

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171117

王玉英, 李晓欣, 董文旭, 张玉铭, 秦树平, 胡春胜. 华北平原农田温室气体排放与减排综述[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 167-174

WANG Y Y, LI X X, DONG W X, ZHANG Y M, QIN S P, HU C S. Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 167-174

## 华北平原农田温室气体排放与减排综述\*

王玉英<sup>1</sup>, 李晓欣<sup>1</sup>, 董文旭<sup>1</sup>, 张玉铭<sup>1</sup>, 秦树平<sup>2</sup>, 胡春胜<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水資源重点实验室 石家庄 050022;  
2. 福建农林大学资源与环境学院 福州 350002)

**摘要:** 华北平原作为典型的冬小麦-夏玉米轮作高水肥精细管理农田, 高水高肥管理下其碳排放量高于秸秆还田的固碳量, 其生态系统正在以每年  $77 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  的速度损失碳。华北平原农田  $>400 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  的过高氮素投入是造成其碳排放增加的主要原因, 其土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放强度在氮肥施入量为  $136 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  时最低, 且在施氮量为  $317 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  时可获得最高作物产量。华北平原土壤中温室气体的产生和消耗主要发生在  $0\sim 90 \text{ cm}$  土壤剖面内,  $>90 \text{ cm}$  土层主要作为土壤包气带中的缓冲层而存在。当前降低华北平原农田温室气体排放除了合理施肥和灌溉, 还需要改变固有的农作制度, 实行减免耕等保护性措施, 并将减排和固碳同步进行。对华北平原温室气体净排放研究, 今后需在以下几个方面加强: 1) 在地-气之间加强冠层尺度温室气体的原位连续在线监测研究, 并将稳定性同位素技术应用到此研究中以达到追踪其来源和比例构成的目的。2) 在土壤包气带中, 利用稳定性同位素技术探索土壤空气中温室气体的来源比例, 探索剖面土壤温室气体产生和消耗对土壤-大气界面温室气体排放的响应机制。3) 将模型研究应用于土壤-大气连续体温室气体排放研究。

**关键词:** 华北平原; 农田生态系统; 小麦-玉米轮作体系; 温室气体; 排放与减排; 调控措施

**中图分类号:** X51; X154.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)02-0167-08

## Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the North China Plain\*

WANG Yuying<sup>1</sup>, LI Xiaoxin<sup>1</sup>, DONG Wenxu<sup>1</sup>, ZHANG Yuming<sup>1</sup>, QIN Shuping<sup>2</sup>, HU Chunsheng<sup>1\*\*</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. College of Resources and Environment, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The winter-wheat and summer-maize double cropping system in the North China Plain (NCP) is the classic intensive crop production pattern with high water demand and nitrogen fertilizer inputs. The carbon (C) emission quantities are higher than the carbon sequestration quantities in the cropping system. C was being lost from the intensive wheat-maize double cropping system in the NCP at a rate of  $77 \text{ g(C)} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  when harvest removals are considered, even though crop residue C is input into the soil since 30 years ago. High nitrogen (N) fertilizer application rate [ $>400 \text{ g(N)} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ] results in the increase of C emissions directly. Yield-scaled  $\text{N}_2\text{O}$  emission is lowest at N application rate of  $136 \text{ g(N)} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . And it is found that maximal crop yield is achieved at a N application rate of  $317 \text{ g(N)} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , which is 20% less than current practice. More than

\* 国家自然科学基金项目(41473021, 41530859 和 41571291)资助

\*\* 通信作者: 胡春胜, 主要研究方向为农田生态系统养分循环过程与机理。E-mail: cshu@sjziam.ac.cn

王玉英, 主要从事农田生态系统温室效应研究。E-mail: wangyuying@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2017-12-01 接受日期: 2017-12-08

\* This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41473021, 41530859 and 41571291).

\*\* Corresponding author, E-mail: cshu@sjziam.ac.cn

Received Dec. 1, 2017; accepted Dec. 8, 2017

90% of the annual cumulative greenhouse gas (GHG) fluxes originated at soil depths shallower than 90 cm. The subsoil (>90 cm) is not a major source or sink of GHG, but it acts as a 'reservoir'. Considering the synthetic greenhouse effect, some measures of greenhouse gas reductions were put forward in papers such as reductions of fertilizer input and water supply and improving farming system (tillage reduction or zero tillage). Furthermore C reduction needs to be in step with C sequestration. In the future, studies on greenhouse gas emissions in NCP require to be further strengthened in the following aspects: 1) *in-situ* continuous online monitoring of canopy scale greenhouse gases, and using stable isotope techniques to track their sources and proportions; 2) in soil profile, using stable isotope techniques to study the sources and proportions of greenhouse gases, and exploring the responding mechanism between greenhouse gas production/consumption in soil profile and their emissions at soil surface is fairly crucial; 3) using models to estimate greenhouse gas emissions of soil-atmosphere continuum.

**Keywords:** North China Plain; Agroecosystem; Wheat-maize double cropping system; Greenhouse gas; Emission and emission reduction; Control measures

自工业革命以来, 人类活动造成的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)和氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等温室气体排放量明显增加。截至 2011 年, 大气中 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 的浓度依次升至 704 mg·m<sup>-3</sup>、0.58 mg·m<sup>-3</sup> 和 1.18 mg·m<sup>-3</sup>, 分别比工业革命前增加 40%、20% 和 150%<sup>[1]</sup>。这势必会加剧全球气候变化进程。研究表明大气中每年有 5%~20% 的 CO<sub>2</sub>、80%~90% 的 N<sub>2</sub>O 和 15%~30% 的 CH<sub>4</sub> 来源于土壤<sup>[2]</sup>。而农田作为陆地生态系统的主要组成部分, 其温室气体排放动态对全球气候变化具有重要影响。IPCC 的研究报告指出农业源温室气体排放量占全球人为活动产生的温室气体排放总量的 10%~12%, 其中 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放占比分别达 60% 和 50%<sup>[1]</sup>。而我国农业源温室气体排放在全国所占比例超过 15%, 其中 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放分别高达 90% 和 60%<sup>[3]</sup>。因此, 我国作为农业大国农田土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 减排对减缓全球气候变化具有重要意义。

华北平原作为我国粮食主产区之一, 耕地面积占全国总耕地面积的 25%<sup>[4]</sup>, 生产了全国 76% 的小麦和 29% 的玉米<sup>[5]</sup>, 依靠大量水(>667 mm·a<sup>-1</sup>)和肥[500~600 kg(N)·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>]投入来保障粮食产量是该地区农业生产的主要特点<sup>[6]</sup>, 但是该种农业生产与农田应用也伴随着温室气体排放的迅速增加。因此在保障作物产量的同时采取合理的农艺措施来减少温室气体排放是目前该区域面对的主要挑战。鉴于此, 研究华北平原典型农田温室气体排放, 探索农田温室气体减排调控措施对于发展低碳农业, 减缓全球变暖具有重要价值。

## 1 华北平原温室气体排放研究进展

### 1.1 土壤-大气界面温室气体排放研究

#### 1.1.1 外源肥料输入

经典的静态箱法被广泛应用于研究土壤-大气界面温室气体排放中。近年来, 利用静态箱法观测

华北平原小麦(*Triticum aestivum*)-玉米(*Zea mays*)轮作系统土壤-大气界面温室气体排放的报道很多<sup>[6-12]</sup>。第一, 氮肥施入、水分和温度变化均会影响 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放。王玉英等<sup>[7-8]</sup>的研究表明华北平原冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统总体为 CH<sub>4</sub> 吸收汇、CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放源, 氮肥施入和灌溉可以直接导致农田 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放通量迅速增加, 同时降低农田土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收强度。例如施氮量[kg(N)·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>]为 0、200、400 和 600 时, 冬小麦-夏玉米轮作系统 N<sub>2</sub>O 排放总量[kg(N<sub>2</sub>O)·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>]分别为 1.27、2.24、4.85 和 6.40, 其 CH<sub>4</sub> 吸收量[kg(CH<sub>4</sub>)·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>]分别为 -2.01、-1.11、-1.01 和 -1.34<sup>[8]</sup>。氮肥施入后土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度迅速增加, 而硝酸盐作为土壤硝化和反硝化作用的主要底物, 其迅速增加必然导致硝化和反硝化过程加剧进而使其产物 N<sub>2</sub>O 产生量增加。化肥用量增加使 CO<sub>2</sub> 排放量略有提高, 这是由于施肥量高的处理留落在田间的作物根系更为发达导致。长期定位施肥试验结果表明, 氮肥对土壤 CH<sub>4</sub> 氧化的影响主要来源于铵态氮肥, 由于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 能够抑制土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收, 其可能的抑制机制为由于 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 CH<sub>4</sub> 的氧化是相互排斥的, 铵态氮肥的使用增加了土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量, 而甲烷氧化细菌优先同化氨, 从而抑制了土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收速率<sup>[13]</sup>, 这也可以解释尿素氮施入农田后 CH<sub>4</sub> 吸收汇强度减弱的现象。第二, 有机肥投入是土壤固碳的有效途径, 但同时增加农田 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[14-16]</sup>。有机肥和化肥养分有效性和形态明显不同, 对温室气体排放的影响也明显不同。例如李燕青等<sup>[14]</sup>在华北平原冬小麦-夏玉米种植制度下, 以长期定位试验为平台持续监测了化肥和有机肥在不同施肥水平下潮土玉米季土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的排放特征; 其研究结果表明等氮条件下化肥处理的 N<sub>2</sub>O 日排放通量明显高于有机肥, 有机肥处理显著增加了农田土壤 CO<sub>2</sub> 的排放量, 而化肥对 CO<sub>2</sub> 排放总量的影响不明显。相较于化肥有机肥速效态氮的含

量很低(仅占全氮含量的13%左右),因此 $N_2O$ 排放量也相对较少<sup>[17-18]</sup>。另外,有机肥中有效氮的缓慢释放决定了土壤中 $N_2O$ 排放是一个缓慢过程,而现在测定周期基本上是周年(短期)测定,因此这些研究可能低估了有机肥对 $N_2O$ 排放的影响<sup>[19]</sup>。此外,有机肥在提高微生物活性方面更具潜力<sup>[20]</sup>,因此有机肥施入后会显著提高农田土壤 $CO_2$ 的排放量<sup>[14]</sup>。第三,秸秆还田对农田土壤温室气体排放也有重要影响。秸秆还田将改变农田土壤氮状况及氮循环速率、碳吸存量、pH、生物(微生物、细根、土壤动物等)量,进而影响地表 $CO_2$ 通量。一般认为,随着秸秆还田量的增加,土壤呼吸通量也增加<sup>[21-23]</sup>。这主要是由于秸秆还田能增加土壤总孔隙度,同时土壤溶液中的 $CO_2$ 含量随秸秆添加量的增加而增大<sup>[23]</sup>,从而增加了土壤中 $CO_2$ 的释放速率。同时秸秆还田能影响土壤中微生物量、微生物活性和微生物群落结构,进而导致土壤 $CO_2$ 排放量增加。秸秆还田将改变农田土壤氮状况及氮循环速率、生物量、碳氮比以及 $NO_3^-$ 和 $NH_4^+$ 的含量,进而影响地表 $N_2O$ 通量,各试验结果有着一定的差异。由于 $CH_4$ 产生的特殊性,国内的研究一般集中于水稻田土壤的 $CH_4$ 排放。研究认为麦秆直接还田增加了稻田 $CH_4$ 的排放量<sup>[24]</sup>。

### 1.1.2 灌溉方式

虽然漫灌仍然是华北平原主要的灌溉方式,但最近几年因淡水资源日益匮乏,为维持粮食水平的高产,节水灌溉技术(如微喷灌溉和滴灌)正在迅速发展,节水灌溉方式下的农田面积也逐渐增加<sup>[25]</sup>。华北平原是我国粮食的主产区,未来粮食产量的进一步提高需要灌溉和施肥的高效性,而灌溉和施肥等措施改变势必会导致温室气体排放强度的变化。郭树芳等<sup>[26]</sup>在华北平原冬小麦田的研究表明微喷水肥一体化(微喷)方式下土壤 $CO_2$ 排放通量均值比漫灌高12.37%, $N_2O$ 排放通量值比漫灌高76.22%。微灌加强土壤呼吸可能与微喷缓解了因漫灌造成的土壤紧实度增加,使土壤保持相对疏松,提高了根系活力有关。此外微喷方式下土壤水分含量和温度均高于漫灌,且微喷增加了土壤微生物量碳含量,促进土壤微生物作用下的硝化和反硝化反应,进而带来土壤 $N_2O$ 排放通量的增加<sup>[26]</sup>。但是也有相反的研究报道,例如Kallenbach等<sup>[27]</sup>研究认为地下滴灌比沟灌减少了50%的 $N_2O$ 排放量。Sánchez-Martín等<sup>[28]</sup>也认为,与沟灌相比,滴灌减少了甜瓜(*Cucumis melo*)田土壤 $N_2O$ 的排放。其原因可能是,与沟灌相比,滴灌模式下水分分布促进了硝化反应<sup>[28]</sup>。由此可

见,不同节水灌溉方式对土壤温室气体排放通量的影响也存在很大差异,因此应进一步加强不同灌溉条件下温室气体排放通量及其影响机制的深入探索。

### 1.1.3 耕作方式

耕作方式主要是通过改变土壤有机碳分解环境,如土壤充气环境以及破坏土壤团聚体结构等影响土壤 $CO_2$ 排放<sup>[29]</sup>。大部分研究表明免耕会降低土壤 $CO_2$ 排放量,原因为常规频繁耕作条件会导致土壤有机碳大量损失, $CO_2$ 排放量增加;免耕则可以有效地控制土壤有机碳损失,减少土壤干扰,降低土壤微生物对活性碳的利用,进而抑制 $CO_2$ 排放<sup>[29-30]</sup>。耕作措施主要是通过影响土壤湿度、土壤硬度及土壤营养含量等来影响 $CH_4$ 排放。干旱地区土壤 $CH_4$ 排放量较低,大多表现为 $CH_4$ 吸收汇<sup>[7-8]</sup>。大部分研究认为免耕降低 $CH_4$ 排放量或者对 $CH_4$ 排放量没有显著影响<sup>[29-30]</sup>。原因可能为免耕土壤更稳定,通透性好,增强甲烷氧化菌活性有利于 $CH_4$ 氧化,使 $CH_4$ 吸收量增加。例如Omonode等<sup>[31]</sup>通过对玉米地和玉米-大豆(*Glycine max*)轮作地研究发现犁耕和耩耕的农田为弱的 $CH_4$ 排放源,免耕农田为弱的 $CH_4$ 汇。但也有学者研究表明 $CH_4$ 通量不受耕作方式的影响<sup>[32]</sup>。造成上述研究结果不同的原因可能由于旱地土壤 $CH_4$ 排放量很低,很多时候都无法监测到有效数据,而且受外界干扰因素较多。免耕对土壤 $N_2O$ 排放的影响主要通过温度、土壤湿度和土壤性质等过程来实现。Abdalla等<sup>[33]</sup>通过综述相关文献认为气候条件与土壤对免耕 $N_2O$ 排放存在着交互作用。例如在干燥的气候条件下,免耕增加通气条件差的土壤 $N_2O$ 排放<sup>[34]</sup>,降低通气性好的土壤 $N_2O$ 排放或者影响不显著<sup>[34-35]</sup>。在湿润气候条件下,土壤性质不同其结论亦不同。目前免耕等保护性农业措施被逐渐推广,大部分研究主要集中在免耕对土壤水分利用率、作物产量和土壤理化性质的响应机制,而对保护性农业措施下温室气体排放的研究相对较少。

## 1.2 冠层和土壤剖面温室气体排放研究

### 1.2.1 冠层温室气体排放

地-气之间进行的物理、化学和生物过程及相互作用对全球气候变化、生物多样性和环境变化有重要影响。涡度相关技术是直接观测下垫面与大气之间水热通量和 $CO_2$ 通量的微气象技术,具有理论论证完善、观测精度高和连续稳定等优点,已逐渐成为地-气之间能量和物质通量观测的标准方法。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,也是受

人为因素强烈控制和干扰的系统,因此农田生态系统碳循环研究受到广泛关注,对该系统碳的源/汇评价是目前国际上研究的热点问题之一。

针对华北平原从 20 世纪 80 年代初转变为秸秆还田的冬小麦-夏玉米轮作精细管理农业体系,其温室气体排放也发生了巨大变化<sup>[36]</sup>。Wang 等<sup>[36]</sup>分析了华北平原 1978 年到 2008 年 0~20 cm 土壤的有机碳储量,其研究结果表明从 1978 年到 2002 年土壤有机碳含量从  $2.5 \text{ kg(C)}\cdot\text{m}^{-2}$  迅速增加到  $4.0 \text{ kg(C)}\cdot\text{m}^{-2}$ ;但之后从 2003 年到 2008 年,0~20 cm 土壤有机碳储量开始降低且最终稳定在  $3.7 \text{ kg(C)}\cdot\text{m}^{-2}$ 。鉴于此,Wang 等<sup>[36]</sup>认为在华北平原冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统中,虽然秸秆还田措施使土壤有机碳含量增加,但长期的高水高肥精细管理方式可能会造成温室气体排放增加,进而导致整个生态系统处于碳损失状态。为了验证这个假说,Wang 等<sup>[36]</sup>将凋度相关法、静态箱法和生物量观测结合起来评估了华北平原冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统的碳平衡。研究结果表明冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统为碳源,其碳源强度为  $77 \text{ g(C)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中冬小麦季为碳汇,碳汇强度为  $90 \text{ g(C)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ;而夏玉米季为碳源,其碳源强度为  $167 \text{ g(C)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。冬小麦和夏玉米季碳源强度的巨大差异主要是由于其总生态系统呼吸(TER)和净初级生产力(NPP)的巨大差异造成的。例如与寒冷干燥的冬小麦季相比,温暖湿润的玉米季的 TER 和 NPP 分别增加 1/4 和降低 1/10。其次,虽然夏玉米的生长季(113 d)比冬小麦季(235 d)短 52%,但是全年超过 55%的  $\text{CO}_2$  排放来自于玉米季。说明碳排放动力学虽然与作物生长密切相关,但是生长季内的气候变异才是其主要驱动因素<sup>[36]</sup>。

### 1.2.2 土壤剖面温室气体排放

如上文所述,目前对冠层和土壤-大气界面的温室气体排放报道很多,但是针对农田系统土壤剖面温室气体产生和排放的报道很少<sup>[37]</sup>。土壤包气带中的温室气体含量是土壤-大气界面温室气体浓度的数倍。因此明确土壤剖面中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度及通量可以更清楚地解释其表层气体排放动力学,进而能够制定更加有效的减排措施指导农业生产。

Wang 等<sup>[38-39]</sup>报道了华北平原冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统 4 个施氮 [ $\text{kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ] 水平(0、200、400 和 600)下 0~300 cm 土壤剖面的温室气体浓度和通量变化动态。研究结果表明土壤空气  $\text{CH}_4$  浓度随着土壤深度的增加而降低,氮肥施入对土壤

剖面中  $\text{CH}_4$  的浓度没有显著影响;土壤空气  $\text{CO}_2$  浓度随着土壤深度的增加迅速上升,氮肥施入对土壤剖面中  $\text{CO}_2$  的浓度同样没有显著影响;土壤空气  $\text{N}_2\text{O}$  浓度随着土壤深度的增加而上升,氮肥施入显著增加土壤剖面中  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度。土壤剖面中  $\text{CH}_4$  浓度随着土壤深度增加而降低说明甲烷氧化细菌将  $\text{CH}_4$  氧化,但是 60~300 cm 的  $\text{CH}_4$  浓度变化不大,说明在低于  $0.75 \text{ mL}\cdot\text{m}^{-3}$  的浓度下甲烷氧化菌不足以氧化或者吸收  $\text{CH}_4$ 。 $\text{CO}_2$  浓度随着土层深度增加而迅速上升,与前人研究结果一致<sup>[40]</sup>,这可能与  $\text{CO}_2$  的分子量有关,土壤空气中分子量比较重的气体会主要分布于底层。土壤剖面  $\text{N}_2\text{O}$  浓度随着土层深度增加有缓慢上升的趋势,氮肥施入对土壤剖面中  $\text{N}_2\text{O}$  浓度有明显的激发效应,这主要是氮肥中的硝酸盐为土壤空气中  $\text{N}_2\text{O}$  产生的主要底物所致<sup>[38]</sup>。根据土壤剖面中温室气体浓度的监测结果,Wang 等<sup>[39]</sup>利用 Fick 定律计算了土壤剖面中  $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的扩散速率。其研究结果表明土壤剖面中 0~90 cm 土层为  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及  $\text{CH}_4$  吸收的主要发生层,90 cm 以下土层的排放和吸收量都很小,可以忽略不计。施用氮肥显著增加剖面中的  $\text{N}_2\text{O}$  排放,但是对  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$  排放影响不大。其中 >90% 的  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放及  $\text{CH}_4$  吸收均发生在 0~90 cm 土层,这主要是由该试验地点的土壤特征导致,0~90 cm 土壤容重明显低于 90 cm 以下的土壤<sup>[39]</sup>。

## 2 华北平原温室气体减排措施

### 2.1 合理施肥和灌溉

农田土壤  $\text{N}_2\text{O}$  的一个重要来源是化肥的施用,研究表明  $\text{N}_2\text{O}$  的排放随着施肥量的增加而增加, $\text{N}_2\text{O}$  受施肥速率和施肥种类的影响很大<sup>[7-10,12,14,16]</sup>。据粗略估计,我国目前化肥氮的总消耗量可基本满足农业生产的需要,但约有 1/3 的区域(主要在经济发达区)过量施用。例如华北平原属于典型高氮肥施入区域。Qin 等<sup>[9]</sup>在华北平原冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统  $\text{N}_2\text{O}$  排放的研究中表明, $\text{N}_2\text{O}$  排放强度(yield-scaled  $\text{N}_2\text{O}$  emission)在氮肥施入量为  $136 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  时最低,且在施氮量为  $317 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  即可获得最高作物产量。而当前华北平原的平均氮肥施入量 >  $400 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。因此减少华北平原氮素施入量是降低当前  $\text{N}_2\text{O}$  排放的有效措施。此外选用氮利用率高和  $\text{N}_2\text{O}$  排放少的硝态氮和尿素以及缓释性化肥,采用根外追肥,减少因土壤微生物活物活动造成额外  $\text{N}_2\text{O}$  排放,这些措施均

对当前华北平原的温室气体减排具有一定效果。碳酸氢铵和尿素是我国农业的主体肥料,但其肥效期短,挥发损失量大,氮素利用率低。研究表明与施用普通碳酸氢铵和尿素相比,长效碳酸氢铵与长效尿素能显著减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放 27%~88%<sup>[41]</sup>。Xu 等<sup>[42]</sup>的研究表明脲酶抑制剂氢醌与硝化抑制剂双氰胺适宜组合,可有效地减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放和其他气态氮损失。

华北平原目前主要的灌溉方式为漫灌。针对华北平原地下水位下降,水资源短缺等问题,微喷水肥一体化(微喷)方式正在被广泛推广<sup>[26]</sup>。研究表明虽然华北平原冬小麦田微喷水肥一体化(微喷)方式下土壤  $\text{CO}_2$  排放通量均值比漫灌高 12.37%,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量值比漫灌高 76.22%,但其农田碳汇强度也增加了  $176.48 \text{ g(C)}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[26]</sup>。因此由于土壤水分、温度和肥料是影响温室气体排放的重要因素,在节水灌溉条件下进入土壤的水分和肥料的不均匀性必然会带来温室气体排放的空间上的异质性。

## 2.2 变更农作制度

免耕和秸秆覆盖作为两种重要的保护性耕作措施受到广泛重视。华北平原目前主要以翻耕为主。免耕被认为是减少  $\text{N}_2\text{O}$  排放的有效措施,因为翻耕对土壤的扰动促进了郁闭于土壤内的  $\text{N}_2\text{O}$  的释放。而通过改进和优化耕作措施,注重化肥与有机肥的配合施用,推广少耕与免耕技术,提高秸秆与有机物质的归还量,能稳定甚至增加土壤有机碳贮量,减少农田土壤的  $\text{CO}_2$  净排放<sup>[43]</sup>。研究表明秸秆还田提高了土壤的 C/N 比值,引起微生物对 N 源的充分利用,同时也减少了硝化、反硝化过程的中间产物  $\text{N}_2\text{O}$  的排出<sup>[43]</sup>。然而也有研究认为施入秸秆为反硝化微生物提供了充足的能源物质和微域厌氧环境,利于反硝化过程的进行,促进了  $\text{N}_2\text{O}$  的生成与排放<sup>[44]</sup>。但增加土地覆盖秸秆还田、增加有机肥施用和采用轮作等方式能显著降低土壤侵蚀、改善有机质和养分循环<sup>[43]</sup>。鉴于此,通过农作制度管理达到减少温室气体排放,应在选择方式之前对实施地区土壤和气象等条件进行实地分析和优化选择。

## 2.3 “固碳”和“减排”同步

土壤通过生物和非生物过程捕获大气中的碳素并将其稳定地存入碳库,这一过程被称为碳固存。增加土壤有机碳固存不仅为植被生长及微生物活动提供碳源、维持土壤良好的物理结构,同时也是减少大气中  $\text{CO}_2$  等温室气体含量的一个有效、持续措施。我国耕地土壤有机碳含量总体上较低,低于世界平均值的 30%以上,低于欧洲 50%以上<sup>[33,35]</sup>,因

此我国农业土壤具有巨大的固碳减排潜力。

农田土壤固碳措施的主要目的是将  $\text{CO}_2$  固持于土壤中,以降低大气温室气体浓度。但是如何同时利用土壤固碳潜力并降低大气中温室气体浓度,却仍是当前面临的一个难题。研究表明通过改进和优化耕作措施,注重化肥与有机肥的配合施用,推广少耕与免耕技术,提高秸秆与有机物质的归还量,能稳定甚至增加土壤有机碳贮量,减少农田土壤的  $\text{CO}_2$  净排放。例如土壤免耕减缓了土壤中碳、氮基质供应量,通过陆地生物及落叶的转化使有机碳蓄积量增加<sup>[35]</sup>,有效提高了土壤有机碳含量。但是农田生态系统的碳氮气体交换对人为扰动变化的响应时常表现为互为消涨效应,一系列固碳措施减少土壤  $\text{CO}_2$  排放的同时也可能会增加  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放<sup>[35]</sup>。例如 Qiu 等<sup>[45]</sup>利用 DNDC 模型对全国土壤有机碳的研究结果表明,在目前的施肥水平下采取秸秆还田、增施有机肥、免耕等措施,土壤有机碳含量能够明显增加,土壤  $\text{CO}_2$  释放“源”变为“汇”;但同时发现在北方地区土壤有机碳提高的同时,由于微生物活性的增加,导致土壤中可溶性有机碳和硝态氮含量的升高,从而  $\text{N}_2\text{O}$  排放呈现增加趋势。因此采取只针对单一气体简单的调控策略可能达不到减缓气候变化的预期目标,甚至会产生与预期完全相反的后果。因此,在讨论减排技术措施时应两者兼顾,既提高农田生态系统的固碳效果,又减少温室气体排放以有效应对气候变化。Zhang 等<sup>[46]</sup>的研究也指出通过合理减少化肥投入,配合采取固碳替代管理措施,在保持作物产量、增加碳固存的同时能显著地减少温室气体排放。

## 3 总结与展望

综上所述,华北平原作为典型的冬小麦-夏玉米轮作高水肥精细管理农田,在目前的秸秆还田条件下生态系统正在以  $77 \text{ g(C)}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  的速度损失碳,说明高水高肥管理下其碳排放量>秸秆还田的固碳量。华北平原农田  $>400 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  的过高氮素投入是造成其碳排放增加的主要原因,其土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放强度在氮肥施入量为  $136 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  时最低,且在施氮量为  $317 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$  可获得最高作物产量。华北平原土壤中温室气体的产生和消耗主要发生在 0~90 cm 土壤剖面内, >90 cm 土层主要作为土壤包气带中的缓冲层而存在。减少当前华北平原农田温室气体排放除了合理施肥和灌溉,还需要改变固有的农作制度实行减免耕等保护性措施,并将减

排和固碳同步进行。

对华北平原温室气体净排放研究,今后需要进一步加强的研究方向有以下几个方面: 1)在地-气之间加强冠层尺度除 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 以外的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等温室气体的原位连续在线监测研究,并将稳定性同位素技术应用到此研究中,以达到追踪其来源和比例构成的目的。2)在土壤包气带中,利用稳定性同位素技术探索土壤空气中的温室气体来源比例,明确变更农事制度对剖面温室气体排放的直接和间接影响;进而探索剖面土壤温室气体产生和消耗与土壤-大气界面温室气体排放的响应机制。并根据不同研究区土壤类型和气候条件,探索既可以减少温室气体排放,又可以保持作物产量的最佳措施。3)将模型研究应用于土-气界面温室气体排放研究。短期的试验数据能够得出单位面积粮食产量和温室气体的排放量,但存在年际间的波动,且不能够完全反映农田管理措施的长期效应。经过验证的过程机理模型可进行长时间尺度的模拟,可能是解决此问题的一条捷径。

## 参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [2] HANSEN J E, LACIS A A. Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change[J]. *Nature*, 1990, 346(6286): 713-719
- [3] WANG J X, HUANG J K, ROZELLE S. Climate change and China's agricultural sector: An overview of impacts, adaptation and mitigation[Z]. International Centre for Trade and Sustainable Development and International Food and Agricultural Trade Policy Council, 2010, (5): 1-31
- [4] 吴泽新. 气候变化对黄淮海平原主要粮食作物的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2007: 9  
WU Z X. The effects of the climate change on the main grain crop in the Huang-Huai-Hai Plain[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 9
- [5] NBSC. China Statistical Yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014
- [6] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 285-293  
ZHONG Q, JU X T, ZHANG F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(3): 285-293
- [7] 王玉英, 胡春胜, 程一松, 等. 太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作生态系统碳截存及其气体调节价值[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(7): 1508-1515  
WANG Y Y, HU C S, CHENG Y S, et al. Carbon sequestrations and gas regulations in summer-maize and winter-wheat rotation ecosystem affected by nitrogen fertilization in the piedmont plain of Taihang Mountains, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1508-1515
- [8] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1122-1128  
WANG Y Y, HU C S. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1122-1128
- [9] QIN S P, WANG Y Y, HU C S, et al. Yield-scaled N<sub>2</sub>O emissions in a winter wheat-summer corn double-cropping system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 55: 240-244
- [10] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 297-307  
SONG L N, ZHANG Y M, HU C S, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(3): 297-307
- [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 S, 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
- [12] 谭月臣, 诸葛玉平, 刘东雪, 等. 华北平原农田管理措施对冬小麦-夏玉米轮作系统 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(7): 2638-2649  
TAN Y C, ZHUGE Y P, LIU D X, et al. Effect of farmland management on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emission from winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(7): 2638-2649
- [13] HÜTSCH B W. Methane oxidation in soils of two long-term fertilization experiments in Germany[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(6): 773-782
- [14] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381-4389  
LI Y Q, TANG J W, CHE S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381-4389
- [15] ZHOU Y Z, ZHANG Y Y, TIAN D, et al. The influence of straw returning on N<sub>2</sub>O emissions from a maize-wheat field in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584-585: 935-941
- [16] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米

- 季温室气体的排放[J]. 环境化学, 2012, 31(4): 407-414  
PEI S W, ZHANG Y Y, LIU J F, et al. Greenhouse gas emission under the treatments of fertilization and wheat straw returning during the maize growing seasons[J]. Environmental Chemistry, 2012, 31(4): 407-414
- [17] LI H, QIU J J, WANG L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 135(1/2): 24-33
- [18] MENG L, DING W X, CAI Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(11): 2037-2045
- [19] GREGORICH E G, ROCHETTE P, VAN DEN BYGAART A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in eastern Canada[J]. Soil and Tillage Research, 2005, 83(1): 53-72
- [20] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 176-182  
LIU E K, ZHAO B Q, LI X Y, et al. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(1): 176-182
- [21] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2883-2887  
ZHANG Q Z, WU W L, WANG M X, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2883-2887
- [22] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO<sub>2</sub> 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469-472  
QIANG X C, YUAN H L, GAO W S. Effect of crop-residue incorporation on soil CO<sub>2</sub> emission and soil microbial biomass[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 469-472
- [23] 叶文培, 王凯荣, JOHNSON S E, 等. 添加玉米和水稻秸秆对淹水土壤 pH、二氧化碳及交换态铵的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 345-350  
YE W P, WANG K R, JOHNSON S E, et al. Effects of maize and rice straw amendment on the pH, CO<sub>2</sub>, and exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup> of submerged soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 345-350
- [24] 马静, 徐华, 蔡祖聪, 等. 焚烧麦秆对稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2): 107-110  
MA J, XU H, CAI Z C, et al. Influence of wheat Straw burning on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields[J]. China Environmental Science, 2008, 28(2): 107-110
- [25] GAO Y, YANG L L, SHEN X J, et al. Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146: 1-10
- [26] 郭树芳, 齐玉春, 尹飞虎, 等. 不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1880-1890  
GUO S F, QI Y C, YIN F H, et al. Effect of irrigation patterns on soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from winter wheat field in North China Plain[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1880-1890
- [27] KALLENBACH C M, ROLSTON D E, HORWATH W R. Cover cropping affects soil N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions differently depending on type of irrigation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 137(3/4): 251-260
- [28] SÁNCHEZ-MARTÍN L, ARCE A, BENITO A, et al. Influence of drip and furrow irrigation systems on nitrogen oxide emissions from a horticultural crop[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1698-1706
- [29] AHMAD S, LI C F, DAI G Z, et al. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 54-61
- [30] LENKA N K, LAL R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 78-89
- [31] OMONODE R A, VYN T J, SMITH D R, et al. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 95(1/2): 182-195
- [32] KESSAVALOU A, MOSIER A R, DORAN J W, et al. Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management[J]. Journal of Environmental Quality, 1998, 27(5): 1094-1104
- [33] ABDALLA M, OSBORNE B, LANIGAN G, et al. Conservation tillage systems: A review of its consequences for greenhouse gas emissions[J]. Soil Use and Management, 2013, 29(2): 199-209
- [34] LEMKE P, REN J, ALLEY R B, et al. Climate change 2007: The physical science basis: Summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions[R]. Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007: 337-383
- [35] MALHI S S, LEMKE R L. Tillage, crop residue and N fertilizer effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality and nitrous oxide gas emissions in a second 4-yr rotation cycle[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 96(1/2): 269-283
- [36] WANG Y Y, HU C S, DONG W X, et al. Carbon budget of a winter-wheat and summer-maize rotation cropland in the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 206: 33-45
- [37] RETH S, GRAF W, GEFKE O, et al. Whole-year-round observation of N<sub>2</sub>O profiles in soil: A lysimeter study[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2008, 8(2): 129-137
- [38] WANG Y Y, HU C S, MING H, et al. Concentration profiles of CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O in soils of a wheat-maize rotation ecosystem in North China Plain, measured weekly over a whole year[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 260-272
- [39] WANG Y Y, HU C S, MING H, et al. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in soil profile under a winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain[J].

- PLoS One, 2014, 9(6): e98445
- [40] Fierer N, Chadwick O A, Trumbore S E. Production of CO<sub>2</sub> in soil profiles of a California annual grassland[J]. *Ecosystems*, 2005, 8(4): 412–429
- [41] 梁巍, 张颖, 岳进, 等. 长效氮肥施用对黑土水旱田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(3): 44–48  
LIANG W, ZHANG Y, YUE J, et al. Effect of slow-releasing nitrogen fertilizers on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission in maize and rice fields in black earth soil [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(3): 44–48
- [42] XU X K, BOECKX P, VAN CLEEMPUT O, et al. Urease and nitrification inhibitors to reduce emissions of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in rice production[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 64(1/2): 203–211
- [43] 李虎, 邱建军, 王立刚, 等. 中国农田主要温室气体排放特征与控制技术[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 159–165
- LI H, QIU J J, WANG L G, et al. The characterization of greenhouse gases fluxes from croplands of China and mitigation technologies[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 159–165
- [44] ZOU J W, HUANG Y, ZONG L G, et al. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice-wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(5): 691–698
- [45] QIU J J, LI C S, WANG L G, et al. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(1): GB1007
- [46] ZHANG F, LI C, WANG Z, et al. Modeling impacts of management alternatives on soil carbon storage of farmland in northwest China[J]. *Biogeosciences*, 2006, 3: 451–466