



粉垄耕作与氮肥减施对木薯地土壤温室气体排放及土壤酶活性的影响

杨慰贤¹, 覃锋燕¹, 刘彦汝¹, 韩笑¹, 周佳², 韦茂贵^{1*}, 申章佑^{2*}, 韦本辉²

(¹广西大学农学院, 南宁 530004; ²广西农业科学院经济作物研究所, 南宁 530007)

摘要:【目的】研究粉垄耕作与氮肥减施对木薯地土壤温室气体排放及土壤酶活性的影响,明确粉垄栽培木薯的增产及碳减排效应,为木薯种植业的可持续发展提供技术支持。【方法】以木薯品种华南205为试验材料,利用粉垄耕作和常规耕作2种方式进行整地,分别设4个不同施氮量水平(100%N、50%N、25%N和0N),分2次追肥,于第1次追肥后至木薯收获期采集土壤温室气体及土壤样品,研究耕作方式及施氮量对土壤脲酶、过氧化氢酶活性及土壤温室气体排放量、净增温潜势(GWP)、温室气体强度(GHGI)和固碳量的影响。【结果】在木薯整个生育期中,2种耕作方式下,100%N处理的土壤脲酶活性较高,25%N处理的土壤过氧化氢酶活性较高,且粉垄耕作的酶活性整体上高于常规耕作。土壤温室气体累积排放量、GWP、GHGI和土壤固碳量均受耕作方式和施氮量的双重影响。减氮处理有利于降低土壤N₂O、CH₄和CO₂的累积排放量及GWP和GHGI,0N处理的土壤温室气体排放量均最低;常规耕作100%N处理的土壤GWP和GHGI分别为1170.4 kg/ha和0.069 kg/kg,均显著高于各减氮处理($P<0.05$,下同);粉垄耕作100%N处理的GWP和GHGI分别为367.6 kg/ha和0.014 kg/kg,与各减氮处理差异不显著($P>0.05$)。相同施氮量处理下,粉垄耕作的土壤固碳量均显著高于常规耕作,其中100%N处理的土壤固碳量最高,为1.95 kg/(ha·a)。【结论】粉垄耕作可通过优化土壤理化性质,提高土壤固氮效率,改善土壤固碳能力。在相同的试验条件下,粉垄耕作100%N处理的碳减排效果最明显。

关键词: 粉垄耕作; 木薯; 减量施肥; 土壤酶活性; 净增温潜势; 温室气体强度

中图分类号: S533

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2021)09-2426-12

Effects of Fenlong tillage and reducing nitrogen treatment on soil greenhouse gas emissions and soil enzyme activities in cassava field

YANG Wei-xian¹, QIN Feng-yan¹, LIU Yan-ru¹, HAN Xiao¹, ZHOU Jia²,
WEI Mao-gui^{1*}, SHEN Zhang-you^{2*}, WEI Ben-hui²

(¹College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China; ²Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract:【Objective】The objective of the current study was to investigate influences on the greenhouse gas emission of soil and enzyme activities caused by Fenlong tillage (FLT) technology and nitrogen fertilizer application, to investigate the effect of planting cassava in FLT on yield increase and carbon emission reduction, and the existing cassava cultivation methods were optimized to provide technical support for sustainable development of cassava planting industry. 【Method】Cassava (*Manihot esculenta* Crantz) variety South China 205 was used as materials and cultivated using the FLT technology and the conventional tillage (CT) method, respectively. Four different nitrogen application rates were set up for both the FLT and CT. The conventional nitrogen application amount was set as 100%N treatment while other treatments were treated

收稿日期: 2020-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860347, 31960389)

通讯作者: 韦茂贵(1986-), <https://orcid.org/0000-0003-2625-1935>, 博士, 主要从事木薯栽培与利用研究工作, E-mail: weimaogui0806@163.com; 申章佑(1983-), <https://orcid.org/0000-0001-9069-1172>, 副研究员, 主要从事粉垄耕作及薯类作物育种栽培研究工作, E-mail: shzhyou@126.com

第一作者: 杨慰贤(1993-), <https://orcid.org/0000-0002-2624-4703>, 研究方向为作物环境及农产品安全, E-mail: yangweix205@163.com

as 50%N, 25%N and 0N. Conventional phosphorus and potassium were used for all treatments. The fertilizer was applied as topdressing twice. Soil greenhouse gas emission and soil samples were collected from the first topdressing period to the cassava harvest season. The effects of combing tillage methods and nitrogen application on soil greenhouse gas emissions characteristics, the global warming potential (GWP), the greenhouse gas intensity (GHGI), soil carbon sequestration, soil urease and catalase activity were examined. [Result] During the whole growth period of cassava, soil urease activity was higher under 100%N treatment and soil catalase activity was higher under 25%N treatment under the two tillage methods, and the enzyme activity under FLT was higher than that under CT. Soil greenhouse gas emissions, GWP, GHGI and soil carbon sequestration were all affected by tillage methods and nitrogen application rates. N_2O , CH_4 and CO_2 emissions, GWP, GHGI were decreased under nitrogen reduction treatment, and soil greenhouse gas emissions under 0N treatment were the lowest. In the blocks using the conventional tillage method, GWP and GHGI of the 100%N treatment were 1170.4 kg/ha and 0.069 kg/kg, respectively, which were significantly higher than other nitrogen reduction treatments ($P < 0.05$, the same below). For the blocks using FLT, the GWP and GHGI of the 100%N treatment were 367.6 kg/ha and 0.014 kg/kg, respectively. And there were no difference of GWP and GHGI between the 100%N and other nitrogen reduction treatments ($P > 0.05$). With the same nitrogen application rate, the soil carbon sequestration of the FLT treatment was always significantly higher than which under the CT treatment. The highest carbon sequestration was found in the FLT treatment 100%N, and as high as 1.95 kg/(ha·a). [Conclusion] FLT by optimizing the soil physical and chemical properties, improves the efficiency of soil nitrogen, improves soil carbon sequestration ability. Under the same experimental conditions, comparing with CT, FLT with 100%N treatment has the most obvious carbon emission reduction effect.

Key words: Fenlong tillage; cassava; reduced fertilization; soil enzyme activity; global warming potential; greenhouse gas intensity

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(31860347, 31960389)

0 引言

【研究意义】木薯(*Manihot esculenta* Crantz)块根富含淀粉,是生产淀粉和发酵制醇的重要工业原料之一。广西是我国木薯主产区,木薯产量占全国木薯总产量的60%以上。受土地资源及种植习惯等因素影响,广西绝大部分木薯种植在耕层浅、易板结且无灌溉条件的旱坡地或边际地上。传统耕作方式以旋耕为主,旋耕地块的土壤耕层浅薄易板结,导致作物生产过程中的肥料利用率逐年降低,而农民为了保证木薯产量,势必增加化肥和农药用量,进而导致更多的温室气体排放、土壤酸化严重及水体污染等农业面源污染问题(孟梦等,2013;何悦和漆雁斌,2020;王新刚等,2020)。如何在化肥零增长的前提下保证作物产量,减少温室气体排放,需要探索新的耕作方式。旱作深旋耕粉垄耕作技术用螺旋型钻头代替犁头,耕作时钻头入土深度达30~60 cm,分层超深松土壤,一次性完成深耕、粉碎、成垄等作业程序,省力、省工、增效;此外,粉垄耕作还具有加深土壤耕作层、全耕作层土壤均匀细碎、保持土壤长时间疏松及促进作物根系发达、植株健壮、产量增加等优点(韦本辉等,2012a)。因此,研究粉垄栽培条件下,不同施氮量对木薯地土壤温室气体排放和土壤酶活性的影响,探明粉垄栽培在适当减肥并保产增产的同时能减少土壤温室气体排放的田间管理措施,对广西木薯产业的可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】目前已有较多研究报道了耕作方式及施氮对

土壤温室气体和土壤酶活性的影响。Bista等(2017)研究指出,短期内免耕或少耕可减少土壤温室气体排放,且能提高土壤矿质氮含量;但随着连续免耕时间的延长,土壤 N_2O 和 CO_2 气体排放则会明显增加(Lognoul et al., 2017)。Zhang等(2017)研究表明,旋耕和增施秸秆等有机氮肥可导致农田土壤温室气体 CH_4 排放量增加,会提高产甲烷菌的数量,进而改变相关土壤酶活性。张俊丽等(2018)研究认为,深松耕对增加土壤 CO_2 气体排放的贡献远大于免耕,但同时也提高了土壤酶活性。赵力莹等(2018)、Lü等(2019)、缪平贵等(2020)研究表明,旋耕不利于控制温室气体排放,会提高冬小麦、马铃薯全生育期农田 N_2O 和 CO_2 排放通量。张志勇等(2020)研究指出,夏玉米种植中采用秸秆还田旋耕减施氮肥可在保持较高土壤酶活性的同时减少农田温室气体排放。关于粉垄耕作对土壤温室气体排放及土壤酶活性的影响,郑佳舜等(2019)研究表明,深旋耕粉垄整地配施绿肥和化肥对水稻田温室气体减排有一定积极作用;黎佐生等(2020)研究表明,粉垄种植甘蔗可有效提高土壤微生物数量和改善土壤酶活性,有利于改良土壤质量。【本研究切入点】目前,针对粉垄耕作技术的研究主要集中在其对作物产量及根系生长的影响方面(韦本辉等,2012b;刘江汉和何文寿,2020),而粉垄耕作配合氮肥减施能否减少旱地作物土壤温室气体排放的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】利用粉垄和常规耕作2种方式进行整地,设4个不同

施氮量水平,研究耕作方式及施氮量对土壤的温室气体排放量、净增温潜势(Global warming potential, GWP)、温室气体强度(Greenhouse gas intensity, GHGI)、固碳量及酶活性的影响,明确粉垄栽培木薯的减排效应,优化现有木薯栽培方法,为木薯产业的可持续发展提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019年在广西农业科学院武鸣里建设试验基地(东经107°49'26"、北纬22°59'58")进行。试验地年平均气温21.7℃,年均降水量1233.4 mm,年均日照时数1660 h,年太阳辐射总量496.81 KJ/m²。耕作层(0~20 cm)土壤pH 5.65、碱解氮含量60.38 mg/kg、速效磷含量45.09 mg/kg、速效钾含量42.17 mg/kg、有机质含量17.23 g/kg。

1.2 试验材料

供试木薯品种为华南205,由中国热带农业科学院选育。

供试肥料:氮肥为尿素(N≥46.4%,湖北大田化工股份有限公司生产),磷肥为钙镁磷肥(P₂O₅≥18.0%,云南省昆明磷都钙镁磷肥厂生产),钾肥为氯化钾(K₂O≥60.0%,原产国约旦,中化化肥有限公司销售)。

1.3 试验方法

田间试验采用裂区设计,主因素为耕作方式,副因素为施氮水平。2种耕作方式为粉垄耕作和常规耕作。设4个施氮水平,分别为100%N(常规施肥量:N 358.80 kg/ha, P₂O₅ 89.10 kg/ha, K₂O 187.50 kg/ha)、50%N(氮肥较常规施肥量减少50%,磷、钾肥不变)、25%N(氮肥较常规施肥量减少75%,磷、钾肥不变)和0N(不施氮肥,磷、钾肥不变)。主因素内随机区组排列副因素,小区长14 m、宽5 m,共8个处理,3次重复。

1.4 田间管理

粉垄耕作使用LG-125型自走式粉垄机(广西五丰机械公司),一次性完成整地,土壤深耕深松30 cm。常规耕作使用纽荷兰牌110马力拖拉机,卧式旋耕。4月16—18日种植,种茎长度15 cm,株行距为1 m×1 m。种植时不施基肥,第1次追肥在植后60 d(6月16日)进行,占总施肥量的60%;第2次在植后120 d(8月19日)进行,占总施肥量的40%,追肥以撒施方式进行,施肥后用薄土覆盖形成小垄。试验期间无人工灌水,12月16—17日收获。

1.5 测定项目及方法

1.5.1 气体采集与测定 试验观测时间为2019年6—12月。每小区设1个采样点,采样点位于该小区中心位置的垄面上。气体采集与测定采用分离式静态箱—气相色谱法进行(郑佳舜等,2019)。静态箱分为底座和箱体2个部分,底座为50 cm×50 cm,箱体为50 cm×50 cm×50 cm。在第1次施肥当天将不锈钢底座埋入土壤约10 cm深,采集气体时将静态箱镶在底座上且用水密封防止漏气,箱子顶部小孔用硅胶密封。

气体采集:集中进行2轮气体采集,分别在每次追肥后的第1、2、3、5和7 d进行。在第1轮气体采集结束后的第30 d,第2轮气体采集结束后的第30、60和90 d分别进行1次气体采集。采气时间为上午9:00—11:00,采样前后记录气箱内温度。每次取样分别在封口后的0、10、20和30 min用50 mL注射器抽取,重复3次。把气体保存在注射器筒中,带回实验室用7890A气相色谱仪(美国Agilent公司)进行测定。N₂O用ECD前检测器检测,CO₂和CH₄用FID后检测器检测。土壤温室气体排放通量计算公式为(黄太庆等,2010):

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}$$

式中,F为N₂O[μg/(m²·h)]、CO₂和CH₄排放通量[mg/(m²·h)];ρ表示标准状况下CO₂-C、CH₄-C(0.54 g/L)和N₂O-N(1.25 g/L)的密度;A为采样箱底座内土壤表面积(m²);V为采气箱的体积(m³), $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 表示CO₂、CH₄[μL/(L·h)]和N₂O[nL/(L·h)]的排放速率;T为采样箱内温度(℃),273为气态方程常数。

1.5.2 温室气体累积排放量 温室气体累积排放量计算公式为(王旭燕等,2015):

$$f = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(F_{i+1} + F_i)}{2} \times (D_{i+1} - D_i) \times \frac{24}{100} \right]$$

式中,f为观测期内气体累积排放量,F_{i+1}、F_i分别为第i+1次和第i次被测气体排放通量;D_{i+1}、D_i分别为第i+1次和第i次采样时间(d)。

1.5.3 土壤样品采集、测定及土壤固碳量计算 供试土样分别于耕作后种植木薯前和木薯收获后采集。各小区按S形路线随机取5个点的土样,采样深度为0~20 cm。采用环刀法测定土壤容重(鲁如坤,2000)。其他土样充分混匀后拣去植物残根和石砾等,经风干、磨碎过筛,采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量(鲍士旦,2000)。土壤固碳量计算公式为(成臣等,2015):

$$SCS=0.1 \times ([SOC]_t - [SOC]_0) \times \gamma \times H$$

式中, SCS为土壤固碳量[$\text{kg}/(\text{ha} \cdot \text{a})$,以C计], $[SOC]_t$ 为试验第 t 年后土壤有机碳含量(g/kg), $[SOC]_0$ 为试验前土壤有机碳含量(g/kg), γ 为试验前后土壤的平均容重(g/cm^3), H 为土壤厚度(20 cm)。

1.5.4 土壤GWP和GHGI计算 农田GWP以农田排放 CH_4 和 N_2O 的综合增温潜势与土壤固碳减缓全球变暖贡献的差值表示(Zhang et al., 2020)。在GWP估算中,一般 CH_4 和 N_2O 排放量按分子温室效应转换成 CO_2 当量进行温室效应估算(廖萍等, 2018)。在100年时间尺度上,单位质量 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别为单位质量 CO_2 的28和265倍(Zhang et al., 2014),农田净GWP(kg/ha)计算公式为(成臣等, 2015):

$$\text{GWP}=28 \times f_{\text{CH}_4} + 265 \times f_{\text{N}_2\text{O}} \times \text{SCS} - 44/12$$

式中, f_{CH_4} 、 $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 分别为测定期内 CH_4 和 N_2O 的累积排放量(kg/ha)。

单位产品的综合净温室效应即为GHGI(kg/kg , yield),其计算公式为(熊正琴和张晓旭, 2017):

$$\text{GHGI} = \frac{\text{GWP}}{\text{Yield}}$$

式中, Yield表示当季木薯实际产量(t/ha)。

1.5.5 土壤温度和湿度测定 随机选取粉垄耕作和常规耕作小区,在采气的同时,把温湿度黑匣子(L92-1)埋入土壤5 cm深处,稳定5 min后记录土壤温度和湿度。

1.5.6 土壤酶活性测定 温室气体取样当天进行土壤田间取样,每小区采用S形取样法随机取5点,用土钻取0~20 cm土样并放入自封袋中,自然风干,过20目土筛后进行土壤脲酶和过氧化氢酶活性测定。脲酶活性采用苯酚一次氯酸钠比色法测定(关松荫, 1989),过氧化氢酶活性采用紫外分光光度法测定(杨兰芳等, 2011)。

1.6 统计分析

采用Excel 2010整理数据并制图,使用SPSS 22.0进行方差分析、成对 t 检验及多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式土壤温湿度的变化

图1为观测期内粉垄耕作和常规耕作5 cm土层土壤的温度和湿度变化趋势。成对 t 检验结果表明,粉垄耕作的土壤温度极显著低于常规耕作($t=-6.44$, $P<0.001$)。由图1可看出,从6月下旬到9月中旬,常规耕作的土壤温度明显高于粉垄耕作的土壤温度;10月入秋后,2种耕作方式下的土壤温度均随着季节

性温度的下降而降低。此外,粉垄耕作的土壤湿度在整个观测期内变化较平缓,变幅较小,显著高于常规耕作的土壤湿度($t=2.20$, $P=0.038$)。7月降雨量较大,粉垄耕作的土壤疏松,利于雨水下渗,耕作层的土壤湿度较常规耕作低;8月降雨量少,粉垄耕作土壤较常规耕作土壤的保水能力强,湿度更大。说明与常规耕作相比,粉垄耕作对土壤物理结构优化的效果更明显。

2.2 不同处理土壤酶活性的变化

2.2.1 脲酶活性 土壤耕作方式和施氮量均极显著($P<0.01$,下同)影响土壤脲酶活性(表1)。由图2可看出,粉垄耕作方式下,木薯主要生育时期的土壤脲酶活性均随着施氮量的增加而升高,且木薯块根形成期和块根膨大期的酶活性相对较高,块根成熟期的酶活性则较低。在木薯同一生育期中,2种耕作方式下不同施氮处理间的土壤脲酶活性存在差异。随着木薯生长进程的推进,与常规耕作相比,粉垄耕作下50%N和100%N处理的土壤脲酶活性均较高,其中粉垄耕作100%N处理的土壤脲酶活性在块根形成期最高,为 $0.26 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$,是粉垄耕作0N处理的1.38倍,是常规耕作100%N处理的1.08倍。木薯整个生育期中2种耕作方式0N处理下的土壤脲酶活性均最低;2种耕作方式相同施氮处理下,木薯块根成熟期粉垄耕作25%N、50%N和100%N处理的土壤脲酶活性均显著高于常规耕作($P<0.05$,下同)。总体上,较木薯其他生育期,土壤脲酶在木薯块根膨大期活性较高。

2.2.2 过氧化氢酶活性 土壤耕作方式和施氮量均极显著影响土壤过氧化氢酶活性(表1)。由图3可

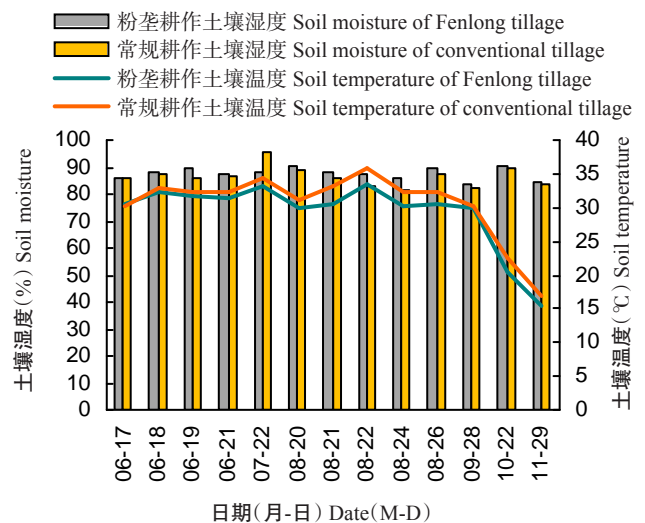


图1 不同耕作方式下土壤温湿度的变化

Fig.1 Changes of soil temperature and humidity of different tillage patterns

表 1 土壤脲酶和过氧化氢酶活性的方差分析结果

Table 1 Results of variance analysis of soil urease activities and soil catalase activities

因素 Factor	df	脲酶活性 Urease activity		过氧化氢酶活性 Catalase activity	
		均方 MS	P	均方 MS	P
耕作方式 Tillage method	1	0.007	0.008**	7.70	0.006**
施氮量 Nitrogen treatment	3	0.013	0.002**	5.48	0.005**
耕作方式×施氮量 Tillage method×nitrogen treatment	3	0.000	0.094	0.11	0.120

**表示影响极显著($P<0.01$)。表2和表3同

** represented extremely significant influence($P<0.01$). The same was applied in Table 2 and Table 3

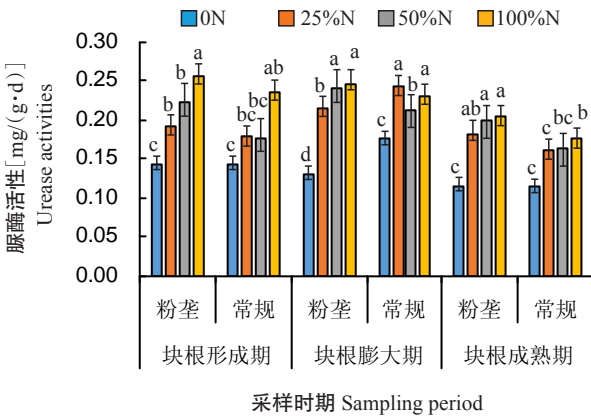


图 2 不同处理的土壤脲酶活性

Fig.2 Soil urease activities in all treatments

不同小写字母表示同一木薯生育期不同处理间差异显著($P<0.05$)。图3同

Different lowercase letters indicated significant differences between different treatments in the same cassava growth period ($P<0.05$). The same was applied in Fig.3

看出,土壤过氧化氢酶活性在木薯块根形成期维持较高水平,随着木薯生育进程的推进,土壤过氧化氢酶活性整体上呈由高逐渐降底的变化趋势,且在相同生育期不同处理间酶活性出现明显差异。木薯块根形成期和块根膨大期不同处理下的土壤过氧化氢酶活性均呈25%N>50%N>100%N>0N的趋势。木薯同一生长时期,与常规耕作相比,粉垄耕作下25%N、50%N和100%N处理的土壤过氧化氢酶活性更高。在木薯整个生育期中,粉垄耕作25%N处理下土壤过氧化氢酶活性均显著高于常规耕作。

2.3 不同处理土壤温室气体排放通量的变化

2.3.1 N₂O排放通量 由图4可看出,粉垄耕作的土壤N₂O排放通量呈现出“慢—快—慢”的变化趋势(图4-A);而常规耕作的N₂O排放通量波动较大(图4-B)。2种耕作方式的N₂O排放在第1次追肥次日表现为吸收通量,在施肥一周后大幅度增加,直至7月22日达最高峰值,且常规耕作100%N处理下的N₂O排放通量在整个生育期也是最高的。第2次追肥后的N₂O排放通量有小幅增加,常规耕作各施氮处理出现小峰值(图4-B),而粉垄耕作各施氮处理均未出现明显变化(图4-A)。成对t检验结果也表明,常

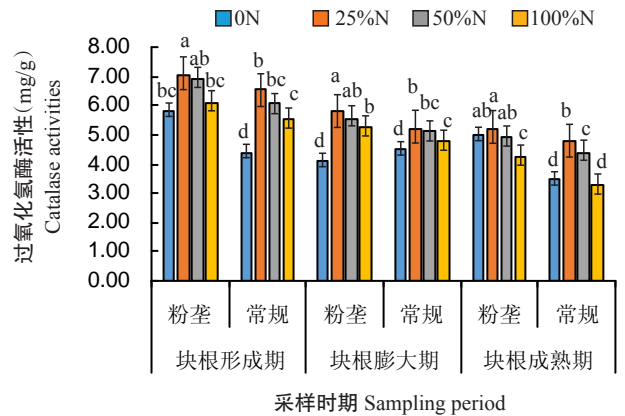


图 3 不同处理的土壤过氧化氢酶活性

Fig.3 Soil catalase activities in all treatments

规耕作100%N处理的N₂O排放通量显著高于粉垄耕作($t=-2.621, P=0.022$)。

2.3.2 CH₄排放通量 由图5可看出,土壤CH₄排放通量总体上表现为吸收通量。2种耕作方式的CH₄排放通量均呈现不规律变化,但常规耕作下的变化幅度较大。不同耕作方式相同施氮量处理比较,常规耕作各处理的CH₄排放通量均高于粉垄耕作,其中常规耕作25%N处理的CH₄排放通量显著高于粉垄耕作($t=-3.378, P=0.005$),表明粉垄耕作对降低田间CH₄排放量有一定效果。

2.3.3 CO₂排放通量 由图6可看出,2种耕作方式不同施氮量处理的CO₂排放通量随着季节改变而呈现相似的变化规律,变化范围3.43~311.06 mg/(m²·h)。在第1次追肥的一周内,CO₂排放通量均低于50.00 mg/(m²·h),随后逐渐增加,直至7月22日达峰值(常规耕作25%N处理除外),其中,常规耕作100%N水平的CO₂排放通量峰值311.06 mg/(m²·h)最高,是粉垄100%N处理CO₂排放通量峰值的1.73倍。常规耕作在8月下旬至9月底出现较为明显的二次峰值,而粉垄耕作无明显变化。从8月20日开始,粉垄耕作50%N和100%N处理下土壤的CO₂排放通量明显低于常规耕作,以粉垄耕作50%N处理效果最佳。

2.4 土壤温室气体累积排放量

由表2可知,土壤N₂O累积排放量受耕作方式、

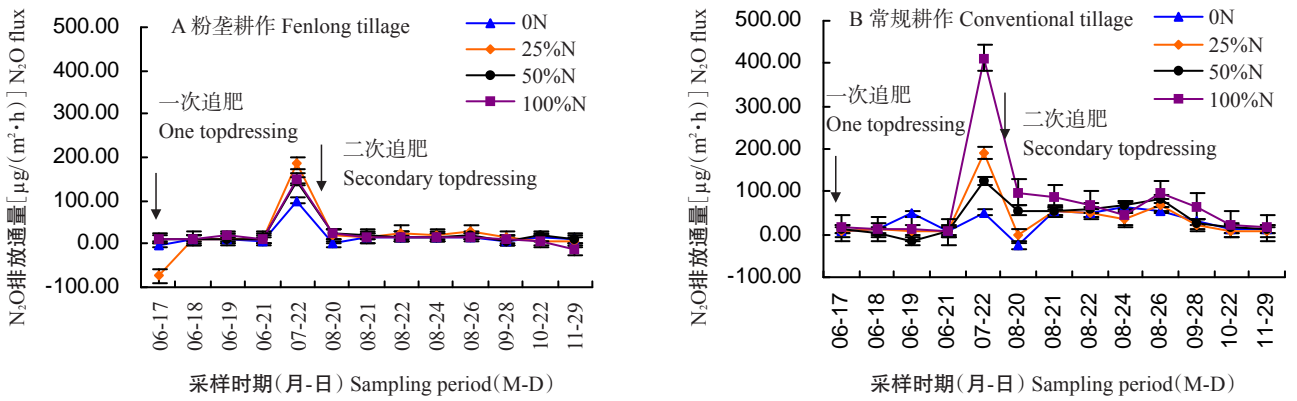
图4 不同耕作方式下木薯生长期N₂O排放通量变化

Fig.4 Dynamic change of the N₂O flux during cassava growing season for different tillage patterns

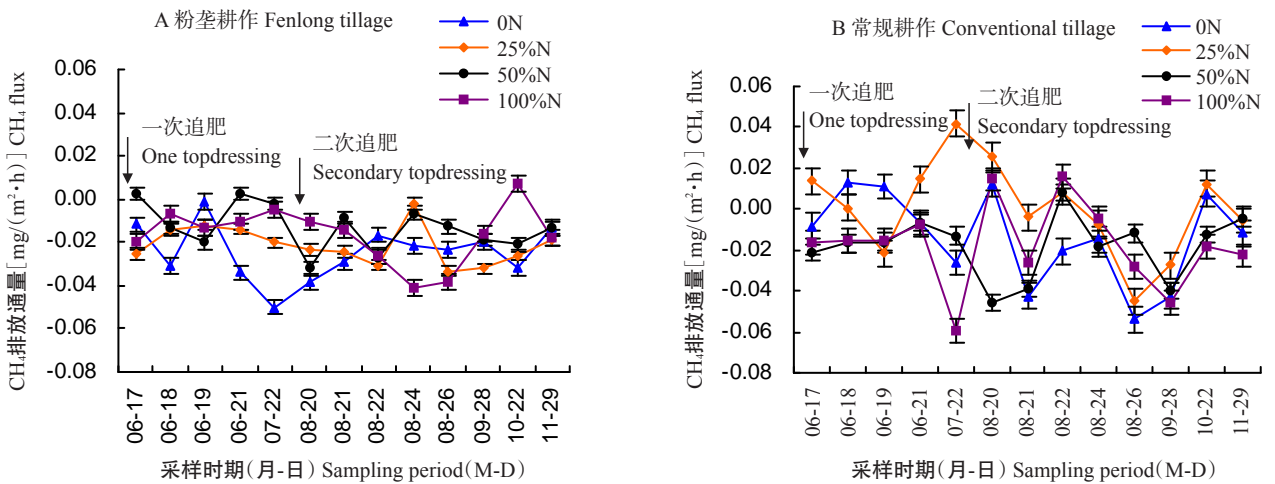
图5 不同耕作方式下木薯生长期CH₄排放通量变化

Fig.5 Dynamic change of the CH₄ flux during cassava growing season for different tillage patterns

施氮量及其交互作用的影响,其中施氮量对其影响较大。由图7-A可看出,常规耕作100%N处理下土壤的N₂O累积排放量最高(4.53 kg/ha),显著高于常规耕作其他施氮量处理及粉垄耕作各处理,其中是粉垄耕作100%N处理的3.3倍(图7-A)。2种耕作方式下0N、25%N和50%N处理间的N₂O累积排放量差异均不显著($P>0.05$,下同)。

土壤CH₄累积排放量受耕作方式与施氮量及施氮量与耕作方式交互作用的影响(表2)。由图7-B可看出,除常规耕作25%N处理外,其余7个处理的CH₄累积排放量均为负值,即为吸收状态。常规耕作在25%N处理下土壤CH₄累积排放量显著高于粉垄耕作;而在100%N处理下,粉垄耕作显著高于常规。粉垄耕作中,CH₄累积排放量随着施氮量的增加而递增,常规耕作则呈现不规律变化。

各处理CO₂累积排放量主要受施氮量和耕作方式的影响(表2)。多重比较表明,常规耕作100%N处理下土壤的CO₂累积排放量(5286.70 kg/ha)显著高于粉垄耕作(3583.30 kg/ha)($t=1.479, P=0.045$)。2种

耕作方式下,均为50%N处理的CO₂累积排放量均最低,显著低于100%N处理(图7-C)。

2.5 土壤GWP、GHGI和固碳量

由表3可知,土壤GWP和GHGI均受耕作方式、施氮处理及其交互作用的影响,其中耕作方式是主要影响因素。常规耕作条件下,100%N处理的土壤GWP和GHGI均显著高于各减氮处理,分别是0N、25%N和50%N处理的4.89、2.22、2.40倍和4.6、2.46、2.46倍。说明常规耕作条件下,减施氮肥可显著降低土壤GWP和GHGI。在粉垄条件下,100%N处理的GWP和GHGI均与各减氮处理差异不显著。

此外,土壤固碳量也受耕作方式、施氮处理及其交互作用的影响,耕作方式是主要因素(表3)。各处理土壤固碳量最高的是粉垄耕作100%N处理,固碳量高达1.95 kg/(ha·a);相同施肥水平下,粉垄耕作处理的土壤固碳量均高于常规耕作。

2.6 土壤酶活性与温室气体的相关分析

由表4可知,土壤脲酶活性与木薯块根形成期的土壤N₂O和CO₂排放通量存在显著正相关,相关系

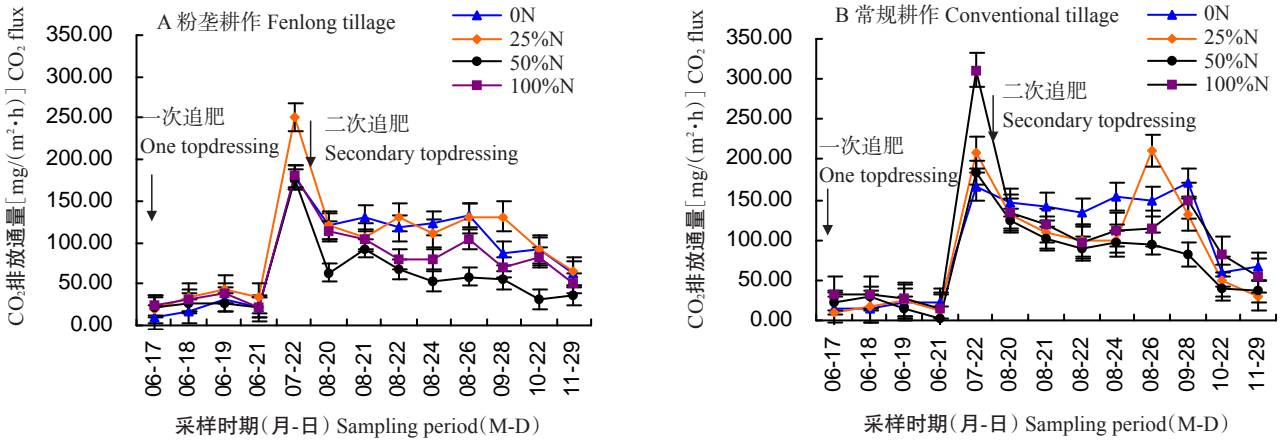


图 6 不同耕作方式下木薯生长季CO₂排放通量变化
Fig.6 Dynamic change of the CO₂ flux during cassava growing season for different tillage patterns

数分别为0.46和0.47;土壤过氧化氢酶活性与木薯膨大期和成熟期的土壤CH₄排放通量存在显著负相关,相关系数分别为-0.48和-0.42;其他时期的土壤酶活性与温室气体排放通量无显著相关性。

3 讨论

3.1 耕作方式与施氮量对土壤脲酶和过氧化氢酶活性的影响

土壤酶活性是土壤微生物分布的重要体现,而土壤微生物则影响作物对土壤养分的吸收利用。黎佐生等(2020)研究表明,与常规耕作相比,粉垄耕作可有效提高土壤微生物数量和土壤酶活性,进而改善土壤质地。本研究中,在木薯的块根膨大期和块根成熟期,粉垄耕作也较常规耕作有效提高了土壤酶活性,与黎佐生等(2020)的研究结果相似,其原因可能与粉垄耕作下土壤透性良好、土壤含氧量提高有关。

本研究发现,除耕作方式影响土壤酶活性外,氮肥施用量也会对土壤酶活性产生影响。随着施氮量增加,2种耕作方式下的土壤脲酶活性整体有提高趋势,其中粉垄耕作100%N处理下的土壤脲酶活性最高;而土壤过氧化氢酶活性则与施氮量相反,且粉垄耕作25%N处理下的土壤过氧化氢酶活性最高。土壤过氧化氢酶活性随着施氮量的增加呈下降趋势

的结果已在吕艳杰等(2016)研究中得到验证。而粉垄耕作土壤脲酶活性整体高于常规耕作,可能与粉垄耕作提高土壤团聚体稳定性、营造良好土壤生态环境有关系(王斌等,2020)。

3.2 耕作方式与施氮量对土壤温室气体排放的影响

土壤反硝化作用是N₂O生成的主要过程(张亚捷和牛海山,2019)。本研究发现,粉垄耕作各处理的N₂O累积排放量均明显低于常规耕作,且施氮量是导致土壤N₂O累积排放量产生差异的主要因素。尤其在100%N处理下,常规耕作的土壤N₂O累积排放量与粉垄耕作差异最大,说明在氮肥较高情况下,粉垄耕作排放N₂O量比常规耕作要少得多,可能是粉垄耕作能改善土壤理化性状(杨博等,2020),增大土壤孔隙度,降低土壤温度并增加土壤湿度、水稳性团聚体,使得参与硝化作用的微生物数量增加(刘江汉和何文寿,2020),进而增强土壤的固氮能力。本研究中,2种耕作方式不施氮肥的N₂O累积排放量均低于其他施肥处理,也印证了施用氮肥会增加N₂O的排放通量的观点(易琼等,2016)。但本研究中出现施氮量较少处理的N₂O排放通量峰值反而高于施氮量较多处理的情况,可能与该小区采气时的土壤田间持水量过高、通气性差有关。此时的微生物活动主要以反硝化作用为主,从而增加了N₂O的排放

表 2 土壤温室气体累积排放量的方差分析结果

Table 2 Variance analysis results of soil greenhouse gas cumulative emissions

因素 Factor	df	累积排放量 Cumulative emission					
		N ₂ O		CH ₄		CO ₂	
		均方 MS	P	均方 MS	P	均方 MS	P
耕作方式 Tillage method	1	5.16	0.045*	0.215	0.047*	5429765	0.034*
施氮量 Nitrogen treatment	3	3.85	0.008**	0.312	0.035*	5872959	0.047*
耕作方式×施氮量 Tillage method×nitrogen treatment	3	3.38	0.040*	0.867	0.006**	2368759	0.078

*表示影响显著(P<0.05)。表3同

* represented significantly influence(P<0.05). The same was applied in Table 3

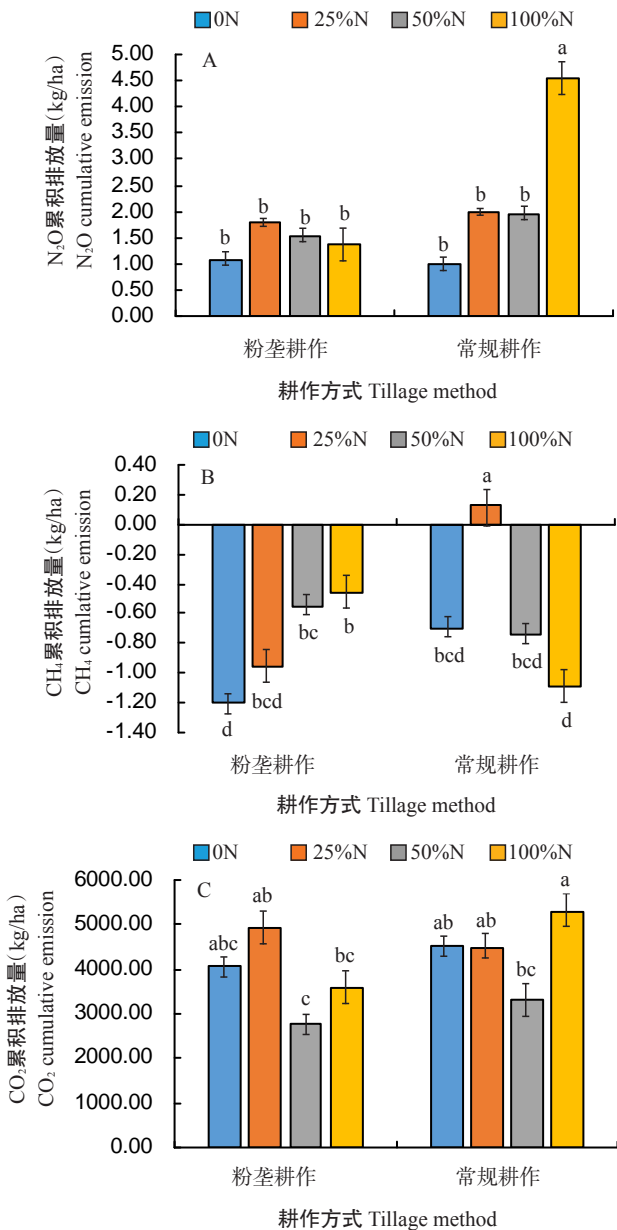


图 7 各处理土壤温室气体的累积排放量

Fig.7 The cumulative greenhouse gas emissions of all treatments

图柱上不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters on the bar represented significant difference ($P < 0.05$)

(Abubaker et al., 2015)。

耕作方式决定了土壤水分、热量和气体的交换情况(秦晓波等, 2014), 不同耕作措施下土壤中甲烷氧化菌的活力不同, 而甲烷氧化菌广泛分布于好氧土壤中(郑聚锋等, 2008), 当温湿度环境适宜时, 甲烷氧化菌活动能力增强, 对大气中 CH_4 (吸收)氧化能力也会增强(王旭燕等, 2015)。本研究中, 各处理的 CH_4 气体绝大多数表现为吸收状态, 而在25%N处理常规耕作下的土壤 CH_4 累积排放量显著高于粉垄耕作, 表现为土壤 CH_4 排放源。常规耕作的 CH_4 出现

较多源的现象, 可能与其耕作层土壤板结相关, 如土壤孔隙度减少会引起厌氧的发生, 导致土壤还原电位和溶解氧的下降(Yang et al., 2019), 从而降低土壤对 CH_4 的吸收能力。而粉垄耕作通过深耕深松土壤, 可有效改善土壤板结情况(韦本辉等, 2012b), 增加土壤孔隙度, 可有效降低土温, 整个观测期内保持较高较平稳的土壤湿度, 可能是其 CH_4 气体汇大于常规耕作的原因之一。此外, 前人研究发现施肥可增加 CH_4 排放量(李成芳等, 2009), 与本研究中的粉垄耕作结果一致, 但与常规耕作的结果有区别, 可能与常规耕作下的土壤有机质含量较低有关系(Humphreys et al., 2019)。

本研究发现, 土壤 CO_2 排放通量受耕作方式影响, 粉垄耕作的土壤 CO_2 排放通量显著低于常规耕作。李成芳等(2010)研究不同耕作方式对稻田土壤 CO_2 排放的影响时也发现, 耕作方式才是影响土壤 CO_2 排放的主要原因, 施氮处理影响较小。而施用氮肥可通过改变土壤pH影响微生物的活性和土壤有机质的分解速率, 进而影响土壤 CO_2 排放量的变化(Snyder et al., 2009)。与常规耕作相比, 粉垄耕作50%N和100%N处理下的土壤 CO_2 排放量明显更少, 而粉垄耕作50%N处理效果最佳。周君玺等(2019)也认为, 控释氮肥配施有利于减少旱作春玉米农田 CO_2 排放。本研究中各处理的土壤 CO_2 累积排放量除受耕作影响外还受施氮量的影响, 常规耕作条件下100%N处理的土壤 CO_2 累积排放量明显高于其他处理。然而, 粉垄耕作中100%N处理的土壤 CO_2 排放量却相对较低, 可能与粉垄耕作改善土壤物理结构、增加微生物数量的同时, 能提高土壤湿度、降低土壤温度及呼吸速率有关(戴衍晨等, 2016; 刘江汉和何文寿, 2020)。

3.3 耕作方式与施氮量对GWP、GHGI及土壤固碳量的影响

田间温室气体净增温潜势可作为评估温室气体排放对全球气候变化的影响(Guardia et al., 2019)。农田生态系统以利用光合作用固碳生产农产品为主要目的, 其净碳交换可近似为零, 故将 CH_4 和 N_2O 的排放来表征农田生态系统的综合温室效应(Zhang et al., 2020)。由于各处理的 CH_4 气体绝大多数表现为吸收状态, 因此, 土壤GWP和GHGI在各处理的变化趋势与 N_2O 的变化近似, 均受耕作方式与施氮处理及其交互作用的影响, 其中以耕作方式影响较大。常规耕作100%N处理的 N_2O 累积排放量、 CO_2 累积排放量、GWP和GHGI均高于各减氮处理; 而粉垄耕作100%N处理的GWP和GHGI均与各减氮处理差异不

表 3 各处理的GWP、GHGI和土壤固碳量

Table 3 Soil global warming potential(GWP), greenhouse gas intensity(GHGI) and soil carbon sequestration of different treatments

因素 Factor	处理 Treatment	土壤固碳量[$\text{kg}/(\text{ha}\cdot\text{a})$] Soil carbon sequestration	GWP (kg/ha)	GHGI (kg/kg)
粉垄耕作 Fenlong tillage	0N	1.32±0.01d	243.6±180.4b	0.011±0.007b
	25%N	1.77±0.02b	439.6±222.1b	0.019±0.009b
	50%N	1.43±0.05c	383.9±192.3b	0.017±0.008b
	100%N	1.95±0.08a	367.6±201.2b	0.014±0.008b
常规耕作 Conventional tillage	0N	1.05±0.04e	239.4±3.3b	0.015±0.003b
	25%N	1.19±0.08d	526.8±191.3b	0.028±0.019b
	50%N	1.40±0.06cd	487.0±73.6b	0.028±0.008b
	100%N	1.09±0.06e	1170.4±231.3a	0.069±0.022a
耕作方式 Tillage method		0.001**	0.004**	0.001**
施氮量 Nitrogen treatment		0.006**	0.005**	0.004**
耕作方式×施氮量 Tillage method×nitrogen treatment		0.009**	0.046*	0.007**

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters in the same column indicated significant difference ($P<0.05$)

表 4 木薯块根各生育期土壤酶活性与温室气体排放通量的相关分析

Table 4 Correlation analysis of soil enzyme activities and greenhouse gases emission flux in cassava tuber at different growth stages

指标 Index	N ₂ O排放通量 N ₂ O emission flux			CH ₄ 排放通量 CH ₄ emission flux			CO ₂ 排放通量 CO ₂ emission flux		
	形成期	膨大期	成熟期	形成期	膨大期	成熟期	形成期	膨大期	成熟期
	Formation stage	Enlargement stage	Maturity stage	Formation stage	Enlargement stage	Maturity stage	Formation stage	Enlargement stage	Maturity stage
脲酶活性 Urease activity	0.46*	0.35	0.40	-0.04	-0.09	-0.04	0.47*	0.39	0.06
过氧化氢酶活性 Catalase activity	-0.08	0.02	-0.30	0.07	-0.48*	-0.42*	-0.11	-0.01	0.13

*表示显著相关($P<0.05$)

* represented significant correlation($P<0.05$)

显著。说明粉垄耕作的土壤理化性状优势明显,有利于减少CO₂、N₂O和CH₄的排放,粉垄耕作栽培木薯时即使按常规施肥方法施用氮肥,也不会造成土壤GWP和GHGI的上升,碳减排效果显著。

3.4 土壤酶活性对土壤温室气体的影响

土壤脲酶可催化尿素水解生成氨和CO₂,氨在亚硝化细菌的作用下生成亚硝酸,通过硝化细菌的硝化作用生成硝酸盐,供作物吸收利用,而在反硝化细菌的反硝化作用下产生N₂O(张志勇等,2020)。土壤脲酶活性与土壤N₂O和CO₂排放通量在木薯块根形成期存在显著相关,而土壤过氧化氢酶与CH₄排放通量在木薯块根膨大期和块根成熟期存在显著相关性,可能与木薯生长发育的关键时期有关联,木薯生长发育加快了根系对土壤养分的吸收利用,促进根系分泌物增加(Girkin et al.,2018),提高了根系微生物的数量,进而影响到土壤酶活性,最终在土壤N₂O、CH₄和CO₂排放通量中得以表现。

4 结论

与常规耕作相比,粉垄耕作可通过优化土壤理化性质,提高土壤固氮效率,改善土壤固碳能力。在相同的试验条件下,粉垄耕作50%N和100%N处理均不会造成土壤GWP和GHGI上升,且粉垄耕作100%N处理的碳减排效果最明显。

参考文献:

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社. [Bao S D. 2000. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing:China Agriculture Press.]

成臣,曾勇军,杨秀霞,黄山,罗亢,石庆华,潘晓华,商庆银. 2015. 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,35(6):1887-1895. [Cheng C, Zeng Y J, Yang X X, Huang S, Luo K, Shi Q H, Pan X H, Shang Q Y. 2015. Effect of different tillage methods on net global warming potential and greenhouse gas intensity in double rice-cropping systems[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,35(6):1887-1895.] doi:10.13671/j.hjkxxb.2014.0873.

戴衍晨,王瑞,申国明,高林,张继旭,李志刚,张继光. 2016. 不同施肥条件下烤烟生育期土壤呼吸变化及其影响因素[J]. 烟草科技,49(1):8-13. [Dai Y C, Wang R, Shen G M, Gao L, Zhang J X, Li Z G, Zhang J G. 2016. Variations and factors influencing soil respiration in flue-cured tobacco fields under different fertilization treatments[J]. Tobacco Science & Technology, 49(1): 8-13.] doi: 10.16135/j.issn1002-0861.20160102.

关松荫. 1989. 土壤酶活性影响因子的研究: I. 有机肥料对土壤中酶活性及氮磷转化的影响[J]. 土壤学报,26(1):72-78. [Guan S Y. 1989. Studies on the factors influencing soil enzyme activities; I. Effects of organic manures on soil enzyme activities and N,P transformations[J]. Acta Pedologica Sinica,26(1):72-78.]

何悦,漆雁斌. 2020. 农户过量施肥风险认知及环境友好型技

- 术采纳行为的影响因素分析——基于四川省380个柑橘种植户的调查[J]. 中国农业资源与区划, 41(5): 8-15. [He Y, Qi Y B. 2020. Analysis on the risk cognition of excess fertilizer application and the adoption behavior of environment-friendly technology and its reason—Base on the survey of 380 citrus grower in Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 41(5): 8-15.] doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20200502.
- 黄太庆, 马煜春, 熊正琴, 孔宪旺, 余丰毅. 2010. 不同种植制度对稻田旱作季节 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态与农村环境学报, 26(6): 519-523. [Huang T Q, Ma Y C, Xiong Z Q, Kong X W, Yu F Y. 2010. CH_4 and N_2O emissions from paddy field during the upland crop growing season in relation to cropping pattern[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 26(6): 519-523.] doi: 10.3969/j.issn.1673-4831.2010.06.002.
- 黎佐生, 蒋代华, 韦本辉. 2020. 粉垄耕作对宿根蔗地根际微生物及酶活性的影响[J]. 新农业, (7): 45-47. [Li Z S, Jiang D H, Wei B H. 2020. Effects of Fenlong cultivation on rhizosphere microorganisms and enzyme activities of sugarcane cultivars[J]. Modern Agriculture, (7): 45-47.]
- 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 翟中兵, 梅少华. 2009. 不同耕作方式下稻田土壤 CH_4 和 CO_2 的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 28(12): 2482-2488. [Li C F, Cao C G, Wang J P, Zhai Z B, Mei S H. 2009. CH_4 and CO_2 emissions from paddy soils and assessment of carbon budget in different tillage systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 28(12): 2482-2488.] doi: 10.3321/j.issn: 1672-2043.2009.12.007.
- 李成芳, 曹凑贵, 汪金平. 2010. 不同耕作方式下稻田土壤 CO_2 排放的研究[C]//中国农学会. 发展低碳农业 应对气候变化——低碳农业研讨会论文集. 北京: 中国农业出版社. [Li C F, Cao C G, Wang J P. 2010. Research on CO_2 emission from paddy soil under different tillage methods [C]//China Association of Agricultural Science Societies. Developing low-carbon agriculture to cope with climate change—Proceedings of seminar on low-carbon agriculture. Beijing: China Agriculture Press.]
- 廖萍, 睦锋, 汤军, 曾勇军, 吴自明, 石庆华, 黄山. 2018. 施用生物炭对双季稻田综合温室效应和温室气体排放强度的影响[J]. 核农学报, 32(9): 1821-1830. [Liao P, Sui F, Tang J, Zeng Y J, Wu Z M, Shi Q H, Huang S. 2018. Effects of biochar amendment on the global warming potential and greenhouse gas intensity in a double rice-cropping system[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 32(9): 1821-1830.] doi: 10.11869/j.issn.100-8551.2018.09.1821.
- 刘江汉, 何文寿. 2020. 粉垄耕作对土壤性质及马铃薯产量的影响[J]. 东北农业科学, 45(2): 20-25. [Liu J H, He W S. 2020. Effects of smash-ridging technology on soil properties and potato yield[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 45(2): 20-25.] doi: 10.16423/j.cnki.1003-8701.2020.02.006.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社. [Lu R K. 2000. Methods of soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press.]
- 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 曹玉军, 魏雯雯, 王立春, 王永军. 2016. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 24(11): 1456-1463. [Lü Y J, Yu H Y, Yao F Y, Cao Y J, Wei W W, Wang L C, Wang Y J. 2016. Effects of straw returning and nitrogen application on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soil region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 24(11): 1456-1463.] doi: 10.13930/j.cnki.cjea.160405.
- 孟梦, 吕成文, 李玉娥, 秦晓波, 万运帆, 高清竹. 2013. 添加生物炭对华南早稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业气象, 34(4): 396-402. [Meng M, Lü C W, Li Y E, Qin X B, Wan Y F, Gao Q Z. 2013. Effect of biochar on CH_4 and N_2O emissions from early rice field in south China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 34(4): 396-402.] doi: 10.3969/j.issn.1000-6362.2013.04.004.
- 缪平贵, 于显枫, 张绪成, 方彦杰, 侯慧芝, 王红丽, 马一凡, 窦学诚. 2020. 立式深旋耕作对马铃薯农田土壤温室气体排放的影响[J]. 作物杂志, (3): 109-116. [Miao P G, Yu X F, Zhang X C, Fang Y J, Hou H Z, Wang H L, Ma Y F, Dou X C. 2020. Effects of vertical deep rotary tillage on soil greenhouse gas emissions from potato farmland [J]. Crops, (3): 109-116.] doi: 10.16035/j.issn.1001-7283.2020.03.017.
- 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 廖育林, 范美蓉, 高清竹, 刘硕, 马欣. 2014. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 30(11): 216-224. [Qin X B, Li Y E, Wan Y F, Liao Y L, Fan M R, Gao Q Z, Liu S, Ma X. 2014. Effect of tillage and rice residue return on CH_4 and N_2O emission from double rice field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 30(11): 216-224.]
- 王斌, 何文寿, 耿世杰. 2020. 粉垄耕作对土壤水分利用效率和马铃薯产量的影响[J]. 江苏农业科学, 48(21): 93-96. [Wang B, He W S, Geng S J. 2020. Effects of deep vertically rotary tillage on soil water use efficiency and potato yield [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 48(21): 93-96.] doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2020.21.015.
- 王新刚, 司伟, 赵启然. 2020. 土地经营权稳定性对农户过量施肥的影响研究——基于黑龙江省地块层面数据的实证分析[J]. 中国农业资源与区划, 41(8): 162-168. [Wang X G, Si W, Zhao Q R. 2020. Research on the effect of stability of farmland property right on farmers' excessive fertilization—An empirical analysis based on data of plot level in Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 41(8): 162-168.] doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20200818.

- 王旭燕,张仁陟,蔡立群,Stephen Yeboah,罗珠珠,李玲玲,谢军红. 2015. 不同施氮处理下旱作农田土壤 CH_4 、 N_2O 气体排放特征研究[J]. 环境科学学报, 35(11):3655-3661. [Wang X Y, Zhang R Z, Cai L Q, Stephen Y, Luo Z Z, Li L L, Xie J H. 2015. Emission characteristics of CH_4 and N_2O fluxes from dryland field under different nitrogen treatments[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(11): 3655-3661.] doi:10.13671/j.hjkxxb.2015.0070.
- 韦本辉,甘秀芹,刘斌,申章佑,陈烈臣,白德朗. 2012a. 推广作物粉垄栽培,保障国家粮食安全[J]. 作物研究, 26(5):447-451. [Wei B H, Gan X Q, Liu B, Shen Z Y, Chen L C, Bai D L. 2012a. Popularizing Fenlong plowing technology cultivation of crops to ensure national food security[J]. Crop Research, 26(5):447-451.] doi:10.3969/j.issn.1001-5280.2012.05.09.
- 韦本辉,申章佑,甘秀芹,刘斌,陆柳英,胡泊,李艳英,吴延勇. 2012b. 粉垄栽培对旱地作物产量品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 14(4):101-105. [Wei B H, Shen Z Y, Gan X Q, Liu B, Lu L Y, Hu P, Li Y Y, Wu Y Y. 2012b. Effects of Fenlong cultivation on yield and quality of dryland crops[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 14(4):101-105.] doi:10.3969/j.issn.1008-0864.2012.04.15.
- 熊正琴,张晓旭. 2017. 氮肥高效施用在低碳农业中的关键作用[J]. 植物营养与肥料学报, 23(6):1433-1440. [Xiong Z Q, Zhang X X. 2017. Key role of efficient nitrogen application in low carbon agriculture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 23(6):1433-1440.] doi:10.11674/zwyf.17282.
- 杨博,屈忠义,孙慧慧,杨威,王丽萍,刘霞,张如鑫,王麒麟. 2020. 粉垄耕作对河套灌区盐碱地土壤性质的影响[J]. 灌溉排水学报, 39(8):52-59. [Yang B, Qu Z Y, Sun H H, Yang W, Wang L P, Liu X, Zhang R X, Wang Q Y. 2020. The effect of smash-ridging cultivation on properties of saline-alkali soil in Hetao Irrigation district[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 39(8):52-59.] doi:10.13522/j.cnki.ggps.2020003.
- 杨兰芳,曾巧,李海波,闫静静. 2011. 紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性[J]. 土壤通报, 42(1):207-210. [Yang L F, Zeng Q, Li H B, Yan J J. 2011. Measurement of catalase activity in soil by ultraviolet spectrophotometry[J]. Chinese Journal of Soil Science, 42(1):207-210.] doi:10.19336/j.cnki.trtb.2011.01.043.
- 易琼,黄旭,张木,黄巧义,逢玉万,唐拴虎. 2016. 氮肥施用水平及种类对生菜产量及菜地 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 35(10):2019-2025. [Yi Q, Huang X, Zhang M, Huang Q Y, Pang Y W, Tang S H. 2016. Effects of nitrogen application rate and sources on yield of lettuce and nitrous oxide emission in vegetable soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 35(10):2019-2025.] doi:10.11654/jaes.2016-0471.
- 张俊丽,张锦丽,赵晓进,廖允成,景小丽,薛菁. 2018. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤 CO_2 排放量及其与土壤水热的关系[J]. 干旱地区农业研究, 36(4):88-93. [Zhang J L, Zhang J L, Zhao X J, Liao Y C, Jing X L, Xue J. 2018. Effects of different tillages on soil CO_2 flux, and its relation to soil moisture and soil temperature in dry-land maize field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 36(4):88-93.] doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2018.04.13.
- 张亚捷,牛海山. 2019. 农田土壤氧化亚氮产生机制和相关模型研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 35(5):554-562. [Zhang Y J, Niu H S. 2019. Research development on generation mechanism and related models of N_2O emissions from agricultural soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 35(5):554-562.] doi:10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0051.
- 张志勇,于旭昊,熊淑萍,马新明,王小纯,刘洋,闫广轩,李永革. 2020. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 39(2):418-428. [Zhang Z Y, Yu X H, Xiong S P, Ma X M, Wang X C, Liu Y, Yan G X, Li Y G. 2020. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 39(2):418-428.] doi:10.11654/jaes.2019-0586.
- 赵力莹,董文旭,胡春胜,李佳珍,陈拓. 2018. 耕作方式转变对冬小麦季农田温室气体排放和产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 26(11):1613-1623. [Zhao L Y, Dong W X, Hu C S, Li J Z, Chen T. 2018. Effect of tillage method change on soil greenhouse gas emission and yield during winter-wheat growing season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 26(11):1613-1623.] doi:10.13930/j.cnki.cjea.180219.
- 郑佳舜,胡钧铭,韦翔华,黄大庆,李婷婷,黄嘉琪. 2019. 绿肥压青粉垄保护性耕作对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农业气象, 40(1):15-24. [Zheng J S, Hu J M, Wei X H, Huang T Q, Li T T, Huang J Q. 2019. Effect of conservation tillage with smash ridging under green manure condition on the emission of greenhouse gas in the rice field soil[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 40(1):15-24.] doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2019.01.002.
- 郑聚锋,张平究,潘根兴,李恋卿,张旭辉. 2008. 长期不同施肥下水稻土甲烷氧化能力及甲烷氧化菌多样性的变化[J]. 生态学报, 28(10):4864-4872. [Zheng J F, Zhang P J, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. 2008. Effect of long-term different fertilization on methane oxidation potential and diversity of methanotrophs of paddy soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(10):4864-4872.] doi:10.3321/j.issn:1000-0933.2008.10.030.
- 周君玺,翟晓芳,孙浩然,唐靓,沈玉芳. 2019. 控释氮肥配施对不同覆盖旱作农田 CO_2 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 38(10):2429-2438. [Zhou J X, Zhai X F, Sun H R, Tang L, Sheng Y F. 2019. Effects of controlled-release urea on CO_2 emission from dry farmland under different mulching patterns[J]. Journal of Agro-Environment Science, 38(10):2429-2438.] doi:10.11654/jaes.2019-0340.

- Abubaker J, Risberg K, Jönsson E, S Dahlin A, Cederlund H, Pell M. 2015. Short-term effects of biogas digestates and pig slurry application on soil microbial activity[J]. *Applied and Environmental Soil Science*, 2015: 658542. doi: 10.1155/2015/658542.
- Bista P, Norton U, Ghimire R, Norton J B. 2017. Effects of tillage system on greenhouse gas fluxes and soil mineral nitrogen in wheat (*Triticum aestivum* L.) - fallow during drought[J]. *Journal of Arid Environments*, 147: 103-113. doi: 10.1016/j.jaridenv.2017.09.002.
- Girkin N T, Turner B L, Ostle N, Sjögersten S. 2018. Composition and concentration of root exudate analogues regulate greenhouse gas fluxes from tropical peat[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 127: 280-285. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.09.033.
- Guardia G, Aguilera E, Vallejo A, Sanz-Cobena A, Alonso-Ayuso M, Quemada M. 2019. Effective climate change mitigation through cover cropping and integrated fertilization: A global warming potential assessment from a 10-year field experiment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 241: 0959-6526. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118307.
- Humphreys J, Brye K R, Rector C, Gbur E E. 2019. Methane emissions from rice across a soil organic matter gradient in Alfisols of Arkansas, USA [J]. *Geoderma Regional*, 16: e00200. doi: 10.1016/j.geodrs.2018.e00200.
- Lognoul M, Theodorakopoulos N, Hiel M, Regaert D, Broux F, Heinesch B, Bodson B, Vandenbol M, Aubinet M. 2017. Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N₂O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements[J]. *Soil & Tillage Research*, 167: 80-89. doi: 10.1016/j.still.2016.11.008.
- Lü T X, Wu Y Z, Shen J L, Chen D, Jiang W Q, Wang J, Li Y, Wu J S. 2019. N₂O Emissions from a tea field with deep application of nitrogen fertilizer and intercropping with white clover[J]. *Huanjing kexue*, 40(9): 4221-4229. doi: 10.13227/j.hjxk.201901254.
- Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, Fixen P E. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 133 (3-4): 247-266. doi: 10.1016/j.agee.2009.04.021.
- Yang Y D, Xu H S, Li D Y, Liu J N, Nie J W, Zeng Z H. 2019. Methane emissions responding to *Azolla* inoculation combined with midseason aeration and N fertilization in a double-rice cropping system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (20): 20352-20363. doi: 10.1007/s11356-019-05342-4.
- Zhang G B, Yang Y T, Huang Q, Ma J, Yu H Y, Song K F, Dong Y J, Lv S H, Xu H. 2020. Reducing yield-scaled global warming potential and water use by rice plastic film mulching in a winter flooded paddy field[J]. *European Journal of Agronomy*, 114: 126007. doi: 10.1016/j.eja.2020.126007.
- Zhang J, Hang X N, Lamine S M, Jiang Y, Afreh D, Qian H Y, Feng X M, Zheng C Y, Deng A X, Song Z W, Zhang W J. 2017. Interactive effects of straw incorporation and tillage on crop yield and greenhouse gas emissions in double rice cropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 250: 37-43. doi: 10.1016/j.agee.2017.07.034.
- Zhang X, Gao Y, Qi Y, Fu S. 2014. Implications of the findings from the working group I contribution to the IPCC fifth assessment report on the UNFCCC Process[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, (1): 14-19. doi: 10.1057/9781137032720_11.

(责任编辑 王 晖)