

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2024)04-0322-09

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2024.04.005

稻薯轮作区不同秸秆还田方式对土壤肥力及马铃薯产量的影响

周 伦¹, 周秋芳¹, 田丽燕¹, 侯 燕², 徐 锐^{1,3*}

(1. 云南师范大学, 云南 昆明 650000; 2. 曲靖职业技术学院, 云南 曲靖 655000;

3. 云南省农村能源工程重点实验室, 云南 昆明 650000)

摘 要: 为研究稻薯轮作区秸秆不同还田方式对土壤肥力和马铃薯生长的影响, 以‘V7’为试验品种, 设置全量秸秆粉碎深耕还田(QT)、全量秸秆粉碎覆盖还田(QF)、半量秸秆粉碎深耕还田(BT)、半量秸秆粉碎覆盖还田(BF), 探讨早稻秸秆不同还田方式和还田量对马铃薯各时期土壤养分、结构及马铃薯产量和品质的影响。深耕和覆盖还田处理马铃薯结薯期土壤有效磷和速效钾含量分别显著降低16.44%~38.50%和19.21%~28.89%, 但对发芽期和成熟期土壤养分的影响不显著。QT、BT、BF显著提高成熟期土壤团聚体几何平均直径(Geometric mean diameter, GMD), 并显著提高成熟期土壤团聚体平均重量直径(Mean weight diameter, MWD), 但对各时期土壤水稳性大团聚体含量 $R_{0.25}$ 无显著影响。全量秸秆粉碎覆盖还田(QF)处理显著提高马铃薯的还原糖含量, 半量秸秆粉碎深耕还田(BT)处理显著提高马铃薯产量和淀粉产量。冬季早稻秸秆半量深耕还田处理在马铃薯产量和淀粉产量提升方面表现优于半量秸秆覆盖还田处理, 且全量及半量深耕还田处理在马铃薯发芽期土壤MWD、GMD提升上优于全量及半量覆盖还田处理。冬季早稻秸秆还田种植马铃薯应选择半量秸秆粉碎深耕还田(BT)方式种植马铃薯。

关键词: 秸秆还田; 马铃薯; 土壤养分; 营养成分

Effects of Different Straw Returning Methods on Soil Fertility and Potato Yield in Rice Potato Rotation Areas

ZHOU Lun¹, ZHOU Qiufang¹, TIAN Liyan¹, HOU Yan², XU Rui^{1,3*}

(1. Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650000, China; 2. Qujing Vocational and Technical College, Qujing,

Yunnan 655000, China; 3. Yunnan Key Laboratory of Rural Energy Engineering, Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: A field experiment was conducted using 'V7' as test material to investigate the specific effects of different straw incorporation methods on soil fertility and potato growth in rice-potato rotation systems. Four treatments were established: whole amount of straw crushed with deep tillage incorporation (QT), whole amount of straw crushed with surface mulching (QF), half amount of straw crushed with deep tillage incorporation (BT), and half amount of straw crushed with surface mulching (BF). This study aimed to evaluate the impacts of different rice straw incorporation methods and quantities on soil nutrient dynamics, soil structure characteristics at various growth stages, as well as potato yield and quality. The results demonstrated that both deep tillage and surface mulching treatments significantly reduced soil available phosphorus and potassium contents during tuber initiation by 16.44%-38.50% and 19.21%-28.89%, respectively,

收稿日期: 2024-07-07

作者简介: 周伦(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事农业生物环境研究。

*通信作者(Corresponding author): 徐锐, 教授, 主要从事生物质能源开发与利用, E-mail: ecowatch_xr@163.com。

compared to conventional practices. However, these treatments showed no significant effects on soil nutrient levels during sprouting and maturity stages. The QT, BT, and BF treatments significantly increased the geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates at maturity, while also enhancing the mean weight diameter (MWD) of soil aggregates. Notably, none of the treatments significantly affected the percentage of aggregates >0.25 mm ($R_{0.25}$) across growth stages. QF significantly increased potato reducing sugar content, whereas BT significantly improved both tuber yield and starch yield. Comparative analysis revealed that half amount straw deep tillage outperformed half amount surface mulching in yield and starch production enhancement. Furthermore, deep tillage treatments (both full and half amounts) demonstrated superior performance in improving soil MWD and GMD during the sprouting stage compared to corresponding surface mulching treatments. Based on these findings, BT is recommended as the optimal winter upland rice straw management practice for potato cultivation.

Key Words: straw returning; potato; soil nutrient; nutritional composition

水稻秸秆作为富含氮、磷、钾及有机质的农作物副产品^[1], 用于冬季还田种植马铃薯不仅能提升土壤肥力, 还能清除冬季蔬菜生产中土壤里富集的病原菌和害虫^[2], 秸秆覆盖还田也被证明可降低马铃薯病毒发生率。已有研究发现, 小麦秸秆还田影响旱作马铃薯块茎淀粉合成关键酶活性及基因表达, 从而提高旱作马铃薯淀粉的崩解值、直链淀粉含量以及直链支链淀粉比, 明显降低淀粉的峰值黏度、低谷黏度、最终黏度、回生值以及总淀粉含量^[3]。赵君华等^[4]发现腐熟秸秆还田种植马铃薯, 可影响土壤肥力和产量。姜占文^[5]研究秸秆直接还田并配施腐熟剂对马铃薯产量的影响, 发现秸秆直接还田应用生物腐熟剂对马铃薯产量无影响, 但可提升土壤肥力, 改善土壤结构。综上, 水稻秸秆还田对马铃薯生长有促进作用, 同时可改良土壤。

马铃薯是世界第四大粮食作物, 云南省是中国重要的加工原料薯产地, 种植面积达 54 万 hm^2 , 产量为 1 120 万 t, 面积和产量分别居中国第 3 位和第 2 位^[6]。水稻与马铃薯轮作是云南省西南地区马铃薯种植的主要模式^[7], 是利用冬季水稻收割后闲置农田实现“正季抓口粮, 小春抓收入”的农业绿色发展模式^[8]。马铃薯是喜肥作物, 春冬季施肥较多, 余肥可以被夏秋季旱稻吸收利用, 实现一田多用、一肥多效、一季多收的效果, 解决农田流域保护与农业经济发展的矛盾。不同作物轮作有利于土壤有机碳的积累, 稻薯秸秆轮作的土壤溶解性有机碳 (Dissolved organic carbon, DOC)、热水浸提有机

碳 (Hot water extraction of organic carbon, HWC)、微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC) 和易氧化有机碳 (Readily oxidizable carbon, ROC) 含量均高于水稻休耕、水稻小麦轮作、水稻绿肥轮作及水稻油菜轮作, 土壤全氮、全磷、速效钾和有机碳含量较高、容重较低, 且水稻年产量略高于其他处理组, 因此, 稻薯轮作是具有显著农业生态系统可持续性特征的耕作方式^[9]。

云南省梯田、山岗田、山坳田较多, 一般种植一熟单季晚稻, 水稻收割后, 闲置土壤较适合种植耐寒的马铃薯, 故马铃薯与旱稻轮作在云南省较普遍^[10]; 稻薯轮作区旱稻秸秆产生量大, 也常被用于原位还田种植马铃薯^[11], 但缺乏有效的秸秆还田技术指导方案, 关于西南地区稻薯轮作模式下旱稻秸秆不同还田量和还田方式对土壤肥力及马铃薯产量和品质影响的评估研究仍然较少。本文通过研究旱稻秸秆不同方式和不同还田量对种植马铃薯的影响, 探究旱稻轮作体系中秸秆还田对马铃薯生长过程不同时期土壤养分、土壤结构的变化及马铃薯产量和品质的影响, 以期为稻薯轮作种植提供绿色种植新模式。

1 材料与方法

1.1 试验地和材料

试验地位于云南省石屏县异龙镇旱稻种植示范区 ($N 23^{\circ}40'$, $E 102^{\circ}30'$)。试验地属于亚热带高原山地季风气候, 年均气温 18.3°C , 年降水量为

786~1 116 mm, 年日照时数为2 176 h, 年均相对湿度为75%。供试马铃薯品种为‘V7’。试验地为黑色沙质土壤, 试验地基础肥力为: 全氮量为5.09 g/kg, 氨态氮含量为304.66 mg/kg, 有机质含量为86.85 g/kg, 速效钾含量为385.20 mg/kg, 有效磷含量为150.26 mg/kg, pH 7.63。

1.2 试验设计

试验于2022年11月开始, 分别设置5个处理组: 不施加秸秆且不深耕的对照组(CK), 25 kg/hm²全量秸秆粉碎还田后深耕25 cm(QT), 12.5 kg/hm²半量秸秆粉碎还田后深耕25 cm(BT), 25 kg/hm²全量秸秆粉碎后覆盖还田(QF)、12.5 kg/hm²半量秸秆粉碎后覆盖还田(BF)。小区面积为1.2 m×15 m, 每个处理3次重复, 共15个试验小区, 采用随机区组排列。其中QT及QF处理组还田量为该试验区往年CK处理产出的秸秆平均量25 kg/hm², BT及BF处理组还田量为QT及QF处理组还田量的一半^[12]。每个试验小区周围设置10 cm宽的垄沟, 防止肥水串联。

栽培措施与当地马铃薯种植方式一致, 人工播种后施入尿素(N 46%)(375 kg/hm²)作底肥, 马铃薯生长周期内, 共施加3次氮磷钾肥, 施用量均为N 727.8 kg/hm²、P₂O₅ 255 kg/hm²、K₂O 255 kg/hm², 施用时间分别为2023年2月3日、2月28日和3月12日, 马铃薯发芽期、结薯期和成熟期土壤pH分别在7.6~7.8、7.4~7.8及7.5~7.8间, 地温分别在14.8~16.0 ℃、16.4~18.5 ℃及14.3~18.5 ℃间。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 马铃薯产量

马铃薯收获时, 各小区取1.8 m²测产, 扣除收获块茎总重的1.5%作为杂质、含土量折合成公顷产量^[13]。

1.3.2 马铃薯品质

马铃薯淀粉含量采用酸解法-DNS测定^[14]; 还原性总糖含量采用3, 5-二硝基水杨酸比色法测定^[15]; 粗蛋白含量采用硫酸-催化剂消解, 凯氏定氮法测定^[16]。

1.3.3 土壤理化性质

在马铃薯发芽期(2023年2月24日)、结薯

期(2023年3月4日)以及成熟期(2023年4月7日)进行3次土壤采样, 用五点法采集每个小区0~20 cm土层土壤, 混合均匀, 风干研磨后用以测定土壤全氮、氨态氮、有机质、速效钾、有效磷和pH指标。土壤全氮测定采用半微量开氏法, 有机质测定采用重铬酸钾外加热氧化法, 氨态氮测定采用碱解扩散法, 有效磷测定采用钼锑抗比色法, 速效钾测定采用火焰光度计比色法^[17]。

1.3.4 土壤团粒结构测定

水稳性团聚体含量(R_{0.25})、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是评判水稳性团聚体稳定性的常用指标, MWD、GMD越大说明土壤团聚体各粒径间团聚度越好, 稳定性越高。0~20 cm土层土壤水稳性团聚体结构采用湿筛法测定^[18]。R_{0.25}、MWD、GMD计算公式如下:

$$R_{0.25} = \frac{M_{r>0.25}}{M_T}$$

式中: M_{r>0.25} 为粒径>0.25 mm的团聚体重量(g); M_T为团聚体的总重量(g)。

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i; \quad GMD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right)$$

式中: X_i为i粒径团聚体的平均直径; W_i为X_i相对应的粒径团聚体占总重的百分含量。

1.4 数据处理方法

使用Excel 2022软件处理试验数据, 使用SPSS 22软件进行单因素方差分析, 各处理组间显著性差异采用Duncan氏法进行多重比较, 使用Origin 2023b软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同还田方式和还田量对马铃薯产量及品质的影响

全量秸秆深耕还田(QT)、全量秸秆覆盖还田(QF)及半量秸秆覆盖还田(BF)对马铃薯产量无显著影响(表1), 但半量秸秆深耕还田(BT)显著提高马铃薯产量(P<0.05)。半量秸秆深耕还田(BT)马铃薯产量比对照组(CK)显著增加28.06%。

通过分析不同秸秆还田方式和还田量对马铃薯淀粉含量的影响, 发现半量秸秆深耕还田(BT)、

全量秸秆深耕还田处理组(QT)、全量秸秆覆盖还田(QF)及半量秸秆覆盖还田(BF)处理组较对照组马铃薯淀粉含量均显著下降18.25%、10.88%、19.1%和17.58%。淀粉产量取决于马铃薯产量和马铃薯淀粉含量,全量秸秆深耕还田(QT)、全量秸秆覆盖还田(QF)及半量秸秆覆盖还田(BF)能提升马铃薯淀粉产量但不显著,而半量秸秆深耕还田(BT)较对照组(CK),显著提升39.85%的马铃薯淀粉产量。

全量秸秆覆盖还田(QF)显著提高马铃薯还原

糖含量,与对照组相比,全量秸秆覆盖还田(QF)马铃薯还原糖含量提升34.82%,其余处理组则对马铃薯还原糖含量无影响。不同还田方式和还田量对马铃薯粗蛋白含量无影响。

2.2 不同还田方式和还田量对土壤肥力的影响

在马铃薯发芽期和成熟期,秸秆不同还田方式和还田量处理组土壤有机质、总氮、氨态氮、有效磷和速效钾含量均无显著差异,但以上指标均随马铃薯生长呈上升趋势(表2)。

表1 旱稻秸秆不同还田方式和还田量对马铃薯产量及品质的影响

Table 1 Effects of different returning methods and amounts of upland rice straw on potato yield and quality

处理 Treatment	产量(t/hm ²) Yield	淀粉含量(mg/g) Starch	淀粉产量(t/hm ²) Starch yield	还原糖含量(mg/g) Reducing sugar	粗蛋白含量(g/100 g) Crude protein
CK	49.71±5.22b	99.53±6.01a	4.04±0.38b	2.47±0.06b	1.86±0.22a
QT	55.10±7.93ab	88.70±3.70b	4.59±0.65ab	2.47±0.21b	1.75±0.17a
QF	48.06±4.28b	80.53±6.27b	4.80±0.69ab	3.33±0.41a	1.74±0.16a
BT	63.66±5.26a	81.37±4.57b	5.65±0.60a	2.67±0.38b	1.71±0.20a
BF	51.44±2.43b	82.03±0.15b	4.14±0.25b	2.37±0.12b	1.80±0.13a

注:同列数据不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference between different treatments ($P<0.05$). The same below.

表2 不同秸秆还田方式及还田量对土壤肥力的影响

Table 2 Effects of different returning methods and amounts of upland rice straw on soil fertility

生长时期 Growth stage	处理 Treatment	有机质(g/kg) Organic matter	总氮(g/kg) Total nitrogen	氨态氮(mg/kg) Ammoniacal nitrogen	速效钾(mg/kg) Available potassium	有效磷(mg/kg) Available phosphorus
发芽期 Sprouting	CK	107.86±18.38a	5.69±0.52a	333.72±26.87a	422.30±78.40a	158.24±9.13a
	QF	110.63±13.48a	5.64±0.51a	328.15±39.91a	526.45±90.57a	167.12±30.54a
	QT	115.47±8.62a	5.33±0.33a	329.19±25.18a	401.43±31.65a	165.41±9.52a
	BT	119.04±5.62a	5.91±0.47a	353.90±16.62a	409.24±68.20a	141.95±13.23a
	BF	118.67±3.52a	5.83±0.23a	348.37±23.95a	449.07±18.00a	173.16±15.74a
结薯期 Tuber initiation	CK	115.72±2.51a	6.18±0.19a	375.10±10.28a	606.32±14.39a	283.70±29.45a
	QF	107.56±9.59a	6.21±0.09a	394.61±22.66a	474.74±25.13b	175.31±25.92c
	QT	115.27±11.51a	6.19±0.08a	403.63±10.29a	484.40±23.70b	208.24±4.70bc
	BT	119.19±3.36a	6.38±0.53a	363.45±45.54a	431.15±10.73b	174.62±7.74c
	BF	117.82±3.62a	6.51±0.12a	410.62±15.68a	489.85±12.21b	237.05±9.01b
成熟期 Maturity	CK	121.39±2.43a	6.66±0.08a	392.82±24.62a	626.03±156.87a	244.79±33.47a
	QF	121.54±5.52a	6.38±0.20a	393.24±26.32a	639.33±100.64a	231.92±16.80a
	QT	115.33±5.61a	6.08±0.47a	374.85±81.24a	676.69±10.09a	241.10±12.13a
	BT	109.13±14.19a	6.43±0.25a	407.60±10.53a	578.92±81.35a	274.08±76.62a
	BF	119.38±3.55a	6.44±0.22a	404.77±3.50a	731.44±79.39a	250.41±33.43a

在马铃薯结薯期, 对比不秸秆还田的对照组(CK), 全量秸秆覆盖还田(QF)、全量秸秆深耕还田(QT)、半量秸秆深耕还田(BT)及半量秸秆覆盖还田(BF)处理组土壤中速效钾含量分别显著降低21.70%、20.11%、28.89%及19.21%。同时, 结薯期全量秸秆覆盖还田(QF)、全量秸秆深耕还田(QT)、半量秸秆深耕还田(BT)及半量秸秆覆盖还田(BF)处理组土壤中有效磷含量较对照组(CK)分别显著降低38.20%、26.60%、38.50%及16.44%, 全量秸秆还田下覆盖还田较深耕还田土壤中有有效磷下降更明显, 半量秸秆还田下深耕还田较覆盖还田土壤中有有效磷下降明显(表2)。

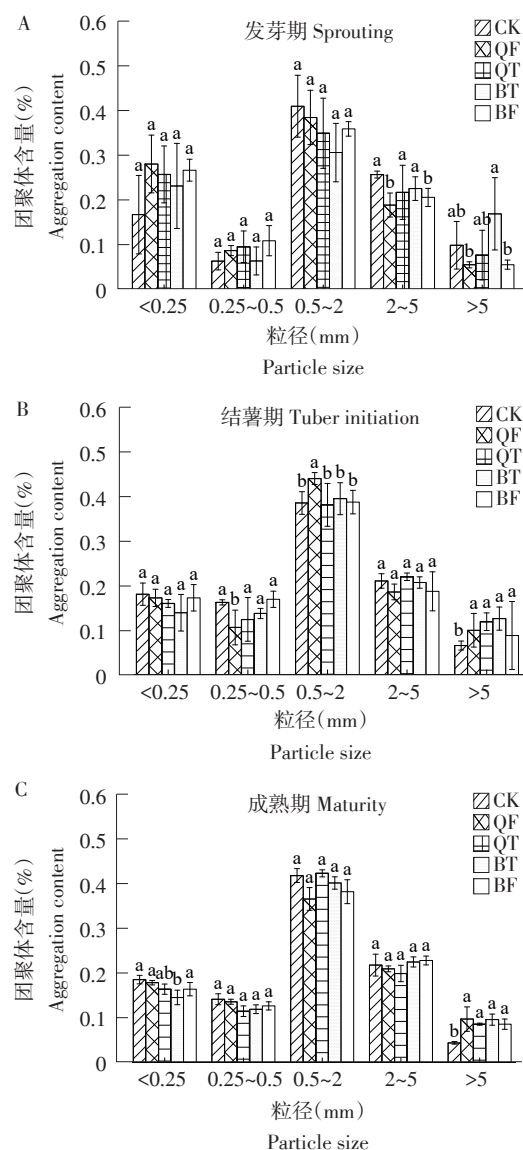
2.3 不同还田方式和还田量对土壤团聚体含量的影响

对秸秆不同还田方式及还田量处理下0~20 cm土层土壤团聚体粒径分布研究发现, 0.5~2 mm粒径团聚体含量在马铃薯生长各个时期均占比最高, 其占比为35.0%~43.8%(图1)。秸秆不同还田方式和还田量对马铃薯不同时期的土壤团聚体粒径含量影响不同, 与对照组(CK)相比, 马铃薯发芽期全量秸秆覆盖还田(QF)和半量秸秆覆盖还田(BF)处理下土壤中2~5 mm粒径团聚体含量分别显著降低26.4%和19.81%(图1A), 说明覆盖还田会降低马铃薯发芽期土壤大团聚体含量。

在马铃薯结薯期, 各处理组对<0.25 mm微团聚体含量无显著影响。与对照组(CK)相比, 全量秸秆覆盖还田(QF)处理下土壤中0.25~0.5 mm粒径团聚体含量显著降低34.7%, 同时, 0.5~2 mm粒径团聚体含量提高12.5%。各处理组对>5 mm大粒径团聚体含量的影响均显著(图1B), 与对照组(CK)相比, 全量秸秆深耕还田(QT)、全量秸秆覆盖还田(QF)、半量秸秆深耕还田(BT)及半量秸秆覆盖还田(BF)处理下土壤中>5 mm大粒径团聚体含量分别显著提高44.99%、34.39%、47.99%及25.63%。

在马铃薯成熟期, 半量秸秆深耕还田(BT)处理下土壤中可显著降低<0.25 mm微团聚体含量且提升>5 mm大粒径团聚体含量(图1C), 与对照组(CK)相比, 半量秸秆深耕还田(BT)处理下土壤中<0.25 mm粒径微团聚体含量显著降低21.5%, >5 mm大粒径大团聚体含量显著提高53.93%。全量秸秆

深耕还田(QT)、全量秸秆覆盖还田(QF)及半量秸秆覆盖还田(BF)处理下土壤中>5 mm大粒径团聚体含量较对照组(CK)分别显著提高48.43%、54.49%及48.59%。



不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatment groups ($P<0.05$).

图1 秸秆不同还田方式和还田量下土壤团聚体粒径分布
Figure 1 Particle size distribution of soil aggregates under different returning methods and amounts of upland rice straw

从马铃薯整体生长时期看, 各处理组均能提高结薯期和成熟期土壤中>5 mm大粒径团聚体含量, 而半量秸秆深耕还田(BT)在提升大团聚体含量的同时降低了成熟期微团聚体含量, 说明半量秸秆深耕还田(BT)处理的土壤团粒结构更稳定。

2.4 不同还田方式和还田量对土壤团粒结构的影响

在马铃薯发芽期, 秸秆覆盖还田显著降低土壤MWD和GMD(表3), 较对照组(CK), 全量秸秆覆盖还田(QF)降低25.0%土壤MWD和36.0%土壤GMD, 半量秸秆覆盖还田(BF)降低25.0%土壤MWD和35.2%土壤GMD。在马铃薯结薯期, 秸秆不同还田方式和还田量均会显著提高土壤MWD, 较对照组(CK), 全量秸秆覆盖还田(QF)、全量秸秆深耕还田(QT)、半量秸秆深耕还田(BT)、半量

秸秆覆盖还田(BF)土壤MWD分别提高11.1%、22.2%、22.2%和5.6%。在马铃薯成熟期, 各处理组显著提高土壤MWD和GMD(QF除外), 较对照组(CK), 全量秸秆覆盖还田(QF)、全量秸秆深耕还田(QT)、半量秸秆深耕还田(BT)、半量秸秆覆盖还田(BF)土壤MWD分别提高17.6%、14.7%、23.5%、17.6%, 土壤GMD分别提高11.8%、15.1%、24.7%、16.1%。在马铃薯各生长时期, 秸秆不同还田方式和还田量对马铃薯土壤 $R_{0.25}$ 均无显著影响。

秸秆覆盖还田显著降低马铃薯发芽期土壤MWD和GMD, 且各处理组均提高马铃薯结薯期和成熟期土壤MWD和GMD, 说明秸秆覆盖还田可降低马铃薯生长初期土壤团聚体的稳定性, 但各还田方式和还田量最终均可提高马铃薯成熟期土壤团聚体的稳定性。

表3 不同秸秆还田方式和还田量对土壤团聚体水稳定性的影响

Table 3 Effects of different returning methods and amounts of upland rice straw on water stability of soil aggregates

马铃薯生长时期 Growth stage	处理 Treatment	团聚体平均重量直径(MWD)(mm) Mean weight diameter (MWD) of aggregate	团聚体几何平均直径(GMD)(mm) Geometric mean diameter (GMD) of aggregate	水稳性大团聚体含量($R_{0.25}$)(%) Content of water stable macroaggregate ($R_{0.25}$)
发芽期 Sprouting	CK	0.44±0.08a	1.25±0.31a	0.83±0.09a
	QF	0.33±0.02b	0.80±0.14b	0.72±0.06a
	QT	0.37±0.08a	0.90±0.20a	0.74±0.06a
	BT	0.50±0.13a	1.21±0.42a	0.77±0.10a
	BF	0.33±0.02b	0.81±0.05b	0.73±0.02a
结薯期 Tuber initiation	CK	0.36±0.04b	0.95±0.06a	0.82±0.02a
	QF	0.40±0.06a	1.08±0.18a	0.83±0.02a
	QT	0.44±0.03a	1.16±0.12a	0.84±0.01a
	BT	0.44±0.04a	1.20±0.17a	0.86±0.04a
	BF	0.38±0.08a	0.98±0.14a	0.83±0.03a
成熟期 Maturity	CK	0.34±0.02b	0.93±0.05b	0.81±0.01a
	QF	0.40±0.04a	1.04±0.07ab	0.82±0.01a
	QT	0.39±0.01a	1.07±0.06a	0.83±0.01a
	BT	0.42±0.02a	1.16±0.05a	0.85±0.02a
	BF	0.40±0.02a	1.08±0.05a	0.83±0.02a

2.5 马铃薯产量及其品质与土壤养分的关系

对马铃薯产量及其品质与土壤养分指标作相关性分析可知(表4), 马铃薯粗蛋白含量与土壤pH呈显著正相关($P<0.05$), 还原糖含量与土壤速效钾和有效

磷含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与pH呈极显著负相关($P<0.01$), 淀粉含量与土壤有机质、速效钾以及有效磷含量呈显著负相关($P<0.05$), 马铃薯产量与土壤速效钾和有效磷含量呈显著负相关($P<0.05$)。

表4 马铃薯产量及其品质与土壤养分的相关性分析

Table 4 Correlation between yield and quality of potato and soil nutrients

指标 Index	总氮 Total nitrogen	有机质 Organic matter	速效钾 Available potassium	有效磷 Available phosphorus	氨态氮 Ammoniacal nitrogen	pH	粗蛋白 Crude protein	还原糖 Reducing sugar	淀粉 Starch
有机质 Organic matter	0.159								
速效钾 Available potassium	0.222	0.141							
有效磷 Available phosphorus	-0.150	0.286	0.621 [*]						
氨态氮 Ammoniacal nitrogen	-0.307	-0.137	0.276	-0.007					
pH	-0.356	-0.299	-0.727 ^{**}	-0.616 [*]	-0.024				
粗蛋白 Crude protein	-0.012	0.057	-0.242	-0.086	0.076	0.496 [*]			
还原糖 Reducing sugar	-0.062	0.174	0.712 ^{**}	0.872 ^{**}	0.032	-0.671 ^{**}	-0.165		
淀粉 Starch	0.010	-0.520 [*]	-0.518 [*]	-0.623 [*]	-0.032	0.428	0.159	-0.392	
产量 Yield	0.113	0.259	-0.513 [*]	-0.524 [*]	-0.144	0.241	0.085	-0.326	-0.072

注：*在0.05水平上相关性显著；**在0.01水平上相关性显著。
Note: * represents significance at 0.05 level; ** represents significance at 0.01 level.

3 讨 论

3.1 不同秸秆还田方式和还田量对马铃薯产量及品质的影响

本研究表明，秸秆还田后马铃薯淀粉含量降低，其原因可能是在马铃薯结薯期，秸秆覆盖还田和秸秆深耕还田处理可能因秸秆对磷钾元素的吸附特性，显著降低土壤速效钾和有效磷含量。磷可促进作物根系发育及幼苗健壮，增强抗旱、抗寒等抗逆能力，提升氮肥利用率，促进植株早熟、提升块茎淀粉和干物质含量，以及加强蛋白质、纤维素等重要物质的合成积累^[19]。结薯期是马铃薯氮磷钾吸收累积最大的时期^[20]，土壤中磷钾量的显著减少直接导致结薯期马铃薯淀粉含量的减少。另一原因为，冬季种植马铃薯时气温较低，秸秆覆盖还田和深耕还田均有保墒保温作用^[21-23]，低温环境有利于马铃薯茎块合成酶Susy4的表达，进而增加淀粉的合成^[21,24]。故秸秆不同还田方式和还田量均会降低马铃薯淀粉含量。

本研究发现，全量秸秆覆盖还田比全量秸秆深耕还田及不还田的对照处理还原糖含量显著提高，这可能是试验地位于亚热带高原山地季风气候且靠近湖泊雨水充足的原因，秸秆覆盖形成了保温保湿

的土壤环境^[13]，在这种环境下，马铃薯中的淀粉可通过淀粉酶降解成葡萄糖、麦芽糖^[25]，使得覆盖处理组马铃薯还原糖含量显著高于对照和深耕处理。秸秆覆盖还田显著提升马铃薯还原糖含量，加重商品薯的“糖化现象”，影响马铃薯加工后产品的口味和品质。本研究发现，在秸秆深耕还田方式下，半量秸秆深耕还田(BT)对马铃薯产量和淀粉含量提升显著，冬季秸秆不同方式还田种植马铃薯应选择半量秸秆深耕还田(BT)。

3.2 不同秸秆还田方式和还田量对土壤肥力的影响

本研究发现，秸秆不同还田方式对马铃薯各个时期土壤有机质、总氮以及氨态氮均无影响，但在马铃薯结薯期，秸秆不同还田方式对有效磷和速效钾影响显著，表现为各处理组土壤有效磷和速效钾含量显著低于对照组，其原因是短时间内秸秆无法腐解，且还田后秸秆对土壤磷钾元素有吸附特性^[26]，秸秆对磷有吸附作用，且秸秆炭的吸附速率和吸附量均高于破碎秸秆。在冬季不同还田方式中，覆盖处理的秸秆因与喷灌肥料接触面积大，吸附的磷钾元素较多。在西南一季多收的稻薯轮作区，农业强度大、复种指数高，土壤磷钾元素缺失严重^[27]，秸秆还田在一定程度上缓解了速效钾和有效磷含量下降的趋势^[28,29]，秸秆不同还田量对速效

钾和有效磷含量下降趋势的缓解不同, 表现为全量秸秆还田土壤对速效钾和有效磷含量下降趋势的缓解能力大于半量秸秆还田。故亚热带高原地区, 考虑秸秆不同还田方式和还田量下马铃薯土壤肥力的变化情况, 冬季种植马铃薯秸秆还田应选择全量秸秆深耕还田(QT)。

3.3 不同秸秆还田方式和还田量对土壤结构的影响

马铃薯发芽期深耕还田处理后土壤中 2~5 mm 粒径团聚体含量、MWD 和 GMD 显著高于覆盖还田, 且半量秸秆深耕还田(BT)处理后土壤中 >5 mm 大粒径团聚体含量显著高于全量秸秆覆盖还田(QF)和半量秸秆覆盖还田(BF), 而马铃薯结薯期全量秸秆覆盖还田(QF)处理后土壤中 0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量显著低于其他处理组但 0.5~2 mm 粒径团聚体含量显著高于其他处理组, 马铃薯成熟期半量秸秆深耕还田(BT)处理后土壤中 <0.25 mm 微团聚体含量显著低于半量秸秆覆盖还田(BF)。这是因为土壤微团聚体主要由胶结持久性强且不易分解的有机无机复合体组成, 大团聚体则主要是植物根系和微生物菌丝体黏结许多微团聚体后形成^[30], 而土壤团聚体有机碳和全氮主要富集在小粒径团聚体中, 土壤团聚体的稳定性受碳、氮的共同作用, 且土壤团聚体稳定性受 C/N 影响显著^[31], 土壤 C/N 越高其土壤团聚体稳定性越强, 这与冯秋苹等^[32]、高洪军等^[33]、裴亚楠等^[34]研究结果相似。秸秆还田腐解后, 产生的胶结物质将土壤颗粒和微团聚体结合成大团聚体, 土壤平均重量直径、几何平均直径得到提升, 土壤团聚体稳定性显著上升^[35]。综上, 在秸秆深耕还田下应选择半量秸秆深耕还田(BT)。

[参 考 文 献]

- [1] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 438-449.
- [2] 洪健康, 范汝明, 白学贵. 红河州“水稻-马铃薯”水旱轮作绿色高效模式[J]. 云南农业科技, 2020(3): 29-31.
- [3] 苏旺, 谢蕊蕊, 王舰. 秸秆还田对旱作马铃薯块茎淀粉合成关键酶活性及基因表达的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1566-1574.
- [4] 赵君华, 徐返, 骆振华, 等. 秸秆还田下化肥减量处理对马铃薯产量及土壤肥力的影响[J]. 种子科技, 2023, 41(22): 17-19, 23.
- [5] 姜占文. 秸秆直接还田应用腐解剂对马铃薯产量的影响[J]. 中国马铃薯, 2014, 28(3): 166-168.
- [6] 沈成春, 张婷, 温宪勤. 2022—2023年云南省马铃薯新品种区域试验[J]. 南方农业, 2024, 18(8): 1-4.
- [7] 庞泽, 田国奎, 王海艳, 等. 我国马铃薯产业发展现状及展望[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(7): 148-154.
- [8] 佚名. 稻薯水旱轮作绿色优质高效集成技术[J]. 云南农业, 2022(7): 48-49.
- [9] Chen S, Xu C, Yan J, *et al.* The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: An 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 223: 261-269.
- [10] 武超, 刘贤文, 张伟, 等. 马铃薯不同品种(系)和稻、薯轮作模式对根结线虫病的防治效果[J]. 作物学报, 2020, 46(9): 1456-1463.
- [11] 龙华. 冬闲稻田马铃薯不同覆盖方式对其产量及后茬水稻生长的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- [12] 赵炳地, 张久明, 朱莹雪, 等. 不同秸秆还田量对土壤团聚体及有机碳含量的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(1): 193-200.
- [13] 马菊花, 黄彩霞. 秸秆局部覆盖种植对土壤水热及早地马铃薯产量的影响[J]. 中国马铃薯, 2023, 37(1): 18-25.
- [14] 韩黎明, 童丹, 安志刚, 等. 马铃薯质量检测技术[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2015: 10.
- [15] 崔辉梅, 石国亮, 安君和. 马铃薯还原糖含量测定方法的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2006(19): 4821-4823.
- [16] Marcó A, Rubio R, Compañó R, *et al.* Comparison of the Kjeldahl method and a combustion method for total nitrogen determination in animal feed [J]. *Talanta*, 2002, 57(5): 1019-1026.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 张翰林, 郑宪清, 何七勇, 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 216-220.
- [19] 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[J]. 土壤, 2014, 46(2): 212-217.
- [20] 马建涛, 陈玉章, 程宏波, 等. 覆盖方式对旱地不同熟性马铃薯土壤水热特征和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 7-16.

- [21] 韩凡香, 常磊, 柴守玺, 等. 半干旱雨养区秸秆带状覆盖种植对土壤水分及马铃薯产量的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7): 8748-8782.
- [22] 张蓉, 陈晓文, 路平, 等. 不同覆盖模式对旱地马铃薯土壤水热变化和产量的影响 [J]. 作物杂志, 2023(5): 145-150.
- [23] Kumar R, Torres J S. Molecular analysis of genetic diversity among different groups of potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding, 2016, 76(2): 187.
- [24] 张森昱, 冯雨露, 马建涛, 等. 不同降水年型下秸秆带状覆盖对西北旱地马铃薯品质和产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 207-216.
- [25] 江应红, 杨茹薇, 古丽米拉·热合木土拉, 等. 影响马铃薯块茎淀粉含量的因素 [J]. 中国马铃薯, 2024, 38(3): 260-267.
- [26] 陆文龙, 赵标, 五毛毛, 等. 秸秆改良茶园土壤对氮磷吸附特性的研究 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 238-240.
- [27] 伍佳, 王忍, 吕广动, 等. 不同秸秆还田方式对水稻产量及土壤养分的影响 [J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 177-183.
- [28] 孙伊辰, 廖文华, 汪红霞, 等. 秸秆还田下土壤磷、钾变化与产量效应 [J]. 河北农业大学学报, 2014, 37(6): 7-12.
- [29] 邓伟, 官利兰, 管大伟, 等. 稻壳覆盖量对冬作马铃薯钾素吸收、产量和产值的影响 [J]. 中国马铃薯, 2023, 37(3): 219-226.
- [30] 王勇, 姬强, 刘帅, 等. 耕作措施对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1365-1373.
- [31] 曹伟, 李露, 赵鹏志, 等. 坡地黑土碳氮分布及其与团聚体稳定性的关系 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(8): 56-63.
- [32] 冯秋苹, 刘玉涛, 郭勇智, 等. 不同秸秆还田方式对土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2023, 45(5): 564-571.
- [33] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 等. 不同秸秆还田模式对黑钙土团聚体特征的影响 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 75-79.
- [34] 裴亚楠, 吕卫光, 郭涛, 等. 秸秆还田配施促腐菌剂对土壤团聚体及其养分的影响 [J]. 应用生态学报, 2023, 34(12): 3357-3363.
- [35] 谭文峰, 许运, 史志华, 等. 胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制 [J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1297-1308.