

马艳芹, 黄国勤. 晚稻施氮量对冬种紫云英生长季温室气体排放与土壤碳库的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 217–221.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.11.055

晚稻施氮量对冬种紫云英生长季温室气体排放与土壤碳库的影响

马艳芹^{1,2}, 黄国勤²

(1. 江西外语外贸职业学院, 江西南昌 330045; 2. 江西农业大学生态科学研究中心, 江西南昌 3300453)

摘要:研究水稻栽培过程中的施肥对冬种紫云英生长季温室气体排放和土壤碳库的影响, 对于进一步认识施肥对温室气体排放以及冬季绿肥对土壤碳库的影响具有重要的参考价值。以晚稻季不施氮前提下的冬闲为对照, 以晚稻季不同施氮量下的冬种紫云英为研究对象, 研究晚稻季施氮对后茬紫云英产量、温室气体排放的影响以及冬种紫云英后的土壤碳库特征。结果表明: 晚稻季施氮 225 kg/hm² 处理下的紫云英产量最高, 达 18 388.97 kg/hm², 与其他处理间差异显著 ($P < 0.05$); 晚稻季施氮增加了紫云英生长季 N₂O、CH₄、CO₂ 的排放量以及全球增温潜势 (GWP); 与冬闲处理相比, 冬种紫云英显著提高土壤有机碳和土壤碳库管理指数; 紫云英产量与 N₂O、CH₄ 排放呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 CO₂ 的排放量、全球增温潜势 (GWP)、活性有机碳、碳库管理指数呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。晚稻季施氮会增加紫云英生长季的 N₂O、CH₄、CO₂ 排放量, 增强紫云英生长季温室气体排放潜势。因此, 在不降低水稻产量的前提下, 减少水稻季氮肥用量可在一定程度上降低后茬紫云英生长季温室气体排放量。

关键词: 施氮; 紫云英; 温室气体排放; 土壤碳库

中图分类号: S158.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)11-0217-05

农田土壤碳库是衡量土壤肥力的一个重要指标, 冬种绿肥还田、水稻秸秆还田、绿肥与氮肥配施等耕作方式均能直接向土壤输送外源有机物, 增加土壤活性有机碳含量^[1], 提高土壤碳库管理指数^[2-6]。同时, 土壤有机碳含量与全球的“温室效应”密切相关^[7], 绿肥作物覆盖和翻压后能够显著增加土壤有机碳含量, 从而影响农田温室气体的排放^[8]。紫云英是南方稻区重要的绿肥作物之一, 具有较强的固氮能力, 紫云英翻压还田后, 在一定程度上可替代后茬水稻生长所需的部分化学氮肥, 减少氮肥用量, 从而有效改善土壤理化性状, 提高土壤有机质含量和微生物含量, 增加作物产量, 提高稻米品质^[9-13]。目前, 关于水稻生长期内温室气体排放的研究较多^[14-16], 对冬种绿肥生长季内的温室气体排放研究较少^[17-18], 而对于晚稻季施肥对冬种绿肥生长季内温室气体排放研究尚未见报道。研究水稻栽培过程中的氮肥用量对紫云英生长季温室气体排放和土壤碳库的影响, 以及二者之间的相互关系, 对于稻田节能减排具有重要意义。为更好地评价南方冬闲田种植紫云英的生态效应, 本研究以冬闲处理为对照, 初步探讨了晚稻季施氮对紫云英鲜草产量、生长季的温室气体排放特征影响及冬种紫云英后的土壤碳库特征, 旨在更好地开发利用冬闲田和紫云英资源, 为稻田节能减排提供理

论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

紫云英配施氮肥试验始于 2011 年 10 月, 生长季温室气体采集时间为 2015 年 11 月至 2016 年 3 月, 试验地点为江西省鹰潭市余江县农业科学研究所试验田 (116°41′ ~ 117°09′E, 28°04′ ~ 28°37′N)。试验地属亚热带季风性湿润气候, 年平均气温 17.6 °C, ≥0 °C 以上的平均积温为 6 586.4 °C, 年降水量约 1 741 mm, 无霜期 258 d, 太阳年辐射总量为 454.27 kJ/cm², 年平均风速为 1 ~ 3.8 m/s。土壤多为泥沙淤积土。试验开始时表层土壤 (0 ~ 15 cm) 有机质含量为 20.65 g/kg, 全氮含量 1.85 g/kg, 全磷含量 0.48 g/kg, 碱解氮含量 151.00 mg/kg, 有效磷含量 59.76 mg/kg, 速效钾含量 38 mg/kg, pH 值 5.59。

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理: (1) 处理 A (CK), 晚稻季施氮量为 0 kg/hm², 冬季空闲; (2) 处理 B, 晚稻季施氮量为 0 kg/hm², 冬季种植紫云英; (3) 处理 C, 晚稻季施氮量为 90 kg/hm², 冬季种植紫云英; (4) 处理 D, 晚稻季施氮量为 150 kg/hm², 冬季种植紫云英; (5) 处理 E, 晚稻季施氮量为 225 kg/hm², 冬季种植紫云英。每个处理重复 3 次, 完全随机区组设计。晚稻季所有处理的磷肥和钾肥施用量相同, 其中磷肥施用量为 60 kg/hm², 钾肥施用量为 75 kg/hm², 以含 N 46% 的尿素、含 P₂O₅ 12% 的钙镁磷肥、含 K₂O 60% 的氯化钾计算化肥施用量, 晚稻收获后所有处理秸秆均不还田。试验小区长为 11 m、宽为 6 m, 小区面积为 66 m², 两边设有保护行, 保护行

收稿日期: 2017-10-16

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2016YFD0300208); 国家自然科学基金 (编号 41661070)。

作者简介: 马艳芹 (1987—), 女, 山东日照人, 博士, 讲师, 主要从事绿肥栽培、农田生态环境研究。E-mail: mayanqin408@163.com。

通信作者: 黄国勤, 教授, 博士生导师, 主要从事农业生态、土壤环境等研究。E-mail: hgqjxes@sina.com。

宽度为 1 m。供试紫云英品种为余江大叶籽,播种时间为 2015 年 10 月 1 日,播种量为 27.5 kg/hm^2 ,翻压时间为 2016 年 3 月 28 日。

1.3 样品采样方法与测定

1.3.1 紫云英测产 于紫云英盛花期,采用 5 点法,每点取 1 m^2 ,测其鲜质量,小区鲜草总产量为小区面积乘以 5 点平均值。

1.3.2 温室气体采集与测定 温室气体采集采用静态箱法,静态箱长、宽、高均为 50 cm,内部材料为不锈钢板,箱体外层包裹厚度为 0.5 cm 的海绵和铝箔隔热板,防止因太阳照射引起的箱内温度升高过快,箱内顶部装有 12 V 小风扇,防止箱内气体不均匀,箱体侧面中部留有抽气孔,采用三通阀控制开关。每小区固定采样底座 1 个,底座上部有 5 cm 深的凹槽,测定时加水密封。紫云英生长季每 10~15 d 采样 1 次^[19],采样期间记录日平均气温变化(图 1)。采集时间为 08:00—11:00,采样按 0、10、20、30 min 的时间间隔用 50 mL 的注射器抽取箱内气体,来回抽动 5~10 次以完全混匀气体,抽出 50 mL 气体保存于真空采样袋后迅速带回实验室分析。 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 气体浓度采用 Agilent 7890 B 气相色谱测定,测定 CH_4 、 CO_2 的检测器为 FID,检测度 300°C ,柱温 60°C ,载气为 99.99% 的高纯氮气,流速 30 mL/min ;测定 N_2O 的检测器为 ECD,检测温度 300°C ,柱温 60°C ,载气为 99.99% 高纯氦/甲烷气(95% 氦气+5% 甲烷),流速 40 mL/min 。气体排放通量计算公式:

$$F = \rho \times h \times dC/dt \times 273 / (273 + T)$$

式中: F 为气体排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 或 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; ρ 为标准状态下气体的密度, kg/m^3 ; h 为采样箱的净高度, m; dC/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, $^\circ\text{C}$; 273 为气态方程常数。

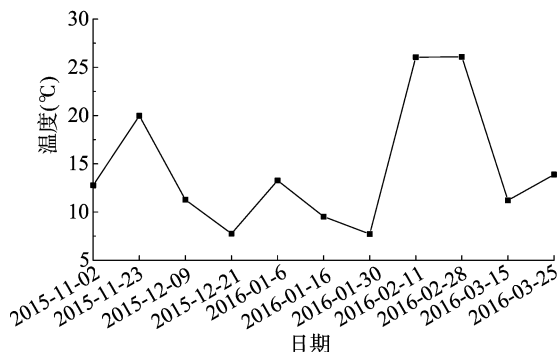


图1 紫云英生长季日平均气温变化

全球增温潜势(global warming potential,简称 GWP)是将各种温室气体的季节排放总量的增温潜势换算为 CO_2 当量, CH_4 和 N_2O 在 100 年尺度上为 CO_2 的 25 倍和 298 倍^[20]。计算公式:

$$\text{GWP} = 25(\text{CH}_4) + 298(\text{N}_2\text{O}) + \text{CO}_2$$

1.3.3 土壤有机碳库指标测定 于紫云英翻压前,每小区按 5 点取样法取土,充分混合,一部分土壤自然风干,用于土壤总有机碳测定,另一部分存放于 4°C 冰箱用于活性有机碳测定。参考稻田土壤的总有机碳质量分数为 16.67 g/kg ,活性有机碳质量分数为 2.11 g/kg 。土壤有机碳(soil organic carbon,简称 SOC)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[21]测定;

活性有机碳(active organic carbon,简称 AOC)采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法测定^[22]。土壤活性有机碳库及碳库管理指数的计算公式:

碳库指数 = 土壤有机碳质量分数(g/kg)/参考农田土壤有机碳质量分数(g/kg);

稳态碳 = 土壤有机碳 - 活性有机碳;

碳库活度 = 土壤活性有机碳质量分数(g/kg)/稳态碳质量分数(g/kg);

碳库活度指数 = 样品碳库活度/参考土壤碳库活度;

碳库管理指数 = 碳库指数 \times 碳库活度指数 $\times 1000$ 。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行统计分析,采用 LSD 进行样本平均数的差异显著性比较,采用 Origin 作图。

2 结果与分析

2.1 晚稻施氮对紫云英鲜草产量的影响

由图 2 可以看出,晚稻季不同施氮量对紫云英鲜草产量的影响较明显,主要表现为随着施氮量的增加,紫云英产量不断增加,其中处理 E 紫云英鲜草产量最高,达 18388.97 kg/hm^2 ,与处理 B 相比,增加了 13.94%,二者之间差异显著($P < 0.05$);其次为处理 D,较处理 B 增加了 9.98%,二者之间差异显著($P < 0.05$),但处理 D 与处理 C 之间差异不显著。可见,与晚稻季不施氮相比,晚稻季施氮显著增加冬季紫云英鲜草产量。

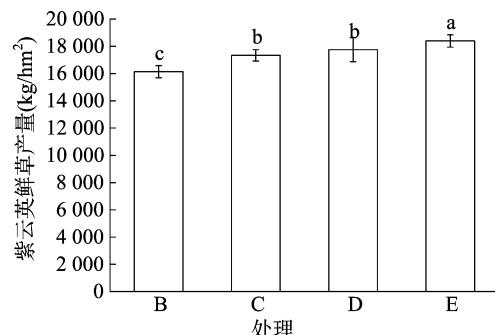


图2 2016 年紫云英鲜草产量

2.2 晚稻季施氮对紫云英生长季温室气体排放的影响

晚稻季施氮和冬种紫云英影响稻田 N_2O 排放。由图 3 可以看出,紫云英播种后至 2015 年 12 月初,不同处理下的稻田 N_2O 排放量较少,12 月后 N_2O 排放量逐渐增加,在 2016 年 1 月中旬达到最大值,该时期内处理 C、D、E 较处理 A 分别增加 21.80%、27.68%、24.40%,较处理 B 分别增加 6.90%、14.71%、12.17%,之后直到翻压,各处理的 N_2O 排放通量逐渐减少。

由图 4 可知,在紫云英生长前期,由于气温较低,紫云英生长缓慢,其 CH_4 排放量较少,甚至低于 0,表现为土壤对 CH_4 的吸收;12 月下旬以后,气温逐渐升高,紫云英生长加快,地上部分生物量逐渐增多,各处理稻田 CH_4 排放通量逐渐升高,在次年 2 月下旬,各处理稻田 CH_4 出现了 1 个小的排放高峰,该时期内各处理的 CH_4 排放通量以处理 E 最高,达 $0.40 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,较处理 A 增加 110.53%,二者之间差

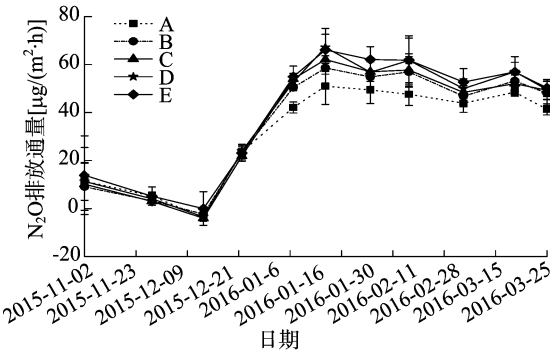


图3 晚稻季施氮对紫云英生长季 N₂O 排放的影响

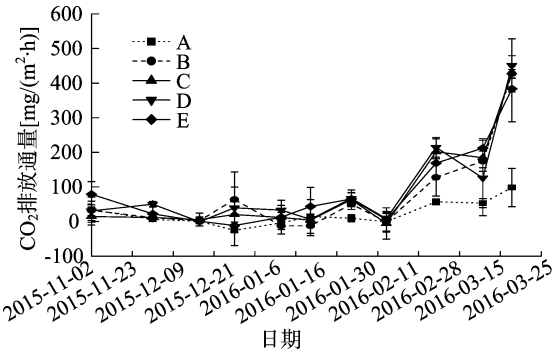


图5 晚稻季施氮对紫云英生长季 CO₂ 排放的影响

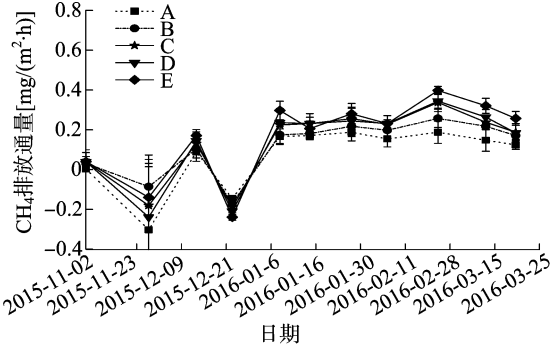


图4 晚稻季施氮对紫云英生长季 CH₄ 排放的影响

异显著 ($P < 0.05$)。

由图 5 可知,晚稻季施氮对 CO₂ 排放影响较大,主要表现为随着紫云英的生长,各处理的 CO₂ 排放逐渐增加,尤其是 2 月中旬以后,各处理 CO₂ 排放通量迅速增加,到 2 月底,各处理均出现 1 次小高峰,与处理 A 相比,该时期内处理 B、

C、D、E 的 CO₂ 排放通量增幅达 124.36% ~ 277.09%,之后逐渐下降,在 3 月底翻压前达到最大值。

2.3 晚稻施氮对紫云英生长季温室气体排放总量和增温潜力的影响

由表 1 可以看出,处理 C、D、E 的紫云英生长季温室气体排放总量均显著高于冬闲处理 A ($P < 0.05$);处理 E 的 N₂O、CO₂ 累积排放总量和全球增温潜势最高,显著高于不施氮处理 B ($P < 0.05$),分别比处理 B 高出 11.54%、28.19%、26.00%;3 个施氮处理中处理 C 的 N₂O、CO₂ 排放量和全球增温潜势最低,分别比处理 E 低 8.28%、7.63%、8.13%,其中 N₂O 排放总量与处理 E 之间差异显著 ($P < 0.05$),CH₄、CO₂ 累积排放总量及全球增温潜势与处理 E 之间差异不显著 ($P > 0.05$)。可见,晚稻季施氮显著影响后茬紫云英生长季的温室气体排放,且随着施氮量的增加紫云英生长季 N₂O、CO₂ 排放量也逐渐增加,全球增温潜势也逐渐增强。

表 1 晚稻季施氮对紫云英生长季温室气体累积排放量、全球增温潜势的影响 (2015—2016 年)

处理	N ₂ O 排放总量	CH ₄ 排放总量	CO ₂ 排放总量	全球增温潜势
A (CK)	1.17 ± 0.05c	1.84 ± 1.77b	632.01 ± 139.90c	1 026.67 ± 125.62c
B	1.30 ± 0.04b	4.23 ± 0.37a	1 994.80 ± 287.82b	2 487.95 ± 253.12b
C	1.33 ± 0.06b	4.86 ± 0.95a	2 362.06 ± 106.16a	2 879.90 ± 300.17a
D	1.40 ± 0.09ab	4.66 ± 0.79a	2 498.22 ± 204.86a	3 031.92 ± 250.14a
E	1.45 ± 0.13a	5.82 ± 1.25a	2 557.22 ± 254.54a	3 134.82 ± 198.59a

2.4 冬种紫云英对土壤碳库的影响

由表 2 可以看出,各处理在活性有机碳、土壤碳库活度方面差异不显著 ($P > 0.05$);不同处理的总有机碳含量、可溶性有机碳含量、碳库指数均表现为处理 D 最高,与对照 A 相比差异显著 ($P < 0.05$),分别增加 21.27%、32.26%、11.36%;处理 C 的土壤活性有机碳含量、碳库管理指数最高,比处理 A 分别高 12.23%、11.99%;处理 B、C、D、E 的土壤碳库管理指数均显著高于处理 A,增幅达 9.54% ~ 11.99%,但处理 B、C、

D、E 之间差异不显著 ($P > 0.05$)。可见,与冬闲处理相比,冬种紫云英显著增加土壤总有机碳含量、可溶性有机碳、碳库指数,其中晚稻季施氮 90、150 kg/hm² 的土壤碳库管理指数较高。

2.5 紫云英产量、碳库管理指数与温室气体排放量相关性分析

通过表 3 可以看出,施氮量与 N₂O 排放量呈显著相关 ($P < 0.05$),说明氮肥的投入会使稻田 N₂O 排放量增加。紫

表 2 冬种紫云英后对土壤碳库的影响

处理	总有机碳含量 (g/kg)	可溶性有机碳含量 (g/kg)	活性有机碳含量 (g/kg)	碳库指数	土壤碳库活度	碳库活度指数	碳库管理指数
A	1.88 ± 0.11c	0.31 ± 0.05c	1.88 ± 0.01a	1.32 ± 0.07b	0.11 ± 0.01a	0.80 ± 0.01a	89.52 ± 5.82b
B	1.97 ± 0.22ab	0.41 ± 0.07a	2.05 ± 0.01a	1.18 ± 0.13c	0.12 ± 0.01a	0.83 ± 0.02a	98.06 ± 11.07a
C	2.13 ± 0.14a	0.38 ± 0.08ab	2.11 ± 0.01a	1.34 ± 0.08b	0.11 ± 0.02a	0.78 ± 0.01a	100.25 ± 7.15a
D	2.28 ± 0.42a	0.41 ± 0.07a	2.09 ± 0.01a	1.47 ± 0.25a	0.10 ± 0.01a	0.73 ± 0.02a	100.15 ± 7.03a
E	1.92 ± 0.48b	0.35 ± 0.05b	2.11 ± 0.01a	1.19 ± 0.29c	0.12 ± 0.02a	0.87 ± 0.03a	99.95 ± 16.65a

云英产量与 N_2O 、 CH_4 排放量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与活性有机碳、碳库管理指数、 CO_2 排放量、全球增温潜势呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 表明随着紫云英鲜草产量的增加, 土壤活性有机碳含量和碳库管理指数逐渐提高, 同时紫云英生长季的温室气体排放量逐渐增多, 全球增温潜势也越来越强。

表 3 紫云英产量、碳库管理指数与温室气体排放量相关性分析

指标	相关系数										
	施氮量	紫云英产量	活性有机碳	碳库指数	碳库活度	碳库活度指数	碳库管理指数	N_2O 排放量	CH_4 排放量	CO_2 排放量	全球增温潜势
施氮量	1.00										
紫云英产量	0.62	1.00									
活性有机碳	0.62	0.97 **	1.00								
碳库指数	0.29	0.52	0.69	1.00							
碳库活度	0.06	0.11	0.12	0.78	1.00						
碳库活度指数	0.12	0.03	0.19	0.84	0.95 *	1.00					
碳库管理指数	0.65	0.99 **	0.99 **	0.59	0.02	0.06	1.00				
N_2O 排放量	0.90 *	0.89 *	0.85	0.41	0.06	0.12	0.88 *	1.00			
CH_4 排放量	0.79	0.95 *	0.90 *	0.34	0.22	0.22	0.95 *	0.95 *	1.00		
CO_2 排放量	0.73	0.99 **	0.98 **	0.56	0.02	0.02	0.99 **	0.94 *	0.97 **	1.00	
全球增温潜势	0.74	0.98 **	0.97 **	0.55	0.03	0.01	0.99 **	0.94 *	0.97 **	1.00 **	1.00

注: “*”表示显著相关 ($P < 0.05$); “**”表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 施肥和冬种紫云英影响稻田温室气体排放

氮肥在提高粮食产量方面发挥了重要作用, 同时也会产生大量的 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 等温室气体。研究表明, 化学氮肥施用是促进农田 N_2O 排放的主要因素, 其中硝态氮对农田 N_2O 排放的决定程度达 65%^[23]。本研究结果显示, 冬种紫云英处理下的 N_2O 排放总量大于冬闲处理, 这与前人研究结果^[17-18, 24]类似。同时也发现, 各处理下的 N_2O 排放通量均表现为紫云英生长后期大于前期, 这与 O'Hara 等的研究结果^[25]一致, 主要原因可能是随着气温的逐渐增高, 土壤微生物活动增强, 紫云英根系发达, 地上部分生物量随晚稻季施氮量的增加而增加, 其生理活动增强, 从而增加了 N_2O 排放。 N_2O 排放与紫云英鲜草产量之间显著正相关, 也证实了这一观点。本研究表明, 2016 年 1 月中旬以前 CH_4 排放量较低, 甚至在某些时间呈现负排放, 12 月中旬后 CH_4 排放通量显著升高, 这与唐海明等的研究结果^[17, 26]一致, 主要是由于稻田 CH_4 排放与土壤含水量^[27]、温度^[28-29]密切相关。12 月下旬以后, 气温逐渐升高, 温度适宜, 降水增加, 良好的土壤环境有利于甲烷菌生长, 从而导致了紫云英生长季 CH_4 排放量出现了 1 次小高峰; 1 月中旬以后温度下降, CH_4 排放量也逐渐减少, 2 月以后随着温度的升高, CH_4 排放量再次出现 1 次高峰。

3.2 冬种紫云英提高农田土壤碳库管理指数

施用有机肥或有机肥无机肥配施, 均向土壤中直接输入了外源有机物, 能够显著增加有机碳含量^[30-31]。研究结果显示, 冬闲对照的土壤碳库各项管理指数均最低, 冬种紫云英显著提高了土壤有机碳和土壤碳库管理指数, 这主要是由于免耕直播紫云英一方面能够提高土壤有机碳储量^[32], 另一方面冬种紫云英增加了地表覆盖面, 减少了对土壤的扰动次数和土壤养分的流失, 降低了风、雨等对土壤的侵蚀, 同时为土壤

土壤碳库管理指数与 CO_2 排放量、全球增温潜势之间存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 N_2O 、 CH_4 排放量存在显著正相关 ($P < 0.05$)。可见, 土壤碳含量的变化会影响稻田温室气体排放。

补充了部分损失的碳, 进而增强了土壤固碳能力^[33], 提高了土壤碳库活度、碳库活度指数和碳库指数。同时本试验结果也表明, 冬种紫云英处理下的土壤活性有机碳含量均明显高于冬闲对照, 相关性结果也表明, 紫云英鲜草产量与土壤活性有机碳之间显著正相关, 这主要是由于晚稻季不同施氮量下的紫云英鲜草量随施氮量的增加逐渐增加, 提高了土壤活性有机碳含量。

3.3 稻田温室气体排放与土壤碳库关系密切

土壤碳库作为地表生态系统中最活跃的碳库之一, 是 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 等温室气体的重要释放源, 也是重要的吸收汇^[34]。稻田土壤有机碳储量的增加对减少土壤温室气体排放、降低大气温室气体浓度、缓解目前的全球变暖问题具有重要的意义。本研究结果表明, N_2O 和 CH_4 排放量与土壤碳库管理指数存在显著正相关 ($P < 0.05$), CO_2 排放量、全球增温潜势与土壤碳库管理指数存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 这主要是由于免耕直播紫云英减少了稻田的耕作次数, 紫云英生长期间提高了土壤矿化速率, 加之紫云英覆盖期间对土壤起到了保温作用, 加速了土壤有机质的腐化, 提高了土壤碳库管理指数, 从而增加了紫云英生长季 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 排放量和温室气体排放潜势。紫云英生长季全球增温潜势与紫云英产量及 CH_4 、 CO_2 排放量存在极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 N_2O 排放量显著正相关 ($P < 0.05$), 这与 Mosier 等的研究结果^[35-36]类似, 原因可能是冬种紫云英产量越高, 其土壤的固碳能力和固碳量越多^[32-33], 较高的碳储量增强了农田土壤温室气体排放。虽然冬种紫云英增加了稻田温室气体排放量, 但紫云英还田后可替代部分氮肥, 在一定程度上可以减少稻田温室气体排放, 抵消了一部分温室气体增排效应^[37], 但紫云英还田量与施氮量以及二者之间的相互抵消量等还需要进一步研究。

4 结论

晚稻季施氮对后茬紫云英产量有显著影响, 紫云英产量随

着施氮量的增加逐渐增加。冬种紫云英可显著提高土壤有机碳含量和土壤碳库管理指数。晚稻季施氮会增加紫云英生长季的 N_2O 、 CH_4 、 CO_2 排放量,增强紫云英生长季温室气体排放潜势。因此,在不降低水稻产量的前提下,减少水稻季氮肥用量可在一定程度上降低后茬紫云英生长季温室气体排放量。

参考文献:

- [1] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359–365.
- [2] 徐明岗, 于 荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459–465.
- [3] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 等. 机械化稻草全量还田对水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 江西农业大学学报, 2011, 33(5): 835–839, 879.
- [4] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 806–809.
- [5] 王 晶, 朱 平, 张 男, 等. 施肥对黑土活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2003, 34(5): 394–397.
- [6] 宇万太, 赵 鑫, 马 强, 等. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 539–544.
- [7] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emission, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 91(1/2/3): 217–232.
- [8] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 双季稻区冬季覆盖作物残茬还田对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1666–1675.
- [9] 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.
- [10] 李继明, 黄庆海, 袁天佑, 等. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 563–570.
- [11] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续性特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1264–1269.
- [12] Lee C H, Park D K, Jung K Y, et al. Effects of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 138(3/4): 343–347.
- [13] 万水霞, 唐 杉, 蒋光月, 等. 紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 109–117.
- [14] 谢义琴, 张建峰, 姜慧敏, 等. 不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 578–584.
- [15] 贺 非, 马友华, 杨书运, 等. 不同施肥技术对单季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(10): 2093–2098.
- [16] 商庆银, 杨秀霞, 成 臣, 等. 秸秆还田条件下不同水分管理对双季稻田综合温室效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2): 181–190.
- [17] 唐海明, 汤文光, 帅细强, 等. 不同冬季覆盖作物对稻田甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3191–3199.
- [18] 唐海明, 肖小平, 帅细强, 等. 双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(5): 1481–1489.
- [19] 成 臣, 曾勇军, 杨秀霞, 等. 不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1887–1895.
- [20] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007 – mitigation of climate change: working group III contribution to the fourth assessment report of the IPCC [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 44–49.
- [22] 宇万太, 赵 鑫, 马 强, 等. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 539–544.
- [23] 邵美红, 孙加焱, 阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述 [J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181–187.
- [24] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 等. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(5): 704–710.
- [25] O'Hara G W, Daniel R M. Rhizobial denitrification: a review [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1985, 17(1): 1–9.
- [26] 刘 惠, 赵 平, 孙谷畴, 等. 华南丘陵区冬闲稻田二氧化碳、甲烷和氧化亚氮的排放特征 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 57–62.
- [27] Yang S S, Chang H L. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddysoil [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1998, 69(1): 69–80.
- [28] 胡荣桂. 氮肥对旱地土壤甲烷氧化能力的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 74–77.
- [29] 丁维新, 蔡祖聪. 氮肥对土壤氧化大气甲烷影响的机制研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2001, 17(3): 30–34.
- [30] 曾 骏, 郭天文, 包兴国, 等. 长期施肥对土壤有机碳和无机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(2): 11–14.
- [31] Gong W, Yan X Y, Wang J Y, et al. Long – term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat – maize cropping system in northern China [J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 318–324.
- [32] 胡 宁, 娄翼来, 梁 雷. 保护性耕作对土壤有机碳、氮储量的影响[J]. 生态环境学报, 2010(1): 223–226.
- [33] 吕瑞珍, 熊 瑛, 李友军, 等. 保护性耕作对农田土壤碳库特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 206–209, 217.
- [34] 王树涛, 门明新, 刘 微, 等. 农田土壤固碳作用对温室气体减排的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1775–1780.
- [35] Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1584–1598.
- [36] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice – cropping systems: a 3 – year field measurement in long – term fertilizer experiments [J]. Global Change Biology, 2011, 17(6): 2196–2210.
- [37] 马艳芹, 钱晨晨, 孙丹平, 等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报, 2016(增刊1): 128–134.