

中图分类号: S532; S143.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2023)05-0440-12

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.05.007

土壤肥料

减氮结合不同肥料配施对农田土壤温室气体排放强度及马铃薯产量的影响

杜二小^{1,2,3}, 李焕春⁴, 任永峰^{1,2,3}, 韩云飞^{1,2,3}, 白红梅¹,巴图¹, 胡达古拉¹, 于东⁵, 赵沛义^{1,2,3*}

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特 010031; 2. 内蒙古旱作农业重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010031;

3. 农业农村部内蒙古耕地保育科学观测试验站, 内蒙古 呼和浩特 010031;

4. 辽宁农业职业技术学院, 辽宁 营口 115007; 5. 辽宁东亚种业有限公司, 辽宁 营口 115007)

摘要: 为研究减氮结合不同肥料施用对农田温室气体排放、氮肥利用效率和马铃薯产量的综合影响, 2020~2021年设计平衡施用氮磷钾肥(NPK, 对照)、不施氮肥(PK, 空白)、减少施氮量20%(RN, 磷钾肥用量同NPK)、减少施氮量20%+水溶肥替代总施氮量的20%(RN+WF)、减少施氮量20%+腐熟羊粪替代总施氮量的20%(RN+SM)、减少施氮量20%+生物有机肥替代总施氮量的20%(RN+BM)、减少施氮量20%+缓释尿素替代总施氮量的20%(RN+RUN)7个处理, 以便明确对马铃薯田温室气体排放、马铃薯生长季内全球增温潜势、产量和氮肥利用效率的影响。氮肥减施与不同肥料配施能够明显影响农田温室气体的排放。2020和2021年, RN+SM处理CO₂和N₂O排放通量均值较NPK处理增加10.97%~22.70%、7.86%~14.66%, RN+SM处理CO₂、N₂O和CH₄累积排放量最大, 分别为9 299.77~11 401.35、3.65~3.77和-1.35~-1.20 kg/hm², RN+SM处理全球增温潜势(Global warming potential, GWP)较NPK处理显著增加36.10%~79.66%。氮肥减施与不同肥料配施能够显著提高马铃薯产量和氮肥利用效率($P<0.05$)。与NPK处理相比, RN+BM处理氮肥偏生产力(Partial factor productivity of applied nitrogen, PFPN)和氮肥农学利用率(Nitrogen agronomic efficiency, NAE)差异显著($P<0.05$), 分别提高46.19%~47.26%和150.51%~236.38%, 产量增产16.95%~17.77%。因此, 有机肥(羊粪)可增加农田温室气体排放; 生物有机肥替代部分氮肥处理可以提高氮肥利用效率和马铃薯产量, 建议在生产上推广应用。

关键词: 氮肥减施; 温室气体; 马铃薯; 产量; 氮肥利用率

Effects of Nitrogen Reduction Combined with Different Fertilizers on Greenhouse Gas Emission Intensity of Farmland Soil and Potato Yield

DU Erxiao^{1,2,3}, LI Huanchun⁴, REN Yongfeng^{1,2,3}, HAN Yunfei^{1,2,3}, BAI Hongmei¹,BA Tu¹, HU Dagula¹, YU Dong⁵, ZHAO Peiyi^{1,2,3*}

(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 2. Inner Mongolia

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0005)。

作者简介: 杜二小(1990-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事作物养分管理与栽培工作。

*通信作者(Corresponding author): 赵沛义, 博士, 研究员, 主要从事作物栽培与耕作学研究, E-mail: zhpy1972@163.com。

Key Laboratory of Dryland Agriculture, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 3. Scientific Observation and Experimental Station of Arable Land Conservation (Inner Mongolia), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China;

4. Liaoning Agricultural Vocational and Technical College, Yingkou, Liaoning 115007, China;

5. Liaoning East Asia Seed Industry Co., Ltd., Yingkou, Liaoning 115007, China)

Abstract: In order to study the comprehensive effects of nitrogen reduction combined with different fertilizer applications on greenhouse gas emissions, nitrogen use efficiency and potato yield, seven treatments were set up: balanced application of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK, control), no nitrogen fertilizer (PK, blank), reduction of nitrogen application rate by 20% (RN, application rate of phosphorus and potassium fertilizer is the same as NPK), reduction of nitrogen application rate by 20% + water-soluble fertilizer instead of 20% of total nitrogen application rate (RN + WF), reduction of nitrogen application rate by 20% + decomposed sheep manure instead of 20% of total nitrogen application rate (RN + SM), reduction of nitrogen application rate by 20% + bio-organic fertilizer instead of 20% of total nitrogen application rate (RN + BM), reduction of nitrogen application rate by 20% + slow-release urea instead of 20% of total nitrogen application rate (RN + RUN) from 2020 to 2021. Effects of the seven treatments on greenhouse gas emissions from potato fields, global warming potential, yield and nitrogen use efficiency during the potato growing season were researched. The results showed that the reduction of nitrogen fertilizer and the combined application of different fertilizers could obviously affect the emission of greenhouse gases in farmland. In 2020 and 2021, the average emission fluxes of CO₂ and N₂O in RN + SM treatment were 10.97%-22.70% and 7.86%-14.66% higher than those in NPK treatment. The cumulative emissions of CO₂, N₂O and CH₄ in RN + SM treatment were the largest, which were 9 299.77-11 401.35, 3.65-3.77 and -1.35- -1.20 kg/ha, respectively. The global warming potential (GWP) in RN + SM treatment was 36.10%-79.66% higher than that in NPK treatment. Nitrogen fertilizer reduction and combined application of different fertilizers could significantly increase potato yield and nitrogen use efficiency ($P < 0.05$). Compared with NPK treatment, the partial factor productivity of applied nitrogen (PFPN) and nitrogen agronomic efficiency (NAE) in RN + BM treatment were significantly different ($P < 0.05$), which increased by 46.19%-47.26% and 150.51%-236.38%, respectively, and the yield of potato increased by 16.95%- 17.77% . Therefore, organic manure (sheep manure) could increase greenhouse gas emissions from farmland; biological organic fertilizer replacing part of nitrogen fertilizer could improve nitrogen use efficiency and potato yield, which should be recommended to be popularized and applied in potato production.

Key Words: nitrogen fertilizer reduction; greenhouse gas; potato; yield; nitrogen use efficiency

全球变暖问题已成为当前和今后人类社会面临的重大环境问题^[1]。减少温室气体排放能够有效缓解全球气候变暖,同时能促进世界各国发展绿色低碳经济,是早日实现“双碳”目标的有效途径之一^[2]。农田土壤是CO₂、CH₄、N₂O 3种温室气体重要排放源,其排放量约占全球温室气体排放总量的10%~12%^[3]。因此,缓解农田温室气体排放,对中国实现碳中和具有重要意义^[4]。肥料的施用尤其是氮肥,对N₂O排放有重要的影响。研究表明,氮肥利用率每增加1%,可减少农田2 Tg CO₂-eq/yr温室气体^[5]。而减少施氮量是提高氮肥利用率最为简单直接的手段。但减施氮肥会有引发马铃薯减产的风险^[6-8]。

因此,探索合理施肥量实现国家粮食安全与农业双碳目标的双赢策略,是目前亟待解决的问题。

不同肥料配施可以适当减少肥料施用,提高马铃薯产量和肥料利用效率^[9]。曹超喜等^[10]研究得出,生物有机肥配施化肥比单施化肥可使马铃薯产量增加12.80%。华智超等^[11]研究表明,大蒜减施30%氮肥配施生物菌肥可以显著提高大蒜长势、蒜头产量和大蒜品质。张妮等^[12]研究发现,在红椒种植试验中,减氮40%配施氨基酸水溶肥可以提高红椒产量,改善红椒品质,产量较对照提高1.94%~2.32%。孙旭东等^[13]和侯云鹏等^[14]在玉米研究中发现,施用缓释肥可以使玉米氮素利用效率提高10~

30个百分点。张夫道等^[15]在水稻研究中发现,与对照相比施用缓释肥的氮素利用效率比施用普通尿素提高30%。朱永昶等^[16]研究证实,水稻和玉米田施加缓控释氮肥后均显著降低了土壤 N_2O 排放通量。王学霞等^[17]和梁蕊芳^[18]研究表明,控释氮肥与水溶肥配施能够延迟 N_2O 排放峰值,生长季土壤 N_2O 累积排放量减少了24.8%。钱栋等^[19]在水稻研究中发现,有机肥配施化肥可以抑制 CH_4 吸收且作用大于单施化肥处理,但 N_2O 排放量大于单施化肥处理,可能是因为有机肥加速了土壤中微生物活动进而加快了反硝化作用,加速了 N_2O 排放速率。

内蒙古自治区阴山北麓气候冷凉,是中国马铃薯生产的重要基地,对保障中国粮食安全至关重要。然而,该区域土壤养分含量低、土壤结构差的特点,导致其作物产量、氮素利用率较低。为追求马铃薯高产,化肥施用量大,大量施用

化肥,导致农田温室气体排放增多。综上所述,通过氮肥减施和不同肥料配施以探索该地区马铃薯稳产、提升氮肥利用率和温室气体减排的管理策略,以期为发展阴山北麓低碳种植马铃薯施肥技术,实现阴山北麓农业高质量发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年5月2日至10月6日与2021年5月4日至10月1日在内蒙古自治区农牧业科学院武川旱作试验站(N 41°8', E 111°17')进行。该地海拔1 576 m,为半干旱偏旱气候,降水集中在7~8月,年降水量300~350 mm,年蒸发量1 850 mm,年平均气温2.60℃,无霜期90~110 d,地形以缓坡丘陵为主,土壤类型为栗钙土。试验期间降雨量和气温变化见图1。试验田土壤肥力见表1。

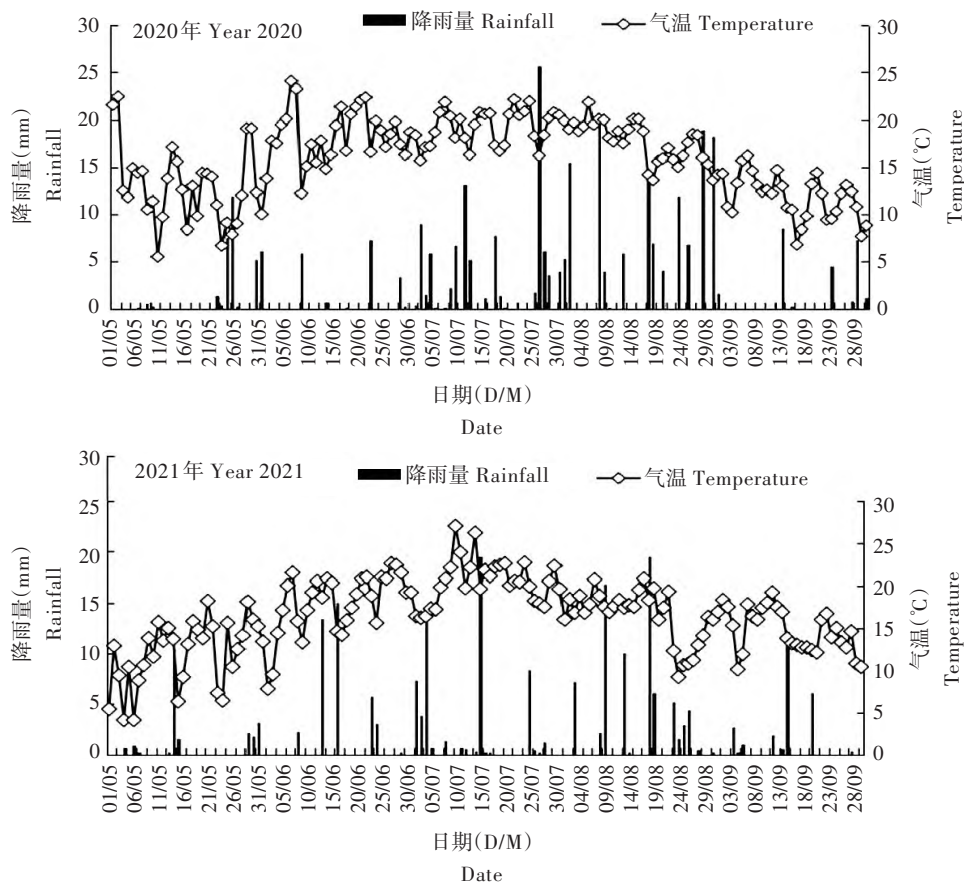


图1 试验期间降雨量和气温变化

Figure 1 Changes in rainfall and temperature during the experiment

表1 试验地0~40 cm土层土壤基础地力
Table 1 Basic soil fertility of 0–40 cm soil layer in experimental site

年份 Year	土层深度(cm) Soil depth	有机质(g/kg) Organic matter	全氮(g/kg) Total nitrogen	铵态氮(mg/kg) Ammonium nitrogen	硝态氮(mg/kg) Nitrate nitrogen	碱解氮(mg/kg) Alkali-hydrolyzed nitrogen	有效磷(mg/kg) Available phosphorus	速效钾(mg/kg) Available potassium	pH
2020	0~20	18.89	1.16	2.03	36.84	120.21	14.78	140.78	8.26
	20~40	16.28	0.97	1.96	34.26	117.61	15.22	143.64	7.87
2021	0~20	17.63	1.12	2.28	37.25	119.56	14.51	139.53	8.10
	20~40	16.21	0.85	1.92	33.46	115.32	13.32	42.65	6.98

1.2 试验材料

供试马铃薯品种‘华颂7号’；供试肥料：粒状重过磷酸钙($P_2O_5 \geq 44.0\%$)、尿素($N \geq 46.4\%$)、氯化钾($K_2O \geq 60\%$)、生物有机肥(有机质 $\geq 45\%$ 、有益菌 ≥ 0.6 亿/g、 $N \geq 1.65\%$ 、 $P_2O_5 \geq 1.05\%$ 、 $K_2O \geq 1.66\%$)、腐熟羊粪(有机质 25.8%、 N 0.8 g/kg、 P_2O_5 0.95 g/kg、 K_2O 1.02 g/kg)、含氨基酸水溶肥($N \geq 20\%$ 、 $P_2O_5 \geq 20\%$ 、 $K_2O \geq 20\%$ 、 $Ca \geq 0.10\%$ 、 $Zn \geq 0.05\%$ 、 $B \geq 0.10\%$)、缓释尿素($N \geq 45.2\%$ 、释放周期 90 d)。

1.3 试验设计

设7个处理(表2)。在平衡施用氮磷钾的基础上,设计不施用氮肥处理,在总施用氮肥 270 kg/hm²

含量(纯养分)的情况下减少施氮量 20%(纯养分 216 kg/hm²)基础上,减少施氮量 20%,水溶肥替代补充了减少施氮量 20%,以保证总养分含量不变(216 kg/hm²的总养分),以下3个处理同理。采用随机区组设计,3次重复,小区面积为 40 m²(5 m × 8 m)。大垄2行种植,起垄宽度为 40 cm,垄高为 25 cm,种植密度为 52 500 株/hm²,灌溉方式为滴灌,NPK处理、RN处理、RN+WF处理、RN+BM处理、RN+RUN处理和RN+SM处理 80%氮肥基施,剩余 20%在马铃薯块茎膨大期用施肥罐随水追施,PK处理粒状重过磷酸钙和其他处理粒状重过磷酸钙和氯化钾做基肥一次性施入,全生育期进行限量补灌 3 次(补灌时间分别为 6 月 10 日、7 月 15 日、8 月 2 日)。

表2 试验设计
Table 2 Experimental design

编号 Code	处理 Treatment	养分用量(kg/hm ²) Dosage (kg/ha)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NPK	平衡施用氮磷钾化肥	270	120	180
PK	不施化学氮肥,磷钾肥用量同 NPK	0	120	180
RN	减少施氮量 20%,磷钾肥用量同 NPK	216	120	180
RN + WF	减少施氮量 20%,水溶肥替代总施氮量的 20%	216	120	180
RN + SM	减少施氮量 20%,羊粪替代总施氮量的 20%	216	120	180
RN + BM	减少施氮量 20%,生物有机肥替代总施氮量的 20%	216	120	180
RN + RUN	减少施氮量 20%,缓释尿素替代总施氮量的 20%	216	120	180

1.4 测定内容及其方法

农田温室气体样品的采集:采用静态箱方法对气体样品进行采集^[18],采样时将底座水槽注水并放入温度计测定温度,密封箱体,箱体长×宽×高为 60 cm×30 cm×30 cm,采样时间为上午 9:00~11:00,分别抽取箱体 0、15、30 min(其中 0 min 随机采集 3 点)。采用 1 个 100 mL 的注射器从采样箱内抽取

气体,将抽取的气体转移到密封的真空玻璃瓶,随后立即上机测定。采集气体样品的同时记录箱内温度。生长季节每周采集 1 次,施肥阶段集中采集 5 次,如遇降雨或灌水后第 2 d 加采 1 次。采用配有 FID 和 ECD 检测器的气相色谱仪(Agilent 7890,美国),测定 CO₂、CH₄和 N₂O 浓度。

温室气体累积排放量是生长季内每天排放量的

累加值。温室气体计算公式^[20]为:

$$F(\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})[\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})] = \rho \times V/A \times dC/dt \times 273/(273 + T)$$

式中: F 为温室气体($\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$)排放通量; ρ 为标准状态下温室气体($\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$)的密度; V 为采样箱体内有效体积(m^3); A 为采样箱覆盖的土壤表面积(m^2); dC/dt 为单位时间内采样箱温室气体随时间浓度变化率 $[\text{nL}/(\text{L}/\text{h})]$; T 为采样过程中箱体內的平均温度($^{\circ}\text{C}$)。

在 100 年时间尺度上, 单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势(Global warming potential, GWP)分别为 CO_2 的 25 和 298 倍。全球增温潜势计算公式为:

$$\text{GWP}(\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2) = \text{RCH}_4 \times 25 + \text{RN}_2\text{O} \times 298$$

式中: GWP 为全球增温潜势; RCH_4 和 RN_2O 为 CH_4 和 N_2O 季节累积排放量(kg/hm^2)。

氮肥偏生产力(Partial factor productivity of applied nitrogen, PFPN)计算公式为:

$$\text{PFPN}(\text{kg}/\text{kg}) = Y/\text{FN}$$

式中: Y 为作物产量(kg/hm^2); FN 为施氮量(kg/hm^2)。

氮肥农学利用率(Nitrogen agronomic efficiency, NAE)计算公式为:

$$\text{氮肥农学利用率}(\text{kg}/\text{kg}) = (\text{施氮区产量} - \text{不施氮区产量})/\text{施氮量}$$

马铃薯产量测定: 待马铃薯成熟时进行产量测定, 将 2 行(16 m^2)收获的马铃薯按大薯和小薯分别计数和称重, 大薯按照 $\geq 300 \text{ g}$ 计算, 小薯按照 300 g 以下计算, 并换算成公顷产量。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SigmaPlot 12.5 软件进行试验数据处理和绘制统计图表, 应用 SPSS 26.0 统计软件进行显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

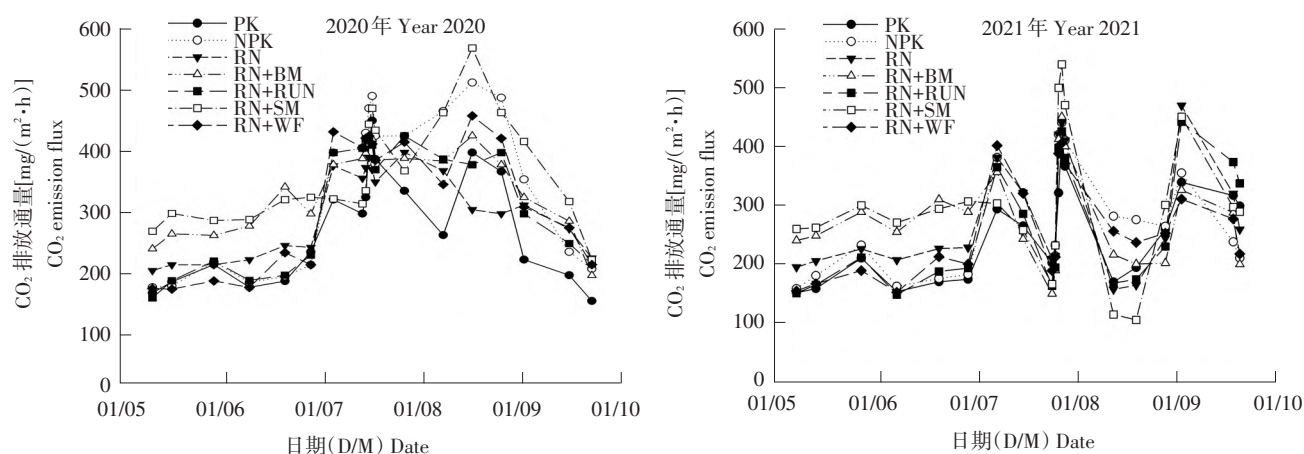
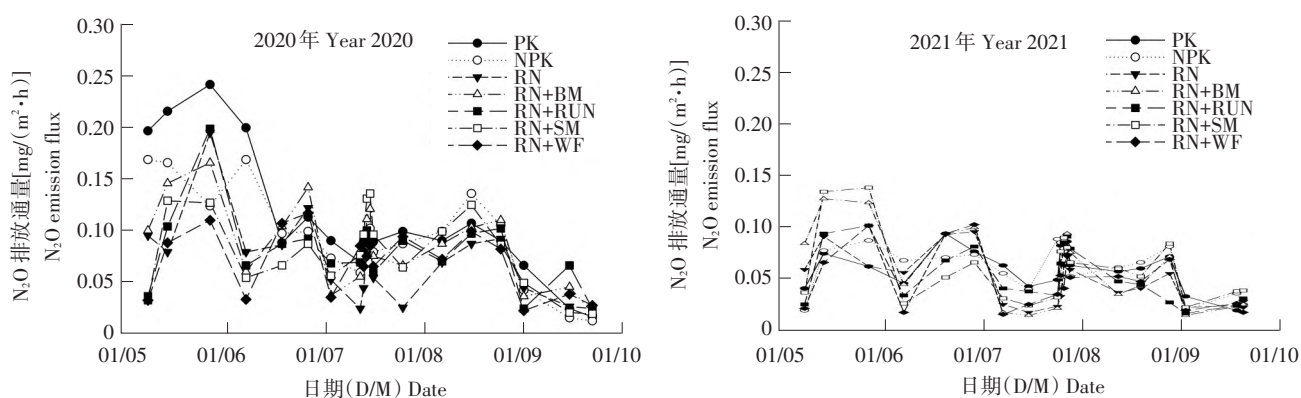
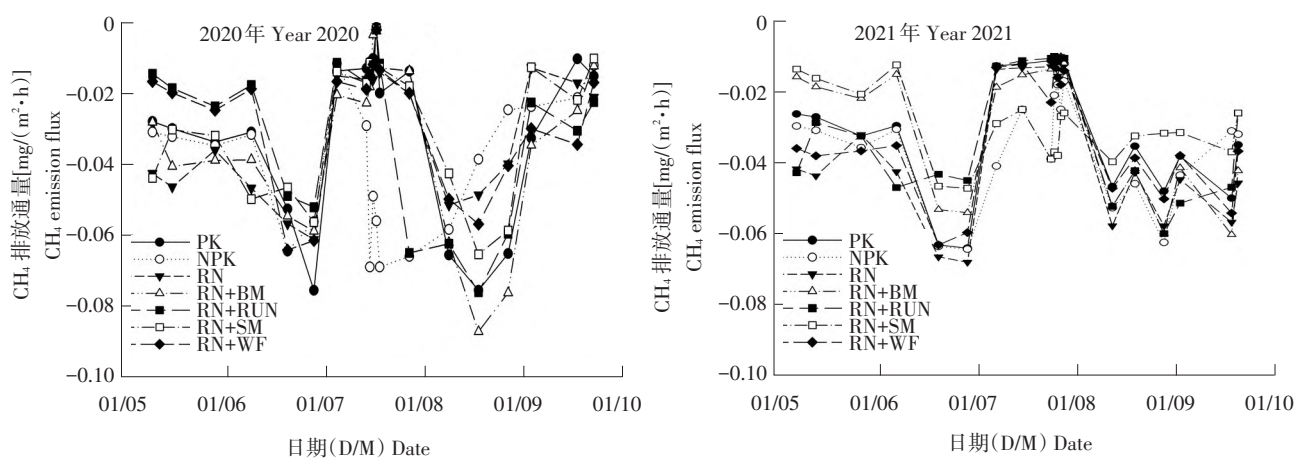
2.1 不同施肥处理对温室气体排放通量的动态变化

2020 和 2021 年马铃薯田 CO_2 排放规律基本一致, 均出现 3 次峰值, 且第 3 次峰值后进入马铃薯的生长后期, CO_2 排放通量逐渐降低。2020 和 2021 年, 马铃薯苗期 CO_2 排放通量呈平缓增长趋势, 没有明显峰值, 随着马铃薯的生长和肥料在土壤中的

的熟化释放, CO_2 排放通量逐渐增大, 均于 7 月出现第 1 个峰值。2020 年, CO_2 排放通量随着马铃薯生长进入盛花期, 呼吸作用增强, 于 7 月中旬达到第 2 个峰值, 于 8 月追肥后, 达到第 3 个峰值。2021 年, 7 月 15 日受降雨的影响, CO_2 排放通量于 8 月追肥后, 达到第 2 个峰值, 9 月初达到第 3 个峰值。2 年中 RN+SM 处理 CO_2 排放通量峰值最大。与对照 NPK 相比, RN+SM 处理两年 CO_2 排放通量增加范围为 10.97%~22.70%, 不施氮肥处理(PK)和减氮 20% 处理(RN)两年 CO_2 排放通量均值分别降低 8.55%~22.19% 和 9.86%~12.10%(图 2)。说明有机肥羊粪替代部分氮肥(RN+SM 处理)会导致农田 CO_2 排放通量增加, 氮肥的减量可以减少农田 CO_2 排放通量。

2020 和 2021 年各处理 N_2O 排放通量总体变化趋势基本相似, 呈现出上下波动状态, 且 2021 年的波动范围更大。2020 和 2021 年, 马铃薯苗期 N_2O 排放通量逐渐增长, 随着马铃薯的生长和肥料在土壤中的熟化, 铵态氮和硝态氮释放, N_2O 排放通量出现第 1 个峰值, 进入 7 月后, 随着马铃薯生长进入盛花期, N_2O 排放通量出现第 2 个峰值。之后受降雨以及施肥影响, 2020 和 2021 年 N_2O 排放通量波动范围因降雨和土壤温度等不同, 出现峰值的时间均有差异。在整个生长季各处理 N_2O 排放规律基本一致, RN+SM 明显高于 RN+RUN、RN+WF、RN+BM 处理。与对照 NPK 相比, RN+SM 处理两年 N_2O 排放均值增加 7.86%~14.66%, 不施氮肥处理(PK)和减氮 20% 处理(RN)两年 N_2O 排放均值分别降低 20.18%~21.48% 和 10.37%~16.85%(图 3)。说明有机肥羊粪替代部分氮肥导致了农田 N_2O 排放通量增加, 氮肥的减量施用可以减少农田 N_2O 排放通量。

2020 和 2021 年 CH_4 表现为吸收状态。2020 和 2021 年所有处理在马铃薯苗期和块茎形成期 CH_4 的吸收通量均呈上升趋势, 于 7 月初达到吸收峰值, 随着马铃薯的生长和肥料在土壤中的熟化释放, CH_4 吸收通量开始下降, 在 8 月追肥前, 达到峰值。2020 年, CH_4 的吸收通量于追肥后呈下降趋势。2021 年, CH_4 吸收通量受降雨量增多影响, 在追肥后出现了 2 次较大的波动, 说明降雨和施用氮肥会明显影响 CH_4 的吸收通量(图 4)。

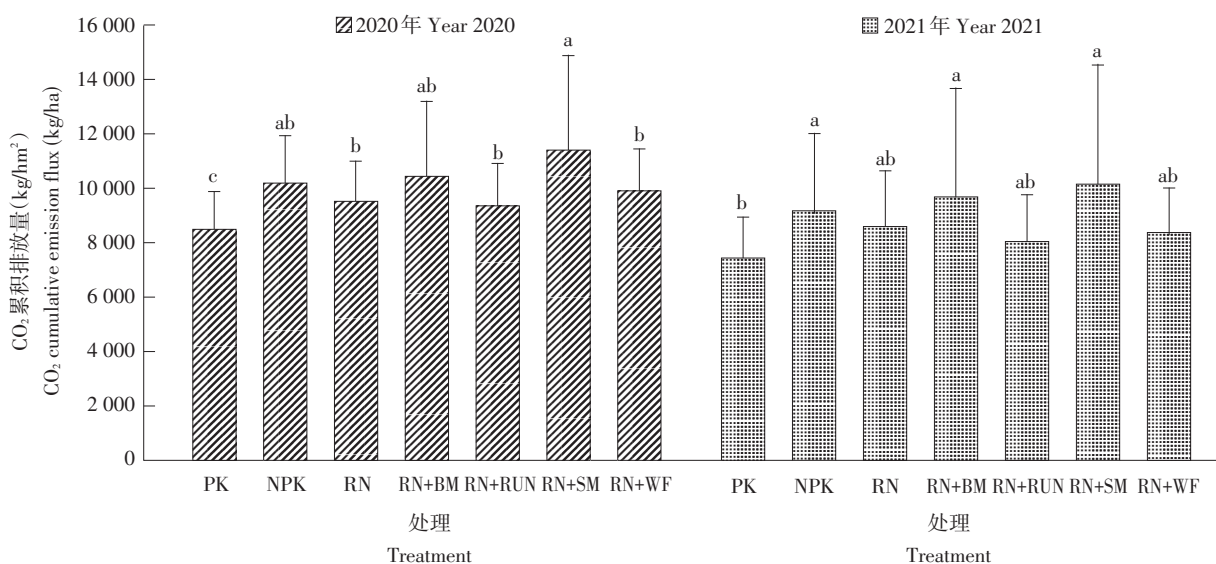
图2 不同处理下马铃薯农田CO₂排放通量变化Figure 2 Variation in CO₂ emission flux in potato farmland under different treatments图3 不同处理下马铃薯农田N₂O排放通量变化Figure 3 Variation in N₂O emission flux in potato farmland under different treatments图4 不同处理下马铃薯农田CH₄排放通量变化Figure 4 Variation in CH₄ emission flux in potato farmland under different treatments

2.2 不同施肥处理对温室气体累积排放量的影响

2年中RN+SM处理CO₂累积排放量最大。2020年, PK、NPK、RN、RN+BM、RN+RUN、RN+SM和RN+WF处理CO₂累积排放量分别为8 494.23、10 175.81、9 526.49、10 436.03、9 353.41、11 401.35和9 922.85 kg/hm²; 2021年, PK、NPK、RN、RN+BM、RN+RUN、RN+SM和RN+WF处理CO₂累积排放量分别为7 521.41、8 762.96、8 429.49、8 975.07、8 094.83、9 299.77和8 104.59 kg/hm²。2020和2021年, 与对照NPK相比, PK处理差异显著($P<0.05$), 其他处理均不显著($P>0.05$) (图5)。

2年中RN+SM处理N₂O累积排放量最大。2020年, PK、NPK、RN、RN+BM、RN+RUN、RN+SM和RN+WF处理N₂O累积排放量分别为2.31、2.84、2.44、3.16、2.74、3.77和2.53 kg/hm²; 2021年, PK、NPK、RN、RN+BM、RN+RUN、RN+SM和RN+WF处理N₂O累积排放量分别为1.86、2.06、2.15、3.24、1.89、3.65和2.07 kg/hm²。2020年, 与对照NPK相比, PK、RN处理显著降低N₂O累积排放量($P<0.05$), RN+SM处理显著增加N₂O累积排放量($P<0.05$), 其他处理均不显著($P>0.05$)。2021年, 与对照NPK相比, RN+SM、RN+BM处理差异显著($P<0.05$), 其他处理均不显著($P>0.05$) (图6)。

2年中RN+SM处理CH₄累积排放量最小。2020年, PK、NPK、RN、RN+BM、RN+RUN、RN+SM和RN+WF处理CH₄累积排放量分别为-0.54、-0.63、-0.55、-0.92、-0.67、-1.20和-0.81 kg/hm²; 2021年, PK、NPK、RN、RN+BM、RN+RUN、RN+SM和RN+WF处理CH₄累积排放量分别为-0.73、-0.91、-0.84、-1.30、-1.00、-1.35和-0.96 kg/hm²。2020年, 与对照NPK相比, RN+SM处理差异显著($P<0.05$), 其他处理均不显著($P>0.05$)。2021年, 与对照NPK相比, 各处理均无显著差异($P>0.05$) (图7)。

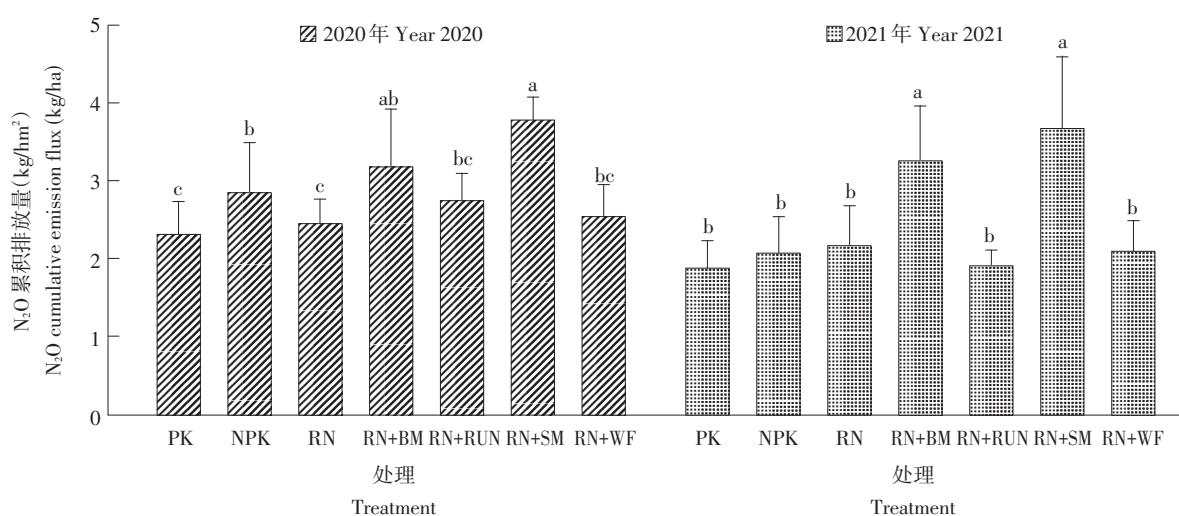
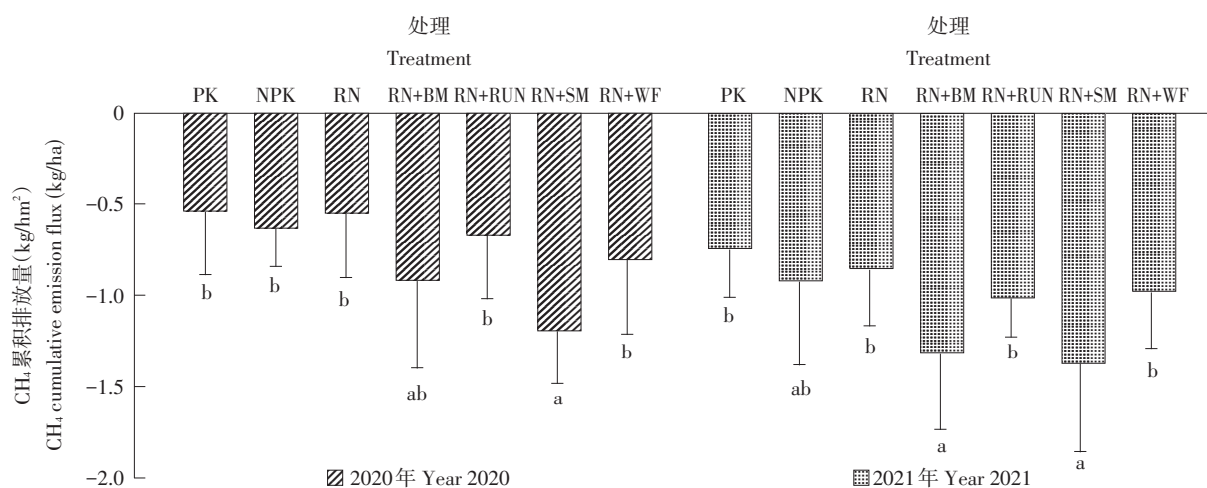


注: 不同小写字母表示不同处理间在0.05水平下差异显著, 采用最小显著差数(Least significant difference, LSD)法。误差线代表标准误差。下同。

Note: Different lowercase letters above treatment means indicate significant difference between different treatments at 0.05 level as tested using least significant difference (LSD) method. Error bar represents standard error. The same below.

图5 不同处理下马铃薯农田CO₂累积排放量变化

Figure 5 Variation in CO₂ cumulative emissions from potato farmland under different treatments

图6 不同处理下马铃薯农田N₂O累积排放量变化Figure 6 Variation in N₂O cumulative emissions from potato farmland under different treatments图7 不同处理下马铃薯农田CH₄累积排放量变化Figure 7 Variation in CH₄ cumulative emissions from potato farmland under different treatments

2.3 不同施肥处理对全球增温潜势的影响

由表2可知, 2020和2021年马铃薯生长季内(CH₄+N₂O)全球增温潜势(GWP)均为RN+SM处理最高, 较NPK处理显著增加。2020和2021年, CH₄的GWP由大到小顺序均为PK>RN>NPK>RN+RUN>RN+WF>RN+BM>RN+SM, 与对照NPK相比, 2020年和2021年RN+SM处理差异均显著($P<0.05$)。2020和2021年, N₂O的GWP大小顺序分别为RN+SM>RN+BM>RN+RUN>NPK>RN+WF>RN>PK和RN+SM>RN+BM>RN>RN+

WF>NPK>RN+RUN>PK。两年试验中N₂O排放量以RN+SM处理最高, 均与对照NPK差异显著($P<0.05$), CH₄排放量则以RN+SM处理最低, 均与对照NPK差异显著($P<0.05$)。2020和2021年马铃薯生育期间有机无机配施(羊粪)(CH₄+N₂O)GWP分别比NPK平衡施肥处理高36.10%和79.66%, 说明施用有机肥(羊粪)对全球增温潜势排放影响较大。

2.4 不同施肥处理对马铃薯产量和土壤氮肥利用效率的影响

不同处理马铃薯产量和氮肥利用率结果见表3。

表2 不同处理对马铃薯田全球增温潜势的影响

Table 2 Effects of different treatments on global warming potential (GWP) of potato field

年份 Year	处理 Treatment	马铃薯田生长季 GWP(kg CO ₂ -eq/hm ²) GWP in potato growing season (kg CO ₂ -eq/ha)		
		CH ₄	N ₂ O	CH ₄ +N ₂ O
2020	PK	-12.81 ± 3.57 b	689.63 ± 213.94 c	676.82 ± 217.51 c
	NPK	-13.85 ± 4.36 b	818.87 ± 275.86 b	805.02 ± 280.22 b
	RN	-13.62 ± 4.27 b	728.18 ± 248.75 c	714.56 ± 253.02 bc
	RN+WF	-16.84 ± 4.82 b	755.93 ± 239.21 bc	739.09 ± 244.03 bc
	RN+SM	-30.01 ± 7.21 a	1 125.7 ± 675.32 a	1 095.69 ± 682.53 a
	RN+BM	-23.10 ± 6.52 ab	942.67 ± 578.64 ab	919.57 ± 585.16 ab
	RN+RUN	-15.91 ± 3.61 b	847.01 ± 298.51 b	831.10 ± 302.12 b
2021	PK	-25.13 ± 5.25 b	556.53 ± 176.34 b	531.40 ± 181.59 b
	NPK	-27.49 ± 6.94 b	615.25 ± 232.54 b	587.76 ± 239.48 b
	RN	-26.17 ± 6.12 b	642.07 ± 214.35 b	615.90 ± 220.47 b
	RN+WF	-31.72 ± 7.32 b	618.50 ± 223.52 b	586.78 ± 230.84 b
	RN+SM	-33.99 ± 7.68 a	1 090.0 ± 449.71 a	1 056.01 ± 457.39 a
	RN+BM	-32.61 ± 7.54 a	966.70 ± 588.43 a	934.09 ± 595.97 a
	RN+RUN	-28.83 ± 6.92 b	564.61 ± 189.61 b	535.78 ± 196.53 b

注: 数据表示为平均值 ± 标准误。同列不同小写字母表示在0.05水平下差异显著, 采用最小显著差数(Least significant difference, LSD)法。下同。

Note: Data are expressed as treatment mean ± standard error. Treatment means followed by different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level as tested using least significant difference (LSD) method. The same below.

表3 不同处理间马铃薯产量、氮肥农学利用率和氮肥偏生产力的变化

Table 3 Changes in yield, nitrogen agronomic efficiency and partial factor productivity of applied nitrogen of potato under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	产量(kg/hm ²) Yield (kg/ha)	氮肥偏生产力(kg/kg) PFPN	氮肥农学利用率(kg/kg) NAE
2020	NPK	33 650 ± 257 bc	124.62 ± 4.6 d	12.89 ± 2.8 c
	PK	29 987 ± 166 c	—	—
	RN	30 252 ± 235 c	138.82 ± 5.3 c	1.22 ± 0.3 d
	RN+WF	35 347 ± 218 b	164.64 ± 7.5 b	24.81 ± 3.6 b
	RN+SM	33 000 ± 313 bc	152.77 ± 6.7 b	13.94 ± 3.2 c
	RN+BM	39 353 ± 279 a	182.19 ± 8.7 a	43.36 ± 4.8 a
	RN+RUN	36 292 ± 253 a	168.01 ± 6.9 b	29.18 ± 3.4 b
2021	NPK	33 846 ± 218 b	125.32 ± 3.6 c	18.51 ± 2.5 c
	PK	29 846 ± 147 c	—	—
	RN	31 550 ± 232 bc	146.06 ± 5.8 bc	7.88 ± 1.6 d
	RN+WF	36 147 ± 187 a	167.34 ± 7.3 b	29.16 ± 3.8 b
	RN+SM	33 679 ± 215 b	155.91 ± 4.8 b	17.74 ± 2.3 c
	RN+BM	39 864 ± 169 a	184.55 ± 9.1 a	46.37 ± 4.2 a
	RN+RUN	37 962 ± 195 a	175.74 ± 8.4 a	37.57 ± 3.4 a

综合2年产量数据(表3)来看,不同肥料配施对马铃薯产量有显著影响。2020年,RN+BM和RN+RUN处理与对照NPK差异显著($P<0.05$),RN+SM、RN+WF、RN和PK处理与对照NPK差异不显著($P>0.05$);2021年,RN+BM、RN+RUN和RN+WF处理与对照NPK差异显著($P<0.05$),RN和RN+SM处理与对照NPK差异不显著($P>0.05$)。2020和2021年,与NPK处理相比,RN+BM处理、RN+RUN处理、RN+WF处理马铃薯产量分别提高16.95%、7.85%、5.04%和17.77%、12.15%、6.79%,说明不同肥料配施(2020年RN+WF处理除外)可以增加马铃薯产量。RN、PK处理马铃薯产量较NPK平衡施肥处理分别降低1.09%、10.88%和6.78%、11.81%,说明减少施氮量20%和不施用氮肥会影响马铃薯产量。施用有机肥(羊粪)替代20%氮肥(RN+SM)处理与平衡施用NPK处理差异不显著($P>0.05$),可能是因为有机肥(腐熟羊粪)养分释放较慢,在后期提供了足够养分供马铃薯生长所需。

氮肥利用率的高低反映了作物在氮肥施用基础上吸收能力的大小,本试验通过氮肥农学利用率和氮肥偏生产力来衡量马铃薯氮肥的利用率(表3)。2020和2021年,不同肥料替代部分氮肥均以RN+BM处理氮肥农学利用率和氮肥偏生产力最高,与对照NPK相比均差异显著($P<0.05$),RN+BM处理的氮肥偏生产力和氮肥农学利用率较对照NPK分别提高46.19%~47.26%和150.51%~236.38%,说明在减氮条件下生物有机肥、无机肥料配施能够提高氮肥的利用效率。

3 讨 论

肥料的施用方式和施肥量是影响农田温室气体排放的重要因素^[21]。大量学者研究表明,减氮与不同肥料配施是影响农田温室气体排放的重要因素^[22,23]。在马铃薯整个生长季,各施肥处理 CO_2 和 N_2O 排放小高峰出现在7月,与孙磊等^[24]研究结果相似。肥料的补充增加了土壤无机氮素,及时为马铃薯后期生长发育提供了所需养分,加之马铃薯后期生长发育旺盛根系活力增强,呼吸作用加快,导致温室气体排放通量升高。不施氮肥、减少氮肥、

缓释肥和水溶肥配施普通化肥处理温室气体排放通量峰值和生育期累积排放量明显低于普通化肥(图2~图7),说明减少氮肥施用和普通化肥配施新型肥料可以减少农田温室气体排放,可能是由于缓释尿素和水溶肥的施用能够延长土壤铵态氮保存时间,减少氮肥流失,使肥料充分释放,提高肥料利用效率,这与前人研究结果一致^[25]。关于有机无机配施对农田温室气体排放通量和累积排放量研究结果不一致,有研究表明,施用有机肥提高了土壤C/N值,促使微生物争氮,从而减少了硝化和反硝化底物,最终降低了土壤温室气体排放^[26],而邹建文等^[27]研究表明,施用有机肥增加了稻麦轮作体系温室气体的排放量。本试验中,有机无机配施RN+SM处理农田 CO_2 和 N_2O 排放通量和累积排放量明显高于对照NPK处理,可能由于施用有机肥增加了土壤微生物活动,导致农田温室气体升高,而且本研究只针对马铃薯田间温室气体排放,其他生产资料的碳排放未计入研究。

温室气体的排放强度是把全球变暖潜能值与作物产量相结合的综合温室效应评价指标^[28]。在两年马铃薯生育期间有机无机配施(羊粪)GWP分别比NPK平衡施肥处理高36.10%和79.66%,说明有机肥羊粪配施化肥会增加农田温室气体排放,与万伟帆^[29]研究结果一致。郝小雨等^[30]研究表明,缓释尿素可以降低全球变暖潜能值和温室气体的排放强度。本试验中,缓释尿素GWP的贡献较平衡施用NPK肥贡献大,可能是由于试验地域、施肥方式、施肥比例等差异因素所造成。

水分和肥料是限制作物产量的重要因素^[31]。适度减施氮肥或施用缓释肥、有机肥不仅能够提高氮肥利用率,而且会减少氮肥流失的风险,降低农业成本^[32]。相较于单施化肥,有机无机配施能减少氮素径流和淋溶损失21%~24%,提高水稻产量28.7%~42.7%^[33]。生物有机肥配施尿素,相较于常规施肥,可以提高氮素利用率37.4%^[34]。研究发现施用水溶肥氮素偏生产力较对照有显著提高,本试验与前人研究结果相似^[35],不同肥料配施处理土壤氮肥利用效率显著高于单施化肥处理,尤其是以RN+BM处理土壤氮肥利用效率最高,这与前人研

究结果一致^[36]。施肥对马铃薯产量有重要的影响, 有机无机肥料配施能够提高马铃薯产量, 较对照处理增产 49.70%^[37]。岳超等^[38]研究表明, 马铃薯施用缓控释肥可以提高产量 7.88%。本试验中不施氮肥 PK 处理和减少氮肥 RN 处理与对照 NPK 处理相比, 全球增温潜势(2020 年 PK 除外)差异不显著, 马铃薯的产量差异不显著(2021 年 PK 除外), 氮肥利用效率差异显著, 但反之平衡施用氮肥和生物有机肥、水溶肥和缓释尿素替代部分氮肥处理提高马铃薯的产量和氮肥利用效率, 其中 RN+BM 处理产量较对照 NPK 提高 16.95%~17.77%, 氮肥偏生产力与氮肥农学利用率提高 46.19%~47.26%和 150.51%~236.38%, 这与前人研究结果相似^[39]。

综上所述, 2020 和 2021 年施用有机肥(生物有机肥 RN+BM)的处理虽然 N₂O(2021 年除外)和 CO₂ 温室气体排放总量、全球增温潜势(2021 年除外)较对照 NPK 处理高, 但没有达到显著差异; 生物有机肥替代部分氮肥处理可以提高氮肥利用效率和马铃薯产量。因此, 该处理是阴山北麓马铃薯种植中理想的减氮施肥方式, 建议生产上推广应用。

[参 考 文 献]

- [1] 林斌, 徐孟, 汪笑溪. 中国农业碳减排政策、研究现状及展望 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 500-515.
- [2] 冯晓赞, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响 [J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 508-517.
- [3] 李晓立, 何堂庆, 张晨曦, 等. 等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响 [J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 948-961.
- [4] 李珺. 中国北方马铃薯氮素管理的农学与环境效应研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [5] 王立为. 旱地马铃薯田温室气体减排与增产协同机制和模式研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [6] 易琼, 黄旭, 张木, 等. 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地 N₂O 排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 2019-2025.
- [7] 李广. 气候变化背景下旱作农田温室气体减排的耕作调控技术与示范 [Z]. 甘肃省, 甘肃农业大学, 2021-03-26.
- [8] 张浩东, 贾俊香, 马智勇. 减氮配施不同调节剂对土壤温室气体强度与冬小麦产量的影响 [J]. 山西农业科学, 2022, 50(2): 191-198.
- [9] 师学静, 柴同海, 邢明振, 等. 不同肥料配施对马铃薯产量和品质以及土壤理化性状的影响 [J]. 河北农业科学, 2021, 25(2): 72-76.
- [10] 曹超喜, 孙科, 李冬, 等. 专用有机肥在马铃薯上的施用效果 [J]. 长江蔬菜, 2016(22): 72-74.
- [11] 华智超, 汪甜, 贾晨楠, 等. 基于有机肥/生物有机肥和菌剂的化学氮肥减施技术在大蒜上的应用 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 178-183.
- [12] 张妮, 程云霞, 张攀, 等. 氮肥减施与氨基酸肥料替代对制干辣椒生长、产量及品质的影响 [J]. 中国瓜菜, 2021, 34(11): 89-93.
- [13] 孙旭东, 孙许, 董树亭, 等. 包膜尿素施用时期对夏玉米产量和氮素积累特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2017(11): 2179-2188.
- [14] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓控释氮肥对春玉米氮素吸收利用土壤无机氮变化及氮平衡的影响 [J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3928-3940.
- [15] 张夫道, 金维续, 王小平, 等. 有机肥与氮肥配合施用对高产水稻土和稻麦品质的影响 [J]. 土壤肥料, 1987(6): 16-18.
- [16] 朱永昶, 李玉娥, 秦晓波, 等. 控释肥和硝化抑制剂对华北春玉米 N₂O 排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1421-1428.
- [17] 王学霞, 曹兵, 梁红胜, 等. 控释氮肥与水溶肥配施减少设施土壤 N₂O 排放的机理 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2084-2094.
- [18] 梁蕊芳. 增效氮肥对马铃薯氮素吸收利用及土壤温室气体排放的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [19] 钱栋, 胡明成, 申卫收, 等. 不同类型有机肥对珠三角水稻产量和温室气体排放的影响 [J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2022, 14(4): 399-409.
- [20] 高琳. 不同农作措施对旱地农田温室气体排放的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [21] 顾一凡. 氮肥减施对双季稻田温室气体排放的影响研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [22] Liu Y, Hu C, Mohamed I, *et al.* Soil CO₂ emissions and drivers in rice-wheat rotation fields subjected to different long-term fertilization

- practices [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2016, 44(7): 867-876.
- [23] 吴得峰. 黄土旱塬区减氮条件下氮素利用及温室气体排放特征 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [24] 孙磊, 王丽华, 高中超, 等. 减氮配合增效剂和缓释肥对玉米田土壤温室气体排放和产量的影响 [J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 185-194.
- [25] 丁维军, 陶林海, 吴林, 等. 新型缓释尿素对削减温室气体、 NH_3 排放和淋溶作用的研究 [J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2840-2847.
- [26] 王楷, 史雷, 马龙, 等. 有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N_2O 的排放特征及微生物特性 [J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6038-6046.
- [27] 邹建文, 刘树伟, 秦艳梅, 等. 不同水分管理方式下水稻生长季 N_2O 排放量估算: 模型应用 [J]. 环境科学, 2009, 30(4): 949-955.
- [28] 郭子艳. 施氮量和秸秆还田对夏玉米产量和农田温室气体排放的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [29] 王伟帆. 尿素不同用量及处理措施对马铃薯田温室气体排放和氨挥发影响的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [30] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响 [J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227-3238.
- [31] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99.
- [32] 丁诚, 张丽, 郁洁, 等. 秸秆全量还田配施缓释尿素对小麦产量及氮肥利用率的影响 [J]. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2021, 42(4): 84-89.
- [33] 石鑫蕊, 任彬彬, 江琳琳, 等. 有机肥替代部分化肥对水稻光合速率氮素利用率和产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 154-162.
- [34] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(5): 852-864.
- [35] 崔云玲, 张立勤, 姜银春, 等. 马铃薯高效专用水溶肥肥效试验初报 [J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(12): 48-52.
- [36] Long G Q, Jiang Y J, Sun B. Seasonal and inter-annual variation of leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under long-term manure application in an acidic clay soil in subtropical China [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 270-278.
- [37] 李鸣凤, 王清林, 鲁明星, 等. 有机水溶肥料与无机肥料配施对马铃薯产量、养分吸收和品质的影响 [J]. 中国马铃薯, 2014, 28(6): 340-347.
- [38] 岳超, 王怀义, 滕松, 等. 马铃薯施用缓控释肥、生物有机肥肥效试验 [J]. 中国马铃薯, 2017, 31(6): 341-345.
- [39] 李晓立, 何堂庆, 张晨曦, 等. 等氮量条件下有机肥替代化肥对玉米农田温室气体排放的影响 [J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 948-961.