植物营养与肥料学报 2013,19(2):413-419
Plant Nutrition and Fertilizer Science doi: 10.11674/zwyf.2013.0218

苏南稻田4种冬绿肥养分特性及对翻压前土壤无机氮的影响

白金顺[1], 曹卫东[1,3*], 樊媛媛[2], 高嵩涓[1]
(1 农业部植物营养与肥料重点实验室,中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;
2 中国农业大学资源与环境学院,北京 100193; 3 青海大学,西宁 810016)

摘要: 为充分利用苏南冬闲稻田发展适宜绿肥作物种植,在大田试验条件下,研究了毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth)、光叶苕子(*Vicia villosa* var.)、紫云英(*Astragalus sinicus* L.)和肥田萝卜(*Raphanus sativus* L.)4种绿肥作物的生长、营养特性,比较分析了绿肥作物翻压前不同处理间耕层土壤无机氮含量与构成的差异。结果表明,在绿肥作物翻压期,4种绿肥作物均达到较高生物量和养分累积量,鲜重、干重分别为24.8～30.7 t/hm^{2}和3.6～4.2 t/hm^2,不同绿肥作物间无显著差异。4种绿肥作物的吸氮量为69.8～136.4 kg/hm^2,毛叶苕子最高,肥田萝卜最低。吸磷量为7.1～11.3 kg/hm^2,肥田萝卜最高,紫云英最低。吸钾量为117.6～151.3 kg/hm^2,毛叶苕子最高,光叶苕子最低。与对照冬闲相比,种植绿肥作物不同程度地降低了耕层土壤无机氮含量(平均降低38.9 kg/hm^2),其中硝态氮含量下降明显,铵态氮含量均较对照土壤有增加趋势(平均提高6.5 kg/hm^2),毛叶苕子和光叶苕子处理铵态氮含量增加显著。4种绿肥作物均适合苏南冬闲稻田种植,能潜在降低无机氮的损失风险和为后季水稻作物生长提供养分。

关键词: 冬闲稻田; 绿肥作物; 品种; 养分特性; 土壤无机氮
中图分类号: S142;S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2013)02-0413-07

Nutrient characteristics of four kinds of winter green manure and their influences on soil mineral nitrogen before incorporation

BAI Jin-shun[1], CAO Wei-dong[1,3*], FAN Yuan-yuan[2], GAO Song-juan[1]
(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, China Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 3 Qinghai University, Xining 810016, China*)

Abstract: In order to replace the winter bare fallow with green manure crop in rice cropping system in South of Jiangsu province, the field experiment was carried out to investigate the growth and nutrient characteristics of hairy vetch (*Vicia villosa* Roth), smooth vetch (*Vicia villosa* var.), milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and radish (*Raphanus sativus* L.) as winter green manure crops and their influences on soil mineral nitrogen before incorporation. The results showed that four kinds of green manure crops in our study all produced relatively high aboveground biomass and N, P, K nutrients accumulation, the fresh and dry biomass ranged from 24.8 t/ha to 30.7 t/ha and from 3.6 t/ha to 4.2 t/ha individually. No significant differences were found among different green manure crops. The nitrogen uptake ranged from 69.8 for radish to 136.4 kg/ha for hairy vetch. The phosphorus uptake ranged from 7.1 for radish to 11.3 kg/ha for milk vetch. The potassium uptake ranged from 117.6 for

收稿日期: 2012-08-17 **接受日期:** 2012-11-09
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项"绿肥作物生产与利用技术集成研究及示范(201103005)"; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所202-6); 太湖小流域生态农业建设技术模式研究与示范(TH2011206)项目资助。
作者简介: 白金顺(1979—),男,山西忻州人,助理研究员,主要从事养分资源管理与绿肥生产利用研究。E-mail: baijs@caas.ac.cn
* 通信作者 Tel: 010-82106733, E-mail: wdcao@caas.ac.cn

smooth vetch to 151.3 kg/ha for hairy vetch. Compared with bare fallow treatment, planting green manure crops decreased the mineral nitrogen content in plow layer soil to different extents (averagely decreased by 38.9 kg/ha). The decrease of soil mineral nitrogen content was related to significant decrease of soil nitrate nitrogen content. The soil ammonium nitrogen content had an increasing trend (averagely increased by 6.5 kg/ha). There were significant increases in ammonium nitrogen for hairy vetch and smooth vetch treatment compared with that in the bare fallow treatment. Four kinds of green manure crops in our study all suitable for planting as green manure crop in rice cropping system in South of Jiangsu province, and potentially reduced the loss risk of soil mineral nitrogen and supplied the nutrients for rice growth in the next season.

Key words: bare fallow rice field; green manure crops; cultivars; nutrient characteristics; soil mineral nitrogen

水稻是我国第一大粮食作物,约占粮食总产量的40%。其中,南方稻区约占我国水稻播种面积的94%。自20世纪90年代以来,由于粮食生产效益低、农村劳务经济发展快等社会和经济原因,南方的冬闲田面积不断扩大[1]。据调查,我国南方16省市区的秋冬种植面积仅占耕地面积的60%左右,冬闲面积近20×10^6 hm^2。耕地的大量闲置不仅造成光、热、水、土资源的大量浪费,同时也引起土壤质量退化、养分流失等生态环境问题[2-3]。

利用冬闲田种植绿肥是我国南方稻田重要的传统管理措施,具有填闲、养地、兼用的多功能特点。但20世纪80年代后期,绿肥生产及科研基本处于停滞阶段[2]。近年来,在环境不断恶化和资源耗竭加剧的背景下,高品质、低污染的农业生产愈发受到重视,清洁农业生产的理念被广泛认同。绿肥是纯天然、最清洁的有机肥源,近年研究表明,稻田种植绿肥作物能增加冬季土壤覆盖、提高土壤质量[4]、增加土壤生物多样性[5]和促进后茬作物增产[6],因此绿肥可以在清洁农业生产中发挥重要作用,在绿色及有机农业生产中具有巨大潜力。

绿肥作物的生物量和养分特性是其用作绿肥的重要指标,也是决定种植利用绿肥对土壤和主作物影响的重要基础。但绿肥作物的生长和养分积累会受到生长环境和作物品种特性的影响,在一定的生态条件下,绿肥作物的品种选择尤为关键。研究表明,同一生态区不同绿肥作物的生物量和营养特性差异明显,同时对土壤性状的影响也不同[7-8]。目前,苏南稻区有机稻米种植逐渐形成规模,其主要措施之一就是种植和利用绿肥作物。在苏南单季稻区,传统是以紫云英为主要绿肥作物,对其他绿肥品种研究较少。由于绿肥品种是决定绿肥培肥和增产效果的主要因素之一,因此为评价不同绿肥作物品种的生态适应性及用作绿肥的潜在作用,2011～2012年在江苏省金坛市研究了冬闲稻田种植紫云英、毛叶苕子、光叶苕子和肥田萝卜的生长与养分特性及其对耕层土壤无机氮的影响,以期为苏南稻区合理种植和利用绿肥、科学进行水稻养分管理和减少农田污染排放提供资源保障。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2011～2012年在江苏省江南春米业有限公司稻米生产基地进行。该试验地位于江苏省金坛市,东经119°58′,北纬31°48′,海拔5 m。年均气温16.7℃,年降水量1144 mm,年日照时数2075 h。试验地土壤为水稻土,pH值8.2,有机碳含量27.0 g/kg,全氮含量1.4 g/kg,速效钾含量117.6 mg/kg,速效磷含量17.0 mg/kg,土壤铵态氮含量2.8 kg/hm^2,硝态氮含量为29.7 kg/hm^2。前季作物为水稻。

1.2 试验设计

试验设5个处理:1)无绿肥对照;2)毛叶苕子(*Vicia villosa* Roth,hairy vetch,品种为蒙苕1号);3)光叶苕子(*Vicia villosa* var.,smooth vetch,品种为云光早苕);4)紫云英(*Astragalus sinicus* L.,milk vetch,品种为弋阳籽);5)肥田萝卜(*Raphanus sativus* L.,radish,品种为云南当地生产种)。4次重复,小区面积21 m^2,随机区组排列。绿肥作物播种日期为2011年10月26日,播种方式采用人工撒播,播种量参照当前生产推荐用量,分别为毛叶苕子90 kg/hm^2,光叶苕子90 kg/hm^2,紫云英30 kg/hm^2,肥田萝卜15 kg/hm^2。播种时施氮肥N 20 kg/hm^2,在生长期间不进行其他管理。

1.3 样品采集与测定方法

试验于绿肥翻压前(2012年4月8日)进行植株和土壤取样,每个小区选取2个1 m^2样方进行测产,取部分小样鲜体在70℃下烘干,然后称重、粉碎并进行养分测定。干物质量由测产鲜样和植株含水

量换算得到。另外,在小区中选择有代表性的完整的绿肥植株样(肥田萝卜、毛叶苕子和光叶苕子为 5 株,紫云英为 20 株),先将地上部剪下并称量鲜重,然后挖掘田间耕层土壤植株根系,将根系与土壤初步分离,用纸巾擦拭根表附着的土壤后进行根系鲜重称量,之后将所取根系样进行冲洗,最后将所取植株地上部和根系鲜样在 70℃下烘干称重。单位面积根系生物量鲜重和干重分别由测产鲜重和干重与代表性植株样的鲜重根冠比和干重根冠比计算获得。同时,采集耕层(0—20 cm)土壤样品,每个小区采集 3 钻,混合后带回试验室进行无机氮测定。

植株样品用硫酸-过氧化氢消化,凯氏定氮法测定全氮;钼蓝比色法测定全磷;原子吸收火焰光度计法测定全钾。植株全碳采用重铬酸钾容量法进行测定。土壤无机氮采用 2 mol/L 的氯化钾浸提—流动注射分析仪测定;土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾采用 EDTA-铵盐法浸提—原子吸收火焰光度计测定;酸度计测定土壤 pH(水土比为 2.5∶1)。

1.4　数据分析

试验数据采用 SAS 统计软件进行统计分析,LSD 法检验差异显著性,用 Microsoft Excel 2003 作图。

2　结果与分析

2.1　不同绿肥作物的地上部和根系生物量

4 种绿肥作物的地上部和根系生物量结果见表 1。不同绿肥作物的生物量鲜重与干重均达到较高水平,鲜重与干重分别为 24.8 ~ 30.7 t/hm^2 和 3.6 ~ 4.2 t/hm^2,但不同绿肥作物间无显著差异。不同绿肥作物的根系生物量鲜重无显著差异,其根系干重以肥田萝卜最高(0.3 t/hm^2),显著高于光叶苕子(0.1 t/hm^2),三种豆科绿肥作物间无显著差异。绿肥鲜体的含水量普遍较高,其中植株地上部含水量以肥田萝卜最高(88.3%),光叶苕子最低(84.6%),绿肥作物的根系含水量间无显著差异。因根系的取样方法未采集耕层以下植株根系,同时采样过程中的侧根和根毛有部分损失,总体根系重量较 Gabriel 等[7]2011 年关于不同绿肥作物根系的报道数据偏低,但与 Zhu 等[9]2012 年关于湖南稻田紫云英耕层的根系重量相当。

表 1　不同绿肥作物地上部和根系生物量与植株含水量比较

Table 1　Comparison of aerial and roots biomass and plant water content for different green manure crops

处理 Treatment	生物量鲜重(t/hm^2) Fresh biomass		生物量干重(t/hm^2) Dry biomass		植株含水量(%) Plant water content	
	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
毛叶苕子 Hairy vetch	28.5 ±2.2 a	2.8 ±0.6 a	4.2 ±0.3 a	0.2 ±0.01 ab	85.2 ±1.1ab	90.1 ±1.3 a
光叶苕子 Smooth vetch	24.8 ±3.0 a	1.6 ±0.1 a	3.8 ±0.5 a	0.1 ±0.02 b	84.6 ±1.2 b	89.3 ±1.0 a
紫云英 Milk vetch	28.1 ±2.0 a	2.2 ±0.3 a	4.1 ±0.4 a	0.2 ±0.03 ab	85.5 ±0.5 ab	89.1 ±1.2 a
肥田萝卜 Radish	30.7 ±4.0 a	2.6 ±0.4 a	3.6 ±0.5 a	0.3 ±0.04 a	88.3 ±0.5 a	89.1 ±0.3 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between treatments at the 5% level.

2.2　不同绿肥作物的养分特性

从表 2 可以看出,不同绿肥种类的氮、磷、钾养分含量具有显著不同的特点,毛叶苕子和光叶苕子相对富含氮素(含氮量分别为 3.29% 和 3.46%),其植株含氮量显著高于紫云英和肥田萝卜,肥田萝卜含氮量最低为 1.93%。肥田萝卜相对富含磷(0.31%),其含磷量显著高于毛叶苕子和光叶苕子,紫云英含磷量最低(0.17%)。与含氮量和含磷量相比,植株含钾量变异相对较小,光叶苕子植株含钾量最低(3.12%),肥田萝卜最高(3.76%),二者差异显著。

不同绿肥作物的养分吸收量与其植株养分含量的变化趋势基本一致。4 种绿肥作物的养分吸收量有较大变异,三种豆科绿肥作物的吸氮量(101.7 ~ 136.4 kg/hm^2)均高于十字花科绿肥作物肥田萝卜(69.8 kg/hm^2),其中毛叶苕子和光叶苕子的吸氮量显著高于肥田萝卜。肥田萝卜的吸磷量最高(11.3 kg/hm^2),但与毛叶苕子和光叶苕子的吸磷量无显

表2 不同绿肥作物植株养分含量、吸收量与C/N比

Table 2 Content and uptake of plant nutrients and C/N for different green manure crops

处理 Treatment	含氮量 N content (%)	含磷量 P content (%)	含钾量 K content (%)	吸氮量 N uptake (kg/hm^2)	吸磷量 P uptake (kg/hm^2)	吸钾量 K uptake (kg/hm^2)	C/N
毛叶苕子 Hairy vetch	3.29 ±0.14 a	0.26 ±0.02 b	3.61 ±0.27 ab	136.4 ±5.8 a	10.7 ±0.9 a	151.3 ±15.4 a	14.1 ±0.9 b
光叶苕子 Smooth vetch	3.46 ±0.14 a	0.24 ±0.02 b	3.12 ±0.17 b	132.9 ±20.1 a	9.4 ±1.5 ab	117.6 ±13.4 b	14.2 ±0.6 b
紫云英 Milk vetch	2.46 ±0.10 b	0.17 ±0.01 c	3.18 ±0.12 ab	101.7 ±14.0 ab	7.1 ±1.1 b	130.7 ±15.7 ab	18.8 ±0.9 a
肥田萝卜 Radish	1.93 ±0.08c	0.31 ±0.01 a	3.76 ±0.18 a	69.8 ±11.2 b	11.3 ±1.6 a	135.0 ±19.5 ab	22.7 ±1.7 a

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significant between treatments at the 5% level.

著差异,紫云英的吸磷量最低(7.1 kg/hm^2),显著低于肥田萝卜和毛叶苕子的吸磷量。对于吸钾量,光叶苕子较其他三种绿肥作物相对较低,与毛叶苕子含钾量相比有显著差异,这主要与光叶苕子的植株含钾量较低有直接关系。

2.3 不同绿肥作物的C/N比特性

不同绿肥作物的碳氮比如表2所示。C/N比是决定绿肥作物翻压后其残体腐解规律和养分释放动态的重要指标。在本研究中,4种绿肥作物的C/N比在14.1～22.7之间,总体规律与植株氮含量相反,依据显著性检验可以分为两类,其中紫云英与肥田萝卜的C/N比相对较高,显著高于毛叶苕子和光叶苕子,后两者间无显著差异。

2.4 不同绿肥种植对耕层土壤含水量和无机氮的影响

从图1可以看出,与无绿肥对照相比,种植不同绿肥作物处理的土壤含水量均有降低趋势,除紫云英外,其他绿肥作物处理的土壤含水量均显著下降。在不同的绿肥作物品种间,种植肥田萝卜的土壤含水量最低,显著低于种植其他三种绿肥作物的土壤含水量。

不同绿肥作物对耕层土壤无机氮含量的影响见图2。受到肥料投入和春季气温回暖土壤矿化增强的影响,与播前土壤无机氮含量相比,无绿肥对照土壤的无机氮、硝态氮和铵态氮含量均表现为增加的趋势,分别增加43.7 kg/hm^2、40.4 kg/hm^2 和3.4 kg/hm^2,铵态氮与硝态氮比例差别不大。种植不同绿肥作物的土壤无机氮含量与播前土壤相比有不同

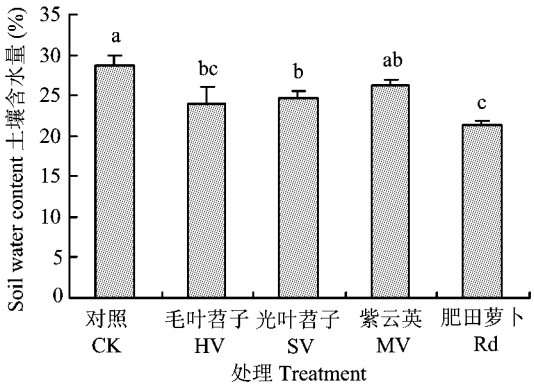

图1 不同绿肥作物种植对土壤水分含量的影响

Fig.1 Effects of different green manure crops planting on soil water content

[注(Note):CK—Control; HV—Hairy vetch; SV—Smooth vetch; MV—Milk vetch; Rd—Radish. 柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars indicate a significant difference at the 5% level.]

表现,种植毛叶苕子和光叶苕子有增加趋势,而种植紫云英和肥田萝卜的有降低趋势,所有种植绿肥作物的土壤铵态氮与硝态氮的比例均表现为增加。

然而,与对照冬闲相比,种植绿肥作物显著降低了耕层土壤无机氮的含量,平均降低38.9 kg/hm^2。其中紫云英(55.1 kg/hm^2)和肥田萝卜(58.5 kg/hm^2)的降低效果显著大于毛叶苕子(16.6 kg/hm^2)和光叶苕子(25.4 kg/hm^2)。同时种植绿肥作物显著改变了土壤无机氮的构成,但不同品种间表现有所差异。与对照相比,种植绿肥作物显著降低了土壤硝态氮的含量(平均降低45.4

kg/hm^2),而土壤铵态氮的含量有增加趋势(平均增加 6.5 kg/hm^2),其中种植毛叶苕子和光叶苕子的土壤铵态氮含量增加显著。不同绿肥作物处理的土壤铵态氮与硝态氮的比例均高于对照土壤,其中种植光叶苕子、紫云英和肥田萝卜的土壤铵态氮与硝态氮的比值增加显著。

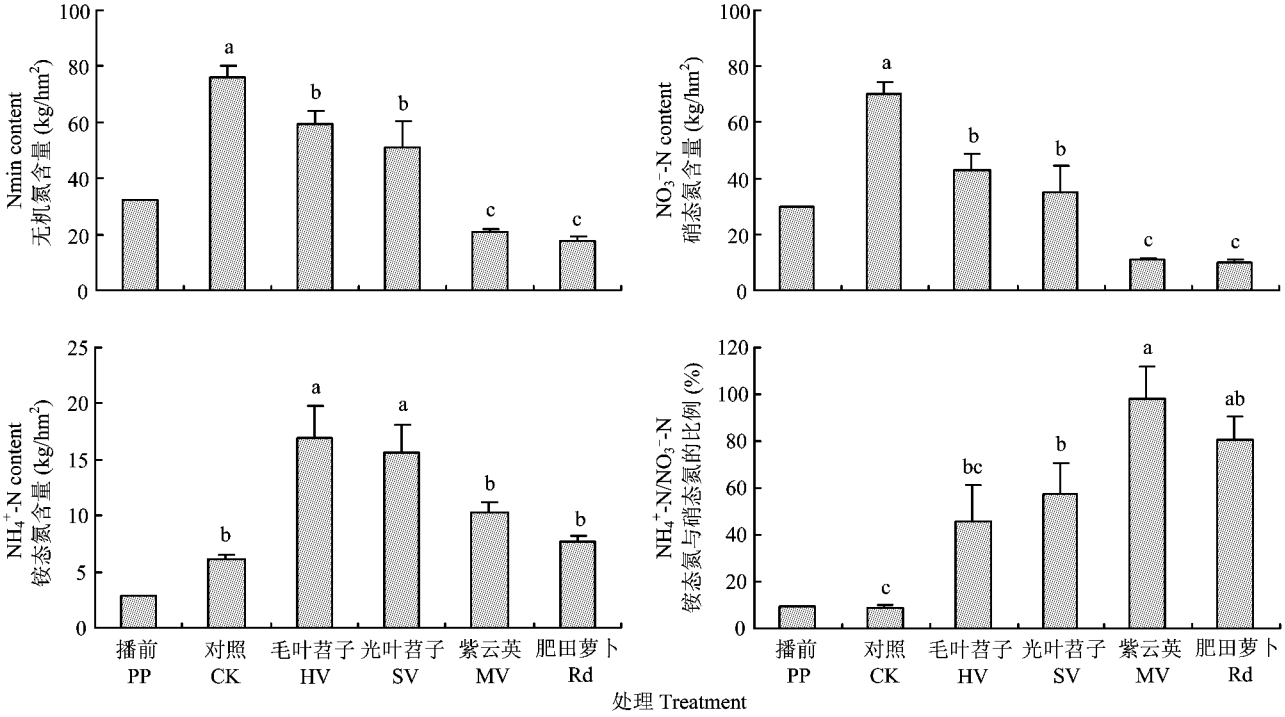

图 2　不同绿肥作物种植对土壤无机氮的影响

Fig. 2　Effects of different green manure crops planting on soil mineral nitrogen

[注(Note): PP—Preplanting; CK—Control; HV—Hairy vetch; SV—Smooth vetch; MV—Milk vetch; Rd—Radish. 柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars indicate a significant difference at the 5% level.]

3　讨论

由于绿肥生产及其相关的科学研究曾经较长时间内处于停滞状态,当前生产上多以 80 年代的绿肥品种和技术为主,南方稻田的绿肥品种以喜湿润的紫云英为主,对其他潜在适宜的绿肥品种研究较少[10]。本研究在推荐的简化管理条件下,对 4 种绿肥作物的生长、营养特性及其对耕层土壤无机氮含量的影响进行了比较研究。

绿肥作物翻压期生物量和养分含量是评价其能否作为绿肥的重要评价指标。一般以每公顷产鲜草达到 22.5 t 作为绿肥作物适合作绿肥的标准[11]。在本研究中,尽管播种较晚,4 种供试绿肥作物均可达到 22.5 t/hm^2 以上的鲜草和 3 t/hm^2 以上的干草产量。可能有两个原因,其一是气候条件适宜绿肥生长,播种后有较好的降水量(328.5 mm),该降水量与该地区过去 5 年(2007 ~ 2011)的平均降水量相当(341.1 mm);其二是不同绿肥的种植均采用当前主导绿肥品种和推荐的播种量。供试绿肥作物的养分含量有显著差异,豆科绿肥作物因具有较强的共生固氮能力[12],因此供试的三种豆科作物的含氮量显著高于肥田萝卜。肥田萝卜的植株含磷量最高,有研究表明,十字花科作物可以通过改变根际 pH 值[13]或分泌有机酸[14],从而有效活化土壤中的磷素,增加植株的磷含量。但与其他报道相比[11],在本研究中紫云英的植株含氮量和含磷量均较低,其原因可能与不同绿肥作物在翻压期处于不同的生育期相关,翻压前毛叶苕子和光叶苕子处于现蕾期,而紫云英处于初花期,研究表明随着生育期延长植物的养分含量有降低趋势[15]。另外,紫云英对根瘤菌具有专一性,一般需要在种植时接种根瘤菌,有研究表明施用菌肥能显著提高紫云英的总吸氮量和固氮量[11]。在本研究中尽管试验田前几季都有紫云英种植,但在种植时未进行接种根瘤菌,这可能影响紫云英的生长和固氮性能以及植株养分吸收量。总体上,供试的 4 种绿肥作物能积累较多的养分(吸

氮量为69.8～136.4 kg/hm^2,吸磷量为7.1～11.3 kg/hm^2,吸钾量为117.6～151.3 kg/hm^2)。Witt和Dobermann[16]利用布置于亚洲6个国家的田间试验获取的约2000组水稻养分数据建立了QUEFTS模型,基于模型的预测结果表明,水稻在5～8 t/hm^{2}的产量水平下其吸氮量为73～127 kg/hm^2,吸磷量为13～22.6 kg/hm^2,吸钾量为72～126 kg/hm^2。在本研究中4种绿肥作物的氮、钾养分吸收量与水稻氮、钾吸收量基本相当,吸磷量约相当于水稻磷吸收量的50%。

尽管气象条件、管理措施、木质素和纤维素含量能影响绿肥作物残体氮素的释放[17-19],但C/N比是表征绿肥作物秸秆在分解过程中氮素释放潜力的有用指标。在本研究中,光叶苕子、毛叶苕子和紫云英的C/N比分别为14.2、14.1和18.9,与其他关于豆科绿肥作物有较低的C/N比报道相一致[20]。肥田萝卜的C/N比略高于豆科绿肥作物(C/N比为22.5)。有研究表明,C/N比为20是评价秸秆在分解过程中氮素矿化和氮素固定的临界值[21]。因而,对于本研究中的豆科作物翻压作绿肥,后季作物需要考虑前期施氮量适当下调的可能性,而对于肥田萝卜用作绿肥,后季作物的前期需要考虑适当的施氮调整C/N比。

绿肥作物不仅能够翻压作为肥料培肥土壤和供下季作物利用,而且在其生长过程中会影响土壤的无机氮状况。以往的研究更多关注翻压绿肥对后季作物和土壤的影响,而对绿肥在生长期间对土壤无机氮的影响研究较少,国内前人的一些报道主要针对夏闲菜田和华北单作春玉米田中绿肥(覆盖)作物对土壤无机氮的作用[22-23]。本研究结果表明,与对照相比,绿肥作物的生长显著降低了土壤无机氮的含量,该结果与国外一些研究结论相一致[20,24]。其中,肥田萝卜处理耕层无机氮含量的显著降低主要与肥田萝卜为非豆科作物其吸收的氮素来源于土壤有关。另外关于种植紫云英的土壤无机氮含量较种植两种苕子的低,尽管研究认为苕子的固氮性能优于紫云英[11],Ramosm等[25]也报道了不同豆科作物植株累积的氮中来源于生物固氮的量可以从39%到80%,然而,紫云英处理耕层无机氮含量显著降低的可能原因与在前面养分含量讨论中提到的本研究中种植时未进行紫云英根瘤菌接种有关。总之,种植绿肥能显著消减稻田旱季土壤中的无机氮,从而有效降低土壤氮素损失的风险,水旱轮作的研究结果表明,水稻季氮素损失中约有50%来源于旱季土壤的无机氮残留[26]。

另外,在本研究中发现种植绿肥显著改变了土壤无机氮的构成,不同处理均显著降低了土壤硝态氮的含量,而铵态氮的含量有增加趋势,种植不同绿肥的土壤铵态氮与硝态氮的比例均表现增加。硝态氮减少的主要原因可能是绿肥植株对氮素的吸收,在本研究中绿肥植株的生长吸收了大量的氮素(69.8 kg/hm^2～136.4 kg/hm^2)。关于土壤铵态氮含量的增加,有研究表明,硝酸盐的异化作用能促进硝态氮向铵态氮的转化,如Burge和Jackson的室内研究结果表明,番茄根系生长的根际效应激发土壤的微生物活动造成土壤的厌氧环境,并有效促进硝态氮向铵态氮的快速转化[27]。但硝态氮的异化作用使之转变成铵的过程主要发生在厌氧的环境中,而本研究中种植绿肥作物的土壤水分含量较无绿肥作物对照较低,因而这一过程可能不是主要的原因;推测土壤铵态氮含量的增加的原因可能与豆科作物在生长过程中会向土壤中的转移氮素有关[28],在本研究中种植毛叶苕子、光叶苕子和紫云英的土壤铵态氮含量增加程度均相对高于肥田萝卜,与这一结论相似。其中只有毛叶苕子和光叶苕子处理表现显著,可能与前面讨论的紫云英固氮量较低有关。然而,不同绿肥作物对土壤氮素转化的效应差异及其机制还需要进一步研究。

4 结论

4种供试绿肥作物具有较好的生态适应性,均能有效利用苏南稻田冬春季节的空闲期获得较高的生物量,鲜重、干重分别为24.8～30.7 t/hm^{2}和3.6～4.2t/hm^2。绿肥作物植株体内能积累较多的养分,但不同绿肥作物的养分特性差异明显,其中毛叶苕子吸收氮、钾的量最高,肥田萝卜吸磷量最高。种植绿肥作物能够降低土壤的无机氮含量,潜在减少氮素损失的风险。

参考文献:

[1] 高菊生,曹卫东,李本荣,颜钧. 充分利用冬闲稻田 大力发展绿肥生产[J]. 耕作与栽培,2009,(2):1-2,12.
Gao J S, Cao W D, Li B R, Yan J. Make full use of winter bare fallow to develop green manure production [J]. Cult. Plant., 2009,(2):1-2,12.

[2] 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]. China Soils Fert., 2009,(4):1-3.

[3] 唐海明,汤文光,肖小平,等. 冬季覆盖作物对南方稻田水稻

生物学特性及产量性状的影响[J]. 中国农业科技导报, 2010, 12 (3): 108-113.
Tang H M, Tang W G, Xiao X P *et al*. Effects of different winter cover plants on biological characteristics and yield traits of rice in southern china[J]. J. Agric. Sci. Technol., 2010, 12(3): 108-113.

[4] 杨曾平, 徐明岗, 聂军, 等. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. 水土保持学报, 2011, 25 (3): 92-102.
Yang Z P, Xu M G, Nie J *et al*.. Effect of long-term winter planting-green manure on reddish paddy soil quality and its comprehensive evaluation under double-rice cropping system [J]. J. Soil Water Conserv., 2011, 25(3): 92-102.

[5] 朱波, 胡跃高, 曾昭海, 等. 双季稻区冬种覆盖作物对土壤微生物量的影响[J]. 生态环境, 2008, 17 (5): 2074-2077.
Zhu B, Hu Y G, Zeng Z H *et al*. Cover crop effects on the soil microbial biomass in double-rice cropping system [J]. Ecol. Environ., 2008, 17(5): 2074-2077.

[6] 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.
Gao J S, Cao W D, Li D C *et al*. Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field[J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(16): 4542-4548.

[7] Gabriel J L, Quemada M. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: Yield N uptake and fertilizer fate[J]. Eur. J. Agron., 2011, 34: 133-143.

[8] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 曹卫东. 华北地区几种冬闲覆盖作物碳氮蓄积及其对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4): 750-753.
Zhao Q, Gao X B, Ning X G, Cao W D. Carbon-nitrogen fixation and effects on the physical and chemical properties in winter cover crop in north China[J]. J. Ecol. Environ., 2011, 20(4): 750-753.

[9] 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 Till. Res., 2012, 124: 95-101.

[10] 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 the nutrients releasing of three kinds of green manure crops[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2011, 17(1): 216-223.

[11] 焦彬. 中国绿肥[M]. 北京：农业出版社, 1986.
Jiao B. Green manure in China [M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.

[12] Hanly J A, Gregg P E H. Green-manure impacts on nitrogen availability to organic sweetcorn (*Zea mays*)[J]. New Zealand J. Crop Hortic. Sci., 2004, 32: 295-307.

[13] Marschner P, Solaiman Z, Rengel Z. Brassica genotypes differ in growth, phosphorus uptake and rhizoshphere properties under P-limiting conditions[J]. Soi Biol. Biochem., 2007, 39: 87-98.

[14] Shahbaz A M, Oki Y, Adachi T *et al*. Phosphorus starvation induced root-mediated pH changes in solublization and acquisition of sparingly soluble P sources and organic acids exudation by Brassica cultivars[J]. Soil Sci. Plant Nutr., 2006, 52: 623-633.

[15] Greenwood D J, Lemaire G, Gosse G *et al*. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass [J]. Ann. Bot., 1990, 66(4): 425-436.

[16] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S *et al*. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia [J]. Field Crop. Res., 1999, 63: 113-138.

[17] Muller M M, Sundman V, Soininvaara O, Meriläinen A. Effect of chemical composition in the release of nitrogen from agricultural plant materials decomposing in soil under field conditions[J]. Biol. Fert. Soils, 1988, 6: 78-83.

[18] Bowen W T, Jones J W, Carsky R J, Quintana. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation[J]. Agron. J., 1993, 85: 153-159.

[19] Quemada M, Cabrera M L. Carbon and nitrogen mineralized from leaves and stems of four cover crops [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 471-477.

[20] Doran J W, Smith M S. Role of cover crops in nitrogen cycling [A]. Hargrove W L. Cover crops for clean water[C]. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991.

[21] Frankenberger W T, Abdelmagid H M. Kinetic parameters of nitrogen mineralization rates of leguminous crops incorporated into soil [J]. Plant Soil, 1995, 87: 257-271.

[22] 王芝义, 郭瑞英, 李凤民. 不同夏季填闲作物种植对设施菜地土壤无机氮残留和淋洗的影响[J]. 生态学报, 2011, 31 (9): 2516-2523.
Wang Z Y, Guo R J, Li F M. Effects of different summer catch crops planting on soil inorganic N residue and leaching in greenhouse vegetable cropping system [J]. Acta Ecol. Sin., 2011, 31(9): 2516-2523.

[23] 张丽娟, 巨晓棠, 吉艳芝, 等. 夏季休闲与种植对华北潮土剖面残留硝态氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 312-320.
Zhang L J, Ju X T, Ji Y Z *et al*. Effect of fallow and plant growth in summer on the movement of residual nitrate in aquic soil on North China Plain[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2010, 16(2): 312-320.

[24] Kramberger B, Gselman A, Janzekovic M *et al*. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize[J]. Eur. J. Agron., 2009, 31(2): 103-109.

[25] Ramosm M G, Villatoro M A A, Urquiaga S *et al*. Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using ^{15}N-isotope technique[J]. J. Biotechnol., 2001, 91: 105-115.

[26] Fan M S, Lu S H, Jiang R F *et al*. Nitrogen input, ^{15}N balance and mineral N dynamics in a rice-wheat rotation in southwest China[J]. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 2007, 79: 255-265.

[27] Burge M, Jackson L E. Plant and microbial nitrogen use and turnover: Rapid conversion of nitrate to ammonium in soil with roots[J]. Plant Soil, 2004, 266: 289-301.

[28] Hφgh-Jensen H, Schjoerring J K. Rhizodeposition of nitrogen by red clover, white clover and ryegrass leys [J]. Soil Biol. Biochem., 2001, 33: 439-448.