

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.05.012

周影, 王琳, 魏启舜, 等. 稻茬高度影响轮作紫云英生长及还田效应. 土壤, 2021, 53(5): 977–982.

稻茬高度影响轮作紫云英生长及还田效应^①

周影¹, 王琳^{1*}, 魏启舜¹, 郭成宝¹, 殷宏宝², 周学珍²

(1 江苏丘陵地区南京农业科学研究所, 南京 210046; 2 南京骏圣生态农业有限公司, 南京 211599)

摘要: 在大田试验条件下, 研究了水稻机械收割不同留茬高度(15、30、40 cm, 分别表示低茬、中茬、高茬)对轮作紫云英生长、养分积累以及翻压还田后土壤养分、化学性状和微生物等的影响。结果表明: 稻茬高度显著影响轮作紫云英生长、养分积累以及翻压还田效果。紫云英单位面积株数随留茬高度的降低而显著减少; 除单株分枝数外, 植株株高、茎粗、单株鲜、干重均表现为高茬处理>中茬处理>低茬处理, 高、低茬处理间差异显著或极显著。产草量受稻茬高度影响明显, 单位面积鲜、干草产量均随稻茬高度的降低而显著减少, 高茬处理的紫云英鲜、干草产量均最高, 分别达到 19.22 t/hm² 和 3.27 t/hm², 较低茬处理每公顷增加 15.21 t 和 2.53 t。不同稻茬高度处理的紫云英植株碳及氮、磷、钾含量无显著差异, 植株养分积累量则随稻茬高度增加而显著增加, 各养分积累量变化趋势一致; 不同处理紫云英翻压还田后土壤 pH 变化差异不显著, 但均较试验前略有上升; 土壤电导率则表现为高茬处理大于中、低茬处理, 处理间差异极显著; 翻压后土壤养分变化差异较大, 各养分含量均表现为随水稻留茬高度降低而减少的趋势, 高茬处理土壤的有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别较低茬处理增加 41.51%、27.35%、34.96%、68.78%、82.12%。不同处理紫云英翻压还田后, 土壤可培养微生物数量存在差异。三大类微生物细菌、真菌、放线菌的数量均以高茬处理最高, 除放线菌外, 差异均达显著水平, 其中, 对细菌数量的影响最为明显, 高茬处理极显著大于中、低茬处理, 中、低茬处理间差异显著。综上, 水稻留高茬(茬高 40 cm)轮作紫云英可获得较高的生物量和养分积累, 翻压还田后土壤培肥效果显著优于中、低茬(茬高≤30 cm)收割的处理。

关键词: 水稻; 留茬高度; 紫云英; 产草量; 养分含量; 微生物

中图分类号: S-3 文献标志码: A

Rice Stubble Height Affects Growth and Returning Effect of Chinese Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) Rotated with Rice

ZHOU Ying¹, WANG Lin^{1*}, WEI Qishun¹, GUO Chengbao¹, YIN Hongbao², ZHOU Xuezheng²

(1 Nanjing Institute of Agricultural Sciences in Jiangsu Hilly Area, Nanjing 210046, China; 2 Nanjing Junsheng Ecological Agriculture Co., Ltd., Nanjing 211599, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of different rice stubble heights (15 cm, 30 cm and 40 cm, marked as low, middle and high stubble respectively) on the growth, nutrient accumulation of *astragalus sinicus* L. (Chinese milk vetch) and soil nutrients, chemical properties and microbes after milk vetch returned to the field. The results showed that rice stubble height significantly affected the growth, nutrient accumulation and soil fertilizing effects of milk vetch. The number of milk vetch per unit area decreased significantly with the decrease of stubble height. Plant height, stem diameter, fresh and dry weight of milk vetch per plant were in the order of high stubble > middle stubble > low stubble, except the number of branches per plant, and the difference was significant or extremely significant between high and low stubble. Grass yield of milk vetch was significantly affected by stubble height, and the fresh and hay yields of milk vetch per unit area decreased significantly with the decrease of stubble height. The fresh and hay yields of milk vetch under high stubble were the highest, reaching 19.22 t/hm² and 3.27 t/hm², and increased by 15.21 t/hm² and 2.53 t/hm² compared with low stubble. There was no significant difference in the contents of carbon, nitrogen, phosphorus and potassium of milk vetch between different stubble heights, but the plant nutrient accumulation increased significantly with the increase of rice stubble height, and the accumulation trend was consistent for all

①基金项目: 六合区骏圣农业 2020 年农业科技(粮食类)示范基地项目资助。

* 通讯作者(wanglin0421nj@163.com)

作者简介: 周影(1983—), 女, 江苏铜山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业废弃物资源化利用、土肥等方面研究。E-mail: JJDD010@126.com

nutrients. There was no significant difference in soil pH after milk vetch returned to field under different stubble heights, but it was slightly higher than that before the test. Soil conductivity was higher in high stubble than in middle and low stubble, and the differences between different stubble heights were all extremely significant. There were great differences in soil nutrients after milk vetch returned to field, and showed decreasing trend with the decrease of stubble height. The contents of organic matter, total nitrogen, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and potassium under high stubble increased by 41.51%, 27.35%, 34.96%, 68.78% and 82.12% respectively compared with those in low stubble. There were differences in culturable microbe population after milk vetch returned to field under different stubble heights. The numbers of bacteria, fungi and actinomycetes were the highest under high stubble, and the differences were significant except actinomycetes. Among them, the number of bacteria was most affected. The number of bacteria under high stubble was significantly larger than middle and low stubble, and the difference was significant between middle and low stubble. To sum up, rice high stubble (40 cm) could promote more the biomass, nutrient accumulation and soil fertilizing effect of milk vetch than those of medium and low stubble (≤ 30 cm).

Key words: Rice; Stubble height; *Astragalus sinicus* L. (Chinese milk vetch); Yield; Nutrient content; Microbe

紫云英(*Astragalus sinicus* L.)作为一种纯天然的优质有机肥源,具有生长发育快、固氮能力强、改善土壤环境质量和促进作物生长等特点^[1-4],是中国稻区最主要种植和利用的冬绿肥作物^[5]。稻草还田和冬种绿肥可较好地归还作物秸秆中的养分,改善土壤理化性状、减少化肥使用、增加作物产量^[6-10],成为南方稻田土壤培肥的重要措施。研究表明,稻草覆盖可为绿肥生长创造比较适宜的温、湿度环境,促进绿肥干物质积累以及对氮、磷、钾等养分的吸收^[11]。水稻收割时不同的留茬高度决定了不同的还田稻草量。郑伟等^[12]认为稻草适当留茬可改善土壤水热条件,避免因稻草覆盖量过大而引起作物沤苗、死苗,利于提高作物产量。周国朋等^[6]研究发现,水稻收割时留高茬(稻草高度约 30 cm)还田可为冬绿肥创造适宜的生长环境,提高产草量以及豆科绿肥生物固氮能力。然而,如果配套技术不足,稻草还田短期可能对后茬作物播种(栽插)、出苗、幼苗生长及产量等产生显著负面影响^[13-14]。在农业生产中,为了便于后续旋耕整地作业及播种栽插,以及防止焚烧秸秆现象的发生,秸秆留茬高度一般小于 15 cm^[15],过量的稻草覆盖对轮作紫云英的生长产生影响。因此,确定水稻机械收割适宜的留茬高度,也即适宜的还田稻草量对后期作物特别是稻田套播轮作植物的生长具有十分重要的意义。为此,本研究拟以江苏地区种植面积较大的粳稻品种为对象,通过大田试验,比较不同水稻机收留茬高度对轮作紫云英生长、养分积累以及翻压还田效果的影响,旨在探明轮作紫云英前茬水稻机械收割适宜的留茬高度,提升紫云英种植效率,实现农艺、农机高效有机结合,为综合利用稻草和绿肥培肥地力提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试紫云英品种为徽紫 1 号。

1.2 试验设计

试验于 2019—2020 年在江苏省句容市茅山风景区墓东村潘庄实施,前茬水稻品种为南粳 5055。田间试验条件下,于水稻收获期设置 3 个留茬高度处理:15、30、40 cm,分别表示:低茬、中茬、高茬。

为方便机械收割,采取大区试验,每处理试验面积 620 m²。2019 年 9 月 25 日水稻成熟期套播播种紫云英,11 月 6 日收割水稻并将收割下的稻草粉碎覆盖还田。紫云英生长期按常规栽培方式进行田间肥水管理及病虫害防治。2020 年 4 月 14 日,花期取样调查紫云英生长状况和养分含量。2020 年 5 月 26 日,紫云英就地全量翻压还田一个月后取耕层土样调查土壤养分含量和化学性状。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 紫云英生长状况 于花期取样调查紫云英生长状况。每小区按“S”型曲线随机采样 10 株调查生长指标(株高、分枝数、茎粗、单株鲜重和干重);每小区随机取 20 cm × 20 cm 的样方各 3 个调查株数;各处理随机取 3 个 1 m² 的样方测量鲜草产量及干草产量。

1.3.2 植株养分含量 植株碳含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;氮含量采用微量凯氏定氮法测定,磷含量采用钼锑抗比色法测定,钾含量采用火焰光度计法测定^[16]。养分积累量 = 植株干物质量 × 养分含量。

1.3.3 土壤化学指标 采用蒸馏水浸提(土水质量比 1 : 5) pH 计测定土壤 pH、电导率仪测定土壤电导

率, $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 外加热法测定土壤有机质, 半微量凯氏定氮法测定土壤全氮, 碱解扩散法测定土壤有效氮, $NaHCO_3$ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷, 乙酸铵浸提 ICP-aes 法测定土壤速效钾^[16]。

1.3.4 土壤微生物量 采用稀释平板计数法测定土壤微生物量, 其中细菌选用牛肉膏蛋白胨培养基、真菌选用马丁氏培养基、放线菌选用改良高氏一号培养基进行培养^[17]。

1.4 数据处理

运用 Microsoft Excel 2016 和 IBM Statistics SPSS 19.0 软件进行数据处理和统计分析, 并作图。

2 结果

2.1 不同稻茬高度处理对还田稻草量的影响

水稻机械收割后稻草直接覆盖还田, 因此, 不同的留茬高度决定了不同的还田稻草量。由表 1 可知, 水稻留高茬(茬高 40 cm)时, 还田稻草鲜、干重分别为 9.09 t/hm² 和 5.60 t/hm², 随着留茬高度的降低, 还田稻草量不断增加, 茬高 15 cm 时还田稻草量最大, 每公顷还田干草量分别较中、高茬处理增加 2.04 t 和 3.81t。

表 1 不同留茬高度处理还田稻草量

Table 1 Amounts of rice straw returned to field under different stubble heights

留茬高度(cm)	还田稻草鲜重(t/hm ²)	还田稻草干重(t/hm ²)
40	9.09	5.60
30	12.66	7.37
15	17.25	9.41

2.2 不同稻茬高度处理对紫云英植株生长状况的影响

表 2 不同处理对轮作紫云英植株生长的影响结果显示, 前茬水稻不同留茬高度显著影响轮作紫云英的单位面积株数。随着留茬高度的降低, 紫云英单位面积株数显著减少, 高茬处理每公顷株数较低茬处理增加 197.25 万株, 增幅 264.06%, 差异极显著。

不同处理紫云英单株分枝数差异不显著, 植株株高、茎粗、单株鲜、干重则均表现为高茬处理>中茬处理>低茬处理, 高、低茬处理间差异达显著或极显著水平。说明, 稻茬高度影响轮作紫云英的群体密度, 进而使个体生长产生差异。

表 2 不同处理对轮作紫云英植株生长状况的影响

Table 2 Growth traits of milk vetch under different rice stubble heights

处理	总株数(万株/hm ²)	株高(cm)	单株分枝数	茎粗(mm)	单株鲜重(g)	单株干重(g)
高茬	271.95 ± 5.85 Aa	58.68 ± 1.25 Aa	2.87 ± 0.07 Aa	3.88 ± 0.15 Aa	7.44 ± 0.51 Aa	1.15 ± 0.05 Aa
中茬	170.20 ± 24.15 ABb	52.04 ± 1.81 Ab	2.40 ± 0.42 Aa	3.72 ± 0.51 Aab	6.24 ± 0.26 ABb	1.08 ± 0.05 Aab
低茬	74.70 ± 5.85 Bc	31.89 ± 2.45 Bc	2.40 ± 0.31 Aa	2.73 ± 0.12 Ab	5.21 ± 0.16 Bb	0.93 ± 0.09 Ab

注: 表中数据为平均值 ± 标准差, 同列数据不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05), 不同大写字母表示处理间差异极显著(P<0.01), 下同。

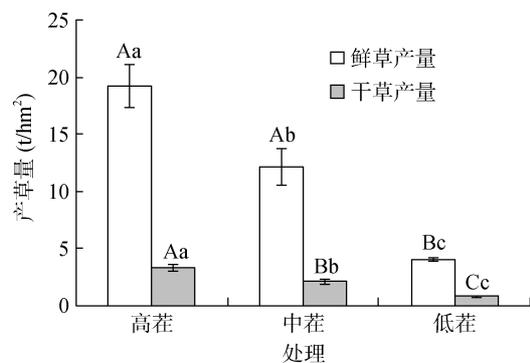
2.3 不同稻茬高度处理对紫云英产草量的影响

对不同稻茬高度处理下轮作紫云英的产草量研究结果显示(图 1), 产草量受稻茬高度影响明显, 单位面积鲜、干草产量均随稻茬高度的降低而减少, 差异达显著或极显著水平。高茬处理的紫云英鲜、干草产量均最高, 分别达到 19.22 t/hm² 和 3.27 t/hm², 较低茬处理每公顷增加 15.21 t 和 2.53 t。

2.4 不同稻茬高度处理对紫云英植株养分积累的影响

本试验条件下, 不同稻茬高度处理的紫云英植株碳及氮、磷、钾含量均无显著差异, 各处理间数值变幅较小, 无明显变化规律。植株养分积累量则随稻茬高度增加而显著增加, 各养分积累量变化趋势一致, 均表现为高茬处理>中茬处理>低茬处理。水稻留高茬处理的紫云英植株各养分积累量最高,

且极显著高于中、低茬处理, 与紫云英干草产量的变化趋势一致。



(图中不同小写字母表示同一指标处理间差异显著(P<0.05), 不同大写字母表示同一指标处理间差异极显著(P<0.01))

图 1 不同稻茬高度对轮作紫云英产草量的影响

Fig. 1 Grass yields of milk vetch under different rice stubble heights

表 3 留茬高度对紫云英植株养分含量及积累量的影响
Table 3 Nutrient contents and accumulation in milk vetch under different rice stubble heights

指标	处理	C	N	P	K
养分含量 (g/kg)	高茬	446.55 ± 9.47 Aa	31.13 ± 1.19 Aa	2.39 ± 0.23 Aa	22.84 ± 2.22 Aa
	中茬	493.19 ± 29.45 Aa	29.61 ± 0.36 Aa	2.10 ± 0.08 Aa	19.91 ± 3.24 Aa
	低茬	485.07 ± 19.00 Aa	30.63 ± 0.95 Aa	2.41 ± 0.08 Aa	24.36 ± 0.60 Aa
养分积累量 (kg/hm ²)	高茬	1410.75 ± 30.00 Aa	98.40 ± 3.75 Aa	7.65 ± 0.75 Aa	72.15 ± 7.05 Aa
	中茬	1010.55 ± 60.45 Bb	60.60 ± 0.75 Bb	4.35 ± 0.15 Bb	40.80 ± 6.60 Bb
	低茬	360.00 ± 14.10 Cc	22.65 ± 0.75 Cc	1.80 ± 0.15 Cc	18.15 ± 0.45 Bc

2.5 不同稻茬高度处理紫云英翻压还田对土壤养分的影响

对不同处理田块紫云英翻压后土壤养分和化学性状进行研究,结果显示(表 4),不同处理的土壤 pH 变化差异不显著,但均较试验前略有上升,增加了 0.09~0.26 个单位。土壤电导率则表现为高茬处理大于中、低茬处理,且差异极显著,这可能是由于不同留茬处理的紫云英生物量不同,翻压还田后释放的养分元素量不同而导致土壤中可溶性盐含量有较

大差异。

不同稻茬高度处理的紫云英翻压还田后,土壤养分变化差异较大。有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均表现为随稻茬高度降低而减少的趋势,处理间差异达极显著水平。高茬处理土壤的有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量分别较低茬处理增加 41.51%、27.35%、34.96%、68.78%、82.12%。表明,稻草高留茬轮作紫云英翻压还田后可释放更多的养分到土壤中,培肥效果优于中、低茬处理。

表 4 不同稻茬高度处理紫云英还田后土壤养分和化学性状
Table 4 Soil nutrients and chemical properties after milk vetch returned to fields under different rice stubble heights

处理	pH	电导率(μs/cm)	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
高茬	5.86 ± 0.04 Aa	88.03 ± 0.62 Aa	17.59 ± 0.06 Aa	1.49 ± 0.02 Aa	105.01 ± 0.13 Aa	18.92 ± 0.24 Aa	143.49 ± 0.22 Aa
中茬	5.78 ± 0.01 Aa	68.43 ± 0.45 Bb	15.60 ± 0.15 Bb	1.34 ± 0.01 Bb	98.78 ± 0.35 Bb	17.59 ± 0.11 Bb	102.19 ± 0.61 Bb
低茬	5.69 ± 0.16 Aa	52.60 ± 3.03 Cc	12.43 ± 0.10 Cc	1.17 ± 0.02 Cc	77.81 ± 0.40 Cc	11.21 ± 0.09 Cc	78.79 ± 0.13 Cc
试验前	5.60	50.50	10.28	1.07	70.68	5.31	64.46

2.6 不同稻茬高度处理紫云英翻压还田对土壤微生物的影响

由表 5 可知,不同稻茬高度处理的轮作紫云英翻压还田后,土壤可培养微生物量存在差异。三大类微生物细菌、真菌、放线菌的数量均以高茬处理最高,除放线菌外,差异达显著水平。其中,对细菌数量的影响最为明显,高茬处理极显著大于中、低茬处理,中、低茬处理间差异显著。

表 5 翻压不同稻茬高度处理紫云英对土壤可培养微生物量的影响

Table 5 Soil culturable microbe populations after milk vetch returned to fields under different rice stubble heights

处理	细菌(10 ⁶ CFU/g)	真菌(10 ⁴ CFU/g)	放线菌(10 ⁵ CFU/g)
高茬	20.42 ± 1.05 Aa	12.27 ± 0.16 Aa	13.90 ± 1.98 Aa
中茬	15.67 ± 1.00 Bb	7.80 ± 1.50 Ab	12.80 ± 1.00 Aa
低茬	11.68 ± 0.61 Bc	8.02 ± 0.91 Ab	13.62 ± 0.64 Aa

3 讨论

3.1 水稻不同留茬高度影响轮作紫云英生长及养分积累

作物群体密度是影响作物产量的重要因素之一。

本试验条件下,不同处理紫云英单位面积株数差异较大,且随着水稻留茬高度的降低而显著减少。由于水稻机械收割后稻草直接覆盖还田,因此,留茬高度越低还田稻草量就越多,过量的稻草覆盖影响紫云英幼苗的光照、透气性等,增加了幼苗死亡率,从而使紫云英的群体密度变小,进而影响其个体性状及群体产量。表现为植株株高、茎粗、单株鲜干重、鲜草产量、干草产量等均随稻茬高度的降低而减小。周国朋等^[6]研究表明,稻草-绿肥联合还田提高了绿肥紫云英的产草量,稻草高留茬(稻茬高度约 30 cm)处理显著高于低留茬(近地面收割)处理。与本研究结果中稻茬高度为 30 cm 的处理轮作紫云英鲜、干草产量均显著高于低茬(茬高 15 cm)处理一致,同时,本试验还表明,继续增加稻茬高度,紫云英的产草量则进一步提升,茬高为 40 cm 时紫云英的鲜、干草产量均最高,且显著高于 30 cm 及以下稻茬的处理。

紫云英作为一种绿肥,最重要的作用是养分还田,获得较高的养分积累量是其栽培的关键^[18]。周国朋等^[6]试验显示,与稻草不还田相比,稻草还田提高了紫云英的含氮量,但不同稻茬高度处理间差异不

显著。与其结果相似,本研究也发现,不同稻茬高度处理的轮作紫云英植株氮含量无明显差异。除此之外,植株碳及磷、钾等含量也未表现出明显趋势,处理间差异不显著。紫云英植株养分积累量则随稻茬高度增加而显著增加,各养分积累量变化趋势一致,均表现为高茬处理>中茬处理>低茬处理。水稻留高茬处理的紫云英植株各养分积累量最高,且极显著高于中、低茬处理,与紫云英干草产量的变化趋势一致。可见,水稻留高茬收割可使套播轮作紫云英获得更高的生物量和养分积累,为后期翻压还田培肥地力奠定了基础。

3.2 水稻不同留茬高度影响轮作紫云英翻压还田效应

土壤酸碱环境以及电导率变化对植物生长产生重要影响。刘威^[19]试验表明,紫云英翻压还田后土壤 pH 由弱酸性逐步上升至中性,土壤电导率也随着紫云英翻压量的增加而提高。张珺等^[20]研究发现,种植和翻压紫云英使土壤 pH 趋于稳定。本试验条件下,不同稻茬高度处理的紫云英翻压还田后土壤 pH 差异不大,但均较试验前略有上升。土壤电导率则表现为随留茬高度的增加而显著上升,说明,高留茬处理下种植和翻压紫云英可向土壤中释放更多的可溶性盐。

土壤有机质是土壤肥力的重要指标^[21]。土壤中的氮、磷、钾等元素在农作物生长发育过程中起着不可替代的作用。研究表明,冬种绿肥和稻草还田可促进土壤有机质、全氮以及其他矿质养分含量的增加^[22-23]。Pramanik 等^[24]认为,豆科绿肥与稻草联合还田提高了土壤有机质矿化速率,促进氮素释放;同时,联合还田较多的氮投入也利于产生较多的无机氮。与前人研究结果一致,本试验条件下,水稻不同留茬高度下稻草覆盖还田联合紫云英翻压,土壤有机质、全氮以及速效养分含量均较试验前有所增加。同时,不同处理间土壤养分变化差异较大,各养分含量均随着稻茬高度的增加而上升,且差异极显著。周国朋等^[6]通过 4 年的稻草-绿肥联合还田试验,比较了杂交稻稻草高留茬(茬高约 30 cm)和低留茬(水稻近地面收割)处理土壤养分的变化,结果表明,水稻高留茬处理的土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量均高于低茬处理,除速效钾外,处理间差异均不显著。与本研究的結果有所不同,这可能主要是由于试验的年限以及作物品种等不同导致,但同时也表明,稻草不同留茬高度处理对稻草-绿肥联合还田后土壤养分短期变化的影响更为显著。稻草高留茬

轮作紫云英生长期可积累更多的碳和氮、磷、钾,翻压还田腐解后可释放更多的养分到土壤中,获得更好的培肥效果。

土壤微生物是评价土壤质量的潜在指标^[25-26]。研究发现,种植翻压紫云英有利于促进土壤微生物的生长^[20,27-28]。本试验条件下,不同稻茬高度处理对轮作紫云英翻压还田后土壤可培养微生物数量产生影响。三大类微生物细菌、真菌、放线菌的数量均以高茬处理最多,除放线菌外,差异均达显著水平,其中,对细菌数量的影响最为明显。研究结果显示,随着水稻机收留茬高度的增加,轮作种植紫云英可获得更高的生物量和养分积累,翻压还田腐解后释放有效碳、氮也较多,利于土壤微生物利用并维持较大的生物群落^[29]。同时在绿肥植物体分解过程中,紫云英根系的分泌物在增加土壤相关酶类的基础上,多种根际微生物需要的营养成分和能源物质也相应增加,从而有利于微生物的生长。

4 结论

水稻不同留茬高度处理下轮作紫云英的生长、养分积累以及翻压还田后土壤养分、化学性状、微生物量等均受到显著影响。本试验条件下,前茬梗稻高留茬(稻茬高度为 40 cm)收割可显著促进轮作紫云英的生长和养分积累,稻茬和紫云英联合翻压还田后,土壤化学性状、养分和微生物状况均优于中、低茬(稻茬高度≤30 cm)收割的处理。综合考量还田稻草量以及降低水稻收割时的产量损失等因素,梗稻机械收割稻茬高度控制在 40 cm 左右较为适宜,轮作绿肥可获得较好的种植效应和土壤培肥效果。

参考文献:

- [1] Kim D J, Chung D S, Bai S C C, et al. Effects of soil selenium supplementation level on selenium contents of green tea leaves and milk vetch[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2007, 12(1): 35-39.
- [2] Asagi N, Ueno H. Nitrogen dynamics in paddy soil applied with various ¹⁵N-labelled green manures[J]. Plant and Soil, 2009, 322(1/2): 251-262.
- [3] Nakayama H. Characteristics of rice (*Oryza sativa*) growth, yield and soil nitrogen by cultivating Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as green manure [J]. Tohoku Agricultural Research, 2005, 58:35-36.
- [4] 周影,魏启舜,管永祥,等.播种量对晚播紫云英生长及养分积累的效应[J].土壤,2020,52(3):482-486.
- [5] 谢志坚,周春火,贺亚琴,等.21世纪我国稻区种植紫云英的研究现状及展望[J].草业学报,2018,27(8):185-196.

- [6] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157-163.
- [7] 杨帆, 董燕, 徐明岗, 等. 南方地区秸秆还田对土壤综合肥力和作物产量的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3040-3044.
- [8] Balwinder-Singh, Humphreys E, Eberbach P L, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule[J]. *Field Crops Research*, 2011, 121(2): 209-225.
- [9] 李继福, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 292-302.
- [10] 马守田, 冯荣成, 张黛静, 等. 有机物料替代部分氮肥对小麦光合特性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 48-51.
- [11] 苏伟, 鲁剑巍, 周广生, 等. 稻草还田对油菜生长、土壤温度及湿度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 366-373.
- [12] 郑伟, 肖国滨, 肖小军, 等. 稻茬高度对谷林套播油菜生长发育及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 648-656.
- [13] 曾木祥, 王蓉芳, 彭世琪, 等. 我国主要农区秸秆还田试验总结[J]. 土壤通报, 2002, 33(5): 336-339.
- [14] 顾克军, 张斯梅, 顾东祥, 等. 稻秸还田与播后镇压对稻茬小麦产量与品质的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(11): 2192-2197.
- [15] 黄鹏. 机收小麦留茬高度对作业成本的影响及建议[J]. 现代农业科技, 2014(7): 257-258.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 362-364.
- [18] 周影, 王琳, 魏启舜, 等. 晚播对紫云英生长、养分积累和根际微生物的影响[J]. 土壤, 2019, 51(1): 46-50.
- [19] 刘威. 紫云英养分积累规律和还田腐解特性及其效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [20] 张珺瞳, 曹卫东, 徐昌旭, 等. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 19-25.
- [21] Adekiya A O. Green manures and poultry feather effects on soil characteristics, growth, yield, and mineral contents of tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108721.
- [22] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4542-4548.
- [23] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1572-1578.
- [24] Pramanik P, Haque M M, Kim S Y, et al. C and N accumulations in soil aggregates determine nitrous oxide emissions from cover crop treated rice paddy soils during fallow season[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 622-628.
- [25] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. *CATENA*, 2013, 101: 122-128.
- [26] 陈香, 李卫民, 刘勤. 基于文献计量的近 30 年国内外土壤微生物研究分析[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1458-1470.
- [27] 肖嫩群, 张洪霞, 成壮, 等. 紫云英还田量对烟田土壤微生物及酶的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 711-715.
- [28] 杨曾平, 高菊生, 郑圣先, 等. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4): 576-583.
- [29] Wang Y F, Liu X M, Butterly C, et al. pH change, carbon and nitrogen mineralization in paddy soils as affected by Chinese milk vetch addition and soil water regime[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(4): 654-663.