002, 31(5):404-408, 450. HOLGER K, JOHNNY J, LARS F, et al. Possibilities for reducing nitrate leaching from agricultural land[J]. *AMBIO-A Journal of the Human Environment*, 2002, 31(5):404-408, 450.
- [22] 龚慧. 地下水硝酸盐危害及处理措施研究[J]. 水利技术监督, 2019(2):102-104. GONG H. Research on groundwater nitrate damage and treatment measures[J]. *Technical Supervision in Water Resources*, 2019(2):102-104.
- [23] 张震, 唐华, 郭彦军. 不同环境温度下沼液养分在土壤中的淋失模拟研究[J]. 草业学报, 2015, 24(4):57-65. ZHANG Z, TANG H, GUO Y J. Simulation study of nutrient leaching from soils irrigated with biogas slurry under different environmental temperatures[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(4):57-65.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] LI Y. Water saving irrigation in China[J]. *Irrigation and Drainage*, 2006, 55(3):327-336.
- [26] 杨荣全, 曹飞, 李迎春, 等. 不同施肥处理对华北露天菜地氮素淋溶的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6):130-137. YANG R Q, CAO F, LI Y C, et al. Effect of different fertilization on nitrogen leaching in an open field used for vegetable planting on north China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6):130-137.
- [27] 冯洁. 沼液农用于土壤和小麦-玉米系统氮平衡的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016:23-27. FENG J. Soil nitrogen dynamics and budgets for optimum biogas slurry application in wheat-maize rotation system in North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Agriculture Science, 2016:23-27.
- [28] 周慧, 史海滨, 张文聪, 等. 有机无机氮配施对玉米产量和硝态氮淋失的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9):291-301, 249. ZHOU H, SHI H B, ZHANG W C, et al. Evaluation of organic inorganic nitrogen application on maize yield and nitrogen leaching by DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9):291-301, 249.
- [29] 张冠华, 胡甲均. W-OH 固化剂对土壤水渗漏及硝态氮淋失的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3):168-174. ZHANG G H, HU J J.

- Effects of W-OH stabilizer on soil water percolation and nitrate nitrogen leaching[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018 (3):168-174.
- [30] 康露, 朱靖蓉, 杨涛, 等. 畦灌下不同施肥方式新疆棉田氮素淋溶损失特征[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3):18-26. KANG L, ZHU J R, YANG T, et al. Characteristics of nitrogen leaching loss in Xinjiang cotton fields with different fertilization methods and border irrigation[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3):18-26.
- [31] 张贵龙, 任天志, 李志宏, 等. 施氮量对白萝卜硝酸盐含量和土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2009, 15(4):877-883. ZHANG G L, REN T Z, LI Z H, et al. Effects of nitrogen fertilization on nitrate content of radish (*Raphanus sativus* L.) and soil nitrate leaching[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4):877-883.
- [32] 陈玉真, 王峰, 尤志明, 等. 不同施氮量对茶园土壤氮淋失的影响[J]. 福建农业学报, 2015, 30(4):394-399. CHEN Y Z, WANG F, YOU Z M, et al. Effects of different nitrogen application levels on nitrogen leaching in tea garden soil[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 30(4):394-399.
- [33] LU J S, HU T T, ZHANG B C, et al. Nitrogen fertilizer management effects on soil nitrate leaching, grain yield and economic benefit of summer maize in northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 247(5):106739.
- [34] 骆晓声, 寇长林, 王小非, 等. 施氮量对潮土区冬小麦-夏玉米轮作农田氮磷淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(1):29-37. LUO X S, KOU C L, WANG X F, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen and phosphorus leaching in fluvo-aquic soil on a winter wheat-summer maize rotation farmland[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1):29-37.
- [35] 倪雄伟, 梁新强, 田光明, 等. 施氮量对稻田旱作期硝酸盐渗漏损失和小麦产量的影响[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(4):670-675. NI X W, LIANG X Q, TIAN G M, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rates on nitrate leaching characteristics and wheat yield in paddy field in dry period[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2012, 24(4):670-675.
- [36] 侯利敏, 王凌, 孙世友, 等. 河北露地蔬菜土壤硝态氮淋溶特征及影响因素研究[J]. 华北农学报, 2016, 31(增刊1):364-368. HOU L M, WANG L, SUN S Y, et al. The nitrate leaching characteristics and different effect factors in open-field soil in Hebei Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(Suppl 1):364-368.
- [37] VARINDERPAL S, NAVNEET K, KUNAL, et al. Nitrate leaching from applied fertilizer is reduced by precision nitrogen management in baby corn cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2021, 120:379-391.
- [38] 杨育文, 陈秋会, 席运官, 等. 有机与常规种植模式下菜地氮、磷的淋溶特征[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4):902-909. YANG Y W, CHEN Q H, XI Y G, et al. Leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in vegetable fields under organic and conventional farming systems[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(4):902-909.
- [39] 骆晓声, 吕宏伟, 寇长林. 有机肥替代氮肥及节水对设施番茄和辣椒菜田氮淋溶的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(2):96-101.
- LUO X S, LU H W, KOU C L, et al. Effects of mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen and water saving on nitrogen leaching in tomato and pepper greenhouse vegetable fields[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(2):96-101.
- [40] 刘青丽, 邹焱, 李志宏, 等. 雨养烟叶种植田无机氮淋溶特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7):141-148. LIU Q L, ZOU Y, LI Z H, et al. Characteristics of inorganic nitrogen leaching from tobacco fields in rain-fed areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(7):141-148.
- [41] 周炜, 孙国峰, 王鑫, 等. 沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1743-1750. ZHOU W, SUN G F, WANG X, et al. Risk of nitrogen loss under the combined application of biogas slurry and organic fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1743-1750.
- [42] 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 等. 减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11):5405-5413. JIANG H B, ZHANG K Q, ZOU H T, et al. Effects of different fertilization patterns on nitrogen leaching loss from paddy fields under reduced nitrogen[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(11):5405-5413.
- [43] 高懋芳, 邱建军, 李长生, 等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9):183-189, 294. GAO M F, QIU J J, LI C S, et al. Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(9):183-189, 294.
- [44] 张敏, 姚元林, 曾科, 等. 配施有机肥减少太湖地区稻田土壤硝态氮淋失的机理研究[J]. 土壤, 2020, 52(4):766-772. ZHANG M, YAO Y L, ZENG K, et al. Study on mechanism of reducing nitrate leaching with organic addition from paddy field in Taihu Lake region[J]. *Soils*, 2020, 52(4):766-772.
- [45] HAFIZ M H, WAJID F, FARHAT A, et al. Maize plant nitrogen uptake dynamics at limited irrigation water and nitrogen[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 24(3):2549-2557.
- [46] ANNE B, NATHALIE N, CHRISTINE B, et al. Genetic control of yield and yield components in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) grown under nitrogen limitation[J]. *Euphytica*, 2014, 199(1/2):183-205.
- [47] TANG Y, WEN G, LI P, et al. Effects of biogas slurry application on crop production and soil properties in a rice-wheat rotation on coastal reclaimed farmland[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2019, 230(3):1-13.
- [48] XU M, XIAN Y, WU J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5):2534-2542.
- [49] YU F B, LUO X P, SONG C F, et al. Concentrated biogas slurry enhanced soil fertility and tomato quality[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2010, 60(3):262-268.
- [50] KE L, LIU X, DU B, et al. Component analysis and risk assessment of biogas slurry from biogas plants[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2022, 44:182-191.

(责任编辑:叶飞)