

有机培肥措施对马铃薯光合特性、养分含量及产量的影响

张乐^{1,2} 韩云飞^{2,3,4} 杜二小^{2,3,4} 李保成² 伞薪潼²
刘新雨^{1,2} 王艳莉⁵ 赵沛义^{2,3,4} 任永峰^{2,3,4}

¹内蒙古农业大学农学院, 010019, 内蒙古呼和浩特; ²内蒙古自治区农牧业科学院, 010031, 内蒙古呼和浩特;

³内蒙古旱作农业重点实验室, 010031, 内蒙古呼和浩特; ⁴农业农村部内蒙古耕地保育科学观测试验站, 010031, 内蒙古呼和浩特; ⁵内蒙古自治区兴安盟农牧技术推广中心, 137400, 内蒙古乌兰浩特)

摘要 针对内蒙古阴山北麓农牧交错区土壤结构性差、养分供应不足和马铃薯产量低等问题, 通过2年田间随机区组试验, 以常规施肥为对照(CK), 设置化肥减量配施羊粪(NPK+SD)、化肥减量配施生物炭(NPK+B)和化肥减量配施微生物菌肥(NPK+MF)3个处理, 对比分析不同处理下马铃薯植株叶面积指数(LAI)、SPAD值、光合性能、植株养分积累量和干物质积累量等动态变化特征。结果表明, 在块茎膨大期NPK+MF处理可显著提高马铃薯LAI和叶片光合性能, 其中叶片SPAD值较CK处理显著提高8.04%, 与NPK+SD和NPK+B处理无显著差异, NPK+MF处理净光合速率较CK、NPK+SD和NPK+B处理分别平均显著提高11.31%、7.66%和4.92%。NPK+MF处理下, 随着马铃薯生育进程的推进, 植株养分由茎叶向块茎转运, 马铃薯叶片、茎秆、根系和块茎的氮、磷、钾积累量均显著提高。在马铃薯生育后期, 块茎中氮、磷和钾的分配比例分别提高了90.58%、178.78%和226.06%。NPK+MF处理产量表现最优, 平均为40 054 kg/hm², 较CK处理平均显著提高25.58%。本试验明确了化肥减量配施微生物菌肥为阴山北麓农牧交错区地力提升和土肥资源高效利用的有效培肥方式。

关键词 马铃薯; 有机培肥; 光合特性; 养分积累; 产量

马铃薯作为我国第四大主粮作物, 在保障粮食安全方面有着重要地位^[1]。内蒙古自治区全区马铃薯种植面积约22.4万hm², 是中国马铃薯主产地之一^[2], 其中阴山北麓农牧交错区是内蒙古马铃薯主产区^[3], 该区域在马铃薯种植过程中普遍存在养分管理水平和养分利用效率较低^[4-6]及化肥施用过量^[7]等问题。因此, 在以绿色发展为导向的新时代背景下, 采取合理的培肥措施是保证作物稳产和培肥地力的重要手段^[8]。相关研究^[9-12]表明, 单施化肥会导致土壤质量严重下降, 施用有机肥虽然可以提高土壤养分含量, 但养分供应效率低下, 而通过施用化肥配施有机物料进行合理培肥是实现土壤培肥和作物增产的有效途径。有机物料普遍具有来源广泛、生产成本较低和绿色高效等优点^[13], 在调节作物生长^[14]、改善土壤生态^[15]及增强土壤微生物活性^[16]等方面扮演重要角色。

适合在阴山北麓农牧交错区进行土壤有机培肥的措施主要有施用羊粪、生物炭和微生物菌肥等^[17-18]。冶秀香等^[19]研究表明, 配施羊粪的农田作

物群体长势更为茂盛, 其叶面积指数和净光合速率显著高于单施化肥; 高哲^[20]研究指出, 施用羊粪后马铃薯植株氮、磷和钾积累量较单施化肥处理显著提高50%以上。配施生物炭可有效提高马铃薯光合能力、叶面积指数和叶绿素含量^[21]; 适量添加亦可促进马铃薯植株氮、磷和钾养分的累积^[22]。此外, 施微生物菌肥显著提高马铃薯干物质积累量的同时, 也减缓了生育后期光合速率和SPAD值下降^[23]; 章孜亮等^[24]研究表明, 施用微生物菌剂处理收获期单株块茎数、单株产量和大中薯质量百分比均有不同程度的提高, 可较常规施肥增产7.9%。

以上研究在马铃薯养分优化管理及土壤质量培育等方面提供了有效支撑, 但在阴山北麓农牧交错区针对马铃薯有机培肥措施对植株光合及养分积累特性和各器官间分配规律的研究目前仍不足。鉴于此, 本试验选用多种有机物料与化肥配施, 研究其对马铃薯叶面积指数、光合特性、植株养分含量和产量的影响, 探究不同培肥措施对马铃薯养分吸收与分配规律, 明确有利于马铃薯高产稳产的土

作者简介: 张乐, 研究方向为旱地作物栽培与生理生态研究, E-mail: 226373659@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: zhp1972@163.com; 任永峰为共同通信作者, 主要从事旱作农业研究, E-mail: ren Yongfeng_1984@163.com

基金项目: 内蒙古农牧业创新基金项目(2022CXJJN10); 国家重点研发计划项目(2021YFD1901104); 内蒙古自治区科技重大专项(2020ZD0005-04)

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-10-14; 网络出版日期: 2024-10-17

壤培肥方式,为阴山北麓农牧交错区地力提升和土肥资源高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022–2023 年在内蒙古阴山北麓旱作区呼和浩特市武川县东后水泉村 (41°09' N,

111°19' E) 进行,该地位于北方农牧交错带中段,属于中温带大陆性季风气候,海拔 1600 m 左右,年均气温 3.5~4.5 °C,年均降水量 280~350 mm,无霜期 110 d 左右,土壤类型以砂质栗钙土为主,种植制度为一年一熟制。该试验地土壤基本性质为碱解氮 36.7 mg/kg,有效磷 9.2 mg/kg,速效钾 117.1 mg/kg,有机质 11.6 g/kg, pH 8.38。图 1 为

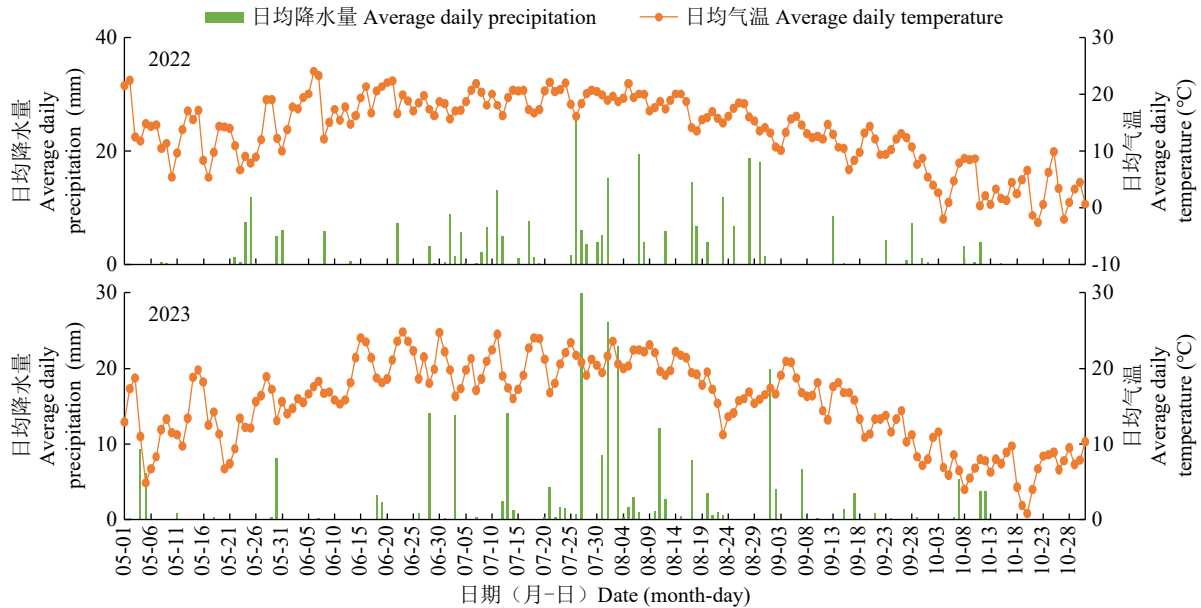


图 1 2022–2023 年马铃薯生长季降水量及气温情况

Fig.1 Precipitation and temperature during the potato growing season in 2022-2023

2022–2023 年马铃薯生长季降水量及气温情况。

1.2 试验设计

采用单因素随机区组设计,以常规施肥为对照 (CK: N 150 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 150 kg/hm²),设置化肥配施羊粪 (NPK+SD: 羊粪 18 000 kg/hm²、N 6 kg/hm²、P₂O₅ 12 kg/hm²、K₂O 60 kg/hm²)、化肥配施生物炭 (NPK+B: 生物炭 9000 kg/hm²、N 51 kg/hm²、P₂O₅ 84 kg/hm²、K₂O 42 kg/hm²) 和化肥配施微生物菌肥 (NPK+MF: 微生物菌肥 1800 kg/hm²、N 114 kg/hm²、P₂O₅ 84 kg/hm²、K₂O 114 kg/hm²) 3 个处理,3 次重复,各处理遵循总养分等量原则。羊粪为当地养殖场堆腐羊粪 (N 0.8%、P₂O₅ 0.6%、K₂O 0.5%),生物炭选用以玉米秸秆为原料的生物炭 (N 1.1%、P₂O₅ 0.4%、K₂O 1.2%),微生物菌肥选用当地有机肥料 (N 2.0%、P₂O₅ 2.0%、K₂O 2.0%)。羊粪、微生物菌肥和生物炭在播种前混合均匀后基施;在苗期、块茎形成期和块茎膨大期进行氮肥 (60 kg/hm²) 和钾肥 (60 kg/hm²) 追施。马铃薯品种为大丰 10

号,采用起垄穴播,小区为面积 30 m² (5 m×6 m) 的 5 行区,垄上播种 2 行,小行距 30 cm,大行距 90 cm,于 5 月 1 日前后完成播种,10 月 10 日前后完成收获,其他田间管理同大田一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 叶面积指数 分别在马铃薯苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期每小区取 3 株马铃薯,将整株叶片摘下,选取 20 片代表叶,用直径为 1 cm 的打孔器沿叶脉打孔,称取小圆叶鲜重和整株叶片鲜重。单株叶面积 (cm²/株) = 样本叶面积 (cm²) × 叶片总重量 (g) / 样本重量 (g),叶面积指数 (LAI) = (单株叶面积 × 单位土地面积内的株数) / 单位土地面积。

1.3.2 叶绿素相对含量 (SPAD 值) 于马铃薯苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期在晴朗天气,利用 SPAD-502 型叶绿素测定仪 (柯尼卡美能达,日本) 测定顶部叶下第 3 片叶叶脉两侧的 SPAD 值,每小区随机选取 5 株,取平均数。

1.3.3 光合特性 于马铃薯苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期用 CIRAS-3 型便携式光合仪 (PP Systems, 美国), 采用标准叶室, 开放式气路, 在晴朗无风的上午测定各处理马铃薯的净光合速率 (P_n)。每小区随机选择 5 株长势一致的马铃薯植株测定其相同叶位。

1.3.4 干物质积累量 于马铃薯苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期每个小区取样 3 株, 带回室内洗净晾干, 分器官 (根、茎、叶和块茎) 称量鲜重后放在 105 °C 的恒温箱内杀青 30 min, 然后在 80 °C 烘干至恒重后, 测定干物质积累量。

1.3.5 植株养分含量 将干样粉碎过 0.2 mm 筛装袋用于养分测定。采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮法消煮, 采用凯氏定氮法测定全 N 含量, 采用钒钼黄比色法测定全 P 含量, 采用火焰光度计法测定全 K 含量。

1.3.6 产量 在 10 月初马铃薯成熟时, 对各小区中间 2 垄 (12 m²) 进行收获测产。

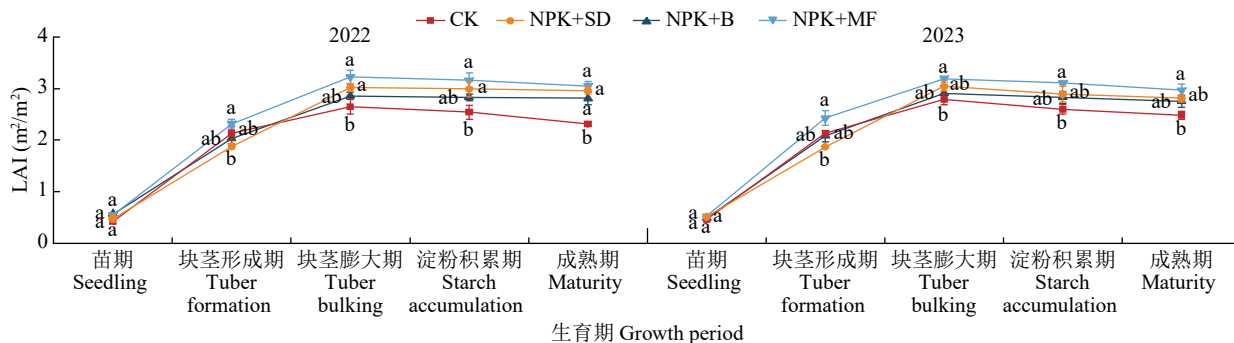
1.4 数据分析

数据采用 Microsoft Excel 2016 进行整理分析, 利用 SPSS 27.0 统计学软件进行单因素方差分析和 Pearson 相关分析, 采用 Duncan 法进行多重比较, 采用 Origin 2021 进行偏最小二乘法分析及作图。

2 结果与分析

2.1 不同培肥措施对马铃薯 LAI 的影响

不同年际间各处理 LAI 随着马铃薯生育期推进, 呈慢—快—慢的趋势变化, 在块茎膨大期达到顶峰 (图 2)。苗期各处理无显著差异; 块茎形成期 NPK+MF 处理 LAI 较 NPK+SD 处理平均显著提高 26.68%; 在块茎膨大期、淀粉积累期和成熟期, NPK+MF 处理与 NPK+SD 处理、NPK+B 处理无显著差异, 较 CK 分别平均显著提高 17.92%、



不同小写字母表示同一生育时期不同施肥措施差异显著 ($P < 0.05$), 下同。
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) in different fertilization measures during the same growth period, the same below.

图 2 2022-2023 年不同有机培肥处理马铃薯叶面积指数

Fig.2 LAI of potato under different organic fertilization treatments in 2022-2023

22.02%和 24.38%。

2.2 不同培肥措施对马铃薯光合特性的影响

2.2.1 对 SPAD 值的影响

如图 3 所示, 2 年试验

表明, 马铃薯 SPAD 值在块茎膨大期达到顶峰后下降。相较于 CK 处理, 有机肥处理对 SPAD 值影响显著, NPK+MF 处理表现最优。在苗期, 各处理无

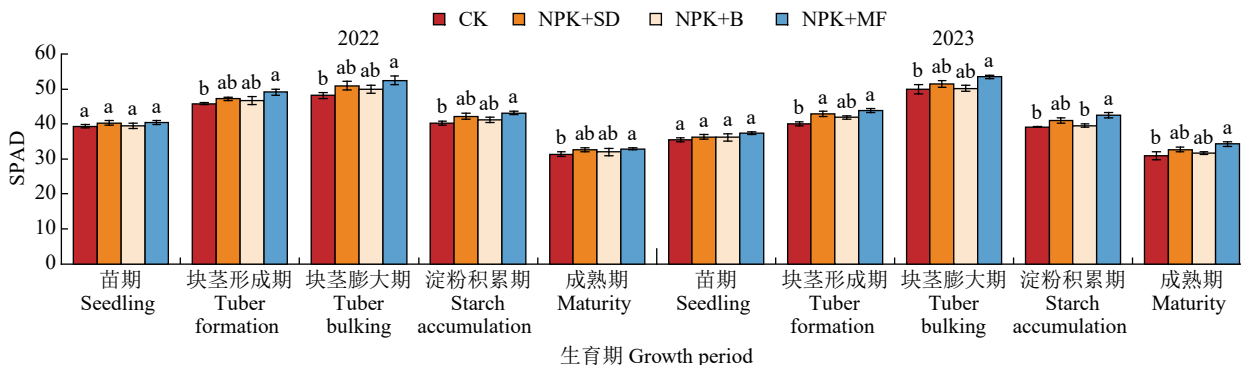


图 3 2022-2023 年马铃薯生育期 SPAD 值变化规律

Fig.3 Change in SPAD values of potato under different fertilization treatments at various growth stages from 2022 to 2023

显著差异；在块茎形成期、块茎膨大期、成熟期 NPK+MF 处理与 NPK+SD 和 NPK+B 处理无显著差异，较 CK 处理分别平均显著提高 8.19%、8.04% 和 7.92%。在淀粉积累期，NPK+MF 处理 SPAD 值较 CK 处理平均显著提高 8.02%，与 NPK+SD 处理无显著差异。

2.2.2 对 P_n 的影响 如图 4 所示，2 年试验表明，各处理马铃薯 P_n 在全生育期呈“S”形规律变化，在块茎膨大期达到最大。相较于 CK 处理，配施有

机肥各处理对 P_n 影响显著，NPK+MF 处理表现最优。块茎形成期 NPK+MF 处理较 CK 和 NPK+B 处理分别平均显著提高 9.53% 和 4.59%；在块茎膨大期，NPK+MF 较 CK、NPK+SD 和 NPK+B 处理分别平均显著提高 11.31%、7.66% 和 4.92%；在淀粉积累期，NPK+MF 较 CK 处理平均显著提高 8.95%；在成熟期，2022 年各处理间无显著差异，2023 年 NPK+MF 处理较 CK 处理显著提高 2.46%，与其他处理无显著差异。

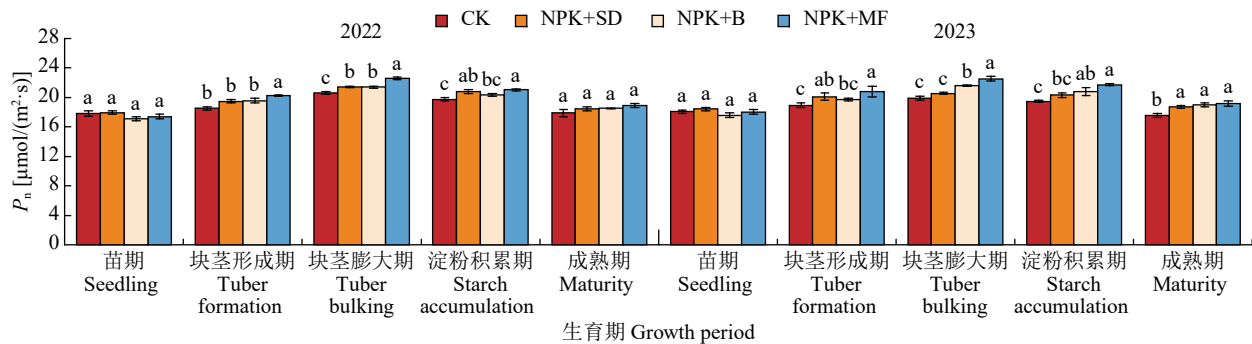


图 4 2022-2023 年马铃薯生育期 P_n 变化规律
Fig.4 The variation of P_n in potato growth period from 2022 to 2023

2.3 不同培肥措施对马铃薯养分吸收及分配的影响

2.3.1 对氮素吸收及分配的影响 如图 5 所示，2 年试验表明，在马铃薯生育前期，氮素的吸收以茎叶为主，后期转为块茎吸收。相较于 CK 处理，有机肥处理对氮素吸收量影响显著，NPK+MF 处理

下各器官氮吸收量最大。NPK+SD 处理下叶片和根系氮素吸收量最低。在块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累和成熟期，叶片、茎秆、根系和块茎中氮素吸收量均以 NPK+MF 处理最高。各时期 NPK+MF 处理叶片氮素吸收量较 CK 处理分别平均

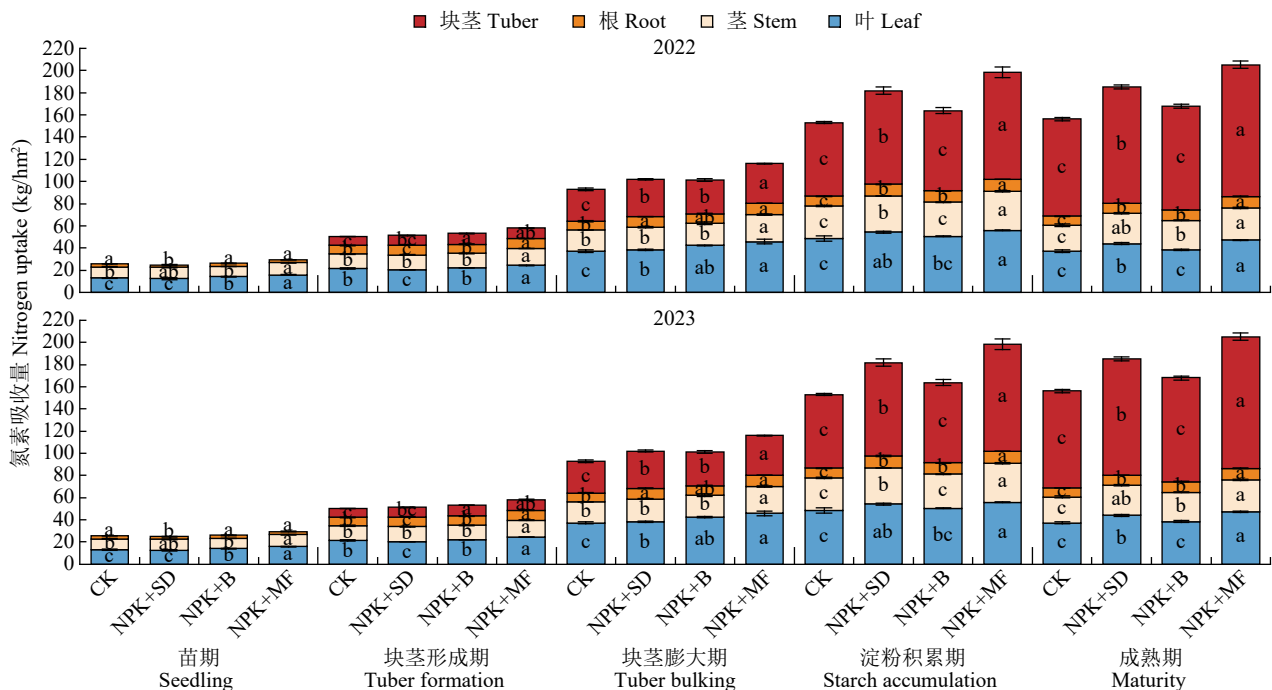


图 5 马铃薯各部分氮素吸收量
Fig.5 Nitrogen uptake in different organs of potato

显著提高 11.41%、29.10%、17.85%和 25.05%；茎秆氮素吸收量较 CK 处理分别平均提高 18.40%、24.26%、21.53%和 27.37%；根系氮素吸收量较 CK 处理分别平均提高 19.67%、29.18%、24.27%和 26.59%；块茎氮素吸收量较 CK 处理分别平均提高

24.55%、25.99%、38.28%和 33.67%。

由图 6 可知，2 年连续试验结果表明，随着生育进程的推进，马铃薯叶片中氮的平均分配比例由 57.93% 下降至 23.46%，茎秆由 37.67% 下降至 28.35%，根系由 16.36% 下降至 5.00%，块茎逐渐上

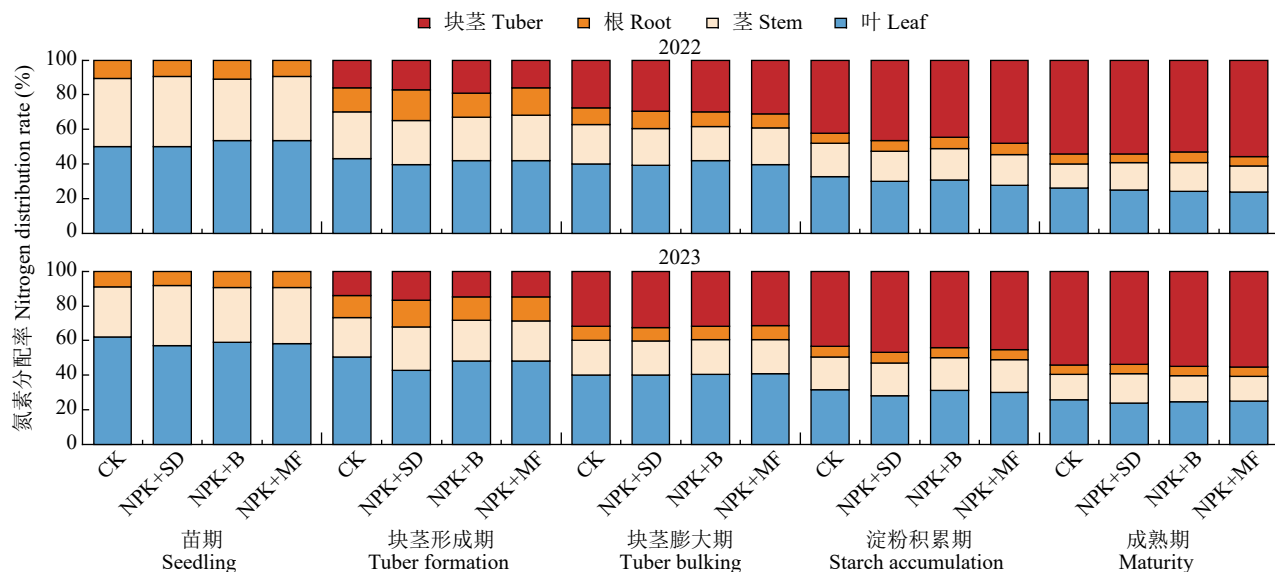


图 6 马铃薯氮素分配

Fig.6 Nitrogen distribution of potato

升，由 29.73% 上升至 56.66%。

2.3.2 对磷素吸收及分配的影响 如图 7 所示，2 年试验表明，在马铃薯前期，磷素的吸收以茎叶为

主，后期转为块茎吸收。相较于 CK 处理，有机培肥措施对磷素吸收量影响显著，NPK+MF 处理下磷素吸收量最高。苗期 NPK+MF 处理叶片、茎秆和

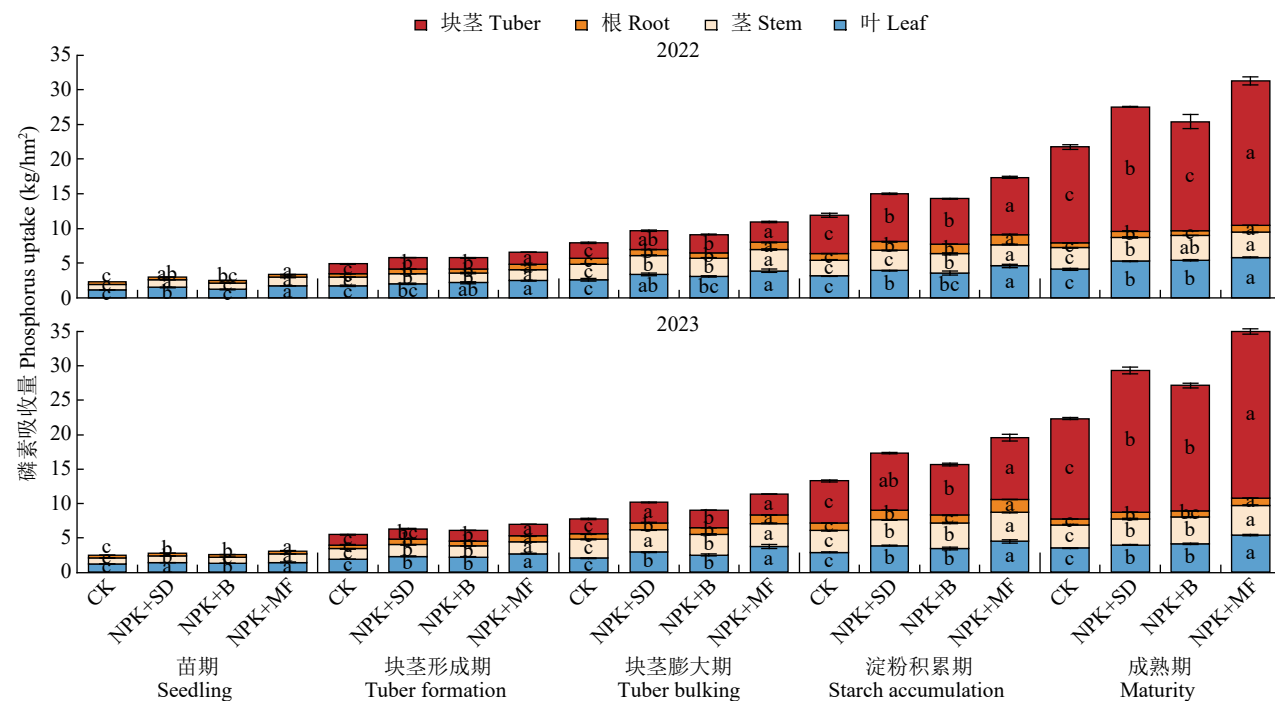


图 7 马铃薯各部分磷素吸收量

Fig.7 Phosphorus uptake in different organs of potato

根系磷素吸收量较 CK 处理平均显著提高 20.55%、26.56%和 23.46%；块茎形成期 NPK+MF 处理叶片、茎秆、根系和块茎磷吸收量较 CK 处理平均显著提高 27.03%、22.43%、36.33%和 17.57%；块茎膨大期较 CK 处理平均显著提高 52.43%、43.49%、38.16%和 34.09%。淀粉积累期较 CK 处理平均显著提高 50.89%、44.58%、52.90%和 47.68%；成熟

期较 CK 处理分别平均显著提高 47.77%、36.96%、37.21%和 47.79%。

由图 8 可知，2 年试验表明，随着生育进程的推进，马铃薯叶片中磷的平均分配比例由 50.44% 下降至 16.49%，茎秆中由 38.02% 下降至 9.22%，根系中由 13.30% 下降至 3.01%，块茎中逐渐上升，由 25.59% 上升至 71.34%。

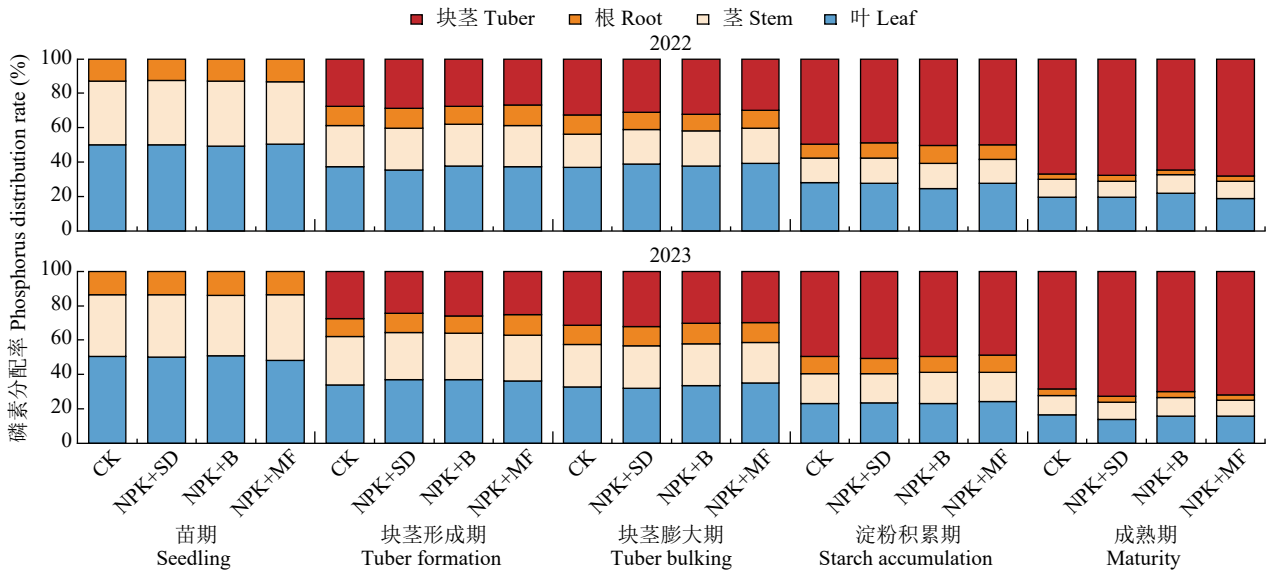


图 8 马铃薯磷素分配
Fig.8 Phosphorus distribution of potato

2.3.3 对钾素吸收及分配的影响 如图 9 所示，2 年试验表明，在马铃薯生育前期，钾素的吸收同样

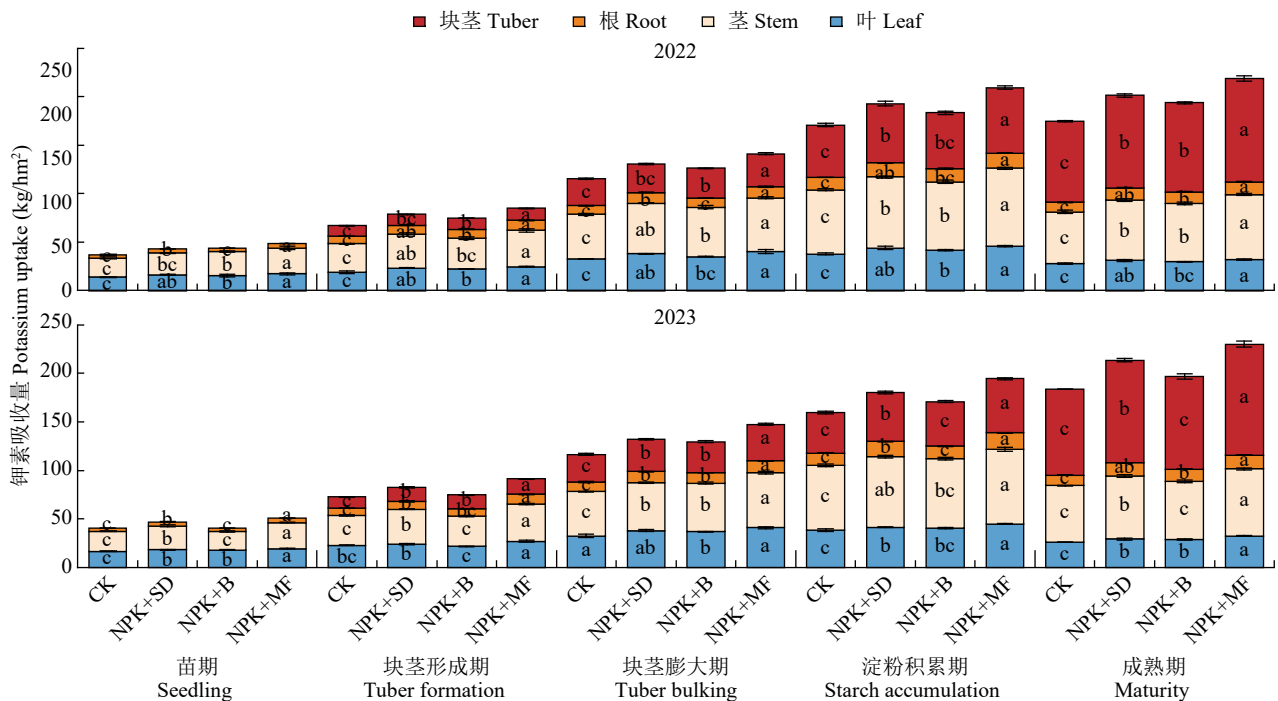


图 9 马铃薯各部分钾素吸收量
Fig.9 Potassium uptake in different organs of potato

以茎叶为主，后期转为块茎吸收。相较于 CK 处理，有机肥处理对钾素吸收量影响显著，各时期马铃薯各部分钾素吸收量均以 NPK+MF 处理最高，以 CK 处理最低。苗期 NPK+MF 处理叶片、茎秆和根系钾素吸收量较 CK 处理分别平均显著提高 20.90%、31.35%和 38.41%；块茎形成期 NPK+MF 处理叶片、茎秆、根系和块茎吸收量较 CK 处理分别平均显著提高 23.77%、26.66%、33.25%和 25.68%；块茎膨大期较 CK 处理分别平均显著提高

25.10%、22.08%、28.58%和 26.02%。淀粉积累期较 CK 处理分别平均显著提高 19.21%、18.42%、26.11%和 29.34%；成熟期较 CK 处理分别平均显著提高 19.40%、22.44%、30.91%和 28.24%。

由图 10 可知，2 年试验表明，随着生育进程的推进，马铃薯叶片中钾的平均分配比例由 41.26% 下降至 14.20%，茎秆中由 54.66% 下降至 30.27%，根系中由 11.61% 下降至 5.77%，块茎中逐渐上升，由 15.08% 上升至 49.17%。

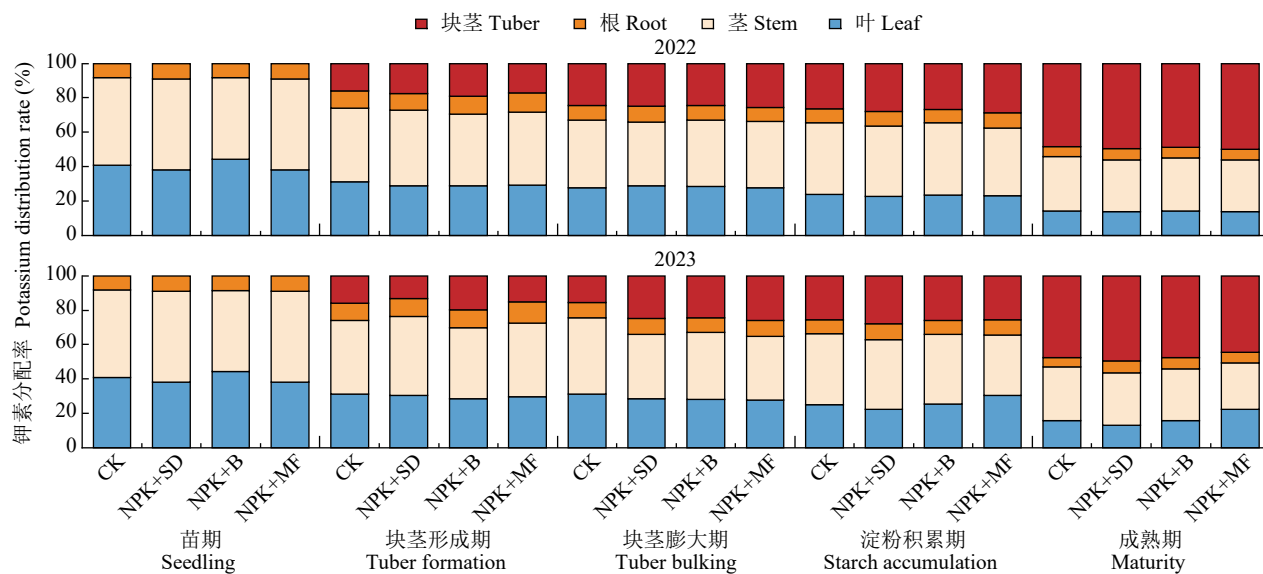


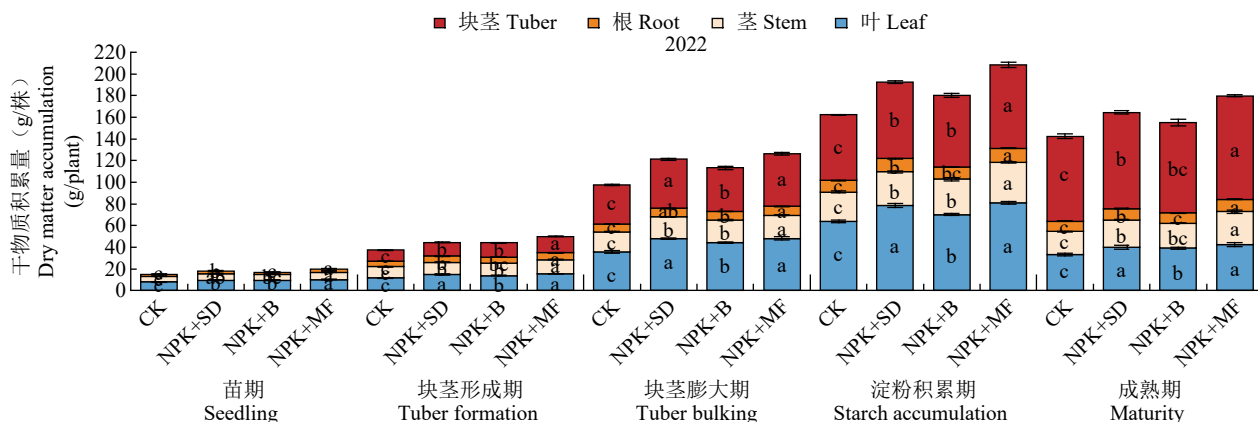
图 10 马铃薯钾素分配

Fig.10 Potassium distribution of potato

2.4 不同培肥措施对马铃薯植株干物质积累量和产量的影响

由图 11 可知，2 年试验显示，马铃薯各部分干物质积累量均随其生育期进程推进呈“S”形规律变化，在淀粉积累期达到最大。相较于 CK 处理，有机肥处理对马铃薯干物质积累量影响显著，其中 NPK+MF 处理下干物质积累量最大。苗期 NPK+

MF 处理叶片、茎秆和根系干物质积累量较 CK 处理分别平均显著提高 21.18%、20.96%和 30.43%；块茎形成期分别平均显著提高 28.15%、19.36%、32.49%和 33.19%；块茎膨大期分别平均显著提高 35.39%、18.31%、16.47%和 27.12%。淀粉积累期分别平均显著提高 27.66%、28.37%、23.81%和 34.60%；成熟期分别平均显著提高 31.57%、



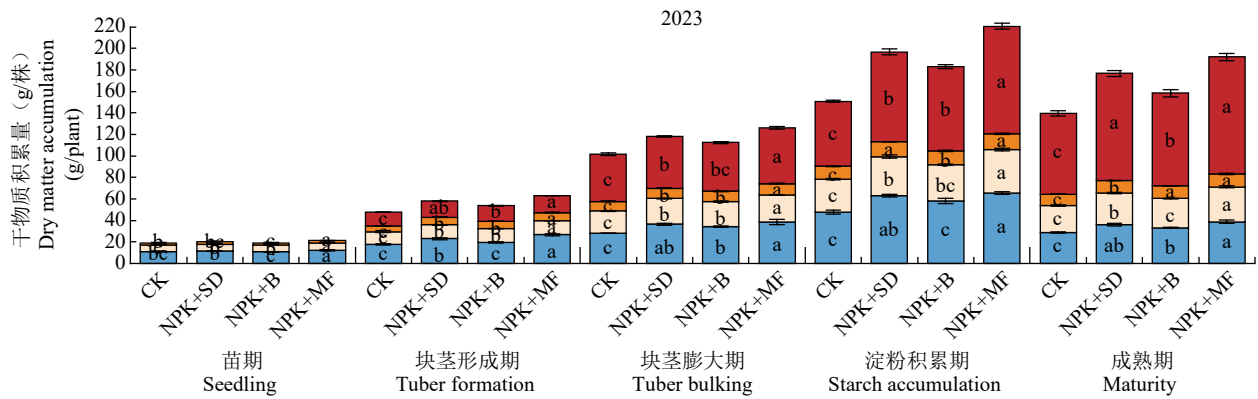


图 11 马铃薯干物质积累量
Fig.11 Dry matter accumulation of potato

30.32%、18.16%和 33.19%。

2 年数据 (图 12) 表明, 有机培肥措施可以显著提高马铃薯产量, NPK+MF 处理产量最高。CK、NPK+SD、NPK+B 和 NPK+MF 处理的马铃薯产量平均分别为 31 910、36 141、35 822

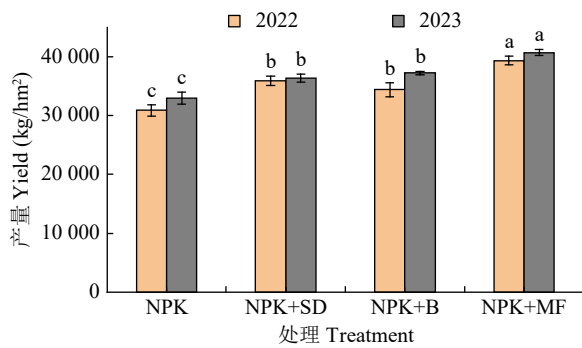


图 12 不同培肥方式下马铃薯产量
Fig.12 Potato yield under different fertilization methods

表 1 马铃薯 LAI、SPAD 值、 P_n 与养分积累量、干物质积累量之间的相关关系
Table 1 The correlation between LAI, SPAD value, P_n rate and nutrient accumulation, dry matter accumulation of potato

指标 Index	LAI	SPAD	P_n	干物质积累量 Dry matter accumulation
LAI	—	0.966*	0.977*	0.993**
SPAD	0.966*	—	0.906	0.990*
P_n	0.977*	0.906	—	0.950*
N	0.997**	0.983*	0.960*	0.999**
P	0.995**	0.985*	0.965*	0.998**
K	0.989*	0.991**	0.955*	0.997**
干物质积累量 Dry matter accumulation	0.993**	0.990*	0.950*	—

“*” 和 “**” 分别表示显著相关 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 相关, 下同。

“*” and “**” indicate significant ($P < 0.05$) and extremely significant ($P < 0.01$) correlation, respectively, the same below.

形成。

由表 2 可知, 马铃薯植株的 N、P、K 积累量、LAI、 P_n 和干物质积累量与收获期产量相关性显著, SPAD 值与收获期产量相关性不显著。且通

和 40 054 kg/hm²。NPK+SD、NPK+B 和 NPK+MF 处理下马铃薯产量较 CK 处理分别平均显著提高 13.35%、12.23%和 25.58%; NPK+MF 处理下马铃薯产量较 NPK+B 和 NPK+SD 处理分别平均显著提高 10.82%和 11.91%。

2.5 马铃薯不同性状间的相关性分析和偏最小二乘法分析

如表 1 所示, 在不同培肥方式下, 马铃薯 LAI 分别与叶片 SPAD 值、 P_n 、N、P、K 与干物质积累量呈显著或极显著正相关关系; SPAD 值和 P_n 均分别与 N、P、K、干物质积累量呈显著正相关关系; N、P、K 与干物质积累量亦呈极显著正相关关系。因此, 化肥减量合理配施有机肥尤其是微生物菌肥可以提高马铃薯 LAI、SPAD 值和 P_n , 从而得到理想的植株养分含量, 利于干物质积累和产量

过偏最小二乘法分析得知, 影响产量的核心因素主要为 P_n 和 LAI, 与干物质积累量和 SPAD 值的关系相对较小, 说明可以通过提高马铃薯的 P_n 及潜在光合面积来提高马铃薯产量。

表 2 基于偏最小二乘法的马铃薯 LAI、SPAD 值、 P_n 、养分积累量、干物质积累量与产量的相关性分析
Table 2 Correlation analysis of potato LAI, SPAD value, P_n , nutrient accumulation, dry matter accumulation, and yield based on partial least squares method

指标 Index	皮尔森相关系数 Pearson correlation coefficient	变量投影重要性 Variable importance in projection	变量投影重要性排序 Variable importance in projection order
N	0.975*	0.99106	4
P	0.982*	0.99478	3
K	0.975*	0.98984	5
LAI	0.986*	0.99821	2
SPAD	0.937	0.97137	7
P_n	0.996**	1.03314	1
干物质积累量 Dry matter accumulation	0.969*	0.98770	6

3 讨论

培肥措施对作物生长发育及农艺性状影响显著，可显著提高作物 LAI 和干物质积累量^[25-26]。岳自慧等^[27]研究表明，施用化肥配施有机肥可显著提高马铃薯 LAI，本研究结果与其相似。本研究表明，化肥配施微生物菌肥（NPK+MF）处理下马铃薯 LAI 表现最优，但在块茎形成期以后才与 CK 处理差异显著，这说明微生物菌肥可促进中后期植株叶片生长，延缓叶片衰老。源库界限在马铃薯生长发育过程中十分明显^[28]，干物质的积累分配是由源到库的重要表现形式，其分配方向决定了块茎产量的高低。本研究中，NPK+MF 处理可促进马铃薯地上及地下部生长，显著提高植株干物质积累量。同时，马铃薯各部分干物质积累量在整个生育期呈慢—快—慢的变化趋势，并在淀粉积累期达到最大，这与焦峰等^[29]和田露等^[30]研究结果一致。近年来，不同施肥措施对作物产量影响的研究较多，作物生产力的提升也是土壤肥力提高的具体表现^[31]。廖育林等^[32]研究表明，单施化肥或有机肥均可提高作物产量，但二者结合是保证作物稳产及土壤健康的可持续施肥模式。本研究结果与其相似，但 2023 年 NPK+MF 处理下马铃薯的产量表现优于 2022 年，化肥减量配施羊粪（NPK+SD）处理与之相反，这可能与微生物菌肥对土壤养分活化作用，以及传统有机肥矿化较慢导致的农田肥力不足有关，其内在机理需深入研究。

植株 SPAD 值影响光合作用的强弱，是叶片进行光合作用的基础^[33]，生物菌肥代谢的产物可促进作物生长，提高叶绿素含量^[34]。本研究中，在使用微生物菌肥后，与 CK 处理相比，马铃薯叶

片 SPAD 值显著提高 7.41% 以上，这与张彭良等^[35]研究结果一致，说明施用菌肥可促进植株对形成叶绿素元素的吸收。光合作用作为作物干物质积累的主要方式，其强弱一定程度取决于物种本身遗传特性，但适宜的外部条件会促使其潜能的释放^[36]。前人^[37]研究表明，添加有机肥可改善作物光合性能，但化肥配施有机肥处理的效果最佳；与不施肥相比，配施生物肥可显著提高作物叶片 P_n 和气孔导度等光合参数。本研究中，NPK+MF 处理下马铃薯叶片各光合参数均达到最大值，与上述研究结果相似。同时，本研究中马铃薯各光合参数在块茎膨大期达到最大值，而干物质积累量在淀粉积累期达到最高，说明微生物菌肥的施用可使植株叶片维持较高的光合速率，延缓了叶片衰老，为后期的干物质积累提供了大而长的产出源^[38]。

马铃薯的生长发育离不开对氮、磷和钾等养分的吸收利用，各养分因子通过参与同化物的合成、分配和转运，最终决定作物产量。张靖等^[39]研究表明，有机无机肥配施的肥效要高于单施化肥或有机肥，且植株吸氮量和吸钾量均最高；晁赢^[40]发现，化肥配施有机肥可提高各器官养分吸收和转移。本研究中，化肥配施有机肥可显著提高马铃薯各器官氮、磷、钾素积累量，且在淀粉积累期达到最大；随着马铃薯生育进程的推进，养分由茎叶向块茎转运，其中配施微生物菌肥处理下的各器官养分转运效率最高，这可能与微生物代谢产物刺激植株根系加快养分吸收有关。段玉等^[41]和田露等^[30]研究发现，马铃薯养分吸收积累量呈典型的“S”形变化，施用微生物菌肥可促进生育前期干物质由叶向茎转运，生育后期由茎叶向籽实转移，且配施微生物菌肥对分配比例的

影响在全生育期与CK处理达到显著差异,本研究结果与其相符。

环境气候条件、土壤肥力和微生物群落等因子是决定作物产量的宏观因素。从施用微生物菌肥对马铃薯生长发育、光合特性、养分吸收分配规律和产量的影响来看,该培肥措施可能影响土壤中微生物活动及土壤养分含量,同时在环境可持续方面有深远意义。因研究角度不同,本阶段未对土壤培肥效果进行深入研究,亟待在今后的研究中进一步探究。

4 结论

不同有机培肥措施对马铃薯植株各指标有促进作用,其中化肥减量配施微生物菌肥的培肥措施增产效果最好。在光合特性方面,NPK+MF处理可显著提高马铃薯LAI、SPAD值和 P_n 。同时施用有机肥增加了马铃薯植株养分含量,施用微生物菌肥有利于马铃薯氮、磷、钾含量的积累,从而提高马铃薯干物质积累量,增产25.58%。综上所述,在内蒙古阴山北麓农牧交错区以化肥减量配施微生物菌肥进行土壤培肥,能够显著提高马铃薯光合性能,有利于作物生长发育和干物质积累,较传统施肥方式显著提高了马铃薯产量,是适宜该地马铃薯栽培的施肥措施。

参考文献

- [1] 何蒲明,狄书非.生态安全与粮食安全并重导向下马铃薯主粮化发展路径研究.农业经济,2019(6):12-14.
- [2] 罗晨.内蒙古由马铃薯产业大区向产业强区迈进.中国食品报,2023-11-03(2).
- [3] 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.
- [4] Hu B, Fan M S, Hao Y F, et al. Potato-cabbage double cropping effect on nitrate leaching and resource-use efficiencies in an irrigated area. *Pedosphere*, 2012, 22(6): 842-847.
- [5] 秦永林,樊明寿.马铃薯氮素管理策略.中国蔬菜,2011(18):1-5.
- [6] Da S A L B R, Zotarelli L, Dukes M D, et al. Irrigation method and application timing effect on potato nitrogen fertilizer uptake efficiency. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112(2): 253-264.
- [7] 陈晓玲.农业可持续发展中的土壤肥料问题与对策.农业开发与装备,2024(3):235-237.
- [8] 景宇鹏,赵沛义,康文钦,等.不同施肥处理对阴山北麓旱作区土壤肥力及马铃薯产量的影响.北方农业学报,2021,49(2):36-43.
- [9] 汪建飞,邢素芝.农田土壤施用化肥的负效应及其防治对策.农业环境保护,1998(1):41-44,49.
- [10] 张秀芝,高洪军,彭畅,等.长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征.植物营养与肥料学报,2019,25(9):1473-1481.
- [11] 查燕,武雪萍,张会民,等.长期有机无机配施黑土土壤有机碳对农田基础地力提升的影响.中国农业科学,2015,48(23):4649-4659.
- [12] 刘旭杰,严旖旎,单海勇,等.我国新型肥料产业现状与发展展望.磷肥与复肥,2024,39(2):1-5.
- [13] 凌妙奇,黄健学,吴桂珍.有机农业栽培施肥与土壤培肥技术探讨.种子科技,2023,41(24):97-99.
- [14] 吴战宽.羊粪的处理与资源化利用研究.畜牧业环境,2023(16):22-24.
- [15] 何燕燕.微生物菌肥在农业生产中的价值和作用.工业微生物,2023,53(2):8-10.
- [16] 何彦臻,许世奇,户可欣,等.腐熟羊粪添加微量元素对风沙土土壤微生物、酶活性和玉米产量的影响.生态与农村环境学报,2024,40(12):1634-1643.
- [17] 高琳.不同农作措施对旱地农田温室气体排放的影响.合肥:安徽农业大学,2017.
- [18] 刘小月,高日平,韩云飞,等.生物炭配施有机肥对阴山北麓旱作燕麦生长及水分利用的影响.中国土壤与肥料,2023(3):46-54.
- [19] 冶秀香,刘亚军,李越,等.不同培肥方式对马铃薯生长及土壤性状的影响.农业科学研究,2016,37(1):25-30.
- [20] 高哲.不同培肥措施对旱作马铃薯生长与产量及土壤理化特性的影响.呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
- [21] 宋明丹,李正鹏,詹舒婷,等.覆膜和生物炭对马铃薯干物质质量积累与分配动态的影响.西北农业学报,2022,31(4):448-456.
- [22] 杨玲.灌水量和生物炭施用量对陕北沙质土马铃薯生长和土壤理化性质的影响.杨凌:西北农林科技大学,2023.
- [23] 李星星.复合微生物菌剂对土壤特性及马铃薯生长与产量的影响.呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [24] 章孜亮,李婧,高俊,等.不同微生物菌剂在马铃薯种植中的应用效果.现代化农业,2023(12):23-25.
- [25] 李燕山,姚春光,普红梅,等.不同施肥模式对马铃薯云薯401生长及产量的影响.南方农业学报,2014,45(9):1608-1611.
- [26] 杨永森.化肥减量配施有机肥对马铃薯生长和土壤化学性状的影响.银川:宁夏大学,2023.
- [27] 岳自慧,刘平.不同有机培肥措施对宁南山区新修梯田马铃薯光合特性及产量的影响研究.中国水土保持,2022(11):37-41.
- [28] 孙芳.马铃薯源、库关系的营养调控技术研究现状与展望.北方农业学报,2009(2):20-24.
- [29] 焦峰,王鹏,翟瑞常.氮肥形态对马铃薯氮素积累与分配的影响.中国土壤与肥料,2012(2):39-44.
- [30] 田露,刘景辉,赵宝平,等.保水剂和微生物菌肥配施对旱作燕麦干物质积累、分配、转运和产量的影响.生态学杂志,2020,39(9):2996-3003.
- [31] 孙永健,杨志远,孙园园,等.成都平原两熟区水氮管理模式与磷钾肥配施对杂交稻冈优725产量及品质的影响.植物营养与肥料学报,2014,20(1):17-28.
- [32] 廖育林,郑圣先,聂军,等.长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响.中国农业科学,2009,42(10):3541-3550.
- [33] 弓建国,徐松鹤.氮磷钾有机肥对马铃薯叶绿素含量的影响.安徽农业科学,2009,37(23):10940-10942.
- [34] 高文斌,吴军,吕婷,等.生物有机肥对设施蔬菜黄瓜生长的

- 影响. 吉林蔬菜, 2015(10): 53-55.
- [35] 张彭良, 李静, 王丹丹. 生物有机肥对春小麦生理特性及土壤养分和微生物的影响. 江苏农业科学, 2018, 46(9): 66-72.
- [36] 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究. 西北植物学报, 2002(4): 93-99.
- [37] 康彩睿, 谢军红, 李玲玲, 等. 培肥方式对陇中旱农区玉米光合特性和产量的影响. 玉米科学, 2021, 29(5): 113-120.
- [38] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响. 应用生态学报, 2012, 23(2): 419-425.
- [39] 张靖, 王平, 刘淑英, 等. 有机无机肥配施对甘肃省秦王川灌区蚕豆产量、养分吸收量及肥料利用率的影响. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 154-159.
- [40] 晁赢. 长期定位施肥对土壤肥力特征及养分吸收利用的影响. 泰安: 山东农业大学, 2010.
- [41] 段玉, 张君, 李焕春, 等. 马铃薯氮磷钾养分吸收规律及施肥肥效的研究. 土壤, 2014, 46(2): 212-217.

Effects of Organic Fertilization Measures on Photosynthetic Characteristics, Nutrient Content and Yield of Potato

Zhang Le^{1,2}, Han Yunfei^{2,3,4}, Du Erxiao^{2,3,4}, Li Baocheng², San Xintong²,
Liu Xinyu^{1,2}, Wang Yanli⁵, Zhao Peiyi^{2,3,4}, Ren Yongfeng^{2,3,4}

(¹College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China;

²Inner Mongolia Academy of Agricultural & Animal Husbandry Sciences, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China;

³Inner Mongolia Key Laboratory of Dryland Agriculture, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China;

⁴Inner Mongolia Cultivated Land Conservation Scientific Observation Experimental Station of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hohhot 010031, Inner Mongolia, China; ⁵Inner Mongolia Autonomous Region Xing'an League Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center, Ulanhot 137400, Inner Mongolia, China)

Abstract Aiming at the issues of poor soil structure, insufficient nutrient supply, and low potato yield in the agro-pastoral ecotone in the Northern piedmont of Yinshan Mountain, Inner Mongolia, a two-year field randomized block experiment was conducted. Taking conventional fertilization as the control (CK), three treatments were set up, including chemical fertilizer reduction combined with sheep manure (NPK+SD), chemical fertilizer reduction combined with biochar (NPK+B), and chemical fertilizer reduction combined with microbial fertilizer (NPK+MF). The dynamic changes of leaf area index (LAI), SPAD value, photosynthetic performance, plant nutrient accumulation and dry matter accumulation of potato plants under different treatments were compared and analyzed. The results showed that during the tuber bulking, NPK+MF treatment significantly improved LAI and leaf photosynthetic performance of potato, with leaf SPAD value significantly increased by 8.04% compared to CK, and no significant difference compared to NPK+SD and NPK+B treatments. The net photosynthetic rate of NPK+MF treatment was significantly increased by an average of 11.31%, 7.66%, and 4.92% compared to CK, NPK+SD, and NPK+B treatments, respectively. Under the NPK+MF treatment, with the growth process of potato, plant nutrients are transported from stems and leaves to tubers, and the accumulation of N, P, and K in potato leaves, stems, roots, and tubers were significantly increased. During the late stage of potato growth, the distribution ratio of nitrogen, phosphorus, and potassium in the tubers increased by 90.58%, 178.78% and 226.06%, respectively. The yield of NPK+MF treatment was the best, with an average of 40 054 kg/ha, which was 25.58% higher than that of CK. This experiment identified that chemical fertilizer reduction combined with microbial fertilizer was an effective fertilization method for soil fertility improvement and efficient utilization of soil and fertilizer resources in the agro-pastoral ecotone of the northern piedmont of Yinshan Mountain.

Key words Potato; Organic fertilization; Photosynthetic characteristics; Nutrient accumulation; Yield