

# 寒地稻作减排农艺途径的研究进展

谢婷婷

(黑龙江省农业科学院 耕作栽培研究所,黑龙江 哈尔滨 150086)

**摘要:**借助农艺手段来减少稻田温室气体排放是应对全球气候变化的重要途径,简要介绍了品种选择、水肥管理、农药施用及动力变化等农艺措施对稻田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体排放的影响,对黑龙江省在进行减排型稻作的农艺途径进行研究分析。结果表明:低碳高产研究是黑龙江省农业可持续发展的内在要求,是实现农业节本增效、农民增收的有效途径;低碳高效是转变农业发展方式的必然选择。

**关键词:**稻田;  $\text{CH}_4$ ;  $\text{N}_2\text{O}$ ; 减排; 农艺途径

**中图分类号:**S511 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2767(2015)07-0153-05 DOI:10.11942/j.issn1002-2767.2015.07.0153

中国是世界上水稻种植面积最大、总产量最高的国家,“黑龙江大米”也被公认为中国人民喜食的“口粮”品种。良好发展水稻的生产,提高水稻总产量和粳米品质,对于确保我国人民“口粮”量达到安全和维持社会稳定,都具有重要的战略意义。在水稻生产总量中,黑龙江省水稻具有举足轻重的地位与作用,直接影响着我国粳米市场的稳定和人民的“口粮安全”。随着经济发展与科技进步,尤其是育秧大棚推广以来,黑龙江水稻从规模与水平上快速发展,黑龙江省水稻种植面积由 1978 年的 88.6 万  $\text{hm}^2$  发展到 2013 年的 952.68 万  $\text{hm}^2$ ,占全国水稻面积的 24%。30 年来,黑龙江省水稻单产水平由 1978 年的 4 365  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  发展到 2013 年 6 992.7  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,单产提高 1.60 倍,总产由 1978 年的 440 万 t 发展到 2013 年 2 220.6 万 t,增加 5.05 倍,因此黑龙江的水稻生产稳步增长。2014 年黑龙江省水稻播种面积几乎占了东北水稻面积的一半,因此黑龙江省稻区已成为:国之仓,民之依托,黑龙江省水稻的产量将直接影响到我国人民的口粮安全和社会稳定。

黑龙江省稻区节能减排是我国节能减排的重要组成部分,潜力巨大,前景广阔。因此,在新形势下,黑龙江省稻区需要重新审视原有的耕作栽培制度,研究探讨新型种植模式,高产与低碳并重。为了应对气候变化,我国农业面临着固碳、节能、减缓温室气体排放等压力。农田的种植、翻

耕、施肥、灌溉等管理措施不仅长期改变着农田生态系统中的化学元素循环,而且给全球气候变化带来影响。黑龙江省农作区农业耕作土壤在高强度集约化利用和高化学投入下的有机碳库损失严重。大面积的农田温室气体排放受到国际关注,减少温室气体排放,以便应对全球气候变化带来的不利影响。种植业的循环生产体系建设急需通过秸秆还田、有机与无机配合的科学施肥、合理水肥管理、少免耕等技术提高农田的增碳能力。因此,我国农业要实现可持续发展的战略目标,必须从建设良好农业生态系统入手,积极推进农业耕作制度改革,改革不合理的耕种方式,建立低碳高效的耕作制度,应用保护性耕作机械化技术,改善农业生产基础条件,增强农业增长后劲。

## 1 黑龙江省稻区减排现状

稻田在我国粮食安全和生态安全保障上起着至关重要的作用,是我国最重要的农田生态系统,但是随着我国对农业生产重视程度的不断增加,由于人们习惯沿用传统的耕作方式进行农业生产,长期对土地的大肆掠夺,造成农田土壤物质与能量的收支失衡,土壤肥力日趋下降,土地得不到休养生息,农业生态系统恶化,严重制约了我国粮食产量的进一步提高。全球 16% 左右的甲烷( $\text{CH}_4$ )来自稻田系统,其中我国稻田甲烷年排放量约占全球的 10%,约为 500 万 t。

### 1.1 灌溉对减排的影响

黑龙江省普遍存在农业投入品,如灌溉用水、农药、化肥等利用效率偏低,资源浪费与环境污染严重。目前黑龙江省水田 80% 以上仍采用大水漫灌方式,用水量达 13 500  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,即使采用节水栽培措施的水田,节水力度不大,用水量也达

收稿日期:2015-05-10

作者简介:谢婷婷(1985-),女,黑龙江省哈尔滨市人,学士,实习研究员,从事农学专业方面研究。E-mail:57193048@qq.com。

9 000~10 500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 远超过水稻生长发育的实际需水量 8 025 m<sup>3</sup>, 稻田灌溉用水有效利用系数只有 0.46, 而发达国家则达 0.8 以上。漫灌方式, 不仅造成水资源浪费, 同时由于稻田长期处于淹水状态, 促进了 CH<sub>4</sub> 的排放。此外, 有些地区由于过度开采地下水, 导致了一系列严重的生态环境问题, 如在井灌区形成大面积地下水降落漏斗, 不合理排水灌溉使得灌区存在不同程度的盐渍化问题。

1.2 黑龙江省农药利用及农用柴油对减排的影响

黑龙江地区粮食产量的增加伴随着化肥施用量的大幅增加, 化肥对产量的贡献率却逐渐下降。化肥利用率不高是黑龙江地区普遍存在的事实, 氮肥的当季利用率平均仅为 30% 左右, 而氮肥的平均损失率约为 45% (见图 1)。随着气候变暖, 农业自然灾害发生频率也呈上升趋势, 农药施用量也逐年增加, 导致农用成本增加, 环境污染严重 (见图 2)。黑龙江省农用柴油消耗量由 2004 年的 93 t 增长到 2008 年的 153 t, 减少农用机械的直接消耗是实现节能减排最简便行之有效措施 (见图 3)。因此黑龙江稻区的粮食增产是以高投入为代价的。因此, 农业投入品的有效使用是农业节能减排的一个重点; 再次, 农业生物质, 主要有农作物秸秆没有得到有效利用, 既浪费资源又污染环境; 第三, 随着农业机械化程度的普遍提高, 农业生产中直接能源消耗逐年增加。黑龙江省是中国的产粮大省, 机械化作业水平全国最高。

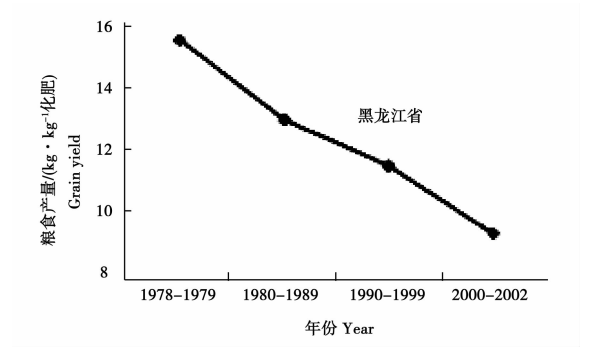


图 1 黑龙江省化肥的利用情况  
Fig. 1 Utilization of fertilizer in Heilongjiang province

1.3 稻田温室气体形成机制

对于稻田的节能减排方式而言, 从 20 世纪 80 年代起, 我国科研工作者已经开始通过系统的偏理论性的对稻田甲烷(CH<sub>4</sub>)的输送、转化和产

生机制进行了研究, 探讨了控制稻田甲烷排放的有用措施, 建立了预测和估算稻田甲烷排放的数学模型, 在稻田甲烷产生率、排放率以及与环境条件的关系等方面获得了重大突破, 以此为证改变了世界上关于全球和我国稻田甲烷排放总量的估算<sup>[1-2]</sup>。甲烷化学式 CH<sub>4</sub>, 是产甲烷菌在大自然中与水解菌等协同作用在极端厌氧的条件下, 使有机质甲烷化而产生的; 而 N<sub>2</sub>O 的产生主要是在嫌气条件下, 多种微生物将硝态氮还原成 N<sub>2</sub>O 的反硝化过程。CH<sub>4</sub> 排放机理分有 3 种途径, 第一阶段为有机物的发酵产生单糖、氨基酸和脂肪酸等; 第二阶段为产酸产氢阶段, 使低级脂肪酸和醇类转化成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>; 第三阶段是甲烷菌利用 H<sub>2</sub> 还原 CO<sub>2</sub> 成甲烷<sup>[3]</sup> (见图 4)。目前在对稻田甲烷深入研究的基础上, 从 1993 年起又开展了对农田氧化亚氮和二氧化碳排放的研究。在农田氧化亚氮排放的时间变化及环境控制因素, 特别是排放量与土壤温度及湿度的关系、排放与施肥、N<sub>2</sub>O 排放与 CH<sub>4</sub> 相互消长关系以及减排措施选择的关系等方面的研究都取得了新的进展<sup>[4]</sup>。

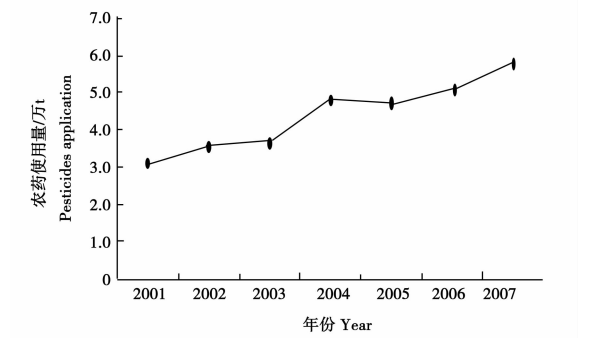


图 2 黑龙江省农药施用变化趋势  
Fig. 2 Pesticides trends in Heilongjiang province

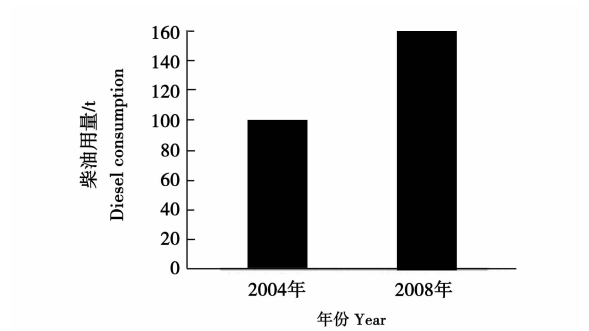


图 3 黑龙江省农用柴油消耗量  
Fig. 3 Agricultural diesel consumption of Heilongjiang province

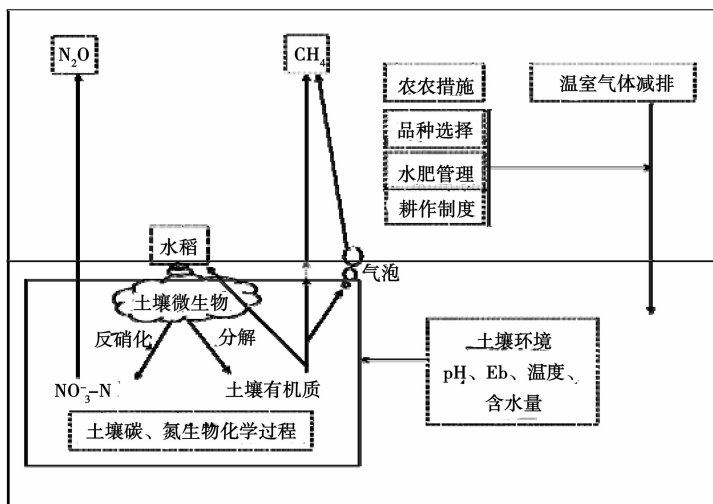


图4 稻田温室气体形成机制及减排的农艺途径

Fig. 4 Paddy formation mechanism and emissions of greenhouse gases agronomic approach

## 2 寒地稻田温室气体减排的农艺途径

### 2.1 品种方面

**2.1.1 抗病、耐旱、氮高效品种选育** 已有的国内外研究表明,水稻的氮素利用效率存在显著的基因型差异,对水稻氮素利用率进行遗传改良是可行的<sup>[5]</sup>。中国常年水稻种植面积为3 000万hm<sup>2</sup>,按全国年推广种植20%的氮高效新品种计算(利用率按国际公认的标准),则可至少减少36万t氮肥(纯N)的损失,折合人民币8.4亿元。同时还将减少稻米及环境污染,刺激出口量的增加,因而其经济、社会效益以及对社会的影响都将十分巨大。同样,在水稻抗病虫害方面,通过选择抗性品种,可明显减少农药施用量。培育抗旱栽培稻品种可较大程度地节约水资源。

**2.1.2 稻田品种布局** 对于品种选择、栽培技术、气候条件等生产要素的改变,作物病虫害种类、生理小种、生物型也在变化。要使农田生态系统的病虫害危害持续在一个较低水平,必须增加生态系统内的生物多样性。一方面在品种布局上合理搭配不同抗性品种,年际间不同品种轮换种植,另一方面,选择品质相似品种进行混栽,已有研究表明,水稻品种多样性混栽对稻瘟病有明显的控制效果。混栽区的间栽品种与净栽区的间栽品种进行比较,稻瘟病叶瘟减轻,病叶面积率明显降低;抗病性品种与感病性品种间栽控制稻瘟病的方法简单易行。不仅可以减少因稻瘟病造成的产量损失,还能减少农药施用1~2次,从而降低生产成本,减轻农药对生态环境的负面影响,有效提

高经济效益。

**2.1.3 抗病育种、抗旱育种** 近几年专家学者针对黑龙江省水稻种质资源进行了抗旱筛选,筛选出牡丹江22、东农425、垦稻12、牡丹江19、龙稻6号等抗旱综合指数达60%以上的水稻种质资源。新近成立的北方水稻分子育种联合研究中心,省政府投资800万元用于水稻种质资源筛选及相关配套栽培技术研究。

### 2.2 稻田水肥管理

**2.2.1 稻田水分状况是影响CH<sub>4</sub>释放的决定性因素** 改变水管理方式可以改变甲烷菌生存的厌氧环境从而控制甲烷产生和排放。湿润灌溉稻田CH<sub>4</sub>排放通量较淹水灌溉(保持4~8cm水层)少26%<sup>[6]</sup>。间歇灌溉CH<sub>4</sub>排放量仅为传统灌溉的40%左右。我国采用湿润灌溉和间歇灌溉等节水技术以来,稻田CH<sub>4</sub>年排放量由20世纪80年代初的850万t下降到目前的510万t<sup>[7]</sup>。鉴于我国水资源日趋短缺的实际,推广节水灌溉无疑有助于实现资源高效和节能减排的双赢。

施用化肥可能影响土壤pH、Eh等,从而影响CH<sub>4</sub>排放。(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>等硫酸盐肥料的使用会大幅度减少CH<sub>4</sub>排放,其原因在于SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>存在下的硫酸盐还原细菌和CH<sub>4</sub>菌之间的底物竞争关系以及土壤Eh下降减缓有关<sup>[8]</sup>。但是硫酸盐肥料的使用将导致土壤有机质降解加速产生更多的CO<sub>2</sub>,因此必须考虑减排和增排之间的平衡<sup>[9]</sup>。很多研究表明,稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放存在互为消长的关系<sup>[10]</sup>。土壤水分状况是影

响稻田之间消长排放的关键因素。中期晒田措施是减少 CH<sub>4</sub> 排放的有效途径,但也显著增加了 N<sub>2</sub>O 的排放。但是对于全年的 N<sub>2</sub>O 排放总量而言,晒田所具有的 N<sub>2</sub>O 的增排效应可以忽略不计<sup>[11]</sup>。稻田节水灌溉应包含两方面内容,一是稻区工程节水,通过农田水利设施改造,减少灌渠跑、冒、滴、漏所造成的水资源浪费;二是技术节水,改变传统大水漫灌方式,采用间歇灌溉、干湿交替灌溉等节水灌溉方式,减少水资源投入的同时缩短田间淹水时间,以此控制 CH<sub>4</sub> 排放。结合黑龙江省稻作特点,2009 年对浅湿干灌溉、间歇灌溉、好气灌溉等灌溉方式的节水效果进行研究(见表 1)。

表 1 不同灌溉方式下的水稻灌水量  
Table 1 Rice irrigation water under different irrigation methods

品种 Varieties	灌水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) Irrigation water			
	浅湿干灌溉 Shallow wet dry irrigation	间歇灌溉 Intermittent irrigation	好气灌溉 Aerobic irrigation	淹水灌溉 Flooding irrigation
松粳 9 号	5040	4830	5145	5670
龙稻 5 号	4875	4650	4965	5430
龙粳 14	4710	4365	4575	5040

由于 2009 年 6-7 月全省降雨频繁,在营养生长期基本没有进行人工灌溉,靠降雨量就已经使水稻处于正常生长,致使今年的灌溉用水量较往年减少一半。但从表 1 可以得出,综合 4 种灌溉方式用水量,可以看出间歇灌溉模式的节水量最多。间歇灌溉既能满足水稻对田间水分的要求较高,又能改善稻田土壤通透性,使其供氧充足,较好水灌溉条件下土壤通气条件改善,增强根系活力,而且稻田也处于一个良好的水分循环中,明显提高水分利用,协调了根系衰老与产量之间的矛盾,对水稻生长发育创造了良好的生长环境。间歇灌溉与浅湿干灌溉相比,间歇灌溉有一个明确的无水层时期,能够为水稻根系提供更为充足的氧气,使水稻根系的生长明显,同时,间歇灌溉田块含水量又高于好气灌溉,为稻苗生长提供充足水分。间歇灌溉既避免了浅湿干灌溉和好气灌溉的缺点,又结合了这两种灌溉方式的优点,因此间歇灌溉模式是以上 4 种灌溉模式中最优的节水灌溉模式。

2.2.2 氮肥优化 肥料施用方式、种类、施用时间

和施用量均对稻田 N<sub>2</sub>O 排放产生重要的影响。氮肥的施用对稻田土壤 N<sub>2</sub>O 排放有明显的促进作用<sup>[12]</sup>。化肥氮转化为 N<sub>2</sub>O 的比例在 0.1%~1.4%,其转化率受农艺措施和环境因素影响。相对于含氮量相同的有机肥,化肥对农田中 N<sub>2</sub>O 排放贡献更大。稻田氮肥的过量施用为反硝化过程提供丰富的氮素来源,能促进 N<sub>2</sub>O 释放。提高磷肥比例,减少化学氮肥用量,可降低稻田 N<sub>2</sub>O 释放<sup>[13]</sup>。氮肥优化包括氮肥精确定量与精确定时两个方面,即明确氮肥的最佳施用水平与最佳施用时期,以最少的肥料,获取预期的优质、高产的稻谷量,收到省肥、高效、环境优良的综合效果,构成了水稻精确定量施肥的技术系统研究方法,并加强此类技术的推广与示范。结合黑龙江寒地稻作特点,北方水稻分子育种联合研究中心开展了黑龙江垦区水稻生产氮肥需要量与利用率试验,并在垦区进行了寒地水稻氮素调控新型施肥技术示范<sup>[14-16]</sup>。

2.3 动力改造

黑龙江稻田灌溉动力主要采用柴油机,部分地区采用电动机。可以考虑动力改造来实现节能减排目标。改燃油动力为电力。黑龙江省自 2005 年起,对部分水田灌溉动力进行了调整,改燃油动力为电力,目前电动机灌排动力所占比重由 2004 年的 21% 上升到 2008 年的 26%<sup>[17]</sup>。

3 结论

3.1 低碳高产研究是黑龙江省农业可持续发展的内在要求

受世界人口增长、全球食品框架升级,以及能源紧张等因素的影响,全球粮食供需矛盾越来越明显,对我国粮食安全也产生了较大负作用。特别是当前国际粮食供应紧张的形势凸现了粮食安全的极端重要性。黑龙江省作为我国重要商品粮基地和粮食大省,是我国 21 世纪粮食增产和粮食供给能力最大的地区,同时也是国家新增千亿斤粮食生产建设的主要区域,制定了“黑龙江省千亿斤粮食产能工程建设总体规划”。通过对农用机械的改装,灌排动力的调整,以及节水、节药、节肥等节能技术的集成组装,建立新型的低碳高产耕作栽培体系,大面积推广应用作物高产、资源高效、环境友好型技术模式,恢复并提高黑龙江省农业可持续发展的能力,确保黑龙江省“大粮仓”的地位,保障国家粮食安全<sup>[18-20]</sup>。

### 3.2 低碳高产研究是实现农业节本增效、农民增收的有效途径

我国当前的农业已是“石油农业”,也就是说,化肥、农药、农业机械化与自动化都离不开以石油为代表的化石能源。在我国,仅化肥农药就占粮食生产成本的 1/4 左右。石油价格直接影响着我国农业的生产成本。从 2004 年以来,以美元计价的原油每桶由 40 美元上升到最近的 130 美元,从而使我国农业生产成本的大幅度上升。从 2007 年以来,国内化肥价格上涨 40% 以上,局部地区农膜价格上涨 10% 以上,肥价上涨 50%~80%。我国种植业生产过程中外源购买性能源投入居高不下,能源消耗大,急需研究开发有效减少农田外部能源投入的关键技术,降低能耗和生产成本,增加农民收入<sup>[21-22]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 梁巍,岳进,吴劼,等.微生物生物量 C、土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田甲烷排放[J].应用生态学报,2003,14(12):2278-2280.
- [2] 黄耀.中国的温室气体排放、减排措施与对策[J].第四纪研究,2006,26(5):722-732.
- [3] 赵建波.保护性耕作对农田土壤生态因子及温室气体排放的影响[D].泰安:山东农业大学,2008.
- [4] 刘正辉,乔江方,李刚华,等.稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 减排的农艺途径探讨[C]//发展低碳农业应对气候变化——低碳农业研讨会论文集,2010.
- [5] 戴万宏,王益权,黄耀,等.农田生态系统土壤 CO<sub>2</sub> 释放研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(12):1-7.
- [6] Iqbal M. Potential rates of denitrification in field soils in southern England[J]. Agricul Soil 1992,118:223-227.
- [7] 白朴,张国平,曾玮,等.稻田周年减排增汇技术研究[J].上海农业学报,2015,2(12):57-59.
- [8] 韩鹏飞,郭敏.不同肥料的施用对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 减排的影响及其减排措施[J].安徽农业科学,2009,37(17):

8153-8155.

- [9] Milkha S A, Refiner W, Buenol C, et al. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil[J]. Plant and Soil, 2001, 230: 77-86.
- [10] 王毅勇,陈卫卫,赵志春,等.三江平原寒地稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放特征及排放量估算[J].农业工程学报,2008,24(10):170-176.
- [11] 李晶,王明星,王跃思,等.农田生态系统温室气体排放研究进展[J].大气科学,2003(4):740-749.
- [12] Milkha S A, Refiner W, Buenol C, et al. Impact of root exudates of different cultivars and plant development stages of rice (*Oryza sativa* L.) on methane production in a paddy soil[J]. Plant and Soil, 2001, 230: 77-86.
- [13] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: Sensitivity and upscaling [J]. Global Biogeochem Cycles, 2004, 18:.
- [14] 李香兰,徐华,曹金留,等.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.
- [15] 东迎欣,韩晓君,边延辉,等.农业生产中的环境生态风险分析——以黑龙江省千亿斤粮食生产能力建设规划为例[J].黑龙江水利科技,2009(10):26-27.
- [16] 高旺盛,陈源泉,董文.发展循环农业是低碳经济的重要途径[J].中国生态农业学报,2010,9(15):88-94.
- [17] 朱啸波.粮价长期低位不可行[J].中国财经报,2008,5(10):145-149.
- [18] 罗志祥,苏泽胜,施伏芝,等.氮肥高效利用水稻育种的现状与展望[J].中国农学通报,2003,2(28):217-225.
- [19] 陈温福,潘文博,徐正进.我国水稻生产现状及发展趋势[J].沈阳农业大学学报,2006,12(25):57-64.
- [20] 陈关,李术英,石庆华.施氮量对直播稻群体发育及产量的影响[J].作物杂志,2011,2(15):120-126.
- [21] 蔡洪法.我国发展粮食生产的新情况与对策[J].农产品市场周刊,2004(2):10-13.
- [22] 程志刚.水稻生产机械化发展模式优选[J].湖北农机化,2009,12(20):15-18.

## Research Progress of Agricultural Emission Ways for Cold Rice

XIE Ting-ting

(Research Institute of Tillage and Cultivation, Heilongjiang Academy of Agricultural Science, Harbin, Heilongjiang 150086)

**Abstract:** Application of agronomic means reducing paddy greenhouse gas emissions is responding to global climate change of important ways. The variety selection, fertilizer, pesticide application management and the dynamic change agronomic measures on rice, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions of greenhouse gases were introduced, and agricultural emission ways for Heilongjiang province were studied and analyzed. The results showed that low carbon and high yield was the internal requirement of Heilongjiang province for sustainable development, it was also effective way to realize the agricultural efficiency, reduce cost and increasing the income for farmers; low carbon and high efficiency was the inevitable choice to change the agricultural development.

**Keywords:** rice paddy; CH<sub>4</sub>; N<sub>2</sub>O; emission reduction; agronomic way