

# 不同处理方式的粪肥对水稻生长和温室气体排放的影响\*

周贝贝<sup>1,2</sup> 王一明<sup>1</sup> 林先贵<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室 南京 210008

<sup>2</sup>中国科学院大学 北京 100049

**摘 要** 通过水稻盆栽试验研究施用新型快腐粪肥、条垛堆肥和未经处理鲜粪对水稻产量和养分利用效率以及CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O等温室气体排放的影响,同时设置不施肥对照,评估不同处理方式粪肥的肥效和环境效应。结果表明:施用快腐粪肥可以明显促进水稻生长、增加水稻产量,且增产效果显著高于鲜粪和条垛堆肥( $P < 0.05$ );等量和等氮施用快腐粪肥处理的水稻产量分别比鲜粪和条垛堆肥处理增加38.72%、35.80%和44.67%、41.63%。与鲜粪和条垛堆肥相比,等量和等氮条件下施用快腐粪肥其氮、磷、钾养分的农学利用效率和当季利用效率显著增加( $P < 0.05$ )。施用条垛堆肥处理的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放以及单位产量全球增温潜势(GHGI)均为最低。施用鲜粪显著增加CH<sub>4</sub>排放,而N<sub>2</sub>O排放增加不显著( $P > 0.05$ ),其GHGI显著高于条垛堆肥和快腐粪肥( $P < 0.05$ );鲜粪经快速物化促腐处理后施用可以显著减少CH<sub>4</sub>排放( $P < 0.05$ ),虽然N<sub>2</sub>O排放有增加趋势,但其GHGI显著降低( $P < 0.05$ )。因此,物化促腐技术处理快速、经济高效、环保低碳,可广泛应用于畜禽养殖场的粪便处理和有机肥生产。(图1表5参40)

**关键词** 水稻;有机肥;新型快腐粪肥;养分利用效率;CH<sub>4</sub>;N<sub>2</sub>O

CLC X713

## Effects of differently treated manures on rice growth and greenhouse gas emission\*

ZHOU Beibei<sup>1,2</sup>, WANG Yiming<sup>1</sup> & LIN Xiangui<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** An 18-week greenhouse pot experiment was conducted to compare the effects of non-composted manure (NCM), commonly composted manure (CCM), and rapidly composted manure (RCM) on rice yield, NPK use efficiency and paddy CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions, with the treatment of no fertilizer as control. The NPK concentrations of rice straw and grain were measured to investigate the nutrient use efficiency of different treatments. The closed chamber method was used to monitor CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions during rice growth. In comparison with NCM and CCM amendments, equal amount- and equal nitrogen (N)-RCM amendments significantly ( $P < 0.05$ ) enhanced rice growth by 38.72% and 35.80%, respectively, and at the same time increased grain yield by 44.67% and 41.63%, respectively. Both equal amount- and equal N-RCM amendments significantly increased apparent recovery efficiency (RE) and agronomic efficiency (AE) of NPK, and significantly improved nutrients absorption ( $P < 0.05$ ). CCM amendment did not increase CH<sub>4</sub> or N<sub>2</sub>O emissions, and the greenhouse gas intensity (GHGI) was also the lowest. On the contrary, NCM amendment resulted in significant increase of CH<sub>4</sub> emission ( $P < 0.05$ ) and a little increase in N<sub>2</sub>O emission. The GHGI of NCM treatment was the highest. RCM amendment could significantly mitigate CH<sub>4</sub> emission ( $P < 0.05$ ) but had the potential to increase N<sub>2</sub>O emission. However, in comparison with NCM treatment, equal amount- and equal N-RCM amendments significantly decreased GHGIs by 61.40% and 68.29%, respectively. The result indicated that compared to NCM, RCM application can not only significantly enhance rice growth and increase grain yield, but also significantly decrease both CH<sub>4</sub> emission and GHGI. In addition, the production of RCM is rapid (2–3 h). Therefore, the handling method of RCM is worth expansion in livestock manure treatment.

**Keywords** rice; organic fertilizer; rapidly composted manure; nutrient use efficiency; CH<sub>4</sub>; N<sub>2</sub>O

收稿日期 Received: 2015-10-12 接受日期 Accepted: 2015-12-06

\*中国科学院战略性先导科技专项(XDA05020803, XDA05020800)和国家自然科学基金面上项目(21377137)资助 Supported by the CAS Strategic Priority Research Program Grant (XDA05020803, XDA05020800) and the National Natural Science Foundation of China (21377137)

\*\*通讯作者 Corresponding author (E-mail: xglin@issas.ac.cn)

随着社会经济的发展和人们膳食结构的调整,肉、蛋、奶等畜禽产品的消费量迅速增加,从而促进了畜禽养殖业规模化、集约化发展。畜禽养殖业的迅猛发展也导致畜禽粪便的排放量迅速增加,据估算,2003年和2009年我国畜禽粪便的排放量分别为31.90亿t<sup>[1]</sup>和32.64亿t<sup>[2]</sup>,预计到2020年将达到42.44亿t<sup>[3]</sup>。畜禽粪便具有恶臭气味,化学需氧量(COD)高,氮、磷等养分物质含量高,且携带有大量病原微生物和寄生虫,若不能加以合理处置将对自然环境和居民健康造成极大的危害<sup>[4-5]</sup>。因此对畜禽粪便进行无害化处理,资源化利用,防止和消除养殖场畜禽粪便的污染,对实现农业生产的良性循环,保护生态环境具有十分重要的意义。

畜禽粪便含有丰富的有机物质和作物生长所需的氮、磷、钾、钙、镁、硫等营养元素,是农业可持续发展的宝贵资源,将其制成有机肥已经成为畜禽粪便资源化利用的主要方式之一<sup>[6]</sup>。条垛式堆肥是目前工厂化生产有机肥广泛采用的方法。该方法通过接种菌剂,在好氧条件下,利用微生物的矿化作用使畜禽粪便达到稳定状态,同时堆肥升温期的高温可以杀死病原微生物和寄生虫等。但是,条垛式堆肥耗时比较长(至少21 d),堆置过程中散发出大量臭气影响环境质量,同时粪便堆置过程中NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>的排放导致条垛堆肥中养分含量降低<sup>[7]</sup>。鉴于条垛式堆肥中存在的不足,我们研发了一种新型畜禽粪便快速处理技术——物化促腐技术。该处理技术通过外加高温(~100 °C)快速彻底地杀灭畜禽粪便中的病原微生物<sup>[8]</sup>,将无害化处理时间缩短为3-5 h;同时通过添加促腐组剂破坏畜禽粪便中木质素、纤维素等难降解物质的结构<sup>[9-10]</sup>,将原来需要几个星期甚至几个月实现的畜禽粪便的熟化缩短在1周内完成。物化促腐技术实现了畜禽粪便的快速除臭、无害化和腐熟,并且经该技术制得的粪肥的各项指标均达到有机肥料行业标准的要求(表1)。

有机肥料的最终归趋是施加到农田。我国是水稻种植大国,水稻种植面积占全球的22%<sup>[11]</sup>。同时稻田也是大气CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的重要排放源<sup>[12-13]</sup>,而有机肥料的施用对于增加土壤有机质含量,培肥土壤具有重要作用<sup>[14-15]</sup>。施用有机肥可以增加产量<sup>[16-17]</sup>和提高品质<sup>[18-19]</sup>是不争的事实,但由于向稻田提供了更多的产CH<sub>4</sub>前体,会导致稻田CH<sub>4</sub>排放的增加<sup>[20-22]</sup>,这无疑引起人们对全球变暖的担忧。然而,不同种类有机肥施用对稻田CH<sub>4</sub>排放的影响是不同的。陈苇等研究发现,施用猪粪显著增加稻田CH<sub>4</sub>排放,而施用沼气渣CH<sub>4</sub>排放增加不明显<sup>[23]</sup>。新型畜禽粪便处理技术生产的粪肥,能否在增产的同时,减缓温室气体排放增加的难题?这是科学界最为关心的问题。因此,我们通过盆栽试验研究施用鲜粪(Non-composted manure, NCM)、条垛堆肥(Commonly composted manure, CCM)、快腐粪肥(Rapidly composted manure, RCM)3种不同方式处理的粪肥对水稻产量和养分利用效率的影响,并采用静态箱-气相色谱法监测不同处理水稻生长过程中CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的排放,以期对不同处理方式粪肥的肥效和环境效应作出评估。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验在中国科学院南京土壤研究所温室进行,供试水

稻品种为南粳46号。试验所用土壤采自中国科学院常熟农业生态实验站,土壤类型俗称为乌栅土,中国土壤系统分类为潜育水耕人为土(Gleyic-Stagnic Anthrosols)。牛粪鲜粪和条垛堆肥化牛粪均来自安徽阜阳某肥料厂。条垛式堆肥是先将85%牛粪与15%秸秆(鲜重)混匀,然后堆置成高1-1.2 m、宽2.5 m、长20 m的条垛状。每2 d翻堆一次,使物料持续混匀并保持堆体呈好氧状态,该过程大约为20 d;后停止翻堆,堆体进入后熟阶段(~30 d),即获得试验中所用的条垛堆肥。快腐粪肥则由鲜粪经由物化促腐技术制得,其各项指标与农业行业标准中规定的关于有机肥料的技术要求<sup>[24]</sup>见表1(以干重计),表明其达到有机肥料标准。土壤基本理化性质为有机质35.75 g/kg、全氮2.41 g/kg、全磷1.67 g/kg、全钾27.02 g/kg、速效磷23.07 mg/kg、pH 7.30。另鲜粪、条垛堆肥和快腐粪肥的基本理化性质见表2。

表1 快腐粪肥各项指标与有机肥料标准比较

Table 1 Characteristics of the RCM and NCM comparing to the organic fertilizer standard

项目 Characteristic	快腐粪肥 RCM	鲜粪 NCM	技术指标 Standard
有机质 Organic matter (w%)	57.87	57.37	≥ 45
总养分 Total nutrient (w%)	7.18	6.17	≥ 5
粪大肠菌群数 Fecal coliforms (n/g <sup>-1</sup> )	0	1.4 × 10 <sup>6</sup>	≤ 100
大肠菌群数 Coliforms (n/g <sup>-1</sup> )	0	1.4 × 10 <sup>6</sup>	-
沙门氏菌数 Salmonella (n/g <sup>-1</sup> )	0	1.5 × 10 <sup>6</sup>	-

表2 不同处理粪肥理化性质

Table 2 Chemical properties of manures treated with different methods

粪肥 Manure	有机碳 TOC (w/g kg <sup>-1</sup> )	全氮 TN (w/g kg <sup>-1</sup> )	全磷 TP (w/g kg <sup>-1</sup> )	全钾 TK (w/g kg <sup>-1</sup> )	pH
鲜粪 (NCM)	332.75	17.26	12.66	12.78	7.80
条垛堆肥 (CCM)	362.73	16.41	13.66	13.26	7.59
快腐粪肥 (RCM)	335.68	32.65	10.19	11.50	6.67

NCM: Non-composted manure; CCM: Commonly composted manure; RCM: Rapidly composted manure.

### 1.2 试验设计

试验设置5个处理,4个重复。试验处理分别为:不施肥对照(CK)、施用鲜粪处理(NCM)、施用条垛堆肥处理(CCM)、等量施用快腐粪肥处理(RCM)和等氮施用快腐粪肥处理(RCMN)。NCM、CCM和RCM处理粪肥施用量(干重)为盆栽土重的1%,RCMN处理快腐粪肥施用量较RCM处理减少47%,其施氮量与NCM处理相同。所有粪肥作为基肥一次性施加,水稻生长过程中不另外追施化肥。

将过5 mm筛的风干土(7 kg)与粪肥混匀后装于尺寸为24 cm × 20 × 20 cm的盆钵中,加水使土壤保持淹水状态,每天补水使盆钵水位维持在3 cm。盆钵淹水后7 d于2014年6月26日进行水稻移栽,7月28日-8月3日排水烤田,10月27日水稻收割。试验过程中除烤田期和水稻收获前1周,其他时期盆钵一直保持淹水状态。

### 1.3 样品采集与分析

水稻生长过程中利用静态箱法采集气体样品。采样箱为不透光的PVC材料,尺寸为25 cm × 21 cm × 80 cm,箱内顶部安装有1个小风扇和1个温度计,箱体上有1个采气孔。采气时将采样箱放置到盆钵的凹槽内,凹槽内加水密封,使采样箱保持密闭状态。气体样品采集时间为上午8:00-10:00,采样

频率为每周两次。在关箱后的第0、5、10、20、30 min用针管抽取箱体内气体20 mL注入18 mL的真空瓶内,带回实验室分析,同时记录箱内温度。 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放通量由5个气样浓度值经线性回归分析得到。积分求得水稻全生育期 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的累积排放量。

气体样品中 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 的浓度用Agilent7890型气相色谱仪(美国)测得。 $\text{CH}_4$ 检测器为火焰离子化检测器(FID),检测器温度250,柱温55; $\text{N}_2\text{O}$ 检测器为电子捕获检测器(ECD),检测器温度350,柱温55。载气为 $\text{N}_2$ (40 mL/min),燃气为 $\text{H}_2$ (40 mL/min),助燃气体为空气(380 mL/min)。

水稻植株收获后烘干,分别对各部分(籽粒、秸秆、根)称重,测定干物质产量和各部分NPK含量。水稻植株采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮,全氮、全磷和全钾分别用靛酚蓝比色法、钼锑抗比色法和火焰分光光度计测定<sup>[25]</sup>。

#### 1.4 数据处理

肥料偏生产力(Partial factor productivity, PFP) = 施肥后所获得的作物产量/肥料纯养分投入量。

肥料农学效率(Agronomic efficiency, AE) = (施肥处理作物产量 - 不施肥对照作物产量)/肥料纯养分投入量。

肥料生理利用效率(Physiological efficiency, PE) = (施肥处理作物产量 - 不施肥对照作物产量)/(施肥处理植株养分积累量 - 不施肥对照植株养分积累量)。

肥料当季利用效率(Apparent recovery efficiency, RE) = (施肥处理植株养分积累量 - 不施肥对照植株养分积累量)/肥料纯养分投入量<sup>[26-27]</sup>。

$\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放通量( $F$ ):

$$F = \rho \times V/A \times dc/dt \times 273/T^{[28]}$$

式中:单位为 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ( $\text{CH}_4$ )和 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ( $\text{N}_2\text{O-N}$ ); $\rho$ 为标准状态下 $\text{CH}_4$ 或 $\text{N}_2\text{O-N}$ 密度,其值为 $0.714 \text{ kg/m}^3$ ( $\text{CH}_4$ )和 $1.25 \text{ kg/m}^3$ ( $\text{N}_2\text{O-N}$ ); $V$ 是采样箱体内有效体积,单位为 $\text{m}^3$ ;A是盆钵面积,单位为 $\text{m}^2$ ;dc/dt为单位时间内采样箱内 $\text{CH}_4$ 或 $\text{N}_2\text{O}$ 浓度的变化,单位为 $\mu\text{L L}^{-1} \text{h}^{-1}$ ( $\text{CH}_4$ 或 $\text{N}_2\text{O}$ ); $T$ 为采样箱内温度,单位为K。

所得数据采用Microsoft Excel 2007 和SPSS 13.0进行统计分析,并使用Tukey检验进行显著性分析( $P < 0.05$ ),图表由Microsoft Excel 2007和Origin 8.5绘制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 施用不同方式处理粪肥对水稻干物质积累的影响

不同处理水稻各部分干物质的积累与分配(表3)表明,施用粪肥显著增加了水稻的产量,RCM和RCMN处理的平均增产效果分别是NCM处理和CCM处理的4.4倍和6.9倍。施用不同处理粪肥也显著增加了水稻生物量,增加幅度为24.58%-68.64%,其中施用快腐粪肥处理增幅最大。进一步分析发现快腐粪肥增加水稻产量的原因在于其一方面促进了水稻分蘖,同时增加了水稻干物质在籽粒中的分配。从表3可以看出,RCM和RCMN处理水稻分蘖数显著高于NCM和CCM处理,分别增加了35.14%和20.27%。比较不同处理水稻干物质在籽粒、秸秆和根部的分配发现,RCM和RCMN处理干物质在籽粒中的分配率显著高于NCM和CCM处理,并且RCMN处理干物质在籽粒中的分配率也高于在秸秆中的分配率。另外,CK处理水稻干物质在籽粒中的分配高于其他施肥处理,且在籽粒中的分配率高于秸秆,这可能是由于不施肥处理水稻分蘖数较其他施肥处理少,单株水稻植株所获得的养分充足,故而可以有效促进水稻干物质在籽粒中的积累。以上结果表明,与鲜粪和条垛堆肥相比,快腐粪肥可以更好地促进水稻的生长,增加干物质在籽粒中的积累,从而提高水稻产量。快腐粪肥增产效果显著的原因可能与快腐粪肥本身含氮量有关,快腐粪肥制备过程中添加的含氮促腐组剂一方面可以促进畜禽粪便中的木质素和纤维素等微生物难降解的有机物的氧化分解,另一方面提高了快腐粪肥中氮含量,更加有利于水稻生长。

### 2.2 施用不同方式处理粪肥对水稻养分利用效率的影响

肥料偏生产力(PFP)是反映土壤基础养分水平和肥料养分施用量综合效应的重要指标。不同处理氮、磷、钾的偏生产力见表4。RCMN处理氮素的偏生产力为43.10 kg/kg,显著高于其他处理( $P < 0.05$ ),分别比CCM、NCM和RCM处理提高34.44%、36.01%和84.74%。同时,参考Dobermann推荐的粮食作物氮肥偏生产力范围40-70 kg/kg<sup>[29]</sup>,RCMN处理氮素的PFP是适宜的。与RCMN处理相比,RCM处理氮素的偏生产力显著降低(-45.9%),表明RCM处理氮施用量过高,超过水稻对氮素的利用能力,而RCMN处理减少快腐粪肥施用量后,可同时提高水稻产量和氮素偏生产力。等量和等氮施用快腐粪肥处理磷素和钾素的偏生产力显著高于施用鲜粪和传统条垛堆肥的处理( $P < 0.05$ ),并且RCMN处理磷素和

表3 施用不同方式处理粪肥对水稻分蘖和不同部位干物质质量积累的影响

Table 3 Effects of differently treated manures on tillering and dry matter production of rice

处理 Treatment	分蘖数 Tillering	干物质质量 Dry matter ( $\text{m/g pot}^{-1}$ )				干物质分配率 Dry matter distribution ( $r/\%$ )		
		籽粒 grain	秸秆 straw	根 root	总生物量 total	籽粒 grain	秸秆 straw	根 root
CK	11.50 c	34.14 c	31.63 c	3.96 c	68.15 c	49.58 a	44.41 b	6.02 b
鲜粪 NCM	14.75 b	38.38 b	40.16 b	7.33 a	84.90 b	44.10 b	47.27 ab	8.63 a
条垛堆肥 CCM	14.75 b	36.80 bc	41.21 b	6.51 b	84.98 b	43.27 b	48.53 a	8.19 a
快腐粪肥 RCM	20.00 a	53.24 a	54.67 a	7.05 ab	114.93 a	46.34 ab	47.55 ab	6.11 b
等氮快腐粪肥 RCMN	17.75 a	52.12 a	50.64 a	7.15 a	108.20 a	48.45 a	45.16 ab	6.39 b

NCM: Non-composted manure; CCM: Commonly composted manure; RCM: Rapidly composted manure; RCMN: Rapidly composted manure (equal N with NCM treatment).

表4 施用不同处理方式粪肥对水稻养分利用效率的影响

Table 4 Effects of differently treated manures on nutrient uptake and recovery of rice

养分 Nutrient	处理 Treatment	偏生产力 PFP ( $P/\text{kg kg}^{-1}$ )	农学效率 AE ( $E/\text{kg kg}^{-1}$ )	生理利用效率 PE ( $E/\text{kg kg}^{-1}$ )	当季利用效率 RE (%)
N	NCM	$31.69 \pm 0.93 \text{ b}$	$4.77 \pm 0.93 \text{ c}$	$31.58 \pm 2.57 \text{ b}$	$13.57 \pm 0.23 \text{ c}$
	CCM	$32.06 \pm 2.60 \text{ b}$	$5.82 \pm 1.12 \text{ bc}$	$37.38 \pm 1.64 \text{ a}$	$15.99 \pm 3.31 \text{ c}$
	RCM	$23.33 \pm 0.53 \text{ c}$	$9.04 \pm 0.53 \text{ b}$	$20.75 \pm 0.99 \text{ c}$	$42.27 \pm 1.50 \text{ b}$
	RCMN	$43.10 \pm 1.97 \text{ a}$	$16.14 \pm 1.97 \text{ a}$	$37.17 \pm 2.68 \text{ ab}$	$47.58 \pm 0.30 \text{ a}$
P	NCM	$18.07 \pm 0.93 \text{ c}$	$2.85 \pm 0.56 \text{ c}$	$97.45 \pm 7.59 \text{ a}$	$3.19 \pm 0.64 \text{ b}$
	CCM	$16.80 \pm 1.36 \text{ c}$	$3.05 \pm 0.59 \text{ c}$	$105.70 \pm 16.77 \text{ a}$	$3.19 \pm 0.73 \text{ b}$
	RCM	$32.26 \pm 0.44 \text{ b}$	$12.31 \pm 0.44 \text{ b}$	$69.35 \pm 6.66 \text{ b}$	$18.35 \pm 1.98 \text{ a}$
	RCMN	$60.20 \pm 2.75 \text{ a}$	$22.55 \pm 2.75 \text{ a}$	$98.59 \pm 8.17 \text{ a}$	$21.78 \pm 2.19 \text{ a}$
K	NCM	$35.60 \pm 1.05 \text{ c}$	$5.36 \pm 1.05 \text{ c}$	$19.69 \pm 5.95 \text{ bc}$	$32.75 \pm 0.65 \text{ c}$
	CCM	$32.90 \pm 2.67 \text{ c}$	$5.97 \pm 1.15 \text{ c}$	$17.72 \pm 0.87 \text{ c}$	$33.58 \pm 4.85 \text{ c}$
	RCM	$54.88 \pm 1.25 \text{ b}$	$21.74 \pm 1.02 \text{ b}$	$29.17 \pm 1.97 \text{ ab}$	$73.37 \pm 8.26 \text{ b}$
	RCMN	$101.37 \pm 4.63 \text{ a}$	$45.44 \pm 8.90 \text{ a}$	$34.89 \pm 2.68 \text{ a}$	$107.39 \pm 11.53 \text{ a}$

NCM: Non-composted manure; CCM: Commonly composted manure; RCM: Rapidly composted manure; RCMN: Rapidly composted manure (equal N with NCM treatment). PFP: Partial factor productivity; AE: Agronomic efficiency; PE: Physiological efficiency; RE: Apparent recovery efficiency.

钾素的偏生产力依然是最高的。

肥料农学利用效率(AE)可以用来很好地评价肥料增产效应。从表4可知,RCM和RCMN处理氮、磷、钾养分的农学利用效率分别为9.04、16.14 kg/kg,12.31、22.55 kg/kg和21.74、45.44 kg/kg,均显著高于施用鲜粪和传统条垛堆肥的处理( $P < 0.05$ ),并且RCMN处理的农学利用效率更高。RCMN处理氮、磷、钾养分的农学利用效率分别是NCM、CCM和RCM处理的3.38、2.77、1.79、7.91、7.39、1.83和8.48、7.61、2.09倍。以上结果表明,与鲜粪和传统条垛堆肥相比,施用快腐粪肥更利于水稻对氮、磷、钾养分的吸收利用,从而增加水稻产量。

肥料生理利用效率(PE)反映的是植株体内养分的利用效率。不同处理氮素的生理利用效率依次为RCM < NCM < RCMN < CCM,其中RCMN和CCM处理氮素的生理利用效率并没有显著差异( $P > 0.05$ )。NCM、CCM和RCMN处理磷素生理利用效率没有显著差异( $P > 0.05$ ),但显著高于RCM处理( $P < 0.05$ )。RCM和RCMN处理钾素的生理利用效率分别是29.17 kg/kg和34.89 kg/kg,二者并无显著差异( $P > 0.05$ ),但高于NCM处理(19.69 kg/kg)和CCM(17.72 kg/kg)。

肥料当季利用效率(RE)反映了作物对施入土壤中肥料养分回收的效率,在土壤肥力低的条件下可以很好地表征作物对肥料养分的吸收状况。从表4可以看出,RCM和RCMN处理肥料氮、磷、钾养分的当季利用效率显著高于NCM和CCM处理( $P < 0.05$ ),NCM和CCM处理肥料养分的当季利用效率并没有显著差异( $P > 0.05$ )。等量和等氮施用快腐粪肥处理氮素的平均当季利用效率为44.93%,分别比施用鲜粪和传统条垛堆肥处理增加231.10%和180.99%。RCM和RCMN处理磷素的平均当季利用效率(20.07%)是NCM和CCM处理的5.29倍。RCMN、RCM、CCM和NCM处理钾素的当季利用效率依次为107.39%、73.37%、33.58%和32.75%,RCMN处理钾素的RE值大于1,表明RCMN处理所施用的钾肥不能满足水稻对钾素的吸收和利用,从而促进水稻对土壤中钾素的吸收。

3种肥料利用效率(AE、PE和RE)之间是相辅相成的关系,肥料生理利用效率可用于揭示植物本身对肥料养分的利用能力,而肥料当季利用效率则可以表明肥料本身对于植物而言其养分的可利用性,若肥料生理利用效率和当季利用效率均较高,势必会促进肥料中养分的吸收和利用、促进作

物生长和增加作物产量,进而增加肥料的农学利用效率。另外,从本研究试验结果看,肥料的当季利用效率与肥料的农学利用效率关系更加紧密。

### 2.3 施用不同方式处理粪肥对CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响

水稻生育期内不同处理CH<sub>4</sub>排放通量动态变化(图1A)表明,不同处理CH<sub>4</sub>排放趋势一致,在水稻淹水后21 d(水稻移栽后14 d)开始出现明显排放,CH<sub>4</sub>排放高峰期出现在淹水后30 d左右水稻分蘖期;随着烤田进行,初期出现脉冲式CH<sub>4</sub>排放后,各处理CH<sub>4</sub>排放通量迅速降低,直至淹水后80 d开始出现明显排放。由于CH<sub>4</sub>的产生需要极端厌氧环境,因而不同水分管理方式会导致土壤通透性和氧化还原状态的差异,影响稻田甲烷产生和氧化,从而对CH<sub>4</sub>排放产生很大影响<sup>[30-31]</sup>。施用不同处理粪肥对CH<sub>4</sub>排放通量也有显著影响。烤田前,稻田一直处于淹水状态,此时CH<sub>4</sub>排放通量高,且不同处理之间存在显著差异( $P < 0.05$ )。与不施肥对照[(3.28 ± 1.37) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]相比,施用鲜粪[(12.31 ± 2.04) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]明显促进了CH<sub>4</sub>排放,而施用传统条垛堆肥[(2.85 ± 0.62) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]并未增加CH<sub>4</sub>排放,其CH<sub>4</sub>排放最低。从表2可知,条垛堆肥中有机碳含量高于鲜粪和快腐粪肥,但CCM处理的CH<sub>4</sub>排放却是最低的,这可能是因为经过堆肥化处理后,粪肥中易降解有机碳和养分已经被堆肥微生物优先利用,而条垛堆肥中剩余有机碳较难被微生物快速利用,从而导致其CH<sub>4</sub>排放低<sup>[32]</sup>。等量[(6.81 ± 0.93) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]和等氮施用快腐粪肥[(4.78 ± 1.04) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]处理的CH<sub>4</sub>排放通量介于两者之间。本研究中,除烤田期和水稻收获前一周外,水稻其他生长时期盆钵均保持淹水状态。烤田后,CH<sub>4</sub>平均排放通量为0.22-3.45 mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,远低于水稻分蘖期。但由于周期长,该时期产生的CH<sub>4</sub>累积排放也不容忽视。此时,NCM处理[(3.45 ± 0.96) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]CH<sub>4</sub>排放通量仍然最高,其次是CK[(1.61 ± 0.64) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]处理,而RCM处理[(0.22 ± 0.09) mg m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>]几乎没有CH<sub>4</sub>排放。与鲜粪相比,快腐粪肥的有机碳含量与鲜粪相当(表2),但RCM处理CH<sub>4</sub>排放显著低于NCM处理,这可能是由于一方面鲜粪中含有的大量产甲烷菌和其他发酵微生物随鲜粪施入土壤后加速了鲜粪的分解,从而可以为产甲烷菌提供更多产甲烷底物,而快腐粪肥经过高温灭菌处理施入土壤后其微生物降解程度低于鲜粪处理,从而限制了产甲烷

底物的生成；另一方面，经过高温和物化促腐处理之后，快腐粪肥中碳的生物可利用性可能较鲜粪有所降低，从而减少了甲烷的生成。

对于N<sub>2</sub>O排放，各处理变化趋势基本相同（图1B）。当盆钵处于淹水状态时，N<sub>2</sub>O排放很低，排放通量几乎为零。而在烤田期，随着盆钵中水位逐渐降低，N<sub>2</sub>O排放逐渐增加；覆水后，N<sub>2</sub>O排放通量又逐渐降至很低水平。该结果与其他人的研究结果<sup>[33-34]</sup>相一致。水稻烤田期土壤水分状况适宜，土壤硝化作用增强从而导致N<sub>2</sub>O排放峰出现。在本研究中，不同施肥处理之间N<sub>2</sub>O排放峰值大小没有显著差异（*P* < 0.05）。

2.4 不同施肥处理温室气体累积排放和综合温室效应

根据水稻不同生长时期CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量与排放时间计算得到水稻整个生育期内CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的累积排放量。从表5可以看出，不同施肥处理之间CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放存在差异。施用鲜粪显著增加了稻田CH<sub>4</sub>排放，其甲烷CH<sub>4</sub>排放总量最高（18.43 g/m<sup>2</sup>）；同时施用鲜粪也增加了N<sub>2</sub>O的排放。条垛堆肥

处理CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量均为最低。施用快腐粪肥未导致CH<sub>4</sub>排放增加，而且其CH<sub>4</sub>排放较不施肥对照甚至略有降低，与NCM处理相比其CH<sub>4</sub>排放降低66.20%；不过，与其他施肥处理相比施用快腐粪肥有增加N<sub>2</sub>O排放的趋势，施用等量快腐粪肥排放的N<sub>2</sub>O为0.68 g/m<sup>2</sup>，是施用鲜粪处理（0.55 g/m<sup>2</sup>）的1.24倍。

全球增温潜势（Global warming potential, GWP）是一个相对辐射强度指数，被用来定量评估不同温室气体排放对全球气温升高造成的影响<sup>[34-36]</sup>。在100年尺度上，CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的GWP分别为CO<sub>2</sub>的25倍和298倍。将1 kg/hm<sup>2</sup> CO<sub>2</sub>的GWP定为1，即可求得CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的GWP。将各处理的CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放量转化为CO<sub>2</sub>当量（Eq-CO<sub>2</sub>）将更有利于评价稻田施用不同处理粪肥的增温效应。

不同施肥处理CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的综合温室效应（GWP）表现为NCM > RCM > RCMN > CK > CCM。该结果表明，施用鲜粪和快腐粪肥均可导致温室效应加强，并且鲜粪的增强

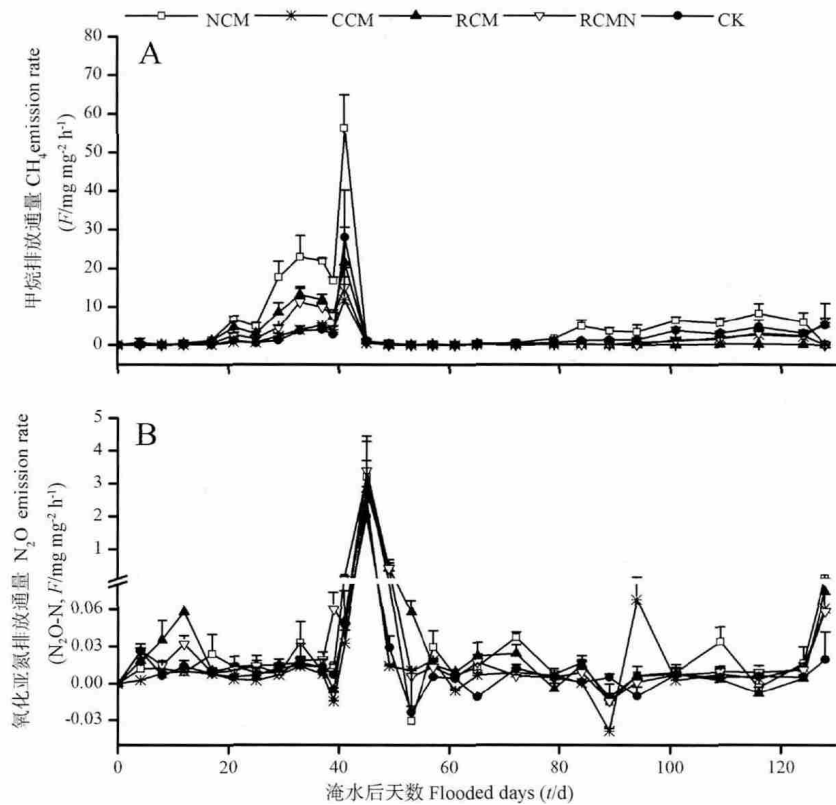


图1 不同处理CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量动态变化。  
Fig. 1 CH<sub>4</sub> (A) and N<sub>2</sub>O (B) emission fluxes of different treatments.

表5 施用不同处理粪肥的温室效应  
Table 5 GHG emission, GWP and GHGI of different treatments

处理 Treatment	CH <sub>4</sub> 累积排放(ρ/g m <sup>-2</sup> ) Cumulative CH <sub>4</sub> emission		N <sub>2</sub> O累积排放(ρ/g m <sup>-2</sup> ) Cumulative N <sub>2</sub> O emission		全球增温潜势 (Eq-CO <sub>2</sub> , GWP/g m <sup>-2</sup> )	单位产量全球增温潜势 (Eq-CO <sub>2</sub> , GHGI/g g <sup>-1</sup> )
	CH <sub>4</sub>	Eq-CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	Eq-CO <sub>2</sub>		
CK	6.79 ± 0.86 b	169.74 ± 21.44 b	0.39 ± 0.16 b	116.71 ± 47.79 b	286.45 ± 31.70 bc	7.58 ± 1.08 b
NCM	18.43 ± 3.29 a	495.34 ± 54.27 a	0.55 ± 0.18 ab	164.27 ± 53.04 ab	646.31 ± 72.20 a	17.28 ± 1.37 a
CCM	5.05 ± 1.72 b	105.06 ± 9.50 b	0.38 ± 0.09 b	112.51 ± 26.69 b	191.31 ± 36.61 c	5.51 ± 1.03 c
RCM	6.23 ± 0.81 b	155.82 ± 20.29 b	0.68 ± 0.14 a	202.23 ± 41.01 a	358.06 ± 28.24 b	6.67 ± 0.58 bc
RCMN	6.00 ± 0.52 b	150.00 ± 13.07 b	0.62 ± 0.19 ab	184.64 ± 57.83 ab	334.64 ± 44.89 b	5.48 ± 0.18 c

不同字母表示存在显著差异（*P* < 0.05）。  
Lowercase letters indicate significant difference (*P* < 0.05). GWP: Global warming potential; GHGI: Greenhouse gas intensity.

作用更加显著, NCM、RCM和RCMN处理的GWP分别是不施肥对照的2.26倍、1.25倍和1.17倍。施用条垛堆肥不会对稻田温室气体排放产生影响, CCM处理的GWP甚至低于不施肥对照。

农业的持续发展需要综合考虑环境效益和经济效益, 并寻求两者的和谐统一。单位产量的全球增温潜势 (Greenhouse gas intensity, GHGI) 将温室气体排放和谷物产量相关联, 可以对不同农业管理措施进行综合评价, 较好地反映环境效益与生产效益的协调统一性<sup>[34-35]</sup>。从表5可以看出, 与不施肥对照相比, 施用鲜粪显著增加GHGI, 而施用传统条垛堆肥和快腐粪肥均可以降低GHGI。目前研究者们对于农作物秸秆还田对水稻产量和稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的研究较多, 包括不同还田量<sup>[37]</sup>、还田方式<sup>[38]</sup>和还田时间<sup>[39]</sup>, 但相关研究表明, 秸秆还田在实际操作过程中会导致许多负面问题, 包括土壤微生物与作物争氮、影响播种质量和出苗、病虫害加重等问题<sup>[40]</sup>, 因此农田增施畜禽粪肥显得尤为重要, 应进一步加强有关安全合理施用畜禽粪肥的研究, 并积极寻找技术经济高效、环保低碳的畜禽粪便处理技术。

### 3 结论

(1) 施用快腐粪肥可以明显促进水稻生长, 且增产效果显著高于鲜粪和条垛堆肥 ( $P < 0.05$ ); 等量和等氮施用快腐粪肥处理的水稻产量分别比鲜粪和条垛堆肥处理增加38.72%、35.80%和44.67%、41.63%。快腐粪肥提高水稻产量的原因在于其可以促进水稻分蘖, 同时增加水稻干物质在籽粒中的分配。与传统条垛堆肥工艺相比, 物化促腐技术大大缩短了畜禽粪便处理的时间, 同时有效地减少了养分的损失, 畜禽粪便经物化促腐技术处理后增产效果明显, 综合考虑快腐粪肥的养分含量, 其生产成本基本与条垛堆肥持平。

(2) 等量和等氮条件下, 快腐粪肥处理的氮、磷、钾养分的农学利用效率和当季利用效率均显著高于施用鲜粪和条垛堆肥处理 ( $P < 0.05$ )。

(3) 与鲜粪和快腐粪肥相比, 施用条垛堆肥处理的CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O排放以及单位产量全球增温潜势 (GHGI) 均为最低。

(4) 施用鲜粪显著增加CH<sub>4</sub>排放, N<sub>2</sub>O排放增加不显著 ( $P > 0.05$ ), 其GHGI显著高于条垛堆肥和快腐粪肥 ( $P < 0.05$ ); 鲜粪经快速物化促腐处理后施用可以显著减少CH<sub>4</sub>排放 ( $P < 0.05$ ), 即使N<sub>2</sub>O排放有增加趋势, 但其GHGI显著降低 ( $P < 0.05$ ); 与施用鲜粪处理相比, 等量和等氮施用快腐粪肥处理的GHGI分别降低61.40%和68.29%。

(5) 新型物化促腐技术可以实现畜禽粪便的快速处理, 并且经物化促腐处理后的粪肥可以显著增加水稻产量同时显著减少CH<sub>4</sub>排放、降低GHGI。表明该技术经济高效、环保低碳, 具有良好的推广价值, 可广泛应用于畜禽养殖场的粪便处理和有机肥生产。

### 参考文献 [References]

1 王方浩, 马文奇, 奚争霞, 马林, 刘小利, 许俊香, 张福锁. 中国畜禽

粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26 (5): 614-617 [Wang FH, Ma WQ, Dou ZX, Ma L, Liu XL, Xu JX, Zhang FS. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China [J]. *China Environ Sci*, 2006, 26 (5): 614-617]

2 张田, 卜美东, 耿维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31 (5): 1241-124 [Zhang T, Bu MD, Geng W. Pollution status and biogas-producing potential of livestock and poultry excrements in China [J]. *Chin Environ Sci*, 2012, 31 (5): 1241-1249]

3 张福锁. 中国养分资源综合管理策略和技术[C]//2006年中国农学会学术年会论文集, 北京, 2006: 371-374

4 苏杨. 我国集约化畜禽养殖场污染问题研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14 (2): 15-18 [Su Y. Research of countermeasures on waste treating of intensive livestock and poultry farms in China [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2006, 14 (2): 15-18]

5 李远. 我国规模化畜禽养殖业存在的环境问题与防治对策[J]. 上海环境科学, 2002, 21 (10): 597-599 [Li Y. Existing problems and prevention and control countermeasures of intensive livestock cultivation in China [J]. *Shanghai Environ Sci*, 2002, 21 (10): 597-599]

6 罗建新, 燕慧, 郭维. 畜禽粪便资源的肥料化利用[J]. 作物研究, 2010, 24 (4): 297-300 [Luo JX, Yan H, Guo W. Resource utilization of livestock and poultry manure [J]. *Crop Res*, 2010, 24 (4): 297-300]

7 陈志宇, 苏继影, 栾冬梅. 畜禽粪便堆肥技术研究进展[J]. 当代畜牧, 2004 (10): 41-43

8 Martens W, Böhm R. Overview of the ability of different treatment methods for liquid and solid manure to inactivate pathogens [J]. *Bioresource Technol*, 2009, 100 (22): 5374-5378

9 Gould JM. Studies on the mechanism of alkaline peroxide delignification of agricultural residues [J]. *Biotechnol Bioeng*, 1985, 27 (3): 225-231

10 Simujide H, Aorigele C, Wang C, Manda B, Ma L. Effect of calcium cyanamide on pathogenic *Escherichia coli* during mesophilic composting and impact on composting process [J]. *Global Nest J*, 2012, 14 (4): 460-467

11 黄耀, 张稳, 郑循华, 韩圣慧, 于永强. 基于模型和GIS技术的中国稻田甲烷排放估计[J]. 生态学报, 2006, 26 (4): 980-988 [Huang Y, Zhang W, Zheng XH, Han SH, Yu YQ. Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26 (4): 980-988]

12 石生伟, 李玉娥, 刘运通, 万运帆, 高清竹, 张仲新. 中国稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43 (14): 2923-2936 [Shi SW, Li YE, Liu YT, Wan YF, Gao QZ, Zhang ZX. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from rice field and mitigation options based on field measurements in China: an integration analysis [J]. *Sci Agric Sin*, 2010, 43 (14): 2923-2936]

13 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 何加骏, 张岳芳. 猪粪沼液施用对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放及温室效应的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17 (5): 124-131 [Sun GF, Zheng JC, Chen LG, He JJ, Zhang YF. Effects of pig manure and biogas slurry application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions and their greenhouse effects on paddy field [J]. *J Chin Agric Univ*, 2012, 17 (5): 124-131]

14 宇万太, 姜子绍, 马强, 周桦. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15 (5): 1057-1064 [Yu WT, Jiang ZS, Ma Q, Zhou H. Effects of application of manure on soil fertility [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15 (5): 1057-1064]

15 邹原东, 范继红. 有机肥施用对土壤肥力影响的研究进展[J]. 中国



- 农学通报, 2013, **29** (3): 12-16 [Zou DY, Fan JH. Review on effect of organic fertilizer on soil fertility [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, **29** (3): 12-16]
- 16 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 欧阳竹. 不同肥料结构对水稻群体干物质生产及养分吸收分配的影响[J]. 土壤通报, 2004, **35** (2): 199-202 [Yang CM, Yang LZ, Yan TM, Ouyang Z. Effects of nutrient regimes on dry matter production and nutrient uptake and distribution by rice plant [J]. *Chin J Soil Sci*, 2004, **35** (2): 199-202]
  - 17 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 秦道珠, 八木一行, 宝川靖和. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(10): 3133-3139 [Xu MG, Li DC, Li JM, Qin DZ, Yagi K, Hosen Y. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and yield of rice in Hunan of China [J]. *Sci Agric Sin*, 2008, **41** (10): 3133-3139]
  - 18 李先, 刘强, 荣湘民, 谢桂先, 张玉平, 彭建伟, 宋海星. 有机肥对水稻产量和品质及氮肥利用效率的影响[J]. 湖南农业大学学报, 2010, **36** (3): 258-262 [Li X, Liu Q, Rong XM, Xie GX, Zhang YP, Peng JW, Song HX. Effects of organic fertilizers on yield and quality of rice grains and nitrogen use efficiency [J]. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci)*, 2010, **36** (3): 258-262]
  - 19 李吉进, 宋东涛, 邹国元, 张青, 聂俊华. 不同有机肥料对番茄生长及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2008, **24** (10): 300-305 [Li JJ, Song DT, Zou GY, Zhang Q, Nie JH. Effect of different organic fertilizers on growth and quality of tomato [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, **24** (10): 300-305]
  - 20 霍莲杰, 纪雄辉, 吴家梅, 彭华, 朱坚. 有机肥施用对稻田甲烷排放的影响及模拟研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32** (10): 2084-2092 [Huo LJ, Ji XH, Wu JM, Peng H, Zhu J. The effect of organic manures application on methane emission and its simulation in paddy fields [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, **32** (10): 2084-2092]
  - 21 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱, 万运帆. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, **22** (7): 143-148 [Qin XB, Li YE, Liu KY, Wan YF. Methane and nitrous oxide emission from paddy field under different fertilization treatments [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2006, **22** (7): 143-148]
  - 22 马静, 徐华, 蔡祖聪. 施肥对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤, 2010, **42** (2): 153-163 [Ma J, Xu H, Cai ZC. Effect of fertilization on methane emissions from rice fields [J]. *Soils*, 2010, **42** (2): 153-163]
  - 23 陈苇, 卢婉芳, 段彬伍, Wassmann R, Lantin RS. 猪粪与沼气渣对双季稻田甲烷排放的影响[J]. 生态学报, 2001, **21** (2): 265-270 [Chen W, Lu WF, Duan BW. Impacts of application of pig manure and biogas sludge on methane emissions in the double-cropping ricefields [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21** (2): 265-270]
  - 24 NY 525-2012 中华人民共和国农业行业标准[S]
  - 25 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000 [Lu RK. Methods of Soil Agricultural Chemical Analysis [M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000]
  - 26 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣凤. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, **45** (5): 915-924 [Zhang FS, Wang JQ, Zhang WF, Cui ZL, Ma WQ, Chen XP, Jiang RF. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedol Sin*, 2008, **45** (5): 915-924]
  - 27 金珂旭, 王正银, 樊驰, 刘辉, 何德清. 不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响[J]. 土壤学报, 2014, **51** (6): 1369-1377 [Jin KX, Wang ZY, Fan C, Liu H, He DQ. Effects of potassium fertilizer on yield, quality and nutrients of cabbage relative to formula of the fertilizer [J]. *Acta Pedol Sin*, 2014, **51** (6): 1369-1377]
  - 28 蔡祖聪, 徐华, 马静. 稻田生态系统CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009 [Cai ZC, Xu H, Ma J. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009]
  - 29 Dobermann AR. Nitrogen use efficiency-state of the art [C]//Paper of the IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers. Frankfurt, Germany, 2005
  - 30 李香兰, 徐华, 曹金留, 蔡祖聪, 八木一行. 水分管理对水稻生长期CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. 土壤, 2007, **39** (2): 238-242 [Li XL, Xu H, Cao JL, Cai ZC, Yagi K. Effect of water management on CH<sub>4</sub> emission during rice-growing season [J]. *Soils*, 2007, **39** (2): 238-242]
  - 31 张广斌, 李香兰, 马静, 徐华, 蔡祖聪. 水分管理对稻田土壤CH<sub>4</sub>产生、氧化及排放的影响[J]. 生态环境学报, 2009, **18** (3): 1066-1070 [Zhang GB, Li XL, Ma J, Xu H, Cai ZC. Effects of water management on production, oxidation, and emission of CH<sub>4</sub> from rice paddy soil [J]. *Ecol Environ Sci*, 2009, **18** (3): 1066-1070]
  - 32 陈槐, 周舜, 吴宁, 王艳芬, 罗鹏, 石福孙. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2006, **12** (5): 726-733 [Chen H, Zhou S, Wu N, Wang YF, Luo P, Shi FS. Advance in studies on production, oxidation and emission flux of methane from wetlands [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2006, **12** (5): 726-733]
  - 33 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 王跃思, Ronald S. 不同种类有机肥施用对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, **24** (4): 7-12 [Zou JW, Huang Y, Zong LG, Wang YS, Ronald S. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy [J]. *Chin J Environ Sci*, 2003, **24** (4): 7-12]
  - 34 罗良国, 近藤始彦, 伊藤纯雄. 日本长期不同施肥稻田N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放特征及其环境影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21** (12): 3200-3206 [Luo LG, Kondo M, Itoh S. N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission from Japan rice fields under different long-term fertilization patterns and its environmental impact [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21** (12): 3200-3206]
  - 35 Qin YM, Liu SW, Guo YQ, Liu QH, Zou JW. Methane and nitrous oxide emissions from organic and conventional rice cropping systems in Southeast China [J]. *Biol Fert Soils*, 2010, **46** (8): 825-834
  - 36 Sainju UM, Stevens WB, Caesar-Tonthat T, Liebig MA, Wang J. Net global warming potential and greenhouse gas intensity influenced by irrigation, tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization [J]. *J Environ Qual*, 2014, **43** (3): 777-788
  - 37 Lee CH, Park KD, Jung KY, Ali MA, Lee D, Gutierrez J, Kim PJ. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2010, **138** (3): 343-347
  - 38 Ma J, Ma ED, Xu H, Yagi K, Cai ZC. Wheat straw management affects CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41** (5): 1022-1028
  - 39 徐华, 蔡祖聪, 贾仲君, 鹤田治雄. 前茬季节稻草还田时间对稻田CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. 农业环境保护, 2001, **20** (5): 289-292 [Xu H, Cai ZC, Jia ZJ, Tsuruta H. Effect of rice straw application time in previous crop season on CH<sub>4</sub> emission from rice paddy field [J]. *Agro-environ Prot*, 2001, **20** (5): 289-292]
  - 40 刘文志. 作物秸秆还田的综合评价[J]. 现代化农业, 2008, **2** (2): 17-19 [Liu WZ. Comprehensive assessment of the effects of straw application to field [J]. *Mod Agric*, 2008, **2** (2): 17-19]