

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24492

绿肥对富硒稻田土壤有效硒及富硒稻米生产的影响

黄太庆^{1, 2}, 陈锦平^{1, 2}, 江泽普^{1, 2}, 廖青^{1, 2}, 邢颖^{1, 2}, 潘丽萍^{1, 2}, 刘永贤^{1, 2}

(1. 广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西 南宁 530007;

2. 广西富硒农业研究中心, 广西 南宁 530007)

摘要: 研究不同轮作体系下水稻自然富硒能力差异, 确定较好的冬种绿肥种类, 为广西壮族自治区富硒稻田资源化利用提供参考依据。在大田开展紫云英-水稻(T1)、油菜-水稻(T2)和肥田萝卜-水稻(T3)3种轮作试验研究, 并以冬闲-水稻为对照(CK), 系统分析不同冬种绿肥品种对土壤硒富集、土壤有效硒、水稻生长及硒含量的影响。结果表明, 在绿肥-水稻轮作体系中, 绿肥翻压时和水稻成熟期的土壤有效硒含量均与绿肥硒总累积量呈显著正相关, 并且稻谷硒含量与水稻孕穗期土壤有效硒含量呈极显著正相关。不同绿肥种植对硒的吸收累积存在明显差异, 其硒总累积量表现为紫云英>油菜>肥田萝卜, 与稻田土壤有效硒含量的结果相一致。冬种绿肥有助于提高下一季稻米硒含量, T1、T2和T3处理糙米硒含量分别比CK提高57.7%、51.6%和25.9%, 但有机硒含量占比与CK均无显著差异。可见, 冬种绿肥可影响土壤有效硒含量, 进而影响水稻对硒的吸收, 其中, 冬种紫云英更有利于提高富硒稻田土壤有效硒含量和稻谷硒含量。

关键词: 绿肥-水稻轮作; 土壤有效硒; 硒总累积量; 富硒水稻; 稻米硒含量

硒是人体必需的微量营养元素, 稻米作为人体硒重要来源之一, 其含量高低对人体硒营养状况有重要影响, 调查表明, 土壤硒含量普遍较低, 从而导致自然条件下稻米硒含量也较低。目前, 主要通过施用外源硒来提高稻米硒含量, 如喷施含硒叶面肥或土施含硒有机肥^[1], 硒溶液浸种+富硒基质育秧^[2]等。施用外源硒在提高稻米硒含量的同时, 容易导致稻米硒含量超标或有机硒含量占比降低等问题, 长期施用外源硒还会导致硒在土壤中累积, 进而污染土壤和水体环境, 因此, 对于富硒稻田并不适宜施用外源硒^[3]。不同土壤条件, 硒的有效性不同, 如在宁夏盐碱地, 土壤全硒含量为0.23 mg/kg就能生产出符合国家富硒标准的稻谷^[4], 而在广西很多富硒土壤上却不能生产出合格的富硒稻谷^[5], 说明广西土壤硒的有效性较低。广西拥有中国最大面积连片富硒土壤区, 因此, 提高土壤硒生物有效性对充分利用广西富硒土壤资源和发展富硒产业有

重要意义。

研究表明, 氨基酸与磷配施能提高茶园土壤有效硒含量, 提升茶叶对硒的吸收^[6]; 在酸性土壤上使用石灰或生物炭能提高土壤有效硒和水稻硒含量^[7], 在红壤上施用生物炭也有相似的结果^[8]; 施用富硒芽孢杆菌也能提高富硒赤红壤的有效硒含量, 促进菜心地上部对土壤硒的吸收累积^[9]。上述表明, 在旱地上采取适当措施有利于提高土壤有效硒含量, 但在富硒水稻土上的硒活化研究还较少。很多豆科黄耆属植物及十字花科植物都是硒超累积植物^[10], 而这些植物中的很多品种均为南方稻田中的主要绿肥作物, 张祥明等^[11]研究发现, 紫云英在自然条件下对硒的吸收量明显高于水稻对硒的吸收量, 且富硒紫云英还田有助于提高稻谷硒含量, 唐红琴等^[12]研究认为, 紫云英还田可促进土壤有效硒释放, 从而提高水稻硒含量, 可见, 硒超累积植物对活化土壤硒有一定作用。

在绿肥-水稻轮作生产富硒稻米的研究中, 目前还只见少量紫云英轮作的研究, 为更深入了解冬季绿肥-水稻轮作对水稻硒含量的影响, 本研究将同时研究紫云英、油菜和肥田萝卜3种冬种绿肥对富硒稻田土壤有效硒转化和水稻硒吸收特征的影响, 为利用绿肥-水稻轮作生产富硒水稻提供理论依据。

收稿日期: 2024-09-01; 录用日期: 2024-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761052); 中央引导地方科技发展资金项目(桂科ZY24212009); 广西自然科学基金项目(2017GXNSFBA198112); 广西农业科学院基本科研业务专项(2020YT039)。

作者简介: 黄太庆(1986-), 副研究员, 硕士, 主要研究方向为土壤生态与高值农业。E-mail: htaiqing@163.com。



1 材料与方法

1.1 试验地点与供试材料

本研究于 2021—2022 年在广西壮族自治区南宁市隆安县雁江镇开展大田试验, 土壤基本理化性质为: pH 6.2, 有机质 35.8 g/kg, 全氮 2.2 g/kg, 全磷 1.5 g/kg, 全钾 22.1 g/kg, 碱解氮 155 mg/kg, 有效磷 52 mg/kg, 速效钾 76 mg/kg, 全硒 0.44 mg/kg, 有效硒 0.06 mg/kg。试验紫云英品种为‘桂紫 7 号’; 油菜品种为‘中双油 9 号’; 肥田萝卜品种为‘桂茹菜 3 号’; 水稻品种为‘桂育 9 号’。

1.2 试验设计

大田试验设置 3 个冬种绿肥品种: 紫云英 (*Astragalus sinicus* L.)、油菜 (*Brassica napus* L.) 和肥田萝卜 (*Raphanus sativus* L.), 并以冬休闲为对照, 共 4 个处理: 紫云英-水稻轮作 (T1)、油菜-水稻轮作 (T2)、肥田萝卜-水稻轮作 (T3) 和冬闲-水稻 (CK), 每个处理 3 个小区重复, 小区面积为 20 m²。绿肥于 2021 年 11 月上旬播种, 紫云英、油菜和肥田萝卜每个小区播种量分别为 90、120 和 150 g, 种子均匀撒播于稻田表面。2022 年 3 月下旬翻压绿肥, 4 月初移栽水稻, 8 月 1 日水稻收获。绿肥生长过程不进行水分管理, 在 1 月下旬撒施尿素 0.25 kg/小区。水稻进行常规种植管理。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 样品采集

试验采集绿肥、水稻和土壤样品。

绿肥样品: 绿肥翻压前, 在每个小区选定 3 个 40 cm × 50 cm 面积大小、绿肥高、中、低长势的区域进行采样, 采集地上部和地下根系样品, 每个小区合并后即得样品, 称重以计算生物量 (干重)。地上部和根系用自来水清洗干净, 再用去离子水清洗一遍, 烘干后制样, 保存, 待测。

水稻样品: 在水稻孕穗期和成熟期两次采集水稻样品。水稻孕穗期在小区 4 个方位分别随机选择 1 株水稻, 分根系和地上部茎叶采集样品, 并称量估算生物量; 清洗、烘干、粉碎后待测全硒含量。水稻成熟期在小区 4 个方位分别随机选择 1 株水稻, 分根系、地上部茎叶、籽粒采集样品, 4 株混合即得样品, 清洗、烘干、称重、粉碎后待测全硒含量。通过样品根系和地上部茎叶重量估算根系及地上部秸秆生物量, 籽粒产量则经全部收割后称重、计算得出。

土壤样品: 种植绿肥翻压前, 以及水稻孕穗期和成熟期采集土壤样品, 风干后磨细过筛, 待测土壤速效养分和有效硒含量。

1.3.2 样品分析

土壤速效养分测定: 碱解氮采用碱解扩散法测定; 有效磷采用氟化铵盐酸浸提-钼锑抗分光光度法测定; 速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

土壤有效硒测定: 称取 1.000x g 风干土 (过 0.15 mm 筛) 于 100 mL 干燥塑料离心管中, 加入 15 mL 1 mol/L K₂HPO₄-KH₂PO₄ 缓冲溶液, 置于 25℃、200 r/min 恒温振荡箱中震荡提取 90 min, 然后在 4000 r/min 下离心 15 min, 上清液用 0.45 μm 滤纸过滤, 于 4℃ 下储存待测。

植物全硒测定: 称取植物样品 0.3000 g 至微波消解管中, 加入 8 mL 浓硝酸, 在 120℃ 电炉预消解 30 min, 转移至微波消解炉, 消解条件为: 10 min 功率加到 800 W, 保持 5 min; 再需 10 min 将功率提高至 1400 W, 保持 20 min; 后冷却至 60℃, 取出样品。从微波消解炉中取出的样品还需在 120℃ 电炉上赶酸至液体体积为 2 mL, 加入 5 mL 1:1 盐酸溶液, 再消煮 15 min。最后把消煮液转移至 50 mL 容量瓶, 用水定容。摇匀后用原子荧光光度计 (吉天 AFS-8330) 测定全硒含量。

稻米有机硒测定: 称取 2.000 g 样品于 50 mL 三角瓶, 加入 20 mL 1:1 HCl 溶液, 磁力搅拌 5 min, 再超声溶解 30 min, 后定容至 50 mL 容量瓶, 离心, 吸取澄清滤液 10 mL 于 50 mL 消煮管, 加 5 mL 混合酸 (硝酸: 高氯酸为 4:1), 在 185℃ 电炉上消煮至 2 mL, 冷却, 加 5 mL 1:1 HCl 再煮 10 min, 后定容于 25 mL 容量瓶, 用原子荧光光度计 (吉天 AFS-8330) 测定硒含量, 得到样品中无机硒含量。有机硒含量为全硒含量减去无机硒含量; 有机硒含量占比 (%) = 有机硒含量 / 全硒含量 × 100。

实验室测定的每个样品都进行两次平行测定, 两次测定值相对误差应小于 15%, 否则重新测定。平行测定合格的样品, 取两次测得值的算术平均值为结果。此外, 测定的每一批样品都插入国家标准样, 标样测定结果相对误差应小于 35%, 否则这批样品重新测定。

1.4 数据统计分析

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 进行数据统计分析和图表制作, 用 LSD 法分析处理间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥生物量及硒富集特征

在广西富硒稻田上不同冬种绿肥品种的生物量和硒富集能力均有显著差异(表1)。肥田萝卜的根系生物量显著高于油菜和紫云英,紫云英则显著低于其他两种绿肥;在绿肥地上部生物量上,油菜最高,肥田萝卜次之,二者间没有显著差异,但均显著高于紫

云英;不同冬种绿肥总生物量大小规律与绿肥地上生物量相同。绿肥根硒含量以紫云英最高,且显著高于油菜和肥田萝卜,后两者的根系硒含量差异不显著;不同绿肥地上部硒含量大小特征与根系相同,以紫云英最高(0.59 mg/kg),肥田萝卜最低(0.25 mg/kg)。在不同绿肥品种硒累积量上,紫云英硒总累积量最高,其次为油菜,二者间没有显著;肥田萝卜硒总累积量最低,且显著低于其他两种绿肥。

表 1 不同绿肥生物量及硒含量

绿肥	根生物量 (kg/hm ²)	地上生物量 (kg/hm ²)	总生物量 (kg/hm ²)	根硒含量 (mg/kg)	地上硒含量 (mg/kg)	硒总累积量 (mg/hm ²)
紫云英	179.1 ± 9.3c	2600.4 ± 193.0b	2779.6 ± 201.8b	0.80 ± 0.08a	0.59 ± 0.04a	1693.8 ± 108.9a
油菜	240.2 ± 11.4b	4496.5 ± 213.4a	4736.7 ± 224.8a	0.49 ± 0.04b	0.33 ± 0.03b	1591.7 ± 186.7a
肥田萝卜	325.9 ± 24.5a	4020.9 ± 391.4a	4346.8 ± 415.9a	0.41 ± 0.04b	0.25 ± 0.04b	1122.3 ± 148.2b

注:同列中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 不同冬种绿肥对稻田土壤速效养分的影响

表2显示冬种绿肥-水稻轮作稻田不同时期碱解氮、有效磷、速效钾含量变化特征。在绿肥翻压前,冬种不同绿肥对土壤碱解氮和有效磷含量无显著影响,但种植紫云英和肥田萝卜会显著降低土壤有效钾含量。在水稻孕穗期,冬种绿肥处理显著提高碱解氮和速效钾含量,提高幅度分别为8.6%~13.9%和20.8%~29.2%;虽然有效磷含量也提高7.9%~15.6%,但与CK差异不显著;不同绿肥品种之间对以上3种有效养分的影响差异不显著。在水稻成熟期,冬种绿肥翻压措施稻田土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量分别提高7.2%~10.7%、13.6%~20.2%和11.9%~24.3%,但只对速效钾的提高达显著水平,碱解氮和有效磷含量与CK差异不显著;水稻成熟期3种绿肥之间对上述3种有效养分含量均没有显著差异。

各处理土壤碱解氮、有效磷和速效钾在不同采样期中均表现为水稻孕穗期含量最高(表2)。其中CK处理不同时期采样碱解氮和有效磷含量没有显著差异,只有孕穗期土壤速效钾含量显著高于绿肥翻压前采样结果;冬种紫云英翻压还田后水稻孕穗期土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量显著高于绿肥翻压前,并且在水稻成熟期的土壤有效磷和速效钾含量显著高于绿肥翻压前;冬种油菜处理不同时期土壤碱解氮没有显著差异,但土壤有效磷和速效钾含量表现为水稻孕穗期和成熟期显著高于绿肥翻压前;冬种肥田萝卜处理水稻孕穗期土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著高于绿肥翻压前,但水

稻成熟期只有土壤速效钾显著高于绿肥翻压前,土壤碱解氮和有效磷含量与绿肥翻压前没有显著差异。

表 2 稻田土壤的有效养分含量 (mg/kg)

养分	处理	绿肥翻压前	孕穗期	成熟期
碱解氮	CK	113.4 ± 3.7aA	120.1 ± 7.7bA	115.9 ± 6.3aA
	T1	117.4 ± 6.9aB	136.7 ± 6.3aA	128.4 ± 3.7aAB
	T2	118.8 ± 10.5aA	133.0 ± 6.8abA	124.6 ± 6.4aA
	T3	112.0 ± 2.7aB	130.4 ± 3.0abA	124.3 ± 8.5aAB
有效磷	CK	37.5 ± 4.3aA	41.7 ± 2.8aA	36.1 ± 1.7aA
	T1	30.5 ± 2.9aB	45.0 ± 2.7aA	43.4 ± 3.6aA
	T2	29.2 ± 3.2aB	48.2 ± 5.1aA	42.7 ± 3.8aA
	T3	31.2 ± 3.0aB	47.3 ± 4.5aA	41.0 ± 4.5aAB
速效钾	CK	69.1 ± 6.2aB	81.8 ± 2.6bA	77.2 ± 2.7bAB
	T1	54.9 ± 2.4bB	105.7 ± 8.0aA	96.0 ± 7.2aA
	T2	61.2 ± 4.0abC	106.1 ± 4.8aA	92.6 ± 3.9aB
	T3	51.8 ± 4.0bC	98.9 ± 3.0aA	86.4 ± 3.2abB

注:不同小写字母表示不同处理在相同时期土壤有效硒含量差异显著(P<0.05);不同大写字母表示相同处理在不同时期土壤有效硒含量差异显著(P<0.05)。下同。

2.3 绿肥及其还田对土壤有效硒含量的影响

表3显示不同冬种绿肥稻田土壤有效硒变化特征。绿肥翻压前,冬种绿肥还田处理土壤有效硒与CK没有显著差异,冬种紫云英和油菜处理土壤有效硒含量较CK提高28.1%和6.5%,冬种肥田萝卜则降低17.3%,在3种绿肥之间,冬种紫云英处理要显著高于冬种肥田萝卜。在水稻孕穗期,绿肥翻压还田处理土壤有效硒含量均显著高于CK,紫云英、油菜和肥田萝卜翻压处理分别比CK提高88.1%、77.2%和49.5%,不同绿肥之间差异不显

著。水稻成熟期稻田土壤采样分析结果与孕穗期有相同的规律,绿肥翻压处理显著高于CK,提高幅度为44.1%~82.2%,且不同绿肥处理间无显著差异。以上结果表明,富硒绿肥还田后有利于提高富硒稻田土壤的有效硒含量,而紫云英翻压还田处理土壤有效硒增量优于油菜和肥田萝卜。

不同时期稻田土壤有效硒含量也不同,其中绿肥翻压还田处理土壤有效硒含量变幅更大(表3)。CK处理,土壤有效硒含量变化为孕穗期>绿肥翻压前>成熟期,但各时期的差异不显著。进行冬种绿肥处理,绿肥翻压后显著提升土壤有效硒含量,不同土壤采样时期的大小均为孕穗期>成熟期>绿肥翻压前,其中孕穗期显著高于成熟期和绿肥翻压前,成熟期和绿肥翻压前采样检测结果没有显著差异。说明绿肥种植及翻压还田加剧了稻田土壤有效硒含量变化,促进土壤硒转化和循环过程,利于水稻对硒的吸收。

表3 各处理在水稻不同生长期的土壤有效硒含量($\mu\text{g}/\text{kg}$)

处理	绿肥翻压前	孕穗期	成熟期
CK	$62 \pm 11\text{abA}$	$67 \pm 13\text{bA}$	$51 \pm 8\text{bA}$
T1	$79 \pm 12\text{aB}$	$127 \pm 17\text{aA}$	$92 \pm 7\text{aB}$
T2	$66 \pm 8\text{abB}$	$119 \pm 12\text{aA}$	$89 \pm 10\text{aB}$
T3	$51 \pm 9\text{bB}$	$101 \pm 14\text{abA}$	$73 \pm 8\text{aB}$

2.4 不同品种绿肥-水稻轮作对稻米生产的影响

从图1可知,在水稻孕穗期,冬种不同绿肥翻压还田对水稻根系和地上部茎叶生物量没有显著影响,但会显著影响水稻成熟期根系生物量和籽粒产量。冬种紫云英、油菜和肥田萝卜翻压还田处理水稻成熟期根系生物量分别比CK提高12.3%、42.6%和7.5%,其中油菜翻压还田处理根系生物量显著高于CK;上述3种绿肥还田处理水稻成熟期茎叶生物量分别比CK提高7.1%、11.7%和7.5%,但差异不显著;冬种紫云英翻压还田处理水稻籽粒产量显著高于CK,增幅达12.8%,而油菜和肥田萝卜翻压还田处理水稻籽粒产量影响不显著,分别增产8.6%和7.4%。

2.5 不同品种绿肥-水稻轮作对稻米硒素营养的影响

2.5.1 水稻不同生育期的硒素营养特征

冬种绿肥翻压还田对水稻植株硒素营养有重要影响(图2)。水稻孕穗期,冬种紫云英、油菜和肥田萝卜处理水稻根系硒含量分别比CK提高23.7%、18.1%和5.8%,紫云英翻压处理显著高于CK;冬种绿肥翻压处理水稻孕穗期茎叶硒含量均显著高于CK,冬种紫云英、油菜和肥田萝卜处理

分别比CK提高25.4%、27.3%和22.3%。水稻成熟期,冬种绿肥翻压处理水稻根系硒含量与CK无显著差异,但均有提高的趋势,其中紫云英翻压处理增幅最大,达10.1%;茎叶硒含量则有显著变化,冬种紫云英、油菜和肥田萝卜处理分别比CK提高34.3%、21.0%和16.8%,其中紫云英翻压还田处理显著高于CK。说明,随着绿肥在土壤中的腐解,及水稻对硒吸收与转运,绿肥对水稻硒素营养的影响由根部逐步过渡到地上部分。

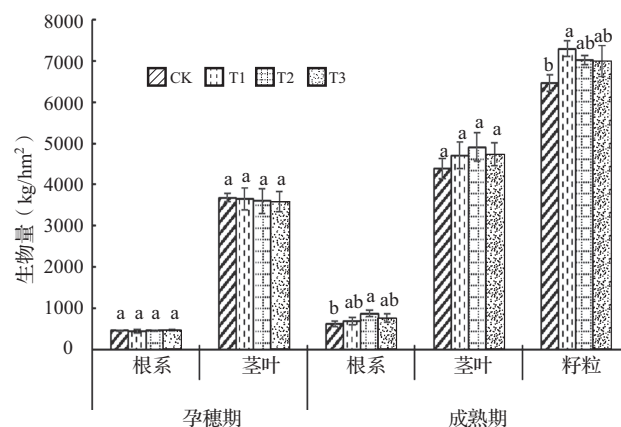


图1 各处理水稻生物量特征

注:同组图柱上不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

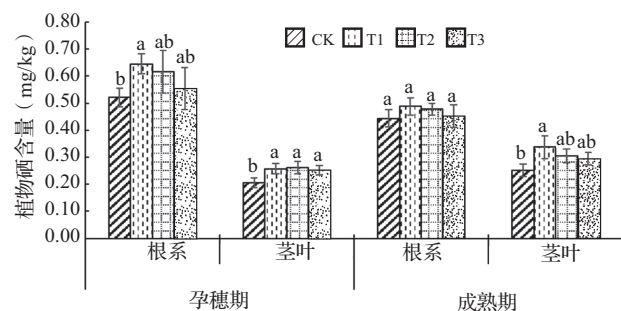


图2 水稻不同生育期根系及茎叶的硒含量

2.5.2 水稻籽粒硒累积特征

从图3可知,冬种绿肥翻压还田均能提高水稻成熟期籽粒硒含量。与CK相比,冬种紫云英、油菜和肥田萝卜翻压还田处理水稻糙米硒含量分别提高57.7%、51.6%和25.9%,其中紫云英和油菜翻压还田处理显著高于CK。谷壳硒含量也表现出相似规律,各处理硒含量大小顺序为紫云英>油菜>肥田萝卜>CK,以上绿肥还田处理分别比CK提高53.2%和42.4%和26.7%,紫云英和油菜翻压还田处理显著高于CK。在水稻糙米有机硒含量上,各处理有机硒含量占比均在90%以上(图3),冬种

紫云英翻压还田处理最高，为 93.4%，肥田萝卜翻压还田处理最低，为 91.8%，但各冬种绿肥翻压还田处理与 CK 均没有显著差异。以上结果说明，冬种紫云英翻压还田处理最有利于提高稻谷硒含量及硒品质，其次为冬种油菜处理。

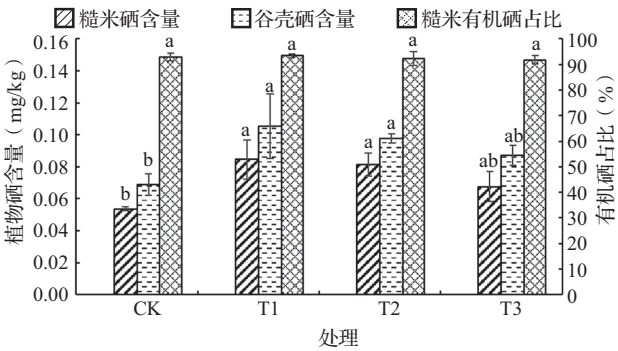


图3 不同绿肥-水稻轮作下稻米硒含量特征

2.6 绿肥硒累积与土壤有效硒及稻谷硒含量的相关关系

在绿肥-水稻轮作种植体系中，稻谷糙米和谷壳硒含量与水稻孕穗期土壤有效硒含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，与绿肥硒累积量、绿肥翻压前土壤有效硒含量及水稻成熟期土壤有效硒含量的相关性不高 (表 4)。此外，水稻孕穗期土壤有效硒含量与绿肥硒累积量的相关性也不显著，但绿肥翻压前土壤有效硒含量与绿肥茎叶硒累积量及硒总累积量呈极显著正相关 ($P<0.01$)，水稻成熟期土壤有效硒含量与绿肥茎叶硒累积量及硒总累积量呈显著正相关 ($P<0.05$)，这可能与水稻孕穗期吸收土壤大量硒相关。以上结果说明，冬种绿肥翻压还田会影响稻田土壤硒形态转化与循环过程，对提高稻米硒含量有积极作用。

表4 水稻硒含量、绿肥硒累积量及土壤有效硒含量之间的线性相关关系

指标	糙米 硒含量	谷壳 硒含量	绿肥根 硒累积量	绿肥茎叶 硒累积量	绿肥硒 总累积量	绿肥翻压前 土壤有效硒	孕穗期土壤 有效硒含量
谷壳硒含量	0.890**						
绿肥根硒累积量	0.032	0.251					
绿肥茎叶硒累积量	0.629	0.546	0.109				
绿肥硒总累积量	0.626	0.555	0.159	0.999**			
绿肥翻压前土壤有效硒	0.359	0.256	0.325	0.824**	0.835**		
孕穗期土壤有效硒	0.960**	0.846**	0.054	0.588	0.587	0.385	
成熟期土壤有效硒	0.599	0.341	-0.162	0.781*	0.767*	0.769*	0.528

注：* 和 ** 分别表示相关性达显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 水平。

3 讨论

不同作物对土壤硒的富集能力有较大差异，研究表明，豆科植物和十字花科植物均有较强的硒富集能力^[13-14]，在本研究中3种绿肥茎叶、根系的硒含量均较高，其中紫云英富集硒能力最强，然后依次为油菜、肥田萝卜 (表 1)。过去研究一般认为十字花科植物的硒富集能力高于豆科植物，如王亚国等^[15]的研究表明，白萝卜的生物富集系数要高于绿豆。紫云英是豆科黄芪属植物，油菜和肥田萝卜是十字花科植物，本研究的结果却表现为豆科植物硒富集、累积能力高于十字花科，一方面黄芪属植物是公认的硒超累积植物^[10]，另一方面可能与具体的作物品种有关，因为相同作物种类，不同品种之间的硒累积

能力也存在明显差异^[16]。此前没有系统比较紫云英、油菜、肥田萝卜3种绿肥根系及地上部分硒含量分布特征的研究，本研究为此内容作了补充。

绿肥种植对土壤养分影响已有较多研究。本研究中水稻孕穗期土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均有明显提升，在水稻成熟期则有所回落，这与前人研究结果一致，紫云英、油菜等冬绿肥还田有利于土壤速效钾、有效磷等养分累积^[17]，在对紫云英等都可绿肥的稻田腐解研究表明，绿肥中氮和钾经历 0 ~ 14 d 快速释放、15 ~ 40 d 中速释放和 41 d 之后的缓慢释放的过程，而磷则经历 0 ~ 30 d 的快速释放，30 d 之后的缓慢释放过程^[18]。在本研究中，3 种冬绿肥处理间土壤速效氮磷钾之间基本没有显著差异，李亚贞等^[19]对紫云英和油菜的研究也有



相似的结果,但对于肥田萝卜的研究还较少,这可能与其相对较差的肥力提升特性有关。

冬种绿肥能增加土壤有效硒含量(表3),因为不仅绿肥植株硒累积量与土壤中有效硒含量呈显著正相关,而且水稻成熟期的土壤有效硒含量也与翻压绿肥的硒累积量呈显著正相关(表4)。绿肥中累积的硒在绿肥分解过程中也会被释放出来,从而提高土壤有效硒含量^[20],而绿肥对土壤微生物及代谢组分有影响,进而影响土壤硒的生物有效性。绿肥翻压后稻田中土壤有效硒含量呈先上升后下降的趋势(表3),这与绿肥在土壤中的腐解速率先加快后逐渐降低的过程一致^[21]。因为,绿肥中的硒虽然主要也是以有机硒的形式存在,但未被土壤物理保护的有机硒形态容易被土壤微生物分解形成无机硒或小分子的有机硒,这部分硒会被水或者 K_2HPO_4 - KH_2PO_4 缓冲溶液提取,从而提高了土壤有效硒含量,随着绿肥腐解的进行,绿肥累积的硒被腐解殆尽,同时腐解产生的硒部分被水稻吸收利用,一部分被土壤吸附固定,土壤有效硒含量则逐步降低。但是,孕穗期的土壤有效硒含量与绿肥总硒累积量却没有显著相关性,这可能是因为孕穗期和灌浆期是水稻吸收硒的关键时期,该时期的有效硒被水稻快速吸收,而导致瞬时调查结果反映不出其与绿肥总硒的相关性。不同冬种绿肥品种对土壤有效硒的影响有差异,本研究中,冬季种植紫云英处理土壤有效硒含量最高,其次为油菜和肥田萝卜处理(表3),这是因为紫云英的硒累积量要高于油菜和肥田萝卜(表1)。

绿肥-水稻轮作有利于提高稻季水稻对硒的吸收,绿肥翻压还田一方面促进水稻根系生长,以增强根系对养分的吸收,另一方面,提高土壤有效态养分含量,尤其是有效磷含量,其能减少土壤对硒的吸附,提高土壤硒的生物有效性^[22]。不同冬种绿肥对水稻根系、茎叶和籽粒硒含量提升幅度大小顺序为紫云英>油菜>萝卜(图2、图3)。这可能与绿肥累积硒总量有关(表1),孕穗期和灌浆期是水稻硒累积关键时期,稻米硒含量与孕穗期土壤有效硒含量呈极显著正相关(表4),如上文所分析,绿肥硒总累积量与土壤有效硒含量有紧密关联,这与前人的研究结果类似,富硒紫云英或富硒秸秆还田能提高后茬作物硒含量^[23-24]。本研究各处理生产的稻谷有机硒含量占比没有显著差异,均

在90%以上,因为绿肥-水稻轮作体系中,稻谷累积的硒均是由水稻根系吸收再往地上部转移,一方面,富硒植物残体腐解产生的溶解有机质结合硒形态能为作物根系吸收利用^[25],另一方面,作物主要吸收四价硒,大部分在根部转化为有机硒才能转移至地上部^[26],因此,从根部吸收硒的稻谷有机硒含量占比通常较高^[27]。

4 结论

绿肥-水稻轮作能提高稻季稻田土壤有效养分及水稻生物量和产量,同时也能提高稻田土壤有效硒含量和稻米硒含量,但与对照相比稻米有机硒含量占比没有显著变化。不同绿肥品种之间,紫云英植株硒总累积量显著高于油菜和肥田萝卜,而绿肥植株硒总累积量与土壤有效硒有紧密关联,稻谷硒含量又与孕穗期的土壤有效硒含量呈显著正相关。因此,紫云英-水稻轮作最有利于提高稻季水稻对硒的吸收和累积。

参考文献:

- [1] 张城铭,周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用率的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 186-194.
- [2] 黄太庆,路丹,江泽普. 不同育秧方式对水稻硒富集的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(1): 63-68.
- [3] Ma Y, Huang X, Du H, et al. Impacts, causes and biofortification strategy of rice selenium deficiency based on publication collection[J]. Science of Total Environment, 2024, 912: 169619.
- [4] 唐珂璠,张智,康淑铭,等. 宁夏引黄灌区盐碱富硒土壤对水稻硒元素吸收积累的影响[J]. 福建农业学报, 2023, 38(7): 864-872.
- [5] 张靖源,陈剑平,黄邵华,等. 广西鹿寨水稻及其种植土壤中硒含量分布特征分析[J]. 南方农业学报, 2016, 47(11): 1856-1860.
- [6] 邢颖,廖青,梁潘霞,等. 磷与有机物配施对南方茶园土壤硒有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(1): 97-103.
- [7] 张阳阳,王梦园,周伟,等. 调理剂对酸性富硒土壤改良效果的初步研究[J]. 资源环境与工程, 2024, 38(1): 34-39.
- [8] 路丹,黄太庆,陈锦平,等. 施用生物炭对红壤富硒区生物有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 118-126.
- [9] 廖青,邢颖,梁潘霞,等. 富硒芽孢杆菌对赤红壤硒转化及菜心硒吸收积累的影响[J]. 南方农业学报, 2022, 53(6): 1666-1673.
- [10] El-Ramady H, Abdalla N, Alshaal T, et al. Selenium and its role in higher plants. In: Pollutants in buildings, water and living organisms[M]. Berlin: Springer, 2015: 235-296.
- [11] 张祥明,郭熙盛,王文军,等. 水稻土和紫云英含硒量对稻

- 米含硒量的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 964-968.
- [12] 唐红琴, 李忠义, 韦彩会, 等. 紫云英不同还田量下土壤硒释放特征及水稻富硒规律[J]. 西南农业学报, 2020, 33(3): 568-574.
- [13] 周乾坤, 周守标, 孔娟娟, 等. 施硒对紫云英硒累积和硒形态的影响研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 304-309.
- [14] 李瑜. 安康富硒土壤中不同农作物富硒能力比较研究[J]. 陕西农业科学, 2015, 61(11): 13-14, 46.
- [15] 王亚国, 张百忍, 李瑜, 等. 天然高硒植物区不同农作物对硒的富集特征研究[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(3): 6-9.
- [16] 蒋光月. 15个紫云英品种的富硒能力比较研究[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(1): 53-54.
- [17] 崔月贞, 王吕, 吴玉红, 等. 冬绿肥联合稻秆还田对水稻产量及稻田土壤肥力的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 100-108.
- [18] 秦宇航, 吴玉红, 王吕, 等. 汉中地区4种冬绿肥还田腐解和养分释放特征[J]. 草业科学, 2024, 41(10): 2306-2315.
- [19] 李亚贞, 韩天富, 柳开楼, 等. 红壤稻田土壤酶活性及水稻产量对翻压冬季绿肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(7): 1313-1322.
- [20] Huang W, Xu Q, Wu N. Effects of selenium-enriched rape returning amount on available selenium content in paddy soil and selenium accumulation in rice[J]. International Journal of Analytical Chemistry, 2022, 2022: 3101069.
- [21] 朱吉凤, 蒋美艳, 周熙荣, 等. 不同绿肥作物的腐解特性及氮磷钾释放规律[J]. 上海农业学报, 2022, 38(2): 1-5.
- [22] Huang J, Huang X, Jiang D. Phosphorus can effectively reduce selenium adsorption in selenium-rich lateritic red soil[J]. Science of Total Environment, 2024, 906: 167356.
- [23] 邹盼, 廖莎, 肖强, 等. 栽培技术对稻谷硒含量的影响——基于文献分析[J]. 中国稻米, 2022, 28(6): 63-69.
- [24] Wang D, Dinh Q T, Thu T T, et al. Effect of selenium-enriched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil[J]. Chemosphere, 2018, 199: 417-426.
- [25] Wang D, Peng Q, Yang W, et al. DOM derivations determine the distribution and bioavailability of DOM-Se in selenate applied soil and mechanisms[J]. Environmental Pollution, 2020, 259: 113899.
- [26] Li H, McGrath S, Zhao F. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. New Phytologist, 2008, 178(1): 92-102.
- [27] 黄太庆, 江泽普, 邢颖, 等. 亚硒酸钠不同施用方法对水稻硒富集及转化的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(2): 311-319.

Effects of green manure varieties on available selenium in paddy soil and selenium-enriched rice production

HUANG Tai-qing^{1, 2}, CHEN Jin-ping^{1, 2}, JIANG Ze-pu^{1, 2}, LIAO Qing^{1, 2}, XING Ying^{1, 2}, PAN Li-ping^{1, 2}, LIU Yong-xian^{1, 2} (1. Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Science, Nanning Guangxi 530007; 2. Guangxi Selenium-Rich Agricultural Research Center, Nanning Guangxi 530007)

Abstract: The differences in natural selenium (Se) enrichment of rice under different rotation systems were studied, in order to identify the better types of winter green manure, and provide theoretical basis for the application of selenium-enriched paddy soil in Guangxi. Three types of rotation system were conducted, including *Astragalus smicus*-rice rotation (T1), *Brassica napus*-rice rotation (T2) and *Raphanus sativus*-rice rotation (T3), with winter fallow-rice rotation (CK) as the control. The effects of different green manures on selenium absorption and accumulation, soil available selenium, rice growth, and selenium content in rice were systematically analyzed. The results showed that there was a significant positive correlation between the total accumulation of selenium in green manure and the available selenium content in the soil during the period of green manure tilling and rice maturity. Moreover, the selenium content in rice grains was significantly positively correlated with the available selenium in the soil during the rice heading stage. There were differences in the absorption and accumulation of selenium among different green manures, the total selenium accumulation was ranked as *Astragalus smicus* > *Brassica napus* > *Raphanus sativus*, the available selenium content in the soil showed the same pattern. Planting green manure in winter was beneficial to increasing the selenium content in rice. Compared to the control, selenium content in unpolished rice treated with T1, T2 and T3 increased by 57.7%, 51.6% and 25.9%, respectively, however, there was no significant difference in the proportions of organic selenium. It could be seen that the accumulation of selenium in green manure affected the available selenium content in soil, which could affect the selenium absorption by rice. Planting of *Astragalus smicus* in winter was more beneficial for increasing the available selenium content in selenium-enriched paddy soil, and increased the selenium content in rice in the subsequent rice growing season.

Key words: green manure-rice rotation; available selenium in paddy soil; total accumulation of selenium; selenium-enriched rice; selenium content in rice