

不同肥料替代化学氮肥对土壤不同形态氮素及马铃薯产量的影响

杜二小^{1,2,3} 张利荣⁴ 任永峰^{1,2,3} 高宏艳^{1,2,3} 张君^{1,2,3}
张鹏^{1,2,3} 高宇^{1,2,3} 王海霞^{1,2,3} 赵沛义^{1,2,3}

(¹内蒙古自治区农牧业科学院, 010031, 内蒙古呼和浩特; ²内蒙古自治区旱作农业重点实验室, 010031, 内蒙古呼和浩特;
³农业农村部内蒙古耕地保育科学观测实验站, 011705, 内蒙古呼和浩特; ⁴乌兰察布市集宁区第二中学, 012099, 内蒙古乌兰察布)

摘要 通过小区试验设置了不施氮肥(CK)、常规氮肥施用(NPK)、减量氮肥(RN)及其与水溶肥(RN+WF)、腐熟羊粪有机肥(RN+SM)、生物有机肥(RN+BM)、缓释尿素(RN+RUN) 7个处理, 研究分析不同肥料替代部分化学氮肥处理对 0~60 cm 土壤全氮、铵态氮、硝态氮、可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)和微生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量的影响。结果表明, 与 CK 处理相比, 各替代处理均显著提高土壤全氮、铵态氮、硝态氮、SON 和 MBN 含量, 并增加了氮肥农学利用效率。2022 年, RN+SM 处理对提升土壤氮素含量和氮肥农学利用效率效果显著, 0~20 cm SON 和 MBN 含量较 NPK 分别提高 30.20%和 26.15%, 2023 年分别提高 40.34%和 43.57%; 2022 年, 氮肥偏生产力和氮肥农学利用效率较 NPK 处理提高 36.76%和 127.95%, 2023 年分别提高 42.38%和 269.09%; 马铃薯产量 2022 年和 2023 年分别较 NPK 处理增产 9.42%和 13.90%。综合分析, RN+SM 在培肥土壤和产量提升上表现优异, 适合在内蒙古阴山北麓地区推广应用。

关键词 阴山北麓; 氮肥减施与替代; 土壤氮; 氮肥农学利用效率; 马铃薯

氮是作物生长和产量形成最重要的营养元素之一, 同时也是全球生态系统物质循环的重要组成部分^[1-2]。土壤中氮含量和存在的形态受多种因素影响, 如土壤类型、气候变化、人类活动和植被覆盖等^[3]。土壤中的氮分为无机氮和有机氮, 而有机氮是土壤氮素存在的主要形态, 占土壤氮库的 90%以上, 主要存在于土壤有机质和未完全分解的动植物残体中^[4]。有机氮是土壤肥力的重要组成部分, 又是影响土壤活性氮和供氮能力的主要因素之一, 在土壤有效供氮能力和氮素的转化循环中扮演重要角色, 同时也是土壤矿质氮的源和库, 对植物生长发育和土壤生态系统的稳定性都有着重要的影响^[5-9]。土壤可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)和土壤微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)是土壤活性氮库中重要的组分, 两者均参与土壤氮素循环、调控和供应, 同时也是土壤铵态氮、硝态氮以及 SON 氮库相互转化的驱动因素^[10-11]。

施肥是补充土壤氮库, 提高土壤供氮能力的重

要措施, 农田有机肥的施用是提升土壤有机氮含量和肥力的重要手段, 与化肥相比, 有机肥对改善土壤质量有较好的效果^[12]。有机肥和控释肥部分替代化学氮肥在提高土壤肥力、优化氮素供应、提升作物产量及氮肥利用效率等方面展现出显著优势。高鹏等^[13]研究表明, 有机肥替代化肥比例越高, SON 和 MBN 含量的提升越明显, 尤其对土壤长期氮素供应能力具有积极作用。李超^[14]进一步指出, 有机肥替代化学氮肥能够增强马铃薯块茎膨大期的氮素供应能力, 同时减少氮素表观损失和盈余量, 优化了土壤氮素平衡。李泽碧等^[15]验证了控释氮肥的增效作用, 结果表明其可显著提高作物干物质积累量、产量及氮肥利用效率, 为构建高效施肥模式提供了技术支撑。冯朋博等^[16]则通过普通尿素与缓释尿素配施, 揭示了肥料氮素释放与作物需氮动态的匹配性, 为实现作物绿色高产高效提供了路径。吕真真等^[17]通过长期定位试验发现, 有机无机肥配施能显著提升土壤有机碳、全氮及矿质氮含量, 其中高比例有机肥(70%)处理在培肥土壤方面表现突

作者简介: 杜二小, 主要从事农田面源污染与作物栽培研究, E-mail: 1319982539@qq.com

赵沛义为通信作者, 主要从事作物栽培与耕作学研究, E-mail: zhpy1972@163.com

基金项目: 院青年基金项目—氮肥减量与替代下土壤水氮时空变化规律及对马铃薯水氮利用效率的影响研究(2022QNJJN08); 内蒙古科技计划项目—内蒙古自治区旱作农业重点实验室

收稿日期: 2025-02-24; 修回日期: 2025-06-21; 网络出版日期: 2025-08-04

出。上述研究充分证明，有机肥与控释肥在减少化肥用量、改善土壤氮素库及提升作物增产潜力方面具有重要作用，同时，不同类型肥料的组合及替代比例的优化也为精准施肥策略的制定提供了丰富的理论依据。

内蒙古阴山北麓是典型的农牧交错区，该地区昼夜温差大、气候冷凉，非常适宜马铃薯的种植和生长，目前已成为内蒙古重要的马铃薯主产区。然而，长期以来该地区马铃薯种植过程中存在施肥结构不合理、肥料施用量以及水肥利用效率低下等问题。过量追求高产不仅导致肥料资源的浪费和生产成本的增加，还加剧了土壤退化和氮素流失等环境问题，威胁到区域农业的生态安全和马铃薯产业的可持续发展。陈杨等^[18]在阴山北麓地区通过调查 1122 个农户发现，氮肥的投入量在 13.5~384.8 kg/hm²，磷肥在 0.0~203.5 kg/hm²，钾肥在 0.0~97.0 kg/hm²，最高值是最低值的数百倍，肥料的施用存在不合理现象。因此，如何优化肥料施用模式，提高肥料利用效率，同时实现作物增产与环境保护的双赢，是阴山北麓地区马铃薯种植亟需解决的关键问题。

尽管前人研究已表明有机肥和控释肥部分替代化学氮肥能显著提升土壤肥力、氮素供应能力和作物产量，但替代比例的优化机制尚不清晰且研究多局限于表层土壤，对深层氮库动态的研究较少。针对上述问题，本研究通过设置多种肥料替代化学氮肥组合，全面分析其对土壤不同形态氮素、深层氮素储量及氮肥利用效率的影响，同时聚焦内蒙古阴山北麓这一典型农牧交错区的土壤和作物特性，

系统探讨优化替代比例对提升土壤综合肥力和作物产量的作用，旨在为区域内科学施肥提供理论依据，实现马铃薯种植的高效、绿色和可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在内蒙古自治区农牧业科学院武川旱作试验站进行（41°05'38" N，111°27'07" E），试验区为干旱半干旱气候，降水集中于 7-8 月，年均降水量为 349.32 mm，年蒸发量达 1850 mm，年均气温 2.60 °C，无霜期 90~110 d，地形以缓坡丘陵为主，土壤类型为砂质栗钙土。2022 年 4-10 月降水量为 103.90 mm，2023 年 4-10 月降水量为 250.10 mm。试验田土壤基础理化性状为：有机质 18.95 g/kg、有效磷 15.99 mg/kg、全氮 1.09 g/kg、速效钾 130.46 mg/kg、碱解氮 115.29 mg/kg、pH 7.94。

1.2 试验材料

供试马铃薯品种为华颂 7 号。供试肥料为尿素（N 46.0%）、过磷酸钙（P₂O₅ 16.0%）、硫酸钾（K₂O 50.0%）、缓释尿素（N 44.5%，释放周期 90 d）、水溶肥（含 N 14.0%、P₂O₅ 0.7%、K₂O 24.0%）、生物有机肥（N、P、K>6%，有机质>30%）以及有机肥腐熟羊粪（有机质 23.8%、N 0.6%、P₂O₅ 0.5%、K₂O 0.3%）。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计，共设置 7 个处理（表 1），小区面积为 40 m²（5 m×8 m），每个处理重复 3 次。采用大垄双行种植，起垄宽度 40 cm，垄

表 1 试验设计					
Table 1 Experimental design					
处理 Treatment	施肥处理 Fertilization treatment	养分施用量 Nutrient application rate (kg/hm ²)			施肥方式 Fertilization method
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	不施用氮肥	0	120	180	全生育期不使用氮肥
NPK	100%氮肥施用	270	120	180	20% N 基施+80% N 在块茎形成期、膨大期、淀粉积累期按 3:4:3 随水追施
RN	80%氮肥施用	216	120	180	80% N 追施（追施时期及比例同 NPK）
RN+WF	80%氮肥施用，水溶肥替代总施氮量的 20%	216	120	180	20% N 基施+80% N 与水溶肥混合（追施时期及比例同 NPK）
RN+SM	80%氮肥施用，羊粪替代总施氮量的 20%	216	120	180	羊粪基施 20%+80% N（追施时期及比例同 NPK）
RN+BM	80%氮肥施用，生物有机肥替代总施氮量的 20%	216	120	180	生物有机肥基施 20%+80% N（追施时期及比例同 NPK）
RN+RUN	80%氮肥施用，缓释尿素替代总施氮量的 20%	216	120	180	缓释尿素基施 20%+80% N（追施时期及比例同 NPK）

高 25 cm，种植密度为 53 000 株/hm²。小区采用人工起埂，化肥和有机肥按小区面积折算称量，均匀撒在起埂处，起埂后以穴播方式播种。分别于 2022 年 5 月 1 日播种、10 月 2 日收获，2023 年 5 月 2 日播种、10 月 5 日收获。全生育期采用滴管方式灌水 3 次，分别于 2022 年 6 月 15 日、7 月 20 日、8 月 23 日灌溉 3 次，2023 年 6 月 10 日、7 月 25 日、8 月 21 日灌溉 3 次，其他田间管理措施与当地农户一致。

1.4 测定指标与方法

于 2022 年 10 月 2 日和 2023 年 10 月 5 日马铃薯收获后采集耕层（0~20、20~40 和 40~60 cm）土壤样品，每小区采用“S 形”7 点采样法，采集样品后剔除石块和其他杂物，混合均匀，将采集的土壤样品放入自封袋中，带回实验室保存测定；采用浓硫酸消煮半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量；采用靛酚蓝比色法测定土壤铵态氮含量；采用酚二磺酸比色法测定土壤硝态氮含量；采用氯仿熏蒸法测定 MBN 含量^[19]，采用凯氏定氮仪一差减法测定 SON 含量^[20]。

1.4.1 土壤预处理 将新鲜土壤样品过 2.00 mm 筛后，称取约 150 g 放入培养桶内，以手感湿润疏松且不结块为宜；培养桶内分别放置盛有 25 mL 蒸馏水和 1 mol/L NaOH 溶液的烧杯各 1 个，随后密封培养桶，于 25 °C 条件下预培养 10 d。

1.4.2 熏蒸 将预处理后的湿土取一半放入小烧杯中，置于干燥器内；干燥器底部放置盛有 50 mL 1 mol/L NaOH 溶液和 50 mL 无乙醇氯仿溶液的容器，通过氯仿熏蒸后，将干燥器置于暗处静置 24 h。随后重复抽气操作，直至完全去除土壤中的氯仿残留。

1.4.3 可溶性有机氮的测定 将浸提样液与碱性过硫酸钾混合后进行高温消解，采用流动分析仪测定土壤可溶性有机总氮（soluble inorganic nitrogen, SIN）。试验操作如下：碱性过硫酸钾溶液的配制方法为，先取 40.0 g K₂S₂O₈ 与 600 mL 蒸馏水混合（试剂 a），置于 50 °C 水浴中溶解（温度≤60 °C）；另取 15 g NaOH 与 300 mL 蒸馏水混合（试剂 b），冷却至室温后，将试剂 a 与试剂 b 合并，定容至 1 L。将滤液与碱性过硫酸钾溶液等体积加入 25 mL 具塞试管中，塞紧管塞后，用纱布和线绳扎紧管塞以防弹出；将具塞试管置于高压蒸汽灭菌锅中，加热至顶压阀开始吹气时关闭阀门，继续加热，温

度达到 120 °C 后开始计时，将温度保持在 120~124 °C，恒温 30 min；待自然冷却后，打开阀门放气，移去外盖，取出试管冷却至室温，随后按住管塞将试管内液体倒置混合 2~3 次；消解后的液体可通过流动分析仪进行测定。其中，氮肥偏生产力（PFPN）计算公式为：PFPN（kg/kg）=Y/FN，式中，Y 为作物产量（kg/hm²），FN 为施氮量。氮肥农学利用效率（agronomic nitrogen use efficiency, ANUE, kg/kg）=（施氮区产量-不施氮区产量）/施氮量。

1.5 数据处理

利用 Excel 2007 软件进行数据处理并绘制表格，采用 SPSS 19.0 对试验数据进行分析，运用 Oringe 2016 作图。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤全氮含量的影响

不同肥料部分替代化学氮肥处理显著影响土壤全氮含量，且表现出明显的处理间差异（表 2）。随着土层深度的增加，土壤全氮含量逐渐减小，其中 2022 年 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤全氮含量均为 CK 处理最低，分别为 1.53、1.58 和 1.42 g/kg，RN+BM 处理 0~20 cm 土层含量最高，为 1.81 g/kg，而 RN+SM 处理 20~40、40~60 cm 土层土壤全氮含量最高，分别为 1.84 和 1.74 g/kg，三者分别较 NPK 处理显著提高了 2.89%、3.37% 和 2.95%，说明生物有机肥和腐熟羊粪有机肥部分替代氮肥能够提高土壤全氮含量，2022 年 0~20 cm 土层 RN+SM 和 RN+BM 处理均与 NPK 处理达显著差异水平，20~40 cm 土层 RN+SM 与 NPK 处理达显著差异水平，40~60 cm 土层 RN+SM 和 RN+WF 处理与 NPK 处理达显著差异水平。

2023 年土层土壤全氮含量与 2022 年规律相似，0~60 cm 土层土壤全氮含量均以 CK 处理最低，分别为 1.56、1.51 和 1.39 g/kg，RN+SM 处理均为最高，分别为 1.83、1.86 和 1.78 g/kg，RN+SM 处理较 NPK 处理分别提高 7.01%、9.41% 和 14.10%，2023 年 0~60 cm 各处理平均土壤全氮含量由低到高为 CK<NPK<RN<RN+BM<RN+WF<RN+RUN<RN+SM，2023 年 0~20 cm 土层 RN+SM 与 NPK 处理达显著差异水平，20~40 cm 土层 RN+SM、RN 和 RN+RUN 处理与 NPK 处理达显著差异水平，40~60 cm 土层 RN+SM、RN、RN+WF 和

RN+RUN 处理与 NPK 处理达显著差异水平。以上结果说明不同肥料部分替代氮肥处理均能提高土壤全氮含量,尤其是有机肥部分替代氮肥处理效果最为明显,说明施用有机肥对提高土壤全氮含量和增加土壤氮储量具有较好效果。

表 2 不同肥料部分替代氮肥对土壤全氮含量的影响
Table 2 Effects of partial replacement of nitrogen fertilizer by different fertilizers on soil total nitrogen content g/kg

年份 Year	处理 Treatment	土层 Soil layer		
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
2022	CK	1.53±0.02c	1.58±0.03c	1.42±0.02c
	NPK	1.65±0.04bc	1.69±0.03bc	1.51±0.02bc
	RN	1.73±0.03ab	1.78±0.04ab	1.69±0.03ab
	RN+WF	1.75±0.05ab	1.72±0.03abc	1.73±0.03a
	RN+SM	1.78±0.05a	1.84±0.07a	1.74±0.05a
	RN+BM	1.81±0.06a	1.74±0.05abc	1.69±0.04ab
	RN+RUN	1.76±0.04ab	1.77±0.06ab	1.54±0.06bc
2023	CK	1.56±0.03c	1.51±0.03d	1.39±0.01d
	NPK	1.71±0.04b	1.71±0.04c	1.56±0.03c
	RN	1.68±0.04b	1.79±0.05b	1.71±0.04b
	RN+WF	1.79±0.05ab	1.73±0.04c	1.69±0.05b
	RN+SM	1.83±0.06a	1.86±0.07a	1.78±0.05a
	RN+BM	1.72±0.05b	1.72±0.05c	1.73±0.04ab
	RN+RUN	1.81±0.06ab	1.79±0.06b	1.62±0.03bc

同列不同小写字母表示同年不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$), 下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments in the same year ($P < 0.05$), the same below.

各施肥处理在不同程度上改变了土壤铵态氮含量(表 3)。随着土层深度的增加,土壤铵态氮含量出现逐渐降低的趋势。2022 年 0~20、20~40 和 40~60 cm 土壤铵态氮含量均以 RN+SM 处理含量最高,较 NPK 处理分别提高 54.76%、52.16%和 28.41%,0~40 cm 土层土壤铵态氮含量 RN+SM、RN+BM 和 RN+RUN 处理与 NPK 处理达显著差异水平,RN 和 RN+WF 处理与 NPK 处理差异不显著。2023 年各土层铵态氮含量与 2022 年规律基本一致,0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤铵态氮含量均以 RN+SM 处理最高,分别较 NPK 处理提高 33.52%、63.97%和 18.51%,20~40 cm 土层土壤铵态氮含量 RN+SM、RN+BM 和 RN+RUN 处理与 NPK 处理达显著差异水平。说明不同肥料配施可以提高土壤铵态氮含量。

2.2 不同施肥处理对土壤硝态氮含量的影响

不同施肥处理对土壤硝态氮含量的影响存在差异(表 4)。土壤硝态氮含量随土层深度的增加

表 3 不同施肥处理对土壤铵态氮含量的影响
Table 3 Effects of different fertilization treatments on soil ammonium nitrogen content mg/kg

年份 Year	处理 Treatment	土层 Soil layer		
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
2022	CK	3.98±0.04c	3.56±0.07c	3.53±0.09c
	NPK	4.51±0.06b	4.62±0.18b	4.47±0.15ab
	RN	4.25±0.03b	4.54±0.24b	4.06±0.27b
	RN+WF	5.87±0.16ab	6.53±0.15ab	5.43±0.19a
	RN+SM	6.98±0.47a	7.03±0.26a	5.74±0.28a
	RN+BM	6.03±0.25a	6.71±0.31a	5.72±0.34a
	RN+RUN	5.98±0.23a	6.61±0.32a	5.67±0.26a
2023	CK	3.54±0.02c	3.25±0.15c	2.74±0.04c
	NPK	5.28±0.25ab	4.83±0.32c	4.32±0.17ab
	RN	4.32±0.13b	5.77±0.26bc	3.25±0.09b
	RN+WF	4.88±0.18b	6.41±0.17ab	4.55±0.23a
	RN+SM	7.05±0.27a	7.92±0.37a	5.12±0.22a
	RN+BM	6.73±0.33a	6.86±0.33a	5.07±0.31a
	RN+RUN	6.11±0.41a	6.55±0.24a	4.96±0.19a

出现先升高后降低的趋势,2022 年 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤硝态氮含量均以 RN+SM 处理最高,分别较 NPK 处理提高 36.77%、27.49%和 59.59%,其次是 RN+BM 处理含量最高,在 0~20 和 40~60 cm 土层中,RN+SM 和 RN+BM 处理与 NPK 处理土壤硝态氮含量差异显著,除 CK 处理外,其他处理与 NPK 处理无显著差异,40~60 cm 土层 RN+WF、RN+SM、RN+BM 和 RN+RUN 处理土壤硝态氮含量与 NPK 处理均无显著差异。

表 4 不同施肥处理对土壤硝态氮含量的影响
Table 4 Effects of different fertilization treatments on soil nitrate nitrogen content mg/kg

年份 Year	处理 Treatment	土层 Soil layer		
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
2022	CK	12.27±0.56c	12.96±0.45c	7.99±0.31d
	NPK	17.54±0.63b	19.57±0.63b	9.85±0.38c
	RN	17.86±0.58b	18.78±0.58b	9.76±0.41c
	RN+WF	18.64±0.72b	19.95±0.61b	12.69±0.46b
	RN+SM	23.99±0.85a	24.95±0.79a	15.72±0.51a
	RN+BM	22.30±0.93a	22.95±0.72a	14.81±0.49a
	RN+RUN	17.68±0.75b	22.71±0.68ab	14.83±0.56a
2023	CK	13.15±0.63c	12.44±0.35c	9.11±0.42b
	NPK	17.35±0.57b	20.13±0.69ab	14.32±0.49a
	RN	16.33±0.57b	17.25±0.58b	9.79±0.38b
	RN+WF	16.88±0.62b	20.57±0.72ab	10.31±0.42b
	RN+SM	24.15±0.73a	24.18±0.83a	15.31±0.51a
	RN+BM	23.71±0.68a	23.33±0.76a	14.15±0.48a
	RN+RUN	18.67±0.71b	23.18±0.81a	13.52±0.55ab

2023 年各土层土壤硝态氮含量 RN+SM 处理最

高, 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤硝态氮含量较 NPK 处理分别提高了 39.19%、20.11% 和 6.91%, 0~20 cm 土层土壤硝态氮含量 RN+SM 和 RN+BM 处理与 NPK 处理差异显著, 除 CK 处理外, 其他处理与 NPK 处理无显著差异, 20~40 和 40~60 cm 土层硝态氮含量与 NPK 处理无显著差异。以上结果表明, 有机肥部分替代氮肥 (特别是 RN+SM 处理) 能显著提升土壤硝态氮储量。

2.3 不同施肥处理对土壤 SON 含量的影响

不同施肥处理对土壤 SON 含量的提升效果显著, 且随着土层深度增加, SON 含量逐渐降低, 表

层土壤 (0~20 cm) 对施肥响应最为敏感 (图 1)。2022 年和 2023 年均表现出随着土层深度的增加土壤 SON 含量逐渐减小的趋势, 2022 年, 各土层土壤 SON 含量由大到小均为 RN+SM>RN+BM>RN+RUN>RN+WF>NPK>RN>CK。其中 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层 RN+SM 处理土壤 SON 含量较 NPK 处理分别提高 30.20%、40.13% 和 46.17%。2023 年各土层土壤 SON 含量与 2022 年基本一致, 且 RN+SM 处理在 0~20、20~40 cm 土层含量最高, RN+BM 处理在 40~60 cm 土层含量最高, 较 NPK 处理分别提高 40.34%、61.59% 和

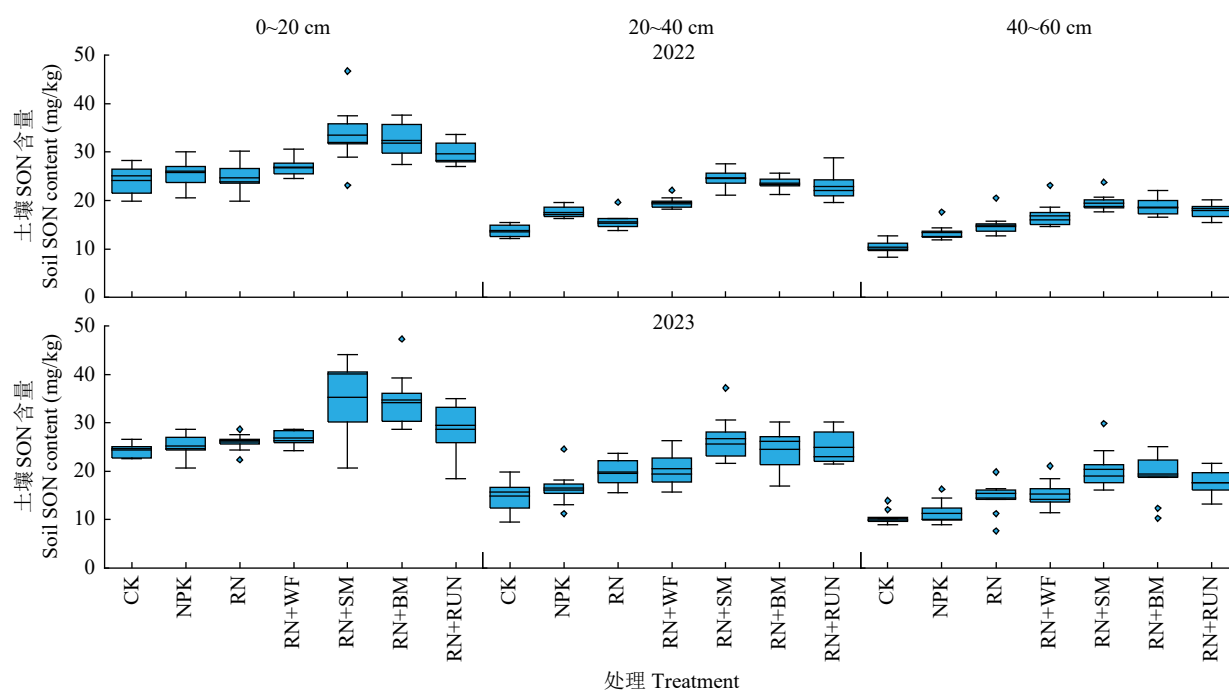


图 1 不同肥料部分替代氮肥对土壤 SON 含量的影响

Fig.1 Effects of partial replacement of nitrogen fertilizer by different fertilizers on soil SON content

79.59%。

2.4 不同施肥处理对土壤 MBN 含量的影响

不同施肥处理显著提高了 MBN 含量, 且随土层深度增加, MBN 含量逐渐降低, 表层土壤 (0~20 cm) 对施肥响应最为明显 (图 2)。2022 年各施肥处理 0~20 cm 土层土壤 MBN 含量高于 20~40 和 40~60 cm 土层, 且有机无机配施处理高于化肥处理, 0~20、20~40 和 40~60 cm 土层土壤 MBN 含量以 RN+SM 处理最高, 分别较 NPK 处理提高了 26.15%、27.80% 和 44.57%。2023 年各土层土壤 MBN 含量与 2022 年变化趋势一致, RN+SM 处理土壤 MBN 含量最高, 较 NPK 处理分别提高 36.42%、37.81% 和 55.27%, 说明有机肥在持续供

氮和提升微生物活性方面效果显著。

2.5 不同施肥处理对马铃薯产量和氮肥农学利用效率的影响

施肥显著提高了马铃薯产量、PFPN 和 ANUE, 不同处理间存在显著差异 (表 5)。其中, 2022 年 RN+SM 处理马铃薯产量最高, 为 35 634.51 kg/hm², 比 NPK 处理增产 9.42%, 且显著高于 CK、NPK、RN 和 RN+WF 处理, 与 RN+BM 和 RN+RUN 处理差异不显著。2023 年 RN+SM 处理马铃薯产量最高, 为 34 938.40 kg/hm², 比 NPK 处理增产 13.90%, 同时也显著高于 NPK、RN 和 RN+WF 处理, 与 RN+BM 和 RN+RUN 处理差异不显著。其次为 RN+BM 处理, 产量为 34 326.00 kg/hm²。

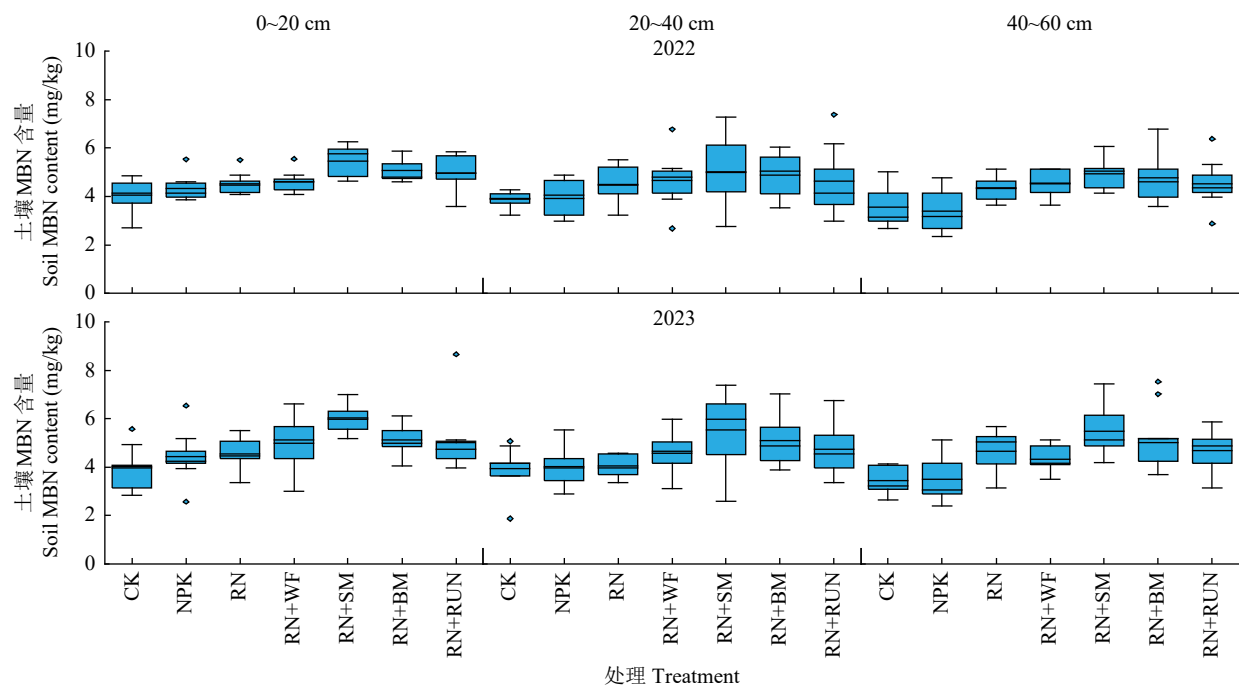


图 2 不同肥料部分替代氮肥对土壤 MBN 含量的影响
Fig.2 Effects of partial replacement of nitrogen fertilizer by different fertilizers on soil MBN content

表 5 不同施肥处理对马铃薯产量和 ANUE 的影响
Table 5 Effects of different fertilization measures on potato yield and ANUE

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield (kg/hm ²)	氮肥偏 生产力 PPFN (kg/kg)	氮肥农学 利用效率 ANUE (kg/kg)
2022	CK	28 798.35±145.67c	—	—
	NPK	32 564.70±234.43b	120.62±8.56d	13.88±3.13c
	RN	30 256.45±174.34c	140.07±10.45c	6.75±1.42d
	RN+WF	32 577.46±234.76b	150.82±12.56b	17.49±2.35b
	RN+SM	35 634.51±225.83a	164.97±7.89a	31.64±3.87a
	RN+BM	34 785.97±236.65a	161.04±8.24a	27.72±3.89a
	RN+RUN	34 567.34±218.78a	160.03±10.76a	26.70±2.97ab
2023	CK	28 487.70±156.76c	—	—
	NPK	30 672.23±215.58b	113.60±10.44c	8.09±1.69c
	RN	29 457.85±163.34bc	136.37±13.67b	4.49±0.76d
	RN+WF	30 979.42±165.45b	143.42±12.98b	11.53±2.84c
	RN+SM	34 938.40±232.67a	161.75±8.54a	29.86±3.56a
	RN+BM	34 326.00±215.89a	158.91±9.45a	27.02±4.02a
	RN+RUN	33 245.77±245.67ab	153.91±10.58ab	22.02±3.15b

氮肥利用率的高低反映了作物氮肥施用的基础上吸收能力的大小，2022 年和 2023 年不同施肥措施 PFPN 和 ANUE 均以 RN+SM 处理最高。2022 年 RN+SM 处理分别较 NPK 处理提高 36.76%和 127.95%，2023 年分别提高 42.38%和 269.10%，且 RN+SM 和 RN+BM 处理与 NPK 处理差异显著。说明生物有机肥对提高产量和 ANUE 有显著作用。

综合来看，RN+SM 处理在产量和 ANUE 方面

均表现最佳，其次是 RN+BM 处理，两者均表明有机肥替代部分化肥的显著优势；RN+RUN 处理表现出较好的增产效果和氮肥利用潜力；RN+WF 处理在快速供氮方面较为突出；RN 处理尽管减少了化肥用量，但其产量和 ANUE 仍显著高于 CK。表明有机肥与缓释肥部分替代化肥（尤其是 RN+SM 和 RN+BM 处理）是提高马铃薯产量和 ANUE 的理想施肥策略。

3 讨论

3.1 不同施肥处理替代化学氮肥对土壤不同形态氮素的影响

施肥是提高土壤氮素含量、增强土壤供氮能力的重要措施^[21]。肥料的投入不仅能直接为作物提供氮素，也能通过残留部分维持土壤氮库水平。然而，氮肥施用也存在淋溶和挥发损失的风险^[22]。高佳蕊等^[23]研究表明，外源有机氮进入土壤后固持率可达 50%以上，这些残留的有机氮不易损失，可显著提高土壤有机氮的供应能力。刘华等^[24]研究发现，在 20%有机肥替代化学氮肥的条件下，土壤全氮含量较单一施化肥增加 5.2%~8.5%；郭勇等^[25]研究表明，长期有机无机配施能显著提高土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量，其中 30%有机肥替代效果最佳。本研究结果与上述研究一致，表明有机肥部分替代

化肥能有效提升土壤氮素含量，但提升幅度及机制不同。

本试验结果显示，与 NPK 处理相比，RN+SM（腐熟羊粪）和 RN+BM（生物有机肥）处理显著提高了 0~60 cm 土层土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量，这一结果与郭勇等^[25]的研究类似，但提升幅度更大。这可能是由于腐熟羊粪施入后，其富含的有机质和氮素为土壤微生物提供了丰富的碳源和氮源，显著促进了微生物活性，增强了氮素矿化速率，从而持续为土壤氮库和作物生长提供有效氮。相比之下，RN+RUN（缓释尿素）处理对深层（40~60 cm）土壤氮素的提升效果显著，表现出优异的长效供氮能力，这表明缓释尿素能有效调控氮素释放速率，与作物需氮节奏高度匹配。相比之下，RN+WF（水溶肥）处理主要在浅层（0~20 cm）土壤氮素提升方面表现出色，这可能与水溶肥溶解快速、短期内氮素供应能力较强有关。而 RN（减量化肥）处理在减少化肥用量的同时，全氮和硝态氮含量提升幅度较低，但依然显著高于 CK 处理，说明化肥减量的合理性和潜力。

本研究表明，除提升幅度显著外，腐熟羊粪和生物有机肥替代化学氮肥还能兼顾表层和深层土壤氮库的平衡改良，尤其是 RN+SM 处理在促进土壤氮素积累、优化源库关系和增强微生物活性方面效果尤为显著。究其原因，腐熟有机肥施入后，不仅直接增加了土壤氮库，还为微生物提供了长期稳定的养分供应，显著提升了土壤肥力和氮素供应能力，表明有机肥替代化肥的合理配施是实现土壤培肥、提高氮素利用效率和促进作物增产的有效策略，尤其以腐熟羊粪配施最为优越。

3.2 不同施肥处理替代化学氮肥对土壤活性氮的影响

SON 和 MBN 是土壤活性氮的重要组成部分，对氮素供应能力和循环过程具有重要影响^[25-28]。已有研究^[13]表明，有机肥施用可以显著提高土壤 SON 和 MBN 含量，从而增强土壤氮素储量和供氮能力，本研究结果与此一致，同时发现其含量表现出随土层深度增加而逐渐减小的趋势，但不同处理效果存在显著差异。

本试验结果显示，RN+SM 处理对 SON 和 MBN 含量的提升效果最为显著。2022 年和 2023 年 0~20 cm 土层，RN+SM 处理 SON 含量较 NPK（全量化肥）分别提高 30.17% 和 40.34%，RN+BM

处理次之，这一结果与前人^[29]研究相符，同时提升幅度更大。这可能是由于腐熟羊粪施入后，不仅直接提供了丰富的有机碳和氮源，还显著促进了土壤微生物活性，使更多的氮素以微生物吸收和同化的形式固持在土壤中，从而减少氮素流失并增加土壤氮储量。RN+RUN 处理在提升深层（40~60 cm）土壤 SON 和 MBN 方面效果突出，缓释尿素通过调控氮素释放速率，与作物需氮节奏相匹配，不仅提高了氮素利用效率，还增强了土壤深层活性氮储量。RN+WF 处理主要在表层（0~20 cm）土壤 SON 和 MBN 含量提升方面表现显著，水溶肥溶解迅速、短期供氮能力较强的特点使其更适合快速提升浅层土壤活性氮含量。相比之下，RN 处理虽然减少了 20% 的化肥用量，但其 SON 和 MBN 含量仍显著高于 NPK 处理，显示出化肥减量的合理性。

综上所述，本研究表明有机肥部分替代化学氮肥显著提高了土壤活性氮（SON 和 MBN）含量，其中 RN+SM 处理表现最优，既提升了表层和深层 SON 和 MBN 含量，又增强了土壤微生物活性和氮素固持能力。其机制在于腐熟羊粪提供了丰富的有机质和氮源，促进了微生物的繁殖和活性，更多的氮素被微生物同化、固持在土壤中，同时减少了氮素的流失，显著增强了土壤氮素储量和供氮能力，表明有机肥替代化肥是实现土壤培肥和氮素高效管理的有效途径，尤其以 RN+SM 处理效果最佳。

3.3 不同施肥处理替代化学氮肥对马铃薯产量和氮肥农学利用效率的影响

为可持续满足粮食需求的增长，提高土壤养分利用效率已成为农业生产的重要研究方向。已有研究表明，部分氮肥替代处理可以在不降低作物产量的前提下显著提高氮肥利用效率。孙晓等^[28]研究发现，缓释尿素替代 20% 氮肥不会降低作物产量，且氮肥利用效率提高了 2.26%~12.69%；刘飞等^[29]研究表明，缓控释肥替代 20% 氮肥同样不会影响马铃薯产量，但氮肥利用效率较常规肥料提高了 13.71%。朱银浩等^[30]通过 Meta 分析指出，有机肥替代氮肥能显著提高粮食作物产量和氮肥利用效率，其中高怡安等^[31]研究表明，有机肥替代化肥可以使马铃薯产量和氮肥利用效率分别提高 12.6% 和 24.8%。本研究结果与上述研究一致，有机肥替代化学氮肥能在提升马铃薯产量和 ANUE 方面发挥重要作用。

与 NPK 处理相比，RN+SM 处理在提升马铃薯

产量和 ANUE 方面表现最优。2022 年和 2023 年, RN+SM 处理产量分别较 NPK 处理提高 9.42%和 13.90%, PFPN 分别提高 36.76%和 42.38%, ANUE 分别提高 127.95%和 269.10%。这一结果优于前人^[2]研究, 原因可能在于腐熟羊粪不仅直接提供了有机氮, 还通过促进土壤微生物活性, 增强了土壤氮素的持续供应能力, 从而更有效地匹配了作物需氮规律, 显著提高了 ANUE。RN+BM 处理次于 RN+SM 处理, 生物有机肥中的功能微生物可能通过加速有机质矿化和促进养分转化, 进一步提高了土壤氮素供应能力, 增强了 ANUE。RN+RUN 处理通过调控氮素释放速率, 减少氮素损失, 提高了 ANUE, 表现出长效增产潜力。RN+WF 处理在快速供氮方面表现较好, 但产量和 ANUE 提升幅度较小, 水溶肥的快速释放特性可能导致短期内供氮能力较强, 但持续性不足。相比之下, RN 处理在减少 20%化肥用量的情况下, 产量和 ANUE 较 NPK 处理有所降低, 但仍显著高于 CK 处理。上述结果显示出化肥减量的潜力, 但替代肥料的补充作用仍需进一步优化。

本研究表明有机肥替代化学氮肥能显著提高马铃薯产量和 ANUE, 其中 RN+SM 处理效果最佳, 兼具高产与高效的优点; 其次是 RN+BM 处理, 表现出稳定供氮的能力; RN+RUN 处理展现出长效供氮潜力; RN+WF 则更适合短期快速补充氮素。本研究系统验证了有机肥替代化肥在提升产量和优化 ANUE 方面的显著作用, 为科学施肥和农业可持续发展提供了理论依据。

4 结论

20%有机肥+80%化肥 (RN+SM 处理) 在提升土壤氮素储量、优化氮素供应能力、促进马铃薯增产及提高氮肥农学利用效率方面均表现最优, 兼具表层与深层土壤改良能力, 是本试验处理中最适合在内蒙古阴山北麓地区推广应用的科学施肥模式。

参考文献

- [1] 杨冰, 孟祥海, 王佰成, 等. 不同耕作及秸秆还田方式对土壤养分及微生物生物量碳氮的影响. 黑龙江农业科学, 2024(7): 24-29.
- [2] 郭雪娇, 张婷婷, 梁俊梅, 等. 不同有机肥替代比例对内蒙古阴山北麓地区马铃薯产量的影响. 北方农业学报, 2024, 52(1): 26-35.
- [3] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 不同有机无机肥氮投入比例对双季水稻生理特性与产量的影响. 中国农业科技导报, 2020,

22(6): 149-160.

- [4] 郭宝玲, 郑祥洲, 余居华, 等. 氮肥形态耦合促进马铃薯生长. 中国土壤与肥料, 2023(5): 1-7.
- [5] 冯冰聪, 马杰, 刘勇, 等. 氮素在农田土壤中迁移转化的研究进展. 农业资源与环境学报, 2025, 42(2): 277-287.
- [6] 胡新元, 柳永强, 谢奎忠, 等. 旱区有机肥替代氮肥对多年连作土壤理化性质和马铃薯品质的影响. 作物杂志, 2023(4): 159-164.
- [7] 陈阳阳. 基于阴山北麓马铃薯产区土壤铵态氮转化的马铃薯氮素优化管理. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [8] 李俊杰, 邹洪琴, 许发辉, 等. 土壤微生物量氮对小麦各生育期氮素形态的调控. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(8): 1321-1329.
- [9] 付强, 张平良, 刘晓伟, 等. 有机肥替代部分化肥对半干旱区马铃薯产量、水分和氮素利用率的影响. 中国土壤与肥料, 2023(10): 143-149.
- [10] 商跃凤. 有机无机复混肥对水稻氮素利用率的影响. 西南农业大学学报, 2001, 23(3): 262-266.
- [11] 刘玉颖, 沈丰, 杨劲峰, 等. 长期施肥棕壤大豆产量的演变及土壤氮素分布特征. 中国农业科学, 2023, 56(10): 1920-1934.
- [12] Wang J, Han G L, Duan Y Y, et al. Effects of different organic fertilizer substitutions for chemical nitrogen fertilizer on soil fertility and nitrogen use efficiency of foxtail millet. Agronomy, 2024, 14(4): 866.
- [13] 高鹏, 雷星宇, 鲁耀雄, 等. 有机氮部分替代化学氮肥对土壤有机氮组分的影响. 中国土壤与肥料, 2023(10): 11-18.
- [14] 李超. 有机肥替代化肥氮对马铃薯氮素利用及土壤氮素转化的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [15] 李泽碧, 黄娟, 张亚勤, 等. 推荐施肥量下控释肥替代普通尿素提高高粱产量和氮肥生产力. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(1): 49-62.
- [16] 冯朋博, 康建宏, 梁熠, 等. 普通尿素与控释尿素配比比例和方法对土壤氮素供应和春玉米产量的影响. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 692-704.
- [17] 吕真真, 吴向东, 刘益仁, 等. 长期不同比例有机肥-化肥配施下红壤性水稻土氮素矿化特征. 中国土壤与肥料, 2021(4): 47-53.
- [18] 陈杨, 樊明寿, 康文钦, 等. 内蒙古阴山丘陵地区马铃薯施肥现状与评价. 中国土壤与肥料, 2012(2): 104-108.
- [19] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [20] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44: 93-101.
- [21] 孙梦媛, 刘景辉, 米俊珍, 等. 控释尿素对旱作马铃薯产量及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 7-15.
- [22] 全智, 刘轩昂, 刘东. 土壤可溶性有机氮研究进展. 应用生态学报, 2022, 33(1): 277-288.
- [23] 高佳蕊, 方胜志, 张玉玲, 等. 东北黑土不同开垦年限稻田土壤有机氮矿化特征. 中国农业科学, 2022, 55(8): 1579-1588.
- [24] 刘华, 彭复细, 陈俊, 等. 不同有机肥替代 20%化肥氮的稻田土壤有机氮组分积累特征. 湖南农业科学, 2024(8): 29-35.
- [25] 郭勇, 文丽, 石丽红, 等. 长期不同施肥模式对大麦-双季稻田根际土壤有机氮组分的影响. 土壤, 2024, 56(2): 273-280.
- [26] 陈瑞英. 水氮互作对马铃薯产量和氮素吸收利用特性的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- [27] 陈懿, 林英超, 杨志晓, 等. 炭基肥对黄壤烤烟生理和氮素吸

- 收与平衡的影响. 土壤学报, 2022, 59(3): 864-872.
- [28] 孙晓, 景建元, 吕慎强, 等. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 848-855.
- [29] 刘飞, 诸葛玉平, 陈增明, 等. 控释肥对马铃薯产量、氮素利用率及经济效益的影响. 中国农学通报, 2011, 27(12): 215-219.
- [30] 朱银浩, 尹娟, 马正虎, 等. 有机肥代替氮肥对中国主要粮食产量的影响. 环境科学, 2025, 46(1): 478-488.
- [31] 高怡安, 程万莉, 张文明, 等. 有机肥替代部分化肥对甘肃省中部沿黄灌区马铃薯产量、土壤矿质氮水平及氮肥效率的影响. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(2): 54-60, 68.

Effects of Replacing Chemical Nitrogen Fertilizer with Different Fertilizers on Soil Nitrogen Fractions and Potato Yield

Du Erxiao^{1,2,3}, Zhang Lirong⁴, Ren Yongfeng^{1,2,3}, Gao Hongyan^{1,2,3}, Zhang Jun^{1,2,3},
Zhang Peng^{1,2,3}, Gao Yu^{1,2,3}, Wang Haixia^{1,2,3}, Zhao Peiyi^{1,2,3}

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

⁽²⁾Inner Mongolia Key Laboratory of Dryland Farming, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China;

⁽³⁾Science Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation in Inner Mongolia,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot 011705, Inner Mongolia, China;

⁽⁴⁾The Second Middle School of Jining District of Ulanqab, Ulanqab 012099, Inner Mongolia, China)

Abstract A field plot experiment was conducted to evaluate the effects of partial replacement of chemical nitrogen fertilizer with different fertilizers on the content of total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, soluble organic nitrogen (SON), and microbial biomass nitrogen (MBN) in 0-60 cm soil. Seven treatments were established: no nitrogen application (CK), conventional nitrogen fertilizer application (NPK), reduced nitrogen application (RN), and RN combined with water-soluble fertilizer (RN+WF), decomposed sheep manure (RN+SM), bio-organic fertilizer (RN+BM), or controlled-release urea (RN+RUN). The results showed that all substitution treatments significantly increased soil total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, SON, and MBN contents and improved agronomic nitrogen use efficiency compared with CK treatment. In 2022, the RN+SM treatment exhibited the most pronounced effects on enhancing soil nitrogen status and agronomic nitrogen use efficiency. Compared with the NPK treatment, SON and MBN contents in the 0-20 cm soil layer increased by 30.20% and 26.15% in 2022 and by 40.34% and 43.57% in 2023, respectively. Nitrogen partial factor productivity and agronomic nitrogen use efficiency increased by 36.76% and 127.95% in 2022, and by 42.38% and 269.09% in 2023, respectively. Potato yield under RN+SM increased by 9.42% and 13.90% compared with NPK in 2022 and 2023, respectively. Overall, the RN+SM treatment showed superior performance in improving soil fertility and increasing yield, indicating its suitability for large-scale application in the northern foothills of the Yinshan Mountains, Inner Mongolia.

Key words Northern foothills of the Yinshan Mountains; Nitrogen fertilizer reduction and replace; Soil nitrogen; Agronomic nitrogen use efficiency; Potato