

杨滨娟,邓丽萍,袁嘉欣,等. 稻田复种轮作下周年温室气体排放及综合效益评价[J]. 江苏农业科学,2022,50(2):225-231.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.02.037

# 稻田复种轮作下周年温室气体排放及综合效益评价

杨滨娟, 邓丽萍, 袁嘉欣, 胡启良, 黄国勤

(江西农业大学农学院/江西农业大学生态科学研究中心,江西南昌 330045)

**摘要:**为减缓温室气体排放和削弱长期连作障碍,在长期定位试验的基础上,通过设置不同复种方式,综合分析稻田复种轮作系统下周年温室气体排放规律和综合效益评价。结果表明,稻田  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  不同季节排放量趋势一致,均是晚稻>早稻>冬作物,而  $\text{N}_2\text{O}$  排放与之相反。从温室气体的排放总量来看, $\text{CO}_2$  排放总量明显高于  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放总量。处理 A(紫云英—早稻—晚稻) $\text{CO}_2$  排放总量最高,但  $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放总量均最低, $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  排放总量最高的是处理 C(油菜—早稻—晚稻)。无论是冬季作物生长季、水稻生长季还是全年,3 种温室气体的综合 GWP 均是以处理 A 最低,处理 C 最高,双季稻田冬种油菜对全球增温贡献较大,对环境来说是不利的,从这一点考虑,冬种紫云英相对来说是对环境更有利的。“混播绿肥—早稻—玉米 || 大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”综合效益较好,最具可持续发展优势,有利于农业的绿色高效可持续发展。因此,“紫云英—早稻—晚稻”和“混播绿肥—早稻—玉米 || 大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”这 2 种模式是适合我国南方稻区大面积推广应用的稻田冬季农业开发与复种轮作模式。

**关键词:**复种轮作;温室气体排放;综合效益;稻田

**中图分类号:**S344.1;S344.3;S181

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2022)02-0225-07

我国的耕地面积只占全世界的 7%,其中“光热水土”等农业自然资源匹配的只占国土面积的 9%,

收稿日期:2021-05-19

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:杨滨娟(1985—),女,山东淄博人,博士,助理研究员,主要从事耕作制度与农业生态研究。E-mail: yangbinjuan@jxau.edu.cn。

通信作者:黄国勤,博士,教授,主要从事作物学、生态学、农业发展与区域农业、资源环境与可持续发展等研究。E-mail: hgqjx@sina.com。

因此,如何改善土壤生态环境,保持土壤肥力,提高农田复种指数,提高粮食作物产量是重中之重。冬种作物主要是紫云英、油菜、肥田萝卜、黑麦草等绿肥作物,同时还有常见的小白菜、大蒜、菠菜等蔬菜,这种稻田周年复种轮作模式在作物持续增产、维持地力和土壤改良等方面发挥着重要作用,具有广阔的发展和研究前景<sup>[1-5]</sup>。但复种轮作体系中不同的施肥方式、水分管理措施以及作物种类都会影响农田生态系统的温室气体排放<sup>[6]</sup>。如何在保障粮食安全生产的前提下减缓稻田温室效应也是当

[21]王永会. 保定市山区耕地土壤养分空间变异及其影响因素研究[D]. 保定:河北农业大学,2015:1-46.

[22]郭永龙,刘友兆,毕如田,等. 基于 GWR 模型的耕地表层土壤有机质空间变异研究——以山西省忻州市忻府区为例[J]. 广东农业科学,2013,40(13):187-190,200,238.

[23]张文博,张福平,苏玉波,等. 渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报,2014,34(1):138-143.

[24]秦富仓,牛晓乐,杨振奇,等. 冒山小流域不同地形和土地利用下的土壤养分空间变异特征[J]. 中国农业科技导报,2020,22(6):138-148.

[25]钟 聪,李小洁,何园燕,等. 广西土壤有机质空间变异特征及其影响因素研究[J]. 地理科学,2020,40(3):478-485.

[26]黄 平,李廷轩,张佳宝,等. 坡度和坡向对低山茶园土壤有机质空间变异的影响[J]. 土壤,2009,41(2):264-268.

[27]武 婕,李玉环,李增兵,等. 南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素[J]. 生态学报,2014,34(6):1596-1605.

[28]王丽霞,汪卫国,李心清,等. 中国北方干旱半干旱区表土的有机质碳同位素、磁化率与年降水量的关系[J]. 干旱区地理,2005,28(3):311-315.

[29]熊正琴,邢光熹,沈光裕,等. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究[J]. 农村生态环境,2002,18(2):29-33.

[30]赵晴月,许世杰,张务帅,等. 中国玉米主产区土壤养分的空间变异及影响因素分析[J]. 中国农业科学,2020,53(15):3120-3133.

[31]安 晶. 东北地区棕壤和黑土旱田土壤板结机理研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016:43-51.

[32]戴万宏,黄 耀,武 丽,等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系[J]. 土壤学报,2009,46(5):851-860.

前的研究热点问题。有研究表明,大气中 80% 的甲烷是由生物活动产生的,其中 33% ~49% 来自稻田的厌氧分解<sup>[7]</sup>。Sass 研究认为,我国稻田土壤甲烷排放量占全世界稻田土壤甲烷排放量的 37.6%<sup>[8]</sup>。另外,我国农业资源长期受到资源衰竭和环境恶化等因素的挑战,且人均耕地少,耕地后备资源不足。因此,在有限的土地上取得更多的生态经济效益也成为了众多学者研究的重点问题,建立农业的可持续性综合评价指标并提供可持续发展建议也显得十分必要<sup>[9-10]</sup>。稻田复种轮作系统的综合评价是对复种轮作系统的经济效益、生态效益和社会效益进行综合分析评价<sup>[11]</sup>。因此,丰富稻田种植制度,并深入研究不同种植制度下土壤生态环境效应和综合效益,有利于筛选出适合提高作物产量、保持土壤肥力的种植模式,对解决全国粮食安全问题具有重要意义。目前,关于复种轮作系统的研究较少。本研究在长期定位试验的基础上,为探明稻田复种轮作系统的综合效应,全面分析了稻田复种轮作系统下温室气体的排放状况,以期为保障国家粮食安全、减少温室气体排放、制定合理的减排措施提供可靠的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地地理位置与气候条件

试验于 2014 年 9 月至 2016 年 11 月在江西农业大学科技园进行,土壤类型为红壤,试验地属亚热带湿润季风气候,年平均气温 17.0 ~17.7 ℃,年降水量 1 600 ~1 700 mm,降水天数为 147 ~157 d,年平均暴雨天数为 5.6 d,年平均相对湿度为 78.5%,年日照时数为 1 723 ~1 820 h,日照率为 40%,年平均风速为 2.3 m/s,年无霜期为 251 ~272 d。试验前各小区土壤肥力均匀一致,表层 0 ~15 cm 土壤肥力状况:pH 值 5.07,有机质含量 35.64 g/kg,全氮含量 1.74 g/kg,碱解氮含量 168.29 mg/kg,有效磷含量 37.32 mg/kg,速效钾含量 41.78 mg/kg。

1.2 试验材料与方法

根据试验要求及试验目的,本试验共设 4 个处理,4 次重复,随机区组排列,共 16 个小区,各个小区之间用水泥埂隔开,小区面积为 11 m × 3 m = 33 m<sup>2</sup>。具体试验处理详见表 1。

表 1 试验设计

处理	试验前 1 年 2013 年冬至 2014 年秋	试验第 1 年 2014 年冬至 2015 年秋	试验第 2 年 2015 年冬至 2016 年秋	备注
A(CK)	紫云英—早稻—晚稻(MV—RE—RL)	紫云英—早稻—晚稻(MV—RE—RL)	紫云英—早稻—晚稻(MV—RE—RL)	连作系统
B	黑麦草—早稻—玉米    大豆(RG—RE—CSB)	小白菜—早稻—玉米    豆角(BC—RE—CLB)	小白菜—早稻—晚稻(BC—RE—RL)	轮作系统
C	油菜—早稻—玉米    花生(RP—RE—CP)	油菜—早稻—玉米(RP—RE—C)	油菜—早稻—晚稻(RP—RE—RL)	轮作系统
D	混播绿肥—早稻—玉米    芝麻(MS—RE—RS)	混播绿肥—早稻—玉米    大豆(MS—RE—CSB)	混播绿肥—早稻—晚稻(MS—RE—RL)	轮作系统

注:“—”表示接茬,“混播”是紫云英、肥田萝卜和油菜的混播,“||”表示间作。MV 表示紫云英(milk vetch),RE 表示早稻,RL 表示晚稻,C 表示玉米,SB 表示大豆,BC 表示小白菜,LB 表示豆角,RP 表示油菜,CP 表示花生。

作物材料与品种:冬季作物紫云英品种为余江大叶籽;小白菜品种为黑叶四月慢;肥田萝卜品种为南畔洲萝卜种;油菜品种为德核杂 15 号。玉米品种为赣糯二号;豆角品种为美国春秋无架豆;大豆品种为农家自留种。2 年试验所用的早稻材料品种均为金优 458,晚稻材料品种 2015 年为天优华占,2016 年为五丰优 T025。

2014—2015 年冬季作物:紫云英于 2014 年 9 月 28 日撒播,以 30 kg/hm<sup>2</sup> 播种,不施肥;小白菜、肥田萝卜、油菜于 2014 年 11 月 14 日播种,待来年春季均作为肥料翻压还田。于 2015 年 3 月 31 日冬

季作物测产并将所有秸秆翻耕还田。2015—2016 年冬季作物:紫云英于 2015 年 10 月 3 日撒播,其他冬季作物肥田萝卜、油菜和小白菜于 2015 年 11 月 14 日播种。2016 年 4 月 1 日冬季作物测产并且所有秸秆都翻耕还田。

2015 年早稻于 3 月 26 日播种,于 4 月 29 日移栽,以行距 22 cm,株距 19 cm 进行,7 月 28 日收获。2015 年旱地作物:单作玉米先进行深耕耙平,播前晒种 3 ~4 h,用 50 ℃ 的温水浸种 15 min,冷却后再浸 6 ~8 h,最后用清水冲洗再进行播种,采取直播栽培的方式种植,行距 60 cm,株距 30 cm。玉米间作

豆角:在玉米长到 30~40 cm 时开始播种豆角,玉米行距 60 cm,株距 25 cm,豆角行距 40 cm,株距 35 cm,间距 30 cm。玉米间作大豆:玉米与大豆行比为 2:3,大豆行距 40 cm,株距 25 cm,间距 40 cm。玉米行距 60 cm,株距 33 cm,每穴 2 粒,定苗保留 1 株。2016 年早稻于 3 月 27 日播种,4 月 28 日移栽,行距 22 cm,株距 19 cm,7 月 23 日收获。2016 年晚稻于 6 月 28 日播种,7 月 28 日犁田并施基肥,7 月 29 日移栽,行距 22 cm,株距 20 cm,11 月 2 日收获。

水稻施肥以基肥为主,磷肥全部作基肥在水稻移栽前施入,水稻氮、钾肥施用比例为基肥:分蘖肥:穗肥=5:3:2。施纯氮 120 kg/hm<sup>2</sup>,纯磷 60 kg/hm<sup>2</sup>,纯钾 75 kg/hm<sup>2</sup>,在移栽后 5~7 d 施分蘖肥,在主茎幼穗长 1~2 cm 时施穗肥,后期施少量氮肥以保证水稻生长的氮素需求。玉米种植中磷肥作为基肥,氮:磷:钾施用比例为 5:3:2。大豆施钙镁磷肥与尿素时,按基肥:花肥=2:3 施用,施钾肥时按基肥:花肥=1:1 施用。早稻打药 3 次,晚稻打药 4 次。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 温室气体测定 气体样品用静态暗箱法采集。采样箱由不锈钢焊接而成,尺寸为 50 cm×50 cm×50 cm,箱体外覆发光铝箔用于反光隔热,箱内安有一小电扇用于混匀箱内气体,在箱子的一侧设有三通阀采气孔,箱体外置有一个红液酒精温度计用于观测箱内温度。在进行采样时,首先将采样箱置于事先埋好的底座上,底座上设有水槽,采样前,将水槽灌满水用于阻断箱体内外气体交换。在 0、10、20、30 min 采集样品时,用 100 mL 注射器来回抽 5~10 次以混匀气体,随后抽取气体样品到气袋中,采样结束后带回实验室测定分析。采样时间在 08:30~12:00 点进行,采样频率为 7 d 采样 1 次。

全球增温效应:采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的综合增温潜势(GWP)计算 3 种温室气体在 100 年尺度的综合增温效应,CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量分别乘以 25 和 298 再相加,得到 CO<sub>2</sub> 排放当量,即为 3 种气体的综合增温潜势。计算公式为

$$GWP = f_{CO_2} + f_{CH_4} \times 25 + f_{N_2O} \times 298. \quad (1)$$

1.3.2 综合效益指标的测定与推算 记载农田农药、化肥、劳力等投入使用量以及农田各产品的输出量,根据农产品价格的变化,计算物质、能量的投

入产出状况,并采用层次分析(AHP)法和综合指数法分别确立指标权重和进行综合评价。为满足评价因素的科学性,采用理论分析、频度统计和专家咨询等方法来设置、筛选因子,对具体因子进行主成分分析,对影响微小或不关联的指标进行合并或淘汰,最后选择内涵丰富并在实践中简便实用的因素构成最终评价因素指标体系。为确保因子权重的科学性,在对稻田冬季复种轮作系统综合效益评价中,结合已有的资料和其他研究者的经验,采用 AHP 法确定各因子权重。本研究采用综合指数法对稻田冬季复种轮作系统的效益进行综合评价,计算公式为

$$V_i = \sum W_j F_j(X_i). \quad (2)$$

式中: $V_i$  为综合效益的综合评价指数; $W_j$  为第  $j$  指标权重; $F_j(X_i)$  为第  $j$  个指标的评价函数。在评价过程中,本研究采用标准化将各指标的观测值变换到同一水平上,消除其量纲的影响,这种变换称为指标  $X_i$  观测值的评价函数  $F_j(X_i)$ ,计算公式为

$$F_j(X_i) = X_{ij}/X_{j\max}. \quad (3)$$

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据计算统计及绘图,采用 SPSS 19.0 软件进行各处理之间的方差分析和多重比较,在  $P < 0.05$  水平下进行方差分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻田复种轮作条件下周年农田温室气体排放特征

2.1.1 稻田 CO<sub>2</sub> 排放 从不同季节排放量(表 2)来看,CO<sub>2</sub> 平均累积排放量为晚稻(3 397.15 kg/hm<sup>2</sup>)>早稻(2 797.43 kg/hm<sup>2</sup>)>冬作物(1 395.00 kg/hm<sup>2</sup>)。冬作物、早稻各处理间差异均不显著,而晚稻是处理 A(紫云英—早稻—晚稻)和处理 C(油菜—早稻—晚稻)排放量较高,与处理 B(小白菜—早稻—晚稻)、处理 D(混播绿肥—早稻—晚稻)差异显著( $P < 0.05$ )。从各处理周年累积排放量来看,以处理 A 最高,为 8 068.45 kg/hm<sup>2</sup>,分别高出其他 3 个处理 14.39%、1.84%、10.32%,与处理 B、处理 D 差异显著。从各季节排放比例来看,冬作物、早稻和晚稻季分别是处理 D、处理 B 和处理 C 最高。综上,“紫云英—早稻—晚稻”处理 CO<sub>2</sub> 周年排放量最高,这可能与紫云英翻压还田后水稻的生长发育以及土壤微生物

表 2 2016 年稻田复种轮作下稻田 CO<sub>2</sub> 累积排放量和季节排放比例

处理	CO <sub>2</sub> 累积排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )				排放比例(%)			
	冬作物	早稻	晚稻	全年	冬作物	早稻	晚稻	全年
A(CK)	1 485.40a	2 935.32a	3 647.73a	8 068.45a	18.41	36.38	45.21	100
B	1 283.53a	2 803.54a	2 966.58b	7 053.65b	18.20	39.75	42.05	100
C	1 432.43a	2 785.67a	3 704.24a	7 922.34a	18.08	35.16	46.76	100
D	1 378.65a	2 665.18a	3 270.03b	7 313.86b	18.85	36.44	44.71	100
平均	1 395.00	2 797.43	3 397.15	7 589.58	18.39	36.93	44.68	100

注:表中同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。表 3、表 4、表 5 同。

活动等相关,紫云英生物量大,翻压还田后为土壤微生物活动提供能源与养分,有利于土壤呼吸,CO<sub>2</sub> 释放量增加。

2.1.2 稻田 CH<sub>4</sub> 排放 由表 3 可知,与 CO<sub>2</sub> 趋势相反,处理 A 的 CH<sub>4</sub> 周年累积排放量最低,且与其他处理差异显著。从不同季节来看,与 CO<sub>2</sub> 趋势一

致,也是晚稻>早稻>冬季作物,各生长季 CH<sub>4</sub> 累积排放量均是以处理 C 最高,且在冬作物和早稻季与处理 A 差异显著;晚稻季各处理间差异不显著。从不同处理的季节排放比例来,冬作物、早稻和晚稻季分别是处理 C、处理 D 和处理 A 最高。

表 3 2016 年稻田复种轮作下双季稻田 CH<sub>4</sub> 累积排放量和季节排放比例

处理	CH <sub>4</sub> 累积排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )				排放比例(%)			
	冬作物	早稻	晚稻	全年	冬作物	早稻	晚稻	全年
A(CK)	6.34b	165.56b	224.76a	396.66b	1.60	37.07	56.66	100
B	8.28ab	197.92ab	248.66a	454.86a	1.82	39.20	54.67	100
C	9.86a	219.58a	264.51a	493.95a	2.00	35.29	53.55	100
D	7.84ab	203.14a	259.95a	470.93a	1.66	43.14	55.20	100

2.1.3 稻田 N<sub>2</sub>O 排放 从表 4 可以看出,稻田 N<sub>2</sub>O 排放以冬作物生长季排放为主,占周年排放总量的 72.79%~78.82%,早晚稻生长季排放量较小,各生长季 N<sub>2</sub>O 排放量为冬季作物>早稻>晚稻,与 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放趋势相反。冬作物、早稻和周年 N<sub>2</sub>O 累积排放量各处理间差异均不显著。晚稻的处理 A、B、C 显著高于处理 D。从季节排放比例

来看,冬作物生长季排放比例整体较高,其中处理 D 的冬作物占全年 N<sub>2</sub>O 累积排放量最高,达 78.72%,其次是处理 C(76.66%),早稻与晚稻生长季均以处理 A 的排放比例最高,分别为 17.46%和 9.75%。因此,“小白菜—早稻—晚稻”N<sub>2</sub>O 排放量较高,“紫云英—早稻—晚稻”排放量最少,而且冬作物生长季是 N<sub>2</sub>O 排放的主要来源。

表 4 2016 年稻田复种轮作下双季稻田 N<sub>2</sub>O 累积排放量和季节排放比例

处理	N <sub>2</sub> O 累积排放量 (kg/hm <sup>2</sup> )				排放比例(%)			
	冬作物	早稻	晚稻	全年	冬作物	早稻	晚稻	全年
A(CK)	3.21a	0.77a	0.43a	4.41a	72.79	17.46	9.75	100
B	3.98a	0.88a	0.49a	5.35a	74.39	16.45	9.16	100
C	4.17a	0.87a	0.40a	5.44a	76.66	15.99	7.35	100
D	3.87a	0.76a	0.28b	4.91a	78.82	15.48	5.70	100

2.2 稻田复种轮作条件下温室气体排放总量及综合温室效应

从温室气体的排放总量(表 5)来看,CO<sub>2</sub> 排放总量明显高于 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放总量。CO<sub>2</sub> 排放总量最高的是处理 A,达 8 068.45 kg/hm<sup>2</sup>,分别高出其他 3 个处理 14.39%、1.84%、10.32%。N<sub>2</sub>O 排放总量最高的是处理 C(5.44 kg/hm<sup>2</sup>),而处理 A 的

N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放总量均最低。从表 5 还可以看出,无论是短时间尺度还是长时间尺度,3 种气体的综合 GWP 均是处理 C 最高,分别高出其他 3 个处理 18.88%、8.97%、5.67%和 13.44%、9.35%、6.53%。因此,双季稻田冬季种植油菜对全球增温贡献较大,4 种复种轮作模式中,以紫云英—早稻—晚稻复种模式的温室效应最低,从这一点考虑,冬

表 5 2016 年稻田复种轮作下温室气体排放总量及其 GWP

处理	排放总量 (kg/hm <sup>2</sup> )			综合全球增温潜势 (GWP)	
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	20 年	100 年
A (CK)	8 068.45a	396.66a	4.41b	37 902.46	19 299.13
B	7 053.65ab	454.86a	5.35a	41 349.72	20 019.45
C	7 922.34a	493.95a	5.44a	45 058.90	21 892.21
D	7 313.86ab	470.93a	4.91ab	42 639.81	20 550.29

种紫云英相对来说是更有利的。

2.3 稻田复种轮作系统的综合效益评价

各种植系统连续 2 年的综合效益评价指标初始值如表 6 所示。从表 6 可以看出,光能利用率、辅助能效率、气体调节和粮食产量均以处理 A(紫云英—早稻—晚稻→紫云英—早稻—晚稻)最高;N 素产投比和劳动净产值率以处理 B(小白菜—早稻—玉米∥豆角→小白菜—早稻—晚稻)最高,分别为 0.82 和 72.45 元/d,分别高出其他 3 个处理

12.33%、20.59%、3.80% 和 7.40%、4.61%、3.31%;经济产投比和消纳废弃物以处理 C(油菜—早稻—玉米→油菜—早稻—晚稻)最高,分别高出其他 3 个处理 18.96%、20.10%、8.66% 和 3.87%、12.84%、1.79%;经济总产值、纯产值、物资费用出益率、养地作物指数、土壤当量比和社会保障价值均以处理 D(混播绿肥—早稻—玉米∥大豆→混播绿肥—早稻—晚稻)表现较好。

表 6 稻田复种轮作系统的效益评价指标权重及原始值

项目	评价指标	指标权重	A (CK)	B	C	D
经济效益	经济总产值(元/hm <sup>2</sup> )	0.065 6	18 754.32	17 329.03	17 270.48	19 643.00
	纯产值(元/hm <sup>2</sup> )	0.109 4	10 010.47	9 492.68	7 928.14	11 050.00
	物资费用出益率(%)	0.087 5	3.12	3.32	3.08	3.48
	经济产投比	0.175 1	2.11	2.09	2.51	2.31
生态效益	光能利用率(%)	0.081 3	1.23	1.08	1.14	1.19
	辅助能效率(%)	0.034 9	3.65	3.49	3.28	3.51
	养地作物指数	0.030 8	0.58	0.16	0.33	0.70
	消纳废弃物(元/hm <sup>2</sup> )	0.021 2	4 340.50	3 995.47	4 508.56	4 429.40
	气体调节(元/hm <sup>2</sup> )	0.071 8	17 648.32	15 642.32	12 098.45	16 486.00
	土壤当量比	0.020 5	2.23	2.16	2.38	2.41
	N 素产投比	0.095 7	0.73	0.82	0.68	0.79
社会效益	劳动净产值率(元/d)	0.044 1	67.46	72.45	69.26	70.13
	粮食产量(kg/hm <sup>2</sup> )	0.121 6	14 952.27	14 234.63	14 110.99	14 360.00
	社会保障价值(元/hm <sup>2</sup> )	0.040 5	26 846.37	24 268.79	27 178.35	29 642.00

注:表中数据折算情况参照《中国耕作学》<sup>[12]</sup>和《农业生态学》<sup>[13]</sup>。

通过表 6 和表 7 可得出表 8 所示的稻田复种轮作系统综合效益评价指数。从表 8 中单项效益指数来看,经济效益指数各处理大小顺序表现为处理 D>处理 C>处理 A>处理 B,生态效益指数表现为处理 D>处理 A>处理 B>处理 C;社会效益指数各处理表现为处理 D>处理 A>处理 C>处理 B。然而单项效益指数反映有限,只能反映某一方面的效益功能,难以对稻田复种轮作系统的综合效益进行准确反映,如果仅根据单项效益指数进行评价,将得出不同的结论。而综合效益指数能更好地反映

各系统的整体效益功能,它可将各单项效益结合在一起,通过综合指数加以排序或判别,从而能够科学客观地对稻田生态系统进行评价。由表 8 还可知,稻田复种轮作系统的综合效益指数各处理大小顺序表现为处理 D>处理 A>处理 B>处理 C,综合效益指数分别为 0.966、0.927、0.885、0.876,由此可以得出,“混播绿肥—早稻—玉米∥大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”复种轮作方式较其他 3 种复种模式更具有可持续发展优势,综合效益更好,更有利于农业的绿色高效可持续发展。

表 7 不同处理各参数的无量纲化值

项目	评价指标	无量纲化值			
		A(CK)	B	C	D
经济效益	经济总产值	0.955	0.882	0.879	1.000
	纯产	0.906	0.859	0.717	1.000
	物资费用出益率	0.940	1.000	0.928	0.988
	经济产投比	0.841	0.833	1.000	0.920
生态效益	光能利用率	1.000	0.878	0.927	0.967
	辅助能效率	1.000	0.956	0.899	0.962
	氧地作物指数	0.835	0.224	0.472	1.000
	消纳废弃物	0.963	0.886	1.000	0.982
	气体调节	1.000	0.886	0.686	0.934
	土壤当量比	0.925	0.896	0.988	1.000
	N 素产投比	0.890	1.000	0.829	0.963
社会效益	劳动净产值率	0.931	1.000	0.956	0.968
	粮食产量	1.000	0.952	0.944	0.960
	社会保障价值	0.906	0.819	0.917	1.000

表 8 不同处理的评价指数

处理	经济效益指数	生态效益指数	社会效益指数	综合效益指数
A(CK)	0.391	0.338	0.198	0.927
B	0.385	0.308	0.192	0.885
C	0.392	0.291	0.193	0.876
D	0.423	0.344	0.199	0.966

3 结论与讨论

农田生态系统中,3 种主要温室气体中属 CO<sub>2</sub> 的情况最复杂,作物的自养呼吸和土壤的异养呼吸都会释放 CO<sub>2</sub>,是稻田生态系统 CO<sub>2</sub> 的排放源,其排放通量随作物生长而发生变化<sup>[14]</sup>。有研究表明,农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量有明显的季节变化,本研究中 CO<sub>2</sub> 季节变化也较明显,总体呈先升后降的趋势,其峰值的出现与温度、作物生长、施肥等因素有关<sup>[15]</sup>。轮作周期内 CH<sub>4</sub> 排放则集中在水稻生长季,且晚稻生长季 CH<sub>4</sub> 排放量要高于早稻生长季,与唐海明等的研究结果<sup>[16]</sup>相一致。早稻生长季初期 CH<sub>4</sub> 排放通量处于较低水平,这可能与冬季作物还田、腐烂分解有关,随后 CH<sub>4</sub> 排放通量随着水稻生长发育的加快不断增加,直到分蘖盛期后的拔节期出现排放高峰,整个早稻季 CH<sub>4</sub> 排放趋势呈现出先增加后降低的抛物线型变化,这与前人研究结果<sup>[17]</sup>一致。随着拔节期的结束,排放通量有一定的减小,但后期又出现了一个排放高峰,此时正处抽穗杨花期,这与韩广轩等研究发现的 水稻油菜轮作条件下 CH<sub>4</sub>

排放峰出现在水稻抽穗扬花期结果<sup>[18]</sup>一致,这个峰值产生的原因可能是水稻根系逐渐老化、死亡,根细胞随之脱落,使得土壤中碳源增多,为土壤甲烷细菌提供了充足的能源,增强了甲烷细菌的活动。稻田 N<sub>2</sub>O 的产生主要源于硝化与反硝化 2 个过程,而参与这些过程的微生物受土壤养分、氧气浓度、水分含量、温度、有机质含量、pH 值等因素控制<sup>[19-22]</sup>,本研究中,随冬种作物种类的不同,N<sub>2</sub>O 排放通量也有所差异。从整个生长季排放来看,N<sub>2</sub>O 排放通量在中后期要高于播种初期,这可能是因为气温的逐渐升高,有利于土壤微生物的活动,同时冬季作物根系和地上部分生理活动的增强,促进了稻田 N<sub>2</sub>O 排放,这与 O'Hara 等的研究结果<sup>[23]</sup>一致。全球增温潜势作为一种相对的指标常用来估计不同温室气体对气候系统的潜在效应。本研究中无论是短时间尺度还是长时间尺度,3 种气体的综合 GWP 均是油菜—早稻—晚稻最高,分别高出其他处理 18.88%、8.97%、5.67% 和 13.44%、9.35%、6.53%。因此,双季稻田冬季种植油菜对全球增温贡献较大,4 种复种轮作模式中,以紫云英—早稻—晚稻复种模式的温室效应最低,从这一点考虑,冬种紫云英相对来说是更有利的。

双季稻田复种轮作系统的综合效益即经济效益、生态效益和社会效益的综合<sup>[24]</sup>,综合效益评价是对稻田轮作系统的社会、经济、生态效益进行综合分析 与评价。近年来,国内外学者对稻田复种轮作的综合效益进行了大量研究,研究主要涉及评价

指标体系、指标权重的确定方法等,操作性强,因此得到了广泛的应用。如危向峰等运用层次分析法确定了土壤耕地的地力评价因子权重和对黑龙江生态环境质量进行了评价研究<sup>[25-26]</sup>。本研究采用综合指数法对不同稻田复种轮作模式的效益进行综合评价,结果表明“混播绿肥—早稻—玉米 || 大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”的综合效益指数最高(0.966),因此,“混播绿肥—早稻—玉米 || 大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”这种复种轮作方式较其他 3 种复种模式更具有可持续发展优势,综合效益更好,更有利于农业的绿色高效可持续发展。

稻田 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 不同季节排放量趋势一致,均是晚稻 > 早稻 > 冬季作物,而 N<sub>2</sub>O 排放与之相反。从温室气体的排放总量来看,CO<sub>2</sub> 排放总量明显高于 CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放总量。紫云英—早稻—晚稻 CO<sub>2</sub> 排放总量最高,但 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放总量均最低,N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放总量最高的是油菜—早稻—晚稻。3 种温室气体的综合全球增温潜势在冬季作物生长季、水稻生长季和全年均是以紫云英—早稻—晚稻最低,油菜—早稻—晚稻最高,双季稻田冬种油菜对全球增温贡献较大,对环境来说是不利的,从这一点考虑,冬种紫云英相对来说是对环境更有利的。“混播绿肥—早稻—玉米 || 大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”综合效益较好,最具可持续发展优势,有利于农业的绿色高效可持续发展。因此,“紫云英—早稻—晚稻”和“混播绿肥—早稻—玉米 || 大豆→混播绿肥—早稻—晚稻”这 2 种模式是适合我国南方稻区大面积推广应用的稻田冬季农业开发与复种轮作模式。

#### 参考文献:

- [1] 诸海燕. 水稻—绿肥轮作对滩涂土壤肥力的影响[J]. 安徽农业科学,2016,44(22):143-144,148.
- [2] 唐海明,肖小平,汤文光,等. 冬季覆盖植物对南方稻田土壤养分和水稻生长的影响[J]. 江西农业大学学报,2010,32(1):9-14,19.
- [3] 王礼献. 不同冬种复种方式下双季稻产量、土壤生态环境及系统能物流特征研究[D]. 南昌:江西农业大学,2016.
- [4] 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.
- [5] 于天一,逢焕成,任天志,等. 冬季作物种植对双季稻根系酶活性及形态指标的影响[J]. 生态学报,2012,32(24):7894-7904.
- [6] 张啸林. 不同稻田轮作体系下温室气体排放及温室气体强度研究[D]. 南京:南京农业大学,2013.
- [7] Cicerone R J, Shetter J D. Sources of atmospheric methane: measurements in rice paddies and a discussion[J]. Journal of Geophysical Research,1981,86:7203-7209.
- [8] Sass L R. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O global emissions and controls from rice fields and other agricultural and industrial sources[M]. Yokyo:Yokendo Publishers,1994:1-7.
- [9] 周 湛. 不同农田生态系统生态经济效益对比研究:以长沙县金井镇为例[D]. 长沙:湖南农业大学,2014.
- [10] Liu W N, Wu W L, Wang X B, et al. A sustainability assessment of a high-yield agroecosystem in Huantai County, China[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2007,14(6):565-573.
- [11] 杨滨娟. 冬种绿肥与稻田还田对农田生态系统生产力及土壤环境的影响[D]. 南昌:江西农业大学,2014.
- [12] 黄国勤. 中国耕作学[M]. 北京:新华出版社,2001.
- [13] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京:中国农业出版社,2001.
- [14] 刘允芬. 农业生态系统碳循环研究[J]. 自然资源学报,1995,10(1):1-9.
- [15] 孟凡乔,关桂红,张庆忠,等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报,2006,26(6):992-999.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 韩广轩,朱 波,高美荣. 水稻油菜轮作稻田甲烷排放及其总量估算[J]. 中国生态农业学报,2006,14(4):134-137.
- [19] 岳 进,黄国宏,梁 巍,等. 不同水分管理下稻田土壤 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放与微生物菌群的关系[J]. 应用生态学报,2003,14(12):2273-2277.
- [20] Song C C, Zhang J B. Effects of soil moisture, temperature, and nitrogen fertilization on soil respiration and nitrous oxide emission during maize growth period in northeast China[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil & Plant Science,2009,59(2):97-106.
- [21] 李香兰,徐 华,蔡祖聪. 稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放消长关系及其减排措施[J]. 农业环境科学学报,2008,27(6):2123-2130.
- [22] 蒋静艳,黄 耀,宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国环境科学,2003,23(5):552-556.
- [23] O'Hara G W, Daniel R M. Rhizobial denitrification: a review[J]. Soil Biology and Biochemistry,1985,17(1):1-9.
- [24] 张壬午,王洪庆,张克强. 县级生态农业建设评价指标体系及其评价标准[J]. 农业环境科学学报,1992,11(3):111-117.
- [25] 危向峰,段建南,胡振琪,等. 层次分析法在耕地地力评价因子权重确定中的应用[J]. 湖南农业科学,2006(2):39-42.
- [26] 李 崧,邱 微,赵庆良,等. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J]. 环境科学,2006,27(5):1031-1034.