

玉米-绿肥轮作体系下光叶紫花苕的氮肥替代 和土壤肥力提升效应

陈检锋¹, 梁海^{2†}, 王伟¹, 陈华¹, 尹梅¹, 王志远¹, 刘俊^{1,4},
陈军¹, 高嵩涓², 曹卫东^{3*}, 付利波^{1*}

(1 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 云南昆明 650205; 2 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏南京 210095;
3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业农村部植物营养与肥料重点实验室, 北京 100081;
4 云龙县农业农村局, 云南云龙 271018)

摘要:【目的】研究光叶紫花苕 (*Vicia villosa* Roth var. *glabrescens*) 不同翻压量对玉米生长及土壤性状的影响, 明确绿肥的养分供应潜力, 为玉米-绿肥轮作系统中的化肥减施提供科学依据。【方法】于 2018 和 2019 年在云南省嵩明县开展玉米 (黑糯 1 号) 田间试验, 共设 5 个处理: 冬闲 (CK); 不施氮肥但翻压绿肥光叶紫花苕 15000 kg/hm² (G1)、30000 kg/hm² (G2)、45000 kg/hm² (G3); 冬闲+常规氮肥 N 270 kg/hm² (FN)。光叶紫花苕冬季种植, 在玉米播种前翻压。在玉米收获期, 测定玉米地上部氮、磷、钾含量和积累量, 测定产量和产量构成因素, 同时测定土壤全量和速效氮磷钾含量、pH 和有机质含量。【结果】2018 年各绿肥处理 G1、G2、G3 的玉米产量分别相当于 FN 处理的 78.14%、88.88% 及 92.86%, 2019 年 G1、G2、G3 处理的产量水平相当于 FN 处理的 98.92%、104.22% 和 113.91%, 相较第一年, 次年各绿肥处理产量水平有较大幅度增长; 2018 和 2019 年各绿肥处理株高、穗位高、秃穗长及单穗重等相较于 FN 多无显著差异; 2018 年 FN 处理籽粒氮含量显著高于其他各处理, 秸秆氮含量显著高于 CK 和 G1 处理。2019 年 G3 处理地上部氮积累量比 FN、G1 处理分别显著提高 42.02%、33.91%。2018 年玉米 FN 处理地上部磷积累量显著高于 CK 和 G1 处理, 钾积累量各施肥处理间无显著差异。2019 年, 4 个施肥处理间磷积累量无显著差异, 3 个绿肥处理的钾积累量均显著高于 FN 处理; 2018 年各处理土壤养分含量无显著差异, 2019 年随绿肥翻压量的增加土壤碱解氮、速效钾、全氮及有机质含量等显著增加, 即土壤培肥效果随绿肥应用年限增加有所提升; 聚合增强树分析表明, 土壤全氮及单穗重对玉米产量的贡献率最大, 均为 20.89%。【结论】无需施用氮肥, 第一年翻压高量光叶紫花苕, 第二年翻压常量光叶紫花苕即可为玉米提供与常量氮肥相当的氮素养分, 获得相近甚至更高的玉米产量。连续两年翻压绿肥后, 土壤速效及全量氮、钾及有机质含量均有显著的提升效果。

关键词: 光叶紫花苕; 玉米; 氮; 养分累积; 土壤培肥

Effects of smooth vetch (*Vicia villosa* Roth var. *glabrescens*) incorporation on nitrogen fertilizer replacement and soil fertility improvement in a maize-green manure rotation system

CHEN Jian-feng¹, LIANG Hai^{2†}, WANG Wei¹, CHEN Hua¹, YIN Mei¹, WANG Zhi-yuan¹, LIU Jun^{1,4},
CHEN Jun¹, GAO Song-juan², CAO Wei-dong^{3*}, FU Li-bo^{1*}

(1 Institute of Agricultural Environment and Resources, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming, Yunnan 650205, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Jiangsu 210095, China;
3 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
4 Agricultural and Rural Bureau of Yunlong Country, Yunlong, Yunnan 271018, China)

收稿日期: 2021-02-07 接受日期: 2021-05-12

基金项目: 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22)。

联系方式: 陈检锋 E-mail: jianfchen@163.com; †共同第一作者 梁海 E-mail: 2019203005@njau.edu.cn

* 通信作者 曹卫东 E-mail: caoweidong@caas.cn; 付利波 E-mail: fulibofj@qq.com

Abstract: 【 Objectives 】 The study was conducted to evaluate the effects of smooth vetch (*Vicia villosa* Roth var. *glabrescens*) turnover amount on maize growth and soil properties in a maize-green manure rotation system. The aim was to provide theoretical support for the chemical fertilizer reduction potential of smooth vetch.

【 Methods 】 The field trials were conducted in Songming County, Yunnan Province in 2018 and 2019, with the maize (Heinuo No.1) as test material. The experiment included five treatments: winter fallow (CK), incorporation of smooth vetch at 15000 kg/hm² (G1), 30000 kg/hm² (G2), 45000 kg/hm² (G3), and winter fallow with chemical fertilizer application N 270 kg/hm² (FN). The smooth vetch was planted during winter season and returned to field before maize cultivation. NPK content and accumulation in the aboveground part of maize, yield and yield components were examined at harvest, including soil total and available N, P, and K and organic matter content. The soil pH was measured as well. **【 Results 】** The maize yields of treatments G1, G2, and G3 were equivalent to 78.14%, 88.88%, and 92.86% of treatment FN in 2018, and 98.92%, 104.22%, and 113.91% of treatment FN in 2019. However, the plant height, ear height, bald ear length, and single ear weight were not significantly different ($P>0.05$) among all the treatments. The grain N content of the FN treatment was ($P<0.05$) higher than other treatments, and the N content of its straw was significantly higher than that of CK and G1 treatments. In 2019, the N accumulation in the shoots of G3 treatment was ($P<0.05$) higher than those of FN and G1 treatments, which were 42.03% and 33.91%, respectively. In 2018, corn P accumulation in the FN treatment was significantly higher than those of CK and G1 treatments, with no difference in K accumulation among the treatments. Except for CK, there was no significant difference ($P>0.05$) in P accumulation among the four treatments in 2019. The three green manure treatments accumulated more K than the FN treatment. There was no difference in soil nutrients among the treatments in 2018. In 2019, soil available N, available K, total N, and organic matter content increased significantly, enhancing soil fertility as the green manure application increased. The aggregated boosted tree (ABT) analysis indicated that soil total N and single ear weight contributed the most to maize yield, both accounting for 20.89%. **【 Conclusions 】** The incorporation of smooth vetch at a high rate in the first year (45000 kg/hm²) and moderate rate (30000 kg/hm²) in the second year relegates the need for N fertilizer in maize production. Smooth vetch incorporation at the above rates could provide similar or even higher N nutrition for maize to produce higher yields. After two years of incorporating smooth vetch, the soil total and available N and K and organic matter contents increased.

Key words: smooth vetch; maize; nitrogen; nutrient accumulation; soil fertility

绿肥是我国传统农业生产的重要资源,在改善土壤理化性状、培肥土壤及提高作物产量上有巨大潜力^[1-3]。豆科绿肥因具备生物固氮能力,可作为一种绿色清洁的肥源为农田输入较多氮素。研究表明,豆科作物年际固氮量可达110~227 kg/hm²^[4]。将豆科绿肥纳入主栽作物轮作体系中,能够起到替代部分化学氮肥、减少化学氮肥投入的作用。有研究发现在作物与红三叶轮作体系中,红三叶的固氮量平均可达177 kg/hm²^[5],毛叶苕子在豆科绿肥-主栽作物轮作体系中总固氮量可达到149 kg/hm²^[6]。豆科绿肥提供的氮素对作物生长的贡献率也有较高的占比,在主栽作物-红三叶和主栽作物-红三叶/黑麦草混播体系中达60%^[7],在小麦-豆科绿肥轮作体系中为7~27 kg/hm²^[8]。在旱地农业中实施豆科绿肥与作物间轮作可起到扩充土壤氮库、减少化肥投入的效

果,豆科绿肥翻压释放氮素的24.7%被后季小麦吸收,在化肥减量30%的情况下小麦产量与常规施肥持平,并且土壤全氮含量显著提升^[9-10]。

光叶紫花苕为我国西南旱地最常见的豆科绿肥作物,在该地区农业生产系统中适应性很强^[2]。我国光叶紫花苕主要种植区的鲜草平均产量为29.7±19.1 t/hm²^[11],在农业生产中,若可通过调控光叶紫花苕的生长使其生物量达到满足后茬作物生长发育的翻压量,则可以作为农业生产过程中的主要氮源,为有机农业发展提供保障。在长期的生产实践中,形成了光叶紫花苕-玉米轮作体系,该体系能够充分利用冬闲季节的水、肥、气、热等资源,发挥光叶紫花苕的生物固氮特性^[12],为后茬玉米的生长提供氮素。但是,光叶紫花苕在玉米生长中的养分供应潜力如何,其作为单独肥源时的养分供应能力及

对土壤肥力有何影响, 尚不明确。通过研究不同翻压量光叶紫花苜蓿作为唯一肥源对玉米生长及土壤理化性状的影响, 为豆科绿肥的化肥替代潜力及绿肥的生产能力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

田间定位试验于 2017 年 11 月至 2019 年 9 月在昆明市嵩明县小街镇云南省农业科学院基地内 (北纬 25°21′11.21″、东经 103°6′47.24″, 海拔 1910 m) 进行。供试土壤为红色石灰土, 质地为粘壤土, 试验开始前土壤 pH 为 7.1, 0—20 cm 土层土壤有机质含量 22.1 g/kg, 全氮含量 0.9 g/kg, 全磷含量 1.6 g/kg, 全钾含量 9.8 g/kg, 碱解氮含量 76.1 mg/kg, 有效磷 (P₂O₅) 含量 30.7 mg/kg, 速效钾 (K₂O) 含量 144.5 mg/kg。

1.2 供试作物

绿肥品种为光叶紫花苜蓿 (*Vicia villosa* Roth var. *glabrescens*); 玉米品种为黑糯 1 号。

1.3 试验设计

试验设 5 个处理 (表 1), 分别为冬闲+不施氮肥处理 (CK)、不施氮肥+翻压 15000 kg/hm² 光叶紫花苜蓿 (G1)、不施氮肥+翻压 30000 kg/hm² 光叶紫花苜蓿 (G2)、不施氮肥+翻压 45000 kg/hm² 光叶紫花苜蓿 (G3) 及冬闲+常规氮肥 (FN), 随机区组排列, 每处理 3 次重复。绿肥翻压量通过就地种植与异地移动进行调整。

定位试验采用光叶紫花苜蓿-玉米轮作体系, 光叶紫花苜蓿 11 月种植, 于第二年 4 月翻压还田, 还田后 15 天种植玉米, 玉米收获日期分别为 2018 年 9 月 20 日与 2019 年 9 月 25 日。光叶紫花苜蓿播种量为 75

kg/hm², 盛花期还田时对各小区产量进行测量, 并根据各处理设定的翻压量进行移除或添加。翻压还田时光叶紫花苜蓿的氮、磷、钾平均含量分别为 34.9、3.2、21.6 g/kg。玉米株行距为 0.45 m×0.75 m。各处理田间管理措施相同, 绿肥作物不施肥, 玉米各处理磷钾肥施用量相同, 分别为 P₂O₅ 90 kg/hm² 及 K₂O 90 kg/hm², 其中常规 100% 氮肥处理施氮量为 N 270 kg/hm², 各处理的磷钾肥及 FN 处理的 20% 氮肥作为基肥施入, FN 处理在玉米苗期追施 30% 氮肥、大喇叭口期追施 50% 氮肥。

1.4 样品采集与测定

分别于 2018 和 2019 年玉米收获期, 采集玉米植株和土壤样品, 并测定玉米农艺性状 (株高、茎粗、穗位高、穗长、秃穗长、穗粗和单穗重)。玉米按小区进行收获测产, 收获后取部分玉米籽粒在烘箱 105℃ 杀青 0.5 h 后, 75℃ 烘干至恒重, 粉碎后测定籽粒养分含量。玉米籽粒样品经 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮法消化后, 利用连续流动分析仪 (SAN++, Skalar, 荷兰) 测定全氮、全磷含量, 用火焰光度计测定全钾含量。

土壤样品采用五点取样法采集, 碱解氮含量用碱解扩散法测定; 土壤有效磷用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼蓝比色法测定; 土壤速效钾采用 pH 7.0 的醋酸铵浸提—火焰光度计法测定; 土壤有机质用硫酸—重铬酸钾氧化法测定^[13]。

1.5 数据分析

试验数据采用 SPSS Statistics 21.0、Excel 2017、Origin 2018 软件进行数据处理、统计分析及作图, 通过 R2.7.0 中的 “gbmplus” 包进行聚合增强树分析 (ABT)。

2 结果与分析

2.1 不同绿肥翻压量对玉米产量的影响

图 1 显示, 2018 年, G1、G2、G3、FN 处理的玉米产量分别为 8985、10220、10677、11498 kg/hm²。FN 处理显著高于 G1 及 G2 处理, 与 G3 处理差异不显著; G1 与 CK 差异不显著, 显著低于其他处理。G1、G2、G3 处理的产量分别相当于 FN 处理的 78.14%、88.88%、92.86%, 可见, 单独翻压绿肥表现出较好的产量效应, 特别是高翻压量能够保障玉米的产量水平。

试验第二年 (2019 年) 的玉米产量表现与第一年有明显不同, G1、G2、G3、FN 处理的产量分别为

表 1 各处理光叶紫花苜蓿翻压量及氮磷钾施用量 (kg/hm²)

Table 1 Application amounts of smooth vetch and nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers under different treatments

处理 Treatment	光叶紫花苜蓿 Smooth vetch	N	K ₂ O	P ₂ O ₅
CK	0	0	90	90
G1	15000	0	90	90
G2	30000	0	90	90
G3	45000	0	90	90
FN	0	270	90	90

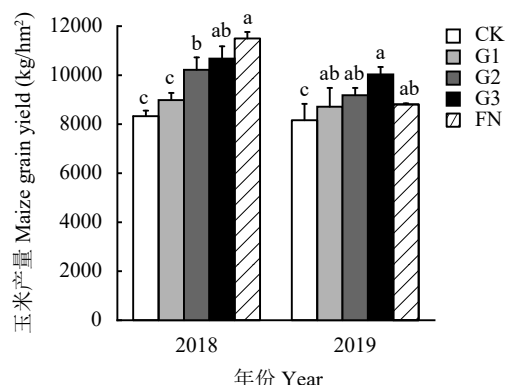


图 1 不同绿肥翻压量对玉米产量的影响

Fig. 1 Maize grain yield affected by green manure incorporation rate

[注 (Note): CK—冬闲 Winter fallow; G1—翻压 15000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 15000 kg/hm²; G2—翻压 30000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 30000 kg/hm²; G3—翻压 45000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 45000 kg/hm²; FN—冬闲+氮肥 Winter fallow + N fertilizer. 柱上不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).]

8712、9179、10032、8807 kg/hm², G1、G2 和 G3 的产量分别为 FN 的 98.92%、104.22% 和 113.91% (图 1)。施肥处理的产量均显著高于 CK, 虽然施肥处理间无显著差异, 但 G3 产量显示出高于 FN 的潜力, 说明连续翻压绿肥提高了绿肥的养分供应能力。

2.2 不同绿肥翻压量对玉米农艺性状的影响

表 2 表明, 各施肥处理间玉米农艺性状多无显著差异, 其中, 2018 年各绿肥处理下玉米农艺性状与 FN 处理间多无显著差异。2019 年 G2 处理的玉米茎粗显著高于 FN 和 G1 处理, 3 个绿肥处理的株高、穗位高、穗长、穗粗和单穗重与 FN 处理间无显著差异。

2.3 不同绿肥翻压量对玉米养分吸收的影响

2018 年 FN 处理籽粒及秸秆氮含量均显著高于其他各处理, 各处理籽粒及秸秆磷、钾含量多无显著差异, 其中籽粒磷钾含量分别处于 0.25%~0.27% 和 0.23%~0.26%, 秸秆磷钾含量则分别为 0.11%~0.12% 和 1.20%~1.59% (表 3)。玉米地上部的氮、磷、钾积累量均以 FN 处理最高, 并且氮积累量显著高于其他各处理, 磷积累量显著高于 CK 与 G1, 钾积累量显著高于 CK (表 4)。表明试验第一年, 绿肥的供氮能力相对较低, 而化肥能快速提供速效养分供作物吸收。

2019 年的结果 (表 3、表 4) 表明, 各施肥处理的养分含量和积累量差异比上一年明显减小。籽粒氮、磷、钾含量以及磷、钾积累量 3 个绿肥处理与化肥处理间多无显著差异; G1 处理秸秆氮含量显著低于 G2, 钾含量显著低于 G3。以 G3 处理的氮积累量最高, 比 G1 和 FN 两个处理分别显著高 42.02% 及 33.91% (表 4), 3 个绿肥处理钾积累量均显

表 2 不同处理下玉米农艺性状

Table 2 Agronomy properties of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	茎粗 Stem thick (cm)	秃穗长 Bald ear length (cm)	穗粗 Ear diameter (cm)	穗长 Ear length (cm)	穗位高 Ear height (cm)	株高 Plant height (cm)	单穗重 Weight per ear (g)
2018	CK	7.33 a	0.88 a	17.00 b	18.66 b	112.44 a	243.33 a	257.8 c
	G1	8.55 a	0.77 a	18.66 a	19.33 ab	113.88 a	246.11 a	285.6 bc
	G2	8.55 a	0.55 a	19.00 a	21.22 a	110.22 a	237.77 a	325.6 a
	G3	7.77 a	0.66 a	18.11 ab	20.22 ab	117.22 a	250.00 a	302.2 ab
	FN	7.88 a	0.55 a	18.77 a	21.44 a	120.77 a	255.00 a	320.0 ab
2019	CK	4.97 c	1.00 a	14.46 a	17.03 b	121.77 a	252.77 a	265.5 b
	G1	5.62 bc	1.86 a	15.44 a	20.37 a	134.33 a	309.88 a	325.4 ab
	G2	6.45 a	1.54 a	15.52 a	20.01 a	131.55 a	289.66 a	308.4 ab
	G3	6.18 ab	2.18 a	16.08 a	21.64 a	133.44 a	295.88 a	363.1 a
	FN	5.37 bc	1.67 a	14.84 a	18.95 a	118.00 a	272.77 a	304.4 ab

注 (Note): CK—冬闲 Winter fallow; G1—翻压 15000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 15000 kg/hm²; G2—翻压 30000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 30000 kg/hm²; G3—翻压 45000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 45000 kg/hm²; FN—冬闲+氮肥 Winter fallow + N fertilizer. 同列数据后不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

表 3 不同处理下玉米氮、磷、钾养分含量 (%)
Table 3 Nitrogen, phosphorus and potassium contents of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	籽粒 Grain			秸秆 Straw		
		N	P	K	N	P	K
2018	CK	1.27 b	0.27 a	0.25 ab	0.59 b	0.12 a	1.20 a
	G1	1.27 b	0.26 a	0.25 a	0.74 b	0.12 a	1.59 a
	G2	1.37 b	0.25 a	0.25 ab	0.78 ab	0.11 a	1.58 a
	G3	1.25 b	0.25 a	0.23 b	0.78 ab	0.11 a	1.59 a
	FN	1.61 a	0.26 a	0.26 a	1.06 a	0.11 a	1.55 a
2019	CK	0.75 b	0.19 a	0.28 a	0.50 c	0.09 b	1.05 c
	G1	0.97 ab	0.19 a	0.27 a	0.78 b	0.10 a	1.36 bc
	G2	1.06 a	0.19 a	0.28 a	1.07 a	0.11 a	1.55 ab
	G3	1.09 a	0.19 a	0.27 a	1.03 ab	0.10 a	1.76 a
	FN	0.90 ab	0.20 a	0.29 a	0.85 ab	0.10 a	1.03 c

注 (Note): CK—冬闲 Winter fallow; G1—翻压 15000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 15000 kg/hm²; G2—翻压 30000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 30000 kg/hm²; G3—翻压 45000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 45000 kg/hm²; FN—冬闲+氮肥 Winter fallow + N fertilizer. 同列数据后不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

表 4 不同处理下玉米地上部养分积累量 (kg/hm²)
Table 4 NPK accumulation in above-ground part of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	N	P	K
2018	CK	114.93 c	42.25 b	244.72 b
	G1	149.97 bc	44.37 b	293.82 ab
	G2	176.09 bc	48.07 ab	333.87 ab
	G3	184.24 b	47.98 ab	346.24 ab
	FN	259.37 a	52.99 a	364.84 a
2019	CK	139.15 c	30.21 b	216.83 c
	G1	215.33 b	35.39 ab	285.06 b
	G2	282.66 a	37.15 a	295.39 ab
	G3	305.82 a	38.70 a	329.65 a
	FN	228.38 b	35.46 ab	230.44 c

注 (Note): CK—冬闲 Winter fallow; G1—翻压 15000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 15000 kg/hm²; G2—翻压 30000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 30000 kg/hm²; G3—翻压 45000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 45000 kg/hm²; FN—冬闲+氮肥 Winter fallow + N fertilizer. 同列数据后不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Values followed by different small letters in a column mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).

著高于 FN 处理。这表明在试验第二年, 各绿肥处理的养分供应能力已经能够保障玉米的生产需要, 其中高翻压量的养分供应能力可以超过化肥处理。

2.4 不同绿肥翻压量对土壤养分及 pH 的影响

图 2 显示, 2018 年各处理间土壤全量养分含量均无显著差异, 表明不同施肥处理在试验第一年对土壤养分的影响不明显; 2019 年各处理间土壤全氮及土壤有机质含量均表现为绿肥处理显著高于 FN 处理, 并且规律一致, 为 G3>G2>G1>FN>CK, 其中绿肥处理 G1、G2、G3 土壤全氮较 FN 处理分别提高了 2.04、4.19 及 6.50 g/kg, 土壤有机质分别提高了 2.86、6.09 及 11.64 g/kg, 表明绿肥翻压对于云南红壤旱地的地力提升效果明显。3 个绿肥处理间, G3 处理的土壤全氮、有机质含量最高, 显著高于 G2 和 G1; G2 处理显著高于 G1。可见, 绿肥翻压利用后, 在第二年即可明显提升土壤全氮和有机质含量, 且提升作用随着绿肥翻压量的增加而增强。

图 3 表明, 2018 年不同处理间土壤碱解氮及速效钾含量无显著差异。2019 年, G2、G3 处理的碱解氮含量显著高于 FN 处理, 分别提升了 19.81 和 20.56 mg/kg。绿肥处理 G1、G2、G3 的土壤速效钾含量也显著高于 FN 处理, 分别提升了 33.09、69.35 和 89.14 mg/kg。总体看, 各处理的碱解氮与速效钾含量变化趋势一致, 均表现为 G3>G2>G1>FN>CK。此外, 两个试验年份各处理间的土壤 pH 与有效磷含量均无显著差异。

2.5 土壤性状及玉米农艺性状对玉米产量的贡献

运用聚合增强树 (ABT) 方法分析了不同处理下

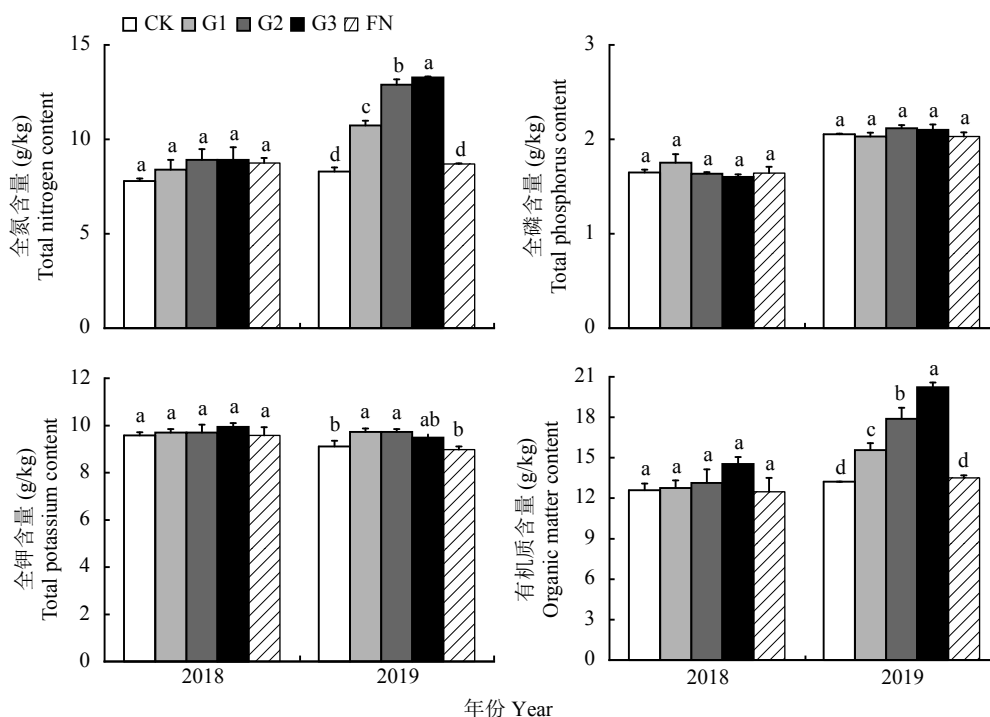


图2 不同处理下玉米收获期土壤全量养分及有机质含量

Fig. 2 Soil total nutrient and organic matter contents at maize harvest stage under different treatments

[注 (Note): CK—冬闲 Winter fallow; G1—翻压 15000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 15000 kg/hm²; G2—翻压 30000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 30000 kg/hm²; G3—翻压 45000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 45000 kg/hm²; FN—冬闲+氮肥 Winter fallow + N fertilizer. 柱上不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).]

的土壤性状以及农艺性状对玉米产量的相对贡献。各处理的贡献率表现为全氮>碱解氮>全磷>有机质>全钾>pH>速效钾>有效磷, 其中全氮、碱解氮对玉米产量的贡献率分别为 20.89% 与 20.51% (图 4)。各农艺性状对玉米产量的贡献率依次为单穗重>穗粗>穗长>茎粗>秃穗长>穗位高>株高, 其中单穗重的贡献率最大为 20.89%, 穗粗为 19.67% (图 4)。

3 讨论

3.1 光叶紫花苕作绿肥对玉米产量的影响

轮作豆科绿肥是农业生产中维持作物稳产高产并减少化肥用量的重要措施^[14]。有研究发现豆科绿肥在翻压量为 15000~30000 kg/hm² 并减量 40% 化学肥料时作物产量可与常规施肥产量持平^[15]。以往的研究主要针对绿肥部分替代化学氮肥时作物产量及土壤肥力的变化^[16-19], 对豆科绿肥作为单一氮源的供氮潜力研究少见报道。本研究设置不同翻压量光叶紫花苕作为玉米生长的单一氮源, 发现随着种植年限增加, 光叶紫花苕作为单一氮源的各处理玉米产量可与常规施肥处理相当, 并且在光叶紫花苕翻压量超

过 30000 kg/hm² 时玉米产量有高于常规施肥处理的趋势 (图 1)。豆科绿肥在田间进行连续施用不仅对作物稳产、增产有较大贡献, 并随着年限的增加效果逐渐加强, 体现了绿肥对作物产量影响具有长效性^[20-21], 这与本研究结果一致。光叶紫花苕在适宜的生态区种植利用时具有良好的综合生物学性状, 合理的翻压施用对玉米茎粗、穗长等农艺性状有一定的提升效果^[22], 本试验中玉米单穗重、穗粗及穗长均对产量有较大贡献值, 体现了绿肥对玉米农艺性状的影响可能是其增产的主要机制之一。相较于部分替代化学氮肥, 绿肥作为单一氮源供给作物生长发育时需要较大的翻压量, 对绿肥生物量有较高要求, 可以为应用绿肥作为主要肥源的有机农业提供发展思路。

3.2 光叶紫花苕作绿肥对玉米养分吸收的影响

豆科绿肥作为氮源供作物生长利用时, 可显著影响作物的氮素吸收量与积累^[23]。研究表明, 光叶紫花苕的翻压量显著影响玉米氮素转运量及转运率^[11]。本研究中, 在试验第一年常规施肥处理下籽粒氮含量较之绿肥处理有显著优势, 第二年在光叶紫花苕

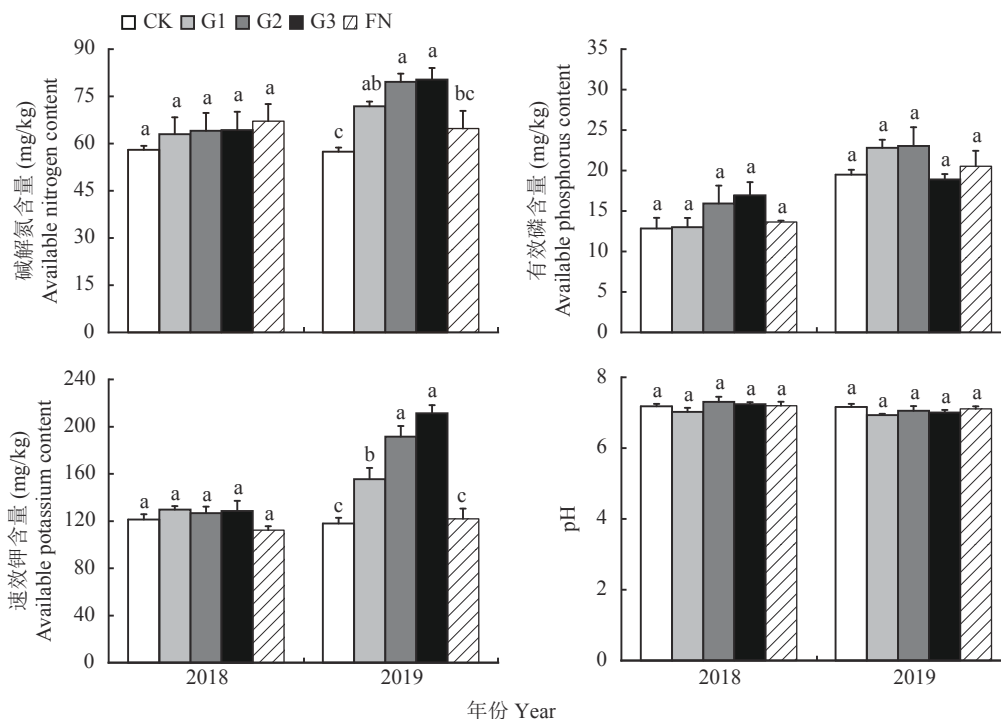


图3 不同处理下玉米收获期土壤速效养分含量及 pH

Fig. 3 Available nutrient contents and pH of soil at maize harvest stage under different treatments

[注 (Note): CK—冬闲 Winter fallow; G1—翻压 15000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 15000 kg/hm²; G2—翻压 30000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 30000 kg/hm²; G3—翻压 45000 kg/hm² 绿肥 Incorporation of green manure at 45000 kg/hm²; FN—冬闲+氮肥 Winter fallow + N fertilizer. 柱上不同小写字母表示同一年不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters above the bars mean significant difference among treatments in the same year ($P < 0.05$).]

翻压量为 45000 kg/hm² 时, 籽粒氮素含量与积累量均较常规施肥有所提高, 表明绿肥处理下氮素由地下转运至玉米地上部出现提升。不同于化学氮肥的养分速效性, 豆科绿肥作为氮源供给需要在其腐解矿化后才能为作物所吸收利用^[24], 其氮素矿化过程的速率随着时间的增长而逐渐出现下降, 在翻压一个月后可释放约 90%^[25], 而作物在生长早期对养分需求量较低, 后期需求量逐渐增大, 绿肥养分释放特性与作物养分需求特点更为契合, 能够更好地促进玉米养分吸收。当足量的绿肥翻压进入农田系统时, 不仅可以有效促进作物氮素吸收, 与磷钾化肥配施还会对作物磷钾养分积累量有积极影响, 其促进养分吸收的效果还具有长效性, 可为后续农业生产服务^[26]。

3.3 光叶紫花苕作绿肥对土壤肥力的影响

绿肥作物在农业系统中应用具有良好的土壤培肥效果, 其生长过程积累氮、磷、钾等养分, 翻压还田后可矿化释放供作物利用; 同时利于土壤有机质形成, 对土壤碳库增长有着较大贡献^[27-28]。豆科绿肥在其生长过程中可通过生物固氮作用将大气中游

离的氮进行固定, 翻压后可为后茬作物提供丰富的氮素, 并且通过其生长季根系伸长吸收上茬作物生长后土壤中盈余的磷钾, 但相较于氮钾, 光叶紫花苕磷吸收量明显较少, 在本试验中相较于单施化肥处理, 绿肥的翻压还田不仅带入了大量的氮素, 其吸收的磷钾也随之进入田间。有研究表明通过紫云英翻压配合化学氮肥减量 40% 的情况下土壤肥力可缓慢提升^[29], 并且有研究表明施用绿肥氮素损失率远低于化学氮肥, 因而能更大程度地维持土壤肥力水平^[30-31]。本研究中玉米收获期土壤有效磷、全磷的含量与常规施肥一致, 而碱解氮及速效钾在 2018 年不同绿肥处理与化肥处理相近, 2019 年度呈现随着光叶紫花苕翻压量增加而增长的规律, 土壤全氮、全钾及有机质也有着相似的累积特征。土壤全氮含量对玉米产量有着最大的贡献率 (图 4), 即输入的养分能较大程度地增加土壤全氮及速效氮含量时, 玉米产量可获得一定程度提升, 表明光叶紫花苕主要通过改善土壤全氮含量进而影响作物产量。本试验中, 在绿肥作为单一氮源输入情况下, 土壤整体肥力得到了较好的维持, 尤其是对土壤有机质及氮、

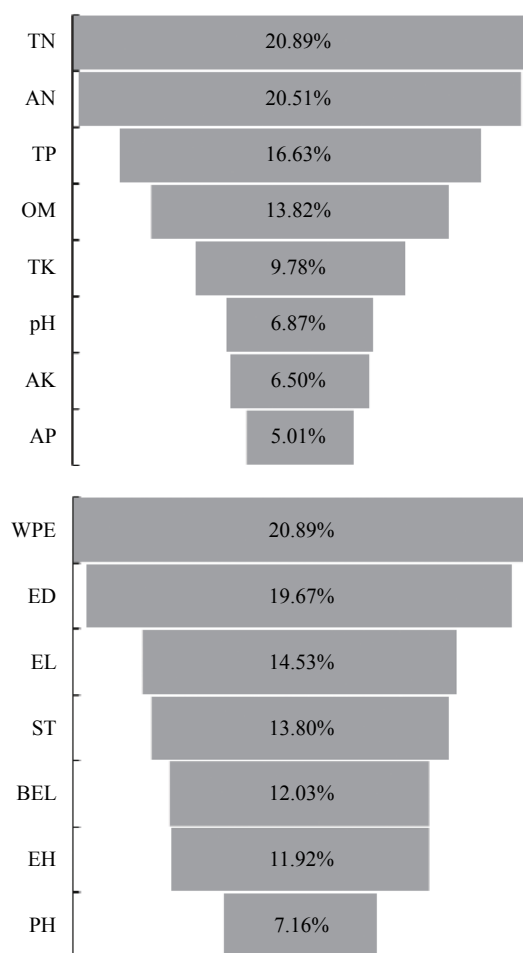


图 4 不同土壤性状及玉米性状对玉米产量的贡献率

Fig. 4 Contribution of soil properties and agronomy traits on maize yield

[注 (Note)]: TN—土壤全氮 Soil total N; AN—土壤速效氮 Soil available N; TP—土壤全磷 Soil total P; OM—土壤有机质 Soil organic matter; TK—土壤全钾 Soil total K; AK—土壤速效钾 Soil available K; AP—土壤有效磷 Soil available P. ST—茎粗 Stem diameter; BEL—秃穗长 Bald ear length; ED—穗粗 Ear diameter; EL—穗长 Ear length; EH—穗位高 Ear height; PH—株高 Plant height; WPE—单穗重 Weight per ear.]

钾养分的提升作用明显, 且试验第二年绿肥作用更佳, 表明绿肥连续种植翻压具有稳定提升土壤养分库存的潜力^[32-33]。

4 结论

云南旱地玉米生产中以绿肥光叶紫花苕作唯一氮源时, 绿肥翻压第一年需要高翻压量 (45000 kg/hm^2) 才能获得常规氮肥相当的产量, 第二年继续翻压, 试验绿肥翻压量均获得了与常规氮肥相近的产量水平, 高翻压量更有超越使用化学氮肥 (270 kg/hm^2) 的增产潜力, 并且玉米地上部氮积累量与化肥多没有

显著差异。绿肥翻压第一年土壤碱解氮、速效钾、全氮、全钾及土壤有机质提升不明显, 但第二年继续绿肥翻压则有明显提高。因此, 光叶紫花苕作绿肥连续翻压能够满足云南旱地玉米生产养分需求, 并且绿肥增产、培肥土壤的效应随着翻压年限增加而更加明显。

参考文献:

- [1] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. *中国土壤与肥料*, 2009, (4): 1-3.
Cao W D, Huang H X. Ideas on restoration and development of green manures in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009, (4): 1-3.
- [2] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研60年回顾与未来展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1450-1461.
Cao W D, Bao X G, Xu C X, *et al.* Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1450-1461.
- [3] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2115-2126.
Gao S J, Zhou G P, Cao W D. Effects of milk vetch (*Astragalus sinicus*) as winter green manure on rice yield and rate of fertilizer application in rice paddies in south China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2115-2126.
- [4] Xie Z J, Tu S X, Shah F, *et al.* Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in south China[J]. *Field Crop Research*, 2016, 188: 142-149.
- [5] Carlsson G, Huss-Danell K. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field[J]. *Plant and Soil*, 2003, 253: 353-372.
- [6] Mueller T, Thorup-Kristensen K. N-fixation of selected green manure plants in an organic crop rotation[J]. *Biological Agriculture & Horticulture*, 2012, 18(4): 345-363.
- [7] Li X, Petersen S O, Sorensen P, *et al.* Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 199: 382-393.
- [8] Zhang D, Yao P, Zhao N, *et al.* Contribution of green manure legumes to nitrogen dynamics in traditional winter wheat cropping system in the Loess Plateau of China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 72: 47-55.
- [9] 刘蕊, 常单娜, 高嵩涓, 等. 西北小麦与豆科绿肥间作体系箭筈豌豆和毛叶苕子生物固氮效率及氮素转移特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2184-2194.
Liu R, Chang D N, Gao S J, *et al.* Nitrogen fixation and transfer efficiency of common vetch and hairy vetch in wheat-vetch intercropping system in northwest China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(12): 2184-2194.
- [10] 吕汉强, 于爱忠, 王玉珑, 等. 干旱绿洲灌区玉米氮素吸收利用对绿肥还田利用方式的响应[J]. *草业学报*, 2020, 29(8): 90-103.

- Lü H Q, Yu A Z, Wang Y L, *et al.* Effect of green manure retention practices on nitrogen absorption and utilization by maize crops in the arid oasis irrigation area[J]. *Acta Prataclturae Sinica*, 2020, 29(8): 90–103.
- [11] 杨叶华, 张松, 王帅, 等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J]. *草业学报*, 2020, 29(6): 39–55.
- Yang Y H, Zhang S, Wang S, *et al.* Yield and nutrient concentration in common green manure crops and assessment of potential for nitrogen[J]. *Acta Prataclturae Sinica*, 2020, 29(6): 39–55.
- [12] 吴永成, 李梦颖, 杨云飞, 等. 光叶紫花苕生物固氮能力及其还田氮素对玉米的当季有效性[J]. *华北农学报*, 2019, 34(S1): 183–189.
- Wu Y C, Li M Y, Yang Y F, *et al.* Biological nitrogen fixation of vetch and the availability of vetch incorporation N to maize as successive crop[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(S1): 183–189.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil and agriculture chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] Zhou G P, Gao S J, Lu Y H, *et al.* Co-incorporation of green manure and rice straw improves rice production, soil chemical, biochemical and microbiological properties in a typical paddy field in southern China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2020, 197: 104499.
- [15] 陈静蕊, 秦文婧, 王少先, 等. 化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 280–287.
- Chen J R, Qin W J, Wang S X, *et al.* Effects of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) incorporation on rice yield and nitrogen use efficiency in double-rice cropping system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6): 280–287.
- [16] Yang L Y, Zhou X, Liao Y L, *et al.* Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake[J]. *Crop Science*, 2019, 59(2): 749–759.
- [17] 徐昌旭, 谢志坚, 曹卫东, 等. 翻压绿肥后不同施肥方法对水稻养分吸收及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2011, (3): 35–39.
- Xu C X, Xie Z J, Cao W D, *et al.* Effects of different fertilizing methods on absorption and utilization of nutrient of rice plants under reducing the amount of mineral fertilizer after turning under Chinese milk vetch[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011, (3): 35–39.
- [18] 程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(6): 1259–1270.
- Cheng H D, Lu Y H, Nie J, *et al.* Effect of reduced amount of chemical fertilizer combined with milk vetch on soil carbon and nitrogen in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1259–1270.
- [19] 程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 化肥减施下紫云英不同翻压量对双季稻产量及养分利用效率的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(3): 143–152.
- Cheng H D, Lu Y H, Nie J, *et al.* Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch and reducing chemical fertilizer on yield and nutrient use efficiencies in double cropping rice system[J]. *Acta Agriculturae Boreali Sinica*, 2020, 35(3): 143–152.
- [20] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区春玉米-冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(4): 1005–1011.
- Zhao Q, Gao X B, Ning X G, *et al.* Effects of spring maize and winter cover crop rotation on accumulation of carbon and nitrogen and soil nutrition and microbe in north China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(4): 1005–1011.
- [21] Yang L, Bai J, Liu J, *et al.* Green manuring effect on changes of soil nitrogen fractions, maize growth, and nutrient uptake[J]. *Agronomy*, 2018, 8(11): 261.
- [22] 赵彩衣, 王媛媛, 董青君, 等. 不同水肥处理对苕子和后茬玉米生长及土壤肥力的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 161–166, 269.
- Zhao C Y, Wang Y Y, Dong Q J, *et al.* Influence of different irrigation and fertilization treatments on the growth of smooth vetch and later-cropping maize and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(4): 161–166, 269.
- [23] Zhu B, Yi L X, Guo L M, *et al.* Performance of two winter cover crops and their impacts on soil properties and two subsequent rice crops in Dongting Lake Plain, Hunan, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 95–101.
- [24] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 216–223.
- Pan F X, Lu J W, Liu W, *et al.* Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of three kinds of green manure crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(1): 216–223.
- [25] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, *et al.* Nitrogen release from incorporated ¹⁵N labelled Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue and its dynamics in a double rice cropping system[J]. *Plant and Soil*, 2014, 374: 331–344.
- [26] Zhou C H, Zhao Z K, Pan X H, *et al.* Integration of growing milk vetch in winter and reducing nitrogen fertilizer application can improve rice yield in double-rice cropping system[J]. *Rice Science*, 2016, 23(3): 132–143.
- [27] 周志明, 张立平, 曹卫东, 黄元仿. 冬绿肥-春玉米农田生态系统服务功能价值评估[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(4): 597–604.
- Zhou Z M, Zhang L P, Cao W D, Huang Y F. Appraisal of agro-ecosystem services in winter green manure-spring maize[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4): 597–604.
- [28] 刘佳, 张杰, 徐昌旭, 等. 二月兰不同翻压量对土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(1): 123–127.
- Liu J, Zhang J, Xu C X, *et al.* Effects of different application rates of *Orychophragmus violaceus* on soil fertility[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(1): 123–127.
- [29] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 106–112.
- Zhang L, Huang J, Gao J S, *et al.* Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(5): 106–112.

- [30] Becker M, Ladha J K, Ali M. Green manure technology: Potential usage and limitations. A case study for lowland rice[J]. *Plant & Soil*, 1995, 174(1-2): 181-194.
- [31] Glasener K M, Waggoner M G, Mackown C T, *et al.* Contributions of shoot and root nitrogen-15 labeled legume nitrogen sources to a sequence of three cereal crops[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 523-530.
- [32] 高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 472-480.
- Gao J S, Huang J, Yang Z C, *et al.* Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 472-480.
- [33] 刘颖颖, 卜容燕, 唐杉, 等. 连续秸秆-紫云英协同还田对双季稻产量、养分积累及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(6): 1008-1016.
- Liu Y Y, Bu R Y, Tang S, *et al.* Effect of continuous straw-Chinese milk vetch synergistic return to the field on yield, nutrient accumulation and soil fertility of double cropping rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(6): 1008-1016.