

网络出版日期:2017-06-05
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20170605.1715.010.html>

麦田间作大蒜减排温室气体:兼顾经济环境效益

陈素云,吴洪生,李季,姚东良,赵月,陈凯凯
(南京信息工程大学 应用与气象学院农业资源与环境系,南京 210044)

摘 要 为应对气候变化,实现农业减排,发展生态农业,提高土地资源利用率,于2013—2014年在南京信息工程大学农业气象试验站,进行冬小麦—大蒜间作小区温室气体减排试验,研究冬小麦间作大蒜对麦田CH₄排放通量的影响,并对其经济与环境效益进行比较分析。结果表明:对冬小麦生长,冬小麦田间作大蒜能分别提高小麦植株鲜质量、穗质量、千粒质量134.67%、2.20%、3.51%;与对照单作小麦处理相比,间作大蒜处理下单位面积农田投入与产出比从1:9.8提高到1:16.7,即在相同投入成本的情况下,产出提高70.41%;对小麦间作大蒜处理下,在小麦抽穗期和灌浆期,比对照处理的土壤CH₄排放通量分别减少38.35%、16.59%;在小麦整个生长季内,土壤CH₄排放通量累计减少了53.45%。研究显示,大蒜—小麦种植模式,不仅可以提高冬小麦的产出,还同时减少土壤CH₄的排放,减缓温室效应,具有节能减排、提高经济环境效益双重功能,是发展可持续生态农业的一个重要途径。

关键词 冬小麦;大蒜;CH₄;经济效益;环境效益
中图分类号 X511;S512.1;F32 **文献标志码** A **文章编号** 1004-1389(2017)06-0832-08

随着温室气体排放的不断增加,气候变化问题越来越受到人类的广泛关注,并已经成为公认的全球性问题。IPCC第4次评估报告中指出^[1]:近百年来,全球平均温度的不断升高很可能是由于人为排放温室气体总量的不断增加所引起的,并且从2003年至2012年全球陆海平均气温比1850—1900年升高约0.78℃。

大气中的CO₂、甲烷(CH₄)和N₂O浓度不断增加,导致全球气温不断上升。《京都议定书》将CH₄作为限制排放的温室气体之一^[2]。以痕量排放到大气中的CH₄对气候变化产生的影响仅次于CO₂,位居第二,但其产生的温室效应—辐射增温潜力却是同单位质量CO₂的20~30倍^[3]。中国农业领域CH₄排放比重占总人为排放的20%左右,农田作为大气中温室气体CH₄的排放源和吸收汇,制定合理有效的农业减排措施对减少农田土壤温室气体的排放具有深远意义。

农田温室气体减排技术逐渐成为农业可持续发展研究的热点问题之一。有研究^[4]表明农田土

壤CH₄的释放与土壤中生物媒介的氧化反应相关,在好气条件下被甲烷氧化菌氧化,在厌氧条件下又可以通过土壤微生物分解土壤有机质而释放到大气中。目前很多研究^[5-6]都只是将耕作制度、田间管理措施与温室气体减排效应相结合。王丙文等^[7]在研究麦田不同留茬高度时发现,CH₄的吸收通量随着秸秆还田量的增加而逐渐降低,从循环农业和生态农业的角度看,当常规耕作方式下秸秆留茬0.5 m还田时,麦田CH₄吸收通量效果最明显。刘全全等^[8]研究表明:影响土壤CH₄变化通量的主导因素是土壤的水分状况;王丙文等^[7]研究表明:从环境效益和土壤保护两方面看,耙耕和旋耕这2种耕作方式可以有助于土壤CH₄的氧化吸收。

但利用传统的农业管理措施之一的间作模式来减少温室气体排放的研究却鲜有报道。间作指在一块地上,按照比例分行或者分带种植2种及以上生长季节接近或相同的作物^[9]。通过合理的间作不仅可以提高作物充分利用光能、温度、水分

收稿日期:2016-08-31 修回日期:2016-10-28
基金项目:环保部国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002)。
第一作者:陈素云,女,硕士研究生,从事农业温室气体微生物生态学机理及其减排技术研究。E-mail:chensuyun77@163.com
通信作者:吴洪生,男,教授,博士,博士生导师,主要从事农业温室气体微生物生态学机理及其减排技术研究。E-mail:wuhsluck@163.com

等自然条件的利用效率,还可以获得比单作多的收获量。张向前等^[10]研究发现:将玉米与花生或大豆间作可以明显增加玉米的经济效益以及生物产量。黄坚雄等^[11]研究发现将玉米和大豆间作能够显著降低土壤 N₂O 排放,但对于土壤 CH₄ 通量并无显著影响。尚小厦等^[12]将板蓝根与冬小麦间作,能够增加小麦生物量,并且能够促进温室气体 CH₄ 的吸收通量。所以从保护环境和农业增收的角度出发,研究出更多间作模式对土壤温室气体 CH₄ 排放的影响十分重要。

大蒜(*Allium sativum*)是多年生草本植物,属于百合科葱属,为香辛类蔬菜,不仅可以食用或者用于调味,亦可入药^[13]。中国作为世界上大蒜生产面积最大的国家,每年生产面积大约 80 万 hm²^[14]。自 1844 年以来,全球的药学家和化学家陆续开始研究大蒜的化学成分及其降解产物发现:不同产地、品种的大蒜在含量上有所不同,但是化学成分相同^[15-16]。并且大蒜根系分泌物可以为根系微生物的生存、繁殖提供所需要的营养物质和能量来源,也很可能会抑制土壤中其他微生物的正常生长繁殖^[17]。

对于大蒜在医学上的研究表明:大蒜的药理和保健功能与其所含的特殊功能成分有关,其中包括具有抗菌消炎、提高机体免疫力、预防以及治

疗心血管、防治肿瘤等多个方面的功能^[18-19],大蒜已成为国内外近几年来研究的热点。但是目前对于大蒜的研究也仅仅主要集中在药理学和其化学成分的研究上,在其他方面的研究甚少。本研究以冬小麦一大蒜间作为例,提出科学假设:从大蒜分泌的杀菌物质可能会抑制小麦田产 CH₄ 的各种菌类以及微生物的生长和活动,由此抑制或破坏 CH₄ 的产生途径从而减少土壤 CH₄ 的产生。通过研究在不同生育期小麦的生物量、最终产量以及土壤 CH₄ 通量等指标,初步揭示间作措施下的农田温室气体减排潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及试验材料

试验作物包括小麦与大蒜,小麦品种为‘宁麦 13 号’(江苏中江种业公司),大蒜苗采购于南京市浦口区盘城菜场内。

本研究在南京信息工程大学农业气象试验站内农田(前作物为玉米)进行,供试土壤属于壤质黏土的黄棕壤土,试验前对土壤理化性质^[20]进行分析,见表 1。试验小区在东经 118°49′、北纬 32°08′,位于亚热带季风气候区,春暖秋凉,夏热冬寒,光照充足,气候湿润,雨水充沛,多年平均温度为 15.6 ℃。

表 1 试验土壤基本理化性质
Table 1 Soil physicochemical properties

有机质/(g/kg) Organic matter	速效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K	碱解氮/(mg/kg) Available N	全氮/(g/kg) Total N	pH
12.0	15.1	87.6	80.3	0.8	7.2

试验所用 PVC 材料制成的静态箱(50 cm×50 cm×110 cm)是由底座、箱体和上盖 3 个部分构成。

1.2 试验设计

主要通过田间小区试验进行试验,研究间作大蒜对小麦生长和 CH₄ 排放的影响,其中,试验小区的规格为:小区面积 16 m²(4 m×4 m),四周筑埂,埂宽 50 cm,高 20 cm。试验共设 2 个处理,每个处理设置 3 个重复,分别为:(1)对照:45%复合肥 900 kg/hm² + 小麦(简写成 FW);(2)45%复合肥 900 kg/hm² + 小麦 + 大蒜(简写成 FWA)。单作小麦施肥(FW)处理小麦种植间距为 10 cm,小麦与大蒜间作处理(FWA)种植间距为 15 cm,单位面积小麦用量、大蒜苗移栽量分别为 155.47 kg/hm²(间作用量减半)、1 031.25

kg/hm²。施肥处理在播种前基施 900 kg/hm² 复合肥(中东化肥公司),总质量分数为 45%(N + P₂O₅ + K₂O = 45%)。2014-04-26 所有施肥处理追施尿素 75 kg/hm²。

2013-10-20 分别播种小麦、移栽大蒜苗,播种之后一次性将小区内土壤灌透水分,保持其他田间管理措施均一致,并保证每个集气箱底座内(50 cm×50 cm)有 30 株麦苗和 10 株大蒜苗。2013-11-10 小麦出苗。2014-05-26 收获。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 植物样品采集与分析 收获计算小麦以及大蒜头产量;测定各处理小麦生物量(株高、穗长等指标),然后脱粒,爆晒并依次装袋,适当剔除瘪粒后计算小麦千粒质量。

1.3.2 气体样品采集与分析 温室气体采集分

析采用静态暗箱—气相色谱法测定温室气体CH₄的通量^[2]。11月10日出苗后,在每个小区内选取作物长势均匀的区域(50 cm×50 cm),将底座固定于土壤中,并在箱体内悬挂温度计,记录采样前后箱内的温度变化以计算静态箱内采样时的平均温度。待小麦平均株高为15 cm左右时(2014-01-05)开始采集气样,平均每4~5 d采集1次气样,并且将每次采集气样的时间控制在当天9:00—11:00,春节前后冬小麦气体采集间断2周左右。每次采集气样前,先在底座和箱体的凹槽内加水,再将箱体、上盖依次水平叠放,以保证集气箱的密封性。具体采样步骤和注意点参考文献^[12,20]。

采集气样当天用Agilent7890A气相色谱仪^[21]分析气体CH₄通量。系统配置以及参数参照尚小厦等^[12]研究。根据气体浓度随时间变化计算单位面积的气体交换量,以计算小麦田间温室气体CH₄的排放通量。CH₄通量按下式计算^[22]:

$$F=60\times H\times(16\times 1.103)/[8.314\times(273+T)]\times dc/dt$$

式中:F代表被测气体流通量[mg/(m²·h)];H代表静态箱的箱内高度(m);dc/dt代表静态箱内CH₄的浓度变化率;T代表采样过程中静态箱内的平均温度(℃);常数16为气体CH₄摩尔质量;常数1.013为理想气体标准状态下的空气密度;常数8.314为普适气体常数。

1.4 数据分析

采用Microsoft Excel 2003和SPSS 19.0软件对试验数据进行处理、作图和统计分析,采用单因素ANOVA方差分析检验处理间的差异显著性(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 间作大蒜对小麦生长以及产量的影响

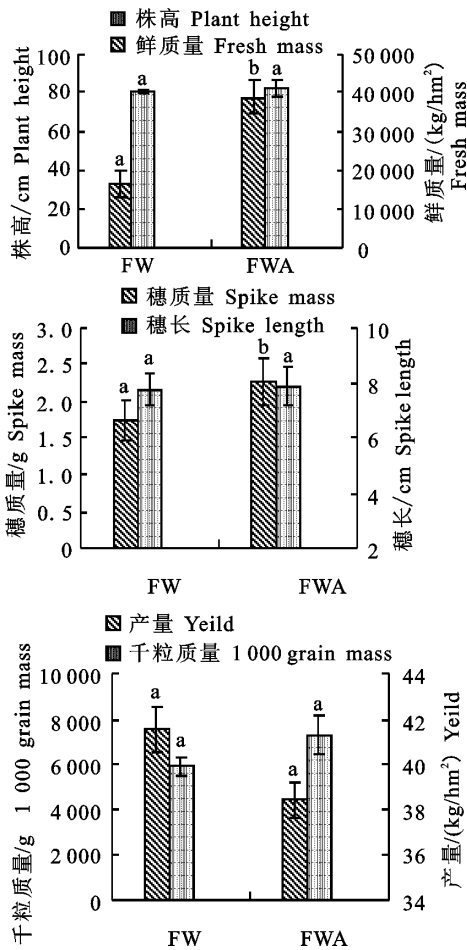
由图1可以看出,麦田间作大蒜对小麦株高、鲜质量、穗长、穗质量的影响效果均为:FW<FWA。在常规施肥基础之上,小麦田间作大蒜(FWA)对小麦株高影响不大,与单作小麦(FW)没有显著性差异;但是间作大蒜对小麦鲜质量有显著影响,较FW相比,鲜质量提高134.67%。间作大蒜还有增加小麦穗质量、穗长的作用,与单作小麦处理相比增加幅度分别为29.71%和

2.20%,其中,对小麦穗质量影响显著,但没有显著影响小麦穗长。从图1中可以看出,麦田间作大蒜较对照相比,千粒质量提高3.51%,但在统计上没有显著差异。

2.2 间作大蒜对麦田CH₄排放通量的影响

由图2可知,在冬小麦的整个生育期,气温和土温的变化趋势与CH₄通量的变化趋势情况:在小麦拔节期(出苗后80~110 d)和抽穗期(出苗后110~140 d)随着环境温度的升高,CH₄排放通量越来越小,但是在小麦生长初期和末期,CH₄通量与变化温度的关系并不明显。

从图2中还可以明显看出,冬小麦田CH₄的排放通量依次为:FW>FWA。间作大蒜对麦田土壤CH₄排放通量的影响明显低于单作处理,推测冬小麦田间作大蒜能够改变土壤中的产甲烷菌或者甲烷氧化菌的活性。



不同字母表示在0.05水平上差异显著 Different letters above the column chart meant significant difference among treatments(P<0.05)

图1 不同种植模式的小麦生物量 Fig.1 Wheat biomass in different cropping patterns

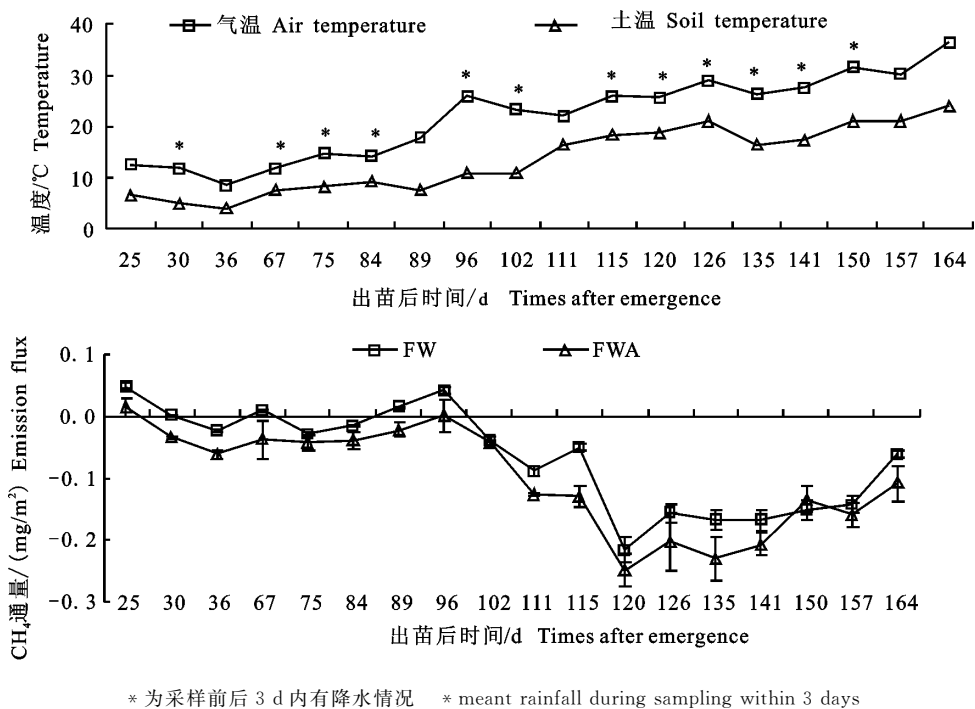


图 2 不同处理间土壤 CH₄ 通量与小麦生长季温度的动态变化

Fig. 2 Dynamics of CH₄ flux and soil temperature during wheat growing seasons

2.3 冬小麦—大蒜间作体系下环境与经济效益分析

根据 2015 年金谷粮食网 (<http://www.82158.com/xiaomai/price.php?diqu=江苏>) 以及 2016 年南京价格信息网 (<http://www.njprice.com>) 公布的江苏小麦种子、复合肥、大蒜

的市场价格及小麦、大蒜球茎市场交易价格数据显示:小麦购买、出售单价分别为 5 元/kg、2.47 元/kg,大蒜苗的购买、大蒜球茎的出售单价分别为 8 元/kg、16 元/kg,根据以上数据计算出常规施肥情况下,单作小麦处理(FW)以及间作大蒜处理(FWA)种植小麦和大蒜的投入成本情况(表 2)。

表 2 冬小麦田间作大蒜投入成本

Table 2 Input of cost of intercropping winter wheat with *Allium sativum*

项目 Project	种子投入 Seed input		肥料投入 Fertilizer input		总投入 Total input
	单价/(元/kg) Price	用量/(kg/hm ²) Consumption	单价/(元/kg) Price	用量/(kg/hm ²) Consumption	
FW 小麦 Wheat	5.00	155.47	1.25	895.52	1 896.75
FWA 小麦 Wheat	5.00	77.74	1.25	895.52	9 758.08
大蒜苗 Garlic	8.00	1 031.25			

通过查阅 2016-01-01—2016-04-01 中国碳排放交易网 (<http://www.tanpaifang.com>), 计算出我国北京、上海、深圳等 5 个主要碳交易所的平均价格为 25.85 元/t(单位质量 CH₄ 的增温潜势是单位质量 CO₂ 的约 25 倍^[3])。这样计算出间作大蒜对冬小麦田的经济和环境效益的影响分析, 利用“投入与产出比”来表示经济效益, 见表 3。

根据表 3 中数据显示, 冬小麦间作大蒜麦田的投入与产出比为 1 : 16.7, 与单作小麦相比提

高 70.41%, 增加农田经济效益。因此, 大蒜与冬小麦间作, 既能减少土壤 CH₄ 排放通量, 还可以增产小麦和大蒜, 增加经济和环境效益。

图 3 可以看出单作小麦和间作大蒜 2 个处理分别在抽穗期、灌浆期 2 个阶段的土壤 CH₄ 总通量。通过比较发现, 在常规施肥情况下, 间作大蒜使得冬小麦在抽穗期和灌浆期 2 个阶段土壤 CH₄ 排放分别减少 38.35%、16.59%, 小麦抽穗期的减排效果明显大于灌浆期; 冬小麦整个生长期间作大蒜土壤 CH₄ 排放通量与单作相比减少

53.45％,说明在冬小麦田间作大蒜能够减少 CH₄ 的排放通量,具有很好的环境效益。

表 3 间作大蒜对冬小麦田经济效益的影响

Table 3 Impact of phosphogypsum on the economic benefits in wheat field

项目 Project	投入 Input		产出 Produce					投入 : 产出 Input : Produce
	FW	FWA	产量 Yield			CH ₄ 总通量 Emission flux		
			FW	FWA		FW	FWA	
				小麦 Wheat	大蒜 Garlic			
数量/(g/hm ²) Number	1 896.75	9 758.08	7 566.67	4 433.00	9 487.50	4.64	7.09	
金额/(元/hm ²) Money			18 674.54	10 940.64	151 800.00	3.00	4.58	
经济效益/(元/hm ²) FW	1 896.75				18 677.54			1 : 9.80
Economic benefits FWA	9 758.08				162 745.22			1 : 16.70

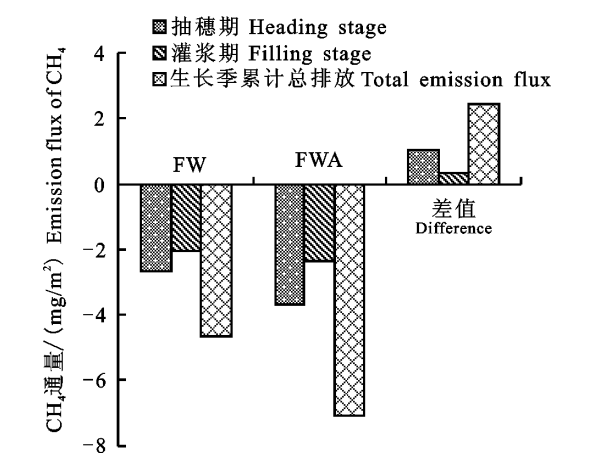


图 3 冬小麦田间作大蒜的环境效益比较

Fig. 3 Comparison of environmental benefits of winter wheat field intercropping with *Allium sativum*

3 讨论

间作是一种可以在时空上充分利用各种农业资源、自然资源等的栽培模式,是农业生产过程中经常采用的种植模式。间作不仅能提高单位面积内的作物产量以增加农民的收入,也能促进农业可持续发展。陈阜等^[23]通过冬小麦、春玉米、夏玉米多熟间套模式的研究,发现单产水平和光热资源利用率增加约 20％,说明间作可以较高的提高资源利用率和生产潜力。张娟等^[24]研究发现,增加种植密度能够提高农作物对氮素的吸收能力,以增强小麦利用氮素进行籽粒生产的能力,从而获得更高的籽粒产量,故冬小麦田间作大蒜能够显著提高小麦的鲜质量、千粒质量。间作对农作物的产量及品质的影响主要在于改变作物系统的内环境以及土壤环境^[25]。宋亚娜等^[26]研究发现间作模式相对于单作能够明显提高作物根系土

壤的菌落多样性,进而使得根际细菌群落结构组成产生变化;张继光等^[27]和张向前等^[10]研究证明土壤微生物的数量多少和酶活性关系有显著或极显著正相关,并且两者相互影响。尚小厦等^[12]在试验中还发现与单一种植冬小麦相比,冬小麦与板蓝根间作,能显著提高冬小麦的产量,还可以减少土壤 CH₄ 的排放量。

施肥处理土壤 CH₄ 排放通量大于不施肥处理,说明施肥不仅改变了土壤中微生物的区系和活性,而且能够加快土壤有机质的分解速率,进而提供充足的产甲烷基质供产甲烷菌消耗^[28]。环境温度的变化能够改变土壤中微生物群落的活性,从而导致相关土壤生物的生化反应速率也相应受到不同程度的影响,所以温度是影响土壤 CH₄ 通量的重要环境因子之一。在小麦拔节期和抽穗期 CH₄ 排放通量随着环境温度的升高越来越小,但是在小麦生长初期和末期,CH₄ 通量与变化温度的关系并不明显,分析原因可能是由于限制 CH₄ 通量的主要因素不只是温度,同时还受其他因素(土壤湿度或氮素等)的影响,长时间的降水,使土壤通气性减弱,从而土壤中的产 CH₄ 菌数量增多且活性增强,可能掩盖了温度对其通量影响的效应。另外,大量研究表明:植物根系可以感知根系土壤中微生物的存在,而且能够分泌一些物质来促进菌群的继续繁殖,从而抑制其他菌群及致病菌的正常生长^[29]。作为土壤中主要分解者的微生物,经过营养元素的周转来调节各种养分的供应,进而影响植物各组织的化学组成以及资源分配利用。

土壤中甲烷氧化菌和产甲烷菌活性和数量明显影响着土壤 CH₄ 的产生与氧化^[4]。有研究^[30]发现土壤根系分泌物中含有的酚酸物质能够抑制

一些气体微生物,还可以减少微生物消耗其生长介质。大蒜复杂的化学成分导致其对许多植物病原菌具有很强的抑制或灭活作用。有研究^[31]表明大蒜提取液可以明显抑制小核菌(*Sclerotium* sp.)和丝核菌(*Rhizoctonia solani*)的菌丝生长。

本试验中大蒜与冬小麦间作,发现麦田土壤 CH₄ 向空气中实际排放的强度减弱,可能是大蒜根系分泌物中某种化学活性成分抑制土壤中产甲烷菌群和甲烷氧化菌群落结构和活性造成的,从而导致土壤 CH₄ 的排放通量减少,至于具体抑制过程和机理,还需要进一步探索。

4 结 论

在整个生长季内冬小麦与大蒜间作,可以使麦田温室气体 CH₄ 的排放通量减少 53.45%,为农田温室气体减排提供了一个简易可行的方案。

间作大蒜处理与对照单作小麦处理相比,单位面积农田产出提高 70.41%。冬小麦与大蒜间作可以同时兼顾经济和环境效益,发展可持续生态农业。

参考文献 Reference:

- [1] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, *et al.* IPCC, 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Computational Geometry*, 2015, 18(2): 95-123.
- [2] 丁治平.《京都议定书》下温室气体减排机制研究[D].上海:华东政法大学,2008.
DING ZH P. The research of greenhouse gases reduction mechanism under the《Kyoto Protocol》[D]. Shanghai: East China University of Political Science and Law, 2008(in Chinese with English abstract).
- [3] HAINES A. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *International Journal of Epidemiology*, 2003, 32(2): 321-321.
- [4] HUTSCH B W. Methane oxidation in non-flooded soils as affected by crop production-invited paper [J]. *European Journal of Agronomy*, 2001, 14(4): 237-260.
- [5] 田慎重,宁堂原,李增嘉,等.不同耕作措施对华北地区麦田 CH₄ 吸收通量的影响[J].生态学报,2010,30(2):541-548.
TIAN SH ZH, NING T Y, LI Z J, *et al.* Effect of CH₄ uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 541-548(in Chinese with English abstract).
- [6] 刘小雪,周晓冬,吴洪生,等.农田甲烷产生的微生物生态学机理研究进展[J].上海农业科技,2010(6):14-16.
LIU X X, ZHOU X D, WU H SH, *et al.* Advances in microbial ecological mechanisms of farmland methane production [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2010 (6): 14-16(in Chinese).
- [7] 王丙文,迟淑筠,田慎重,等.不同留茬高度秸秆还田冬小麦田甲烷吸收及影响因素[J].农业工程学报,2013,29(5): 170-178.
WANG B W, CHI SH Y, TIAN SH ZH, *et al.* CH₄ uptake and its affecting factors in winter wheat field under different stubble height of straw returning[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 170-178(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘全全,王 俊,陈荣荣,等.黄土高原冬小麦田土壤 CH₄ 通量对人工降水的短期响应[J].应用生态学报,2015, 26(1): 140-146.
LIU Q Q, WANG J, CHEN R R, *et al.* Short-term response of soil CH₄ flux to simulated precipitation in a winter wheat field on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 140-146(in Chinese with English abstract).
- [9] 石建国.河西灌区玉米间套作吨粮栽培综合农艺措施数学模型的研究及应用[J].玉米科学,2000,8(3):46-50.
SHI J G. Study and application of mathematic model for comprehensive agronomic measures of corn intercropping and tons grain cultivation in Hexi irrigation area[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2000, 8(3): 46-50(in Chinese).
- [10] 张向前,黄国勤,卞新民,等.间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J].生态学报,2012,32(22): 7082-7090.
ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, *et al.* Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity and enzyme activities in soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (22) : 7082-7090 (in Chinese with English abstract).
- [11] 黄坚雄,隋 鹏,高旺盛,等.华北平原玉米//大豆间作农田温室气体排放及系统净温室效应评价[J].中国农业大学学报,2015,20(4):66-74.
HUANG J X, SUI P, GAO W SH, *et al.* Effect of maize-soybean intercropping on greenhouse gas emission and the assessment of net greenhouse gas balance in North China Plain [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(4): 66-74(in Chinese with English abstract).
- [12] 尚小厦,吴洪生,高志球,等.间作板蓝根对冬小麦生长及麦田 CH₄ 通量影响与经济环境效益分析[J].西南农业学报,2016,29(1):47-53.
SHANG X X, WU H SH, GAO ZH Q, *et al.* Effects of winter wheat intercropping with radish isatidison growth of wheat plant and CH₄ flux and evaluation of economic and environmental benefits [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(1): 47-53(in Chinese with English abstract).
- [13] 钱荷芬.浅谈大蒜高产栽培技术[J].农业开发与装备,

- 2016(2):147.
- QIAN H F. High-yielding cultivation techniques of garlic [J]. *Agricultural Development and Equipments*, 2016(2): 147(in Chinese).
- [14] 陈运起,徐 坤,刘世琦. 中国葱姜蒜产业现状与展望[J]. 山东蔬菜,2009(1):5-6.
- CHEN Y Q, XU K, LIU SH Q. Current situation and prospect of Chinese cong Jiangsuan industry[J]. *Shandong Vegetable Journal*, 2009(1):5-6(in Chinese).
- [15] 李 雪,李英峰,刘必前. 大蒜中大蒜素等含硫化合物的 GC/MS 法测定[J]. 现代仪器,2005,11(6):16-17.
- LI X, LI Y F, LIU B Q. Identification of allicin and sulfur compounds in the garlic by GC-MS[J]. *Modernists*, 2005, 11(6):16-17(in Chinese with English abstract).
- [16] 宋卫国,李宝聚,刘开启. 大蒜化学成分及其抗菌活性机理研究进展[J]. 园艺学报,2004,31(2):263-268.
- SONG W G, LI B J, LIU K Q. Advances in research on chemical components in garlic(*Allium sativum*) and mechanism of their inhibitory reaction with pathogens in plants [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2004, 31(2): 263-268 (in Chinese with English abstract).
- [17] MANGAMMA P, SREERAMULU A. Garlic extract inhibitory to growth of *Xanehmnons campestris* pv. *vesicatoria* [J]. *Indian Phytopathology*, 1991, 44(3): 372-374.
- [18] 张百俊,杨和连,刘爱琴. 大蒜功能研究现状[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2007,35(4):33-35.
- ZHANG B J, YANG H L, LIU A Q. The present situation of the study of garlic function[J]. *Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 35(4): 33-35 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李 瑜,罗 飞,许时婴. 大蒜生物活性功能及蒜粉微胶囊化的研究进展[J]. 食品科学,2007,28(9):610-613.
- LI Y, LUO F, XU SH Y. Review on bioactive function of garlic and microencapsulated garlic powder[J]. *Food Science*, 2007, 28(9): 610-613 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李 季,吴洪生,高志球,等. 磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析[J]. 环境科学, 2015, 36(8): 3099-3105.
- LI J, WU H SH, GAO ZH Q, *et al.* Impact of phosphogypsum wastes on wheat growth and CO₂ emissions and evaluation of economic-environmental benefit[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(8): 3099-3105 (in Chinese with English abstract).
- [21] 万运帆,李玉娥,林而达,等. 静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究[J]. 中国农业气象,2006,27(2): 122-124.
- WAN Y F, LI Y E, LIN E D, *et al.* Studies on closing time in measuring greenhouse gas emission from dry cropland by static chamber method[J]. *Chinese Journal of Agro meteorology*, 2006, 27(2): 122-124 (in Chinese with English abstract).
- lish abstract).
- [22] 王跃思,刘广仁,王迎红,等. 一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO₂, CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 环境污染治理技术与设备,2003,4(10):84-90.
- WANG Y S, LIU G R, WANG Y H, *et al.* Simultaneous measurement of CO₂, CH₄ and N₂O emission from terrestrial ecosystem with one improved gas chromatography[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(10): 84-90 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈 阜,逢焕成. 冬小麦/春玉米/夏玉米间套作复合群体的高产机理探讨[J]. 中国农业大学学报,2000,5(5):12-16.
- CHEN F, PANG H CH. Research on mechanism for maximum yield of intercropping pattern wheat/corn/corn [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(5): 12-16 (in Chinese with English abstract).
- [24] 张 娟,武同华,代兴龙,等. 种植密度和施氮水平对小麦吸收利用土壤氮素的影响[J]. 应用生态学报,2015, 26(6): 1727-1734.
- ZHANG J, WU T H, DAI X L, *et al.* Effects of plant density and nitrogen level on nitrogen uptake and utilization of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1727-1734 (in Chinese with English abstract).
- [25] LESOING G W, FRANCIS C A. Strip intercropping effects on yield and yield components of corn, grainsorghum, and soybean [J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(5): 807-813.
- [26] 宋亚娜, MARSCHNER PETRA, 张福锁, 等. 小麦/蚕豆, 玉米/蚕豆和小麦/玉米间作对根际细菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(7): 2268-2274.
- SONG Y N, MARSCHNER PETRA, ZHANG F S, *et al.* Effect of intercropping on bacterial community composition in rhizosphere of wheat (*Triticum aestivum* L.), maize (*Zea mays* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2268-2274 (in Chinese with English abstract).
- [27] 张继光,秦江涛,要文倩,等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(3): 364-371.
- ZHANG J G, QIN J T, YAO W Q, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils [J]. *Soils*, 2010, 42(3): 364-371 (in Chinese with English abstract).
- [28] WASSMANN R, NEUEHU, BUENO C, *et al.* Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrate [J]. *Plant and Soil*, 1998, 203: 227-237.
- [29] BAIS HARSH PAL, PARK SANG-WOOK, WEIR TIF-FANY L, *et al.* How plants communicate using the underground information superhighway [J]. *Trends of Plant*

Sciences, 2004, 9(1): 26-32.

[30] MUARRAY A H. Effect of simple phenolic compounds of heather(*Calluna vulgaris*) on rumen microbial activity in vitro[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1996, 22 (8): 1493-1504.

[31] BABU S, SEETHARAMAN K. Fungitoxic properties of some plant extracts against *Alternaria solani*, the tomato leaf blight pathogen[J]. *Journal of Ecotoxicology and Environmental Monitoring*, 2000, 10(2): 157-159.

Effects of Winter Wheat Intercropping with Garlic on Wheat Growth, CH₄ Flux Emissions and Evaluation of Economic and Environmental Benefits

CHEN Suyun, WU Hongsheng, LI Ji, YAO Dongliang, ZHAO Yue and CHEN Kaikai

(Department of Agricultural Resources and Environment, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract To cope with climate change, reducing agricultural greenhouse gases emission, developing ecological agriculture and increasing the land utilization rate, a single factor plot experiment was conducted to study the impact of intercropping garlic in winter wheat field on soil methane (CH₄) flux in the agro—meteorological station of Nanjing University of Information and Science Technology from 2013 to 2014, and its economic and environmental effects were assessed. The results showed that in the treatment of intercropping garlic, the fresh mass, panicle mass and 1 000-grain mass of winter wheat can be improved by 134. 67%, 2. 20%, 3. 51%, respectively; compared with monoculture of winter wheat, the input-output ratio in the treatment of intercropping garlic was increased from 1 : 9. 80 to 1 : 16. 70, for the same inputs, the outputs may be increased by 70. 41% compared to the control; the CH₄ flux emission from plot treated with garlic was decreased by 38. 35% and 16. 59% compared with the monoculture of winter wheat in the heading and grain filling stage of wheat, respectively. The accumulative soil CH₄ flux emission in the treatment of garlic was decreased by 53. 45% in the whole growing season of winter wheat. The intercropping of garlic and winter wheat can not only mitigate environmental pollution, but also increase land utilization efficiency and economic profits, which is of great significance to reduce the flux of green-house gases in the soil and consequently develop sustainable agriculture.

Key words Winter wheat; *Allium sativum*; CH₄; Economic benefits; Environmental benefits

Received 2016-08-31 **Returned** 2016-10-28

Foundation item Environmental Protection Ministry of China Project Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment (No. 2015ZX07204-002).

First author CHEN Suyun, female, master student. Research area: microbially ecological mechanisms of greenhouse gases in agriculture and the mitigation measurement. E-mail: chensuyun77@163. com

Corresponding author WU Hongsheng, male, professor, Ph. D, doctoral supervisor. Research area: microbially ecological mechanisms of greenhouse gases in agriculture and the mitigation measurement. E-mail: wuhs1uck@163. com

(责任编辑: 成 敏 Responsible editor: CHENG Min)