

洱海流域长期不同施肥对菜田温室气体和氨挥发的影响

徐卓颖, 续勇波, 白采禾, 雷宝坤

引用本文:

徐卓颖, 续勇波, 白采禾, 雷宝坤. 洱海流域长期不同施肥对菜田温室气体和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 214–225.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0264>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISEThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039–2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

清液肥对滴灌棉田 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响

王方斌, 刘凯, 殷星, 廖欢, 孙嘉璘, 闵伟, 侯振安

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2354–2362 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0067>

水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366–1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677–684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>

氮肥品种对露地蔬菜 NH_3 挥发及经济效益的影响

李晓明, 居静, 夏永秋, 钱晓晴, 颜晓元, 周伟

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1337–1343 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1482>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

徐卓颖, 续勇波, 白采禾, 等. 洱海流域长期不同施肥对菜田温室气体和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 214–225.

XU Z Y, XU Y B, BAI C H, et al. Effects of long-term fertilization on greenhouse gas and ammonia volatilization from vegetable fields in the Erhai watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1): 214–225.



开放科学 OSID

洱海流域长期不同施肥对菜田温室气体和氨挥发的影响

徐卓颖¹, 续勇波^{2*}, 白采禾¹, 雷宝坤³

(1. 云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201; 2. 云南农业大学烟草学院, 昆明 650201; 3. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205)

摘要:为揭示洱海流域长期施肥下露地菜田温室气体(N_2O 、 CH_4 、 CO_2)和土壤氨(NH_3)挥发对不同施肥方式的响应趋势及影响因素,依托始于2007年连续进行15 a的长期定位试验,研究5个施肥处理[不施任何肥料(CK)、有机肥(OM)、化肥和有机肥(NPK+OM)、增施氮肥(NPK+OM+N)、增施磷肥(NPK+OM+P)]的温室气体及氨挥发的特征。结果表明:长期定位15 a后,OM处理能显著增加菜田土壤全氮、有机质、有效磷含量。在等氮条件下,与OM处理相比,NPK+OM处理能显著增加菜田土壤 NO_3^- -N含量;NPK+OM+N处理会使土壤pH显著降低,导致土壤酸化。NPK+OM+N处理pH比NPK+OM处理显著降低9.27%;OM处理会导致土壤 CO_2 和 CH_4 排放量显著升高,在整个莴苣生育期内 CO_2 和 CH_4 的累积排放量分别为($22\,489.29 \pm 1\,562.91$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和(1.95 ± 1.31) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;增施氮肥会导致 N_2O 排放量显著升高,莴苣生育期内NPK+OM+N处理 N_2O 累积排放量为(38.33 ± 10.74) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;氨挥发主要发生在追肥后,各处理氨挥发量表现为NPK+OM+P>NPK+OM+N>NPK+OM,且处理间存在显著差异。相较于NPK+OM处理,NPK+OM+P、NPK+OM+N处理使氨挥发显著增加245.7%、124.3%,说明增施氮肥和增施磷肥会显著增加土壤氨挥发;OM和NPK+OM+N处理会显著增加全球增温潜势和温室气体排放强度。OM处理产量达($3\,183.81 \pm 293.88$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,该处理虽然能显著增加蔬菜产量,但造成的全球增温潜势和温室气体排放强度也是最大的。全氮、有机碳、pH是影响温室气体和氨挥发排放的关键影响因素。有机肥和化肥配施是本研究推荐的施肥方案,该方案既可以保证经济效益,还可以兼顾生态环境效益。

关键词:长期定位菜田;施肥方式;温室气体;氨挥发

中图分类号:S63 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)01-0214-12 doi:10.11654/jaes.2023-0264

Effects of long-term fertilization on greenhouse gas and ammonia volatilization from vegetable fields in the Erhai watershed

XU Zhuoying¹, XU Yongbo^{2*}, BAI Caihe¹, LEI Baokun³

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 2. College of Tobacco Science, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Agricultural Resources and Environment, Kunming 650205, China)

Abstract: In this study, we sought to examine the trends and influencing factors of greenhouse gases (N_2O , CH_4 , and CO_2) and soil ammonia volatilization (NH_3) in response to different fertilization modes in an open vegetable field in the Erhai watershed under long-term fertilization. On the basis of a long-term positioning experiment conducted over 15 years, in 2007, we examined the characteristics of

收稿日期:2023-04-06 录用日期:2023-06-19

作者简介:徐卓颖(1998—),女,云南曲靖人,硕士研究生,主要从事农田碳氮平衡研究。E-mail:suxin709179180@126.com

*通信作者:续勇波 E-mail:xuyongboxx@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(32160758,31960635);云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202005AC160043);云南省重大科技计划项目(202102AE090011);产业技术领军人才专项2019;云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0998)

Project supported: National Natural Science Foundation of China(32160758,31960635); Yunnan Young and Middle-aged Academic and Technological Leaders Reserve Talent Program(202005AC160043); Key Science and Technology Project of Yunnan Province(202102AE090011); Industrial Technology Leading Talents Project 2019; Scientific Research Foundation of Education Department of Yunnan Province(2023Y0998)

greenhouse gases and ammonia volatilization in response to the following five fertilization treatments: no fertilizer (CK), organic fertilizer (OM), chemical fertilizer and organic fertilizer (NPK+OM), increased nitrogen fertilizer (NPK+OM+N), and increased phosphate fertilizer (NPK+OM+P). After 15 years of long-term positioning, the OM treatment was found to promote a significant increase in the contents of total nitrogen, organic matter, and available phosphorus in the vegetable field. Under iso-nitrogen conditions, compared with the OM treatment, treatment NPK+OM contributed to a significant increase in the NO_3^- -N content of vegetable field soil. The pH of the soil subjected to the NPK+OM+N treatment was significantly lower than that of the NPK+OM treatment by 9.27%. Long-term incremental application of nitrogen fertilizer will lead to a significant reduction of soil pH, which leads to soil acidification. Application of organic fertilizer alone resulted in significant increases in soil CO_2 and CH_4 emissions. The accumulative emission of CO_2 and CH_4 in the OM treatment was found to be significantly higher than that in other treatments, with an accumulative emissions of $(22\,489.29 \pm 1\,562.91) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $(1.95 \pm 1.31) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Furthermore, N_2O emissions were significantly increased by increasing the application of nitrogen fertilizer. The cumulative N_2O emission of NPK+OM+N was $(38.33 \pm 10.74) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, which was significantly higher than that recorded for other treatments. Ammonia volatilization is mainly concentrated after topdressing. In this regard, we detected significant differences among the assessed treatments, which could be ordered as follows: $\text{NPK+OM+P} > \text{NPK+OM+N} > \text{NPK+OM}$. Compared with the NPK+OM treatment, treatments NPK+OM+P and NPK+OM+N promoted significant increases in NH_3 emission by 245.7% and 124.3%, respectively. Unbalanced fertilization methods such as increased inputs of nitrogen and phosphorus fertilizers can contribute to significant increases in NH_3 emission, and we detected significant increases in the global warming potential and greenhouse gas intensity in response to the application of organic fertilizer and nitrogen fertilizer alone. Single application of organic fertilizer led to the production of $(3\,183.81 \pm 293.88) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ NH}_3$. Although such fertilization can significantly increase vegetable yield, it also contributes to the largest global warming potential and greenhouse gas intensity. Total nitrogen, soil organic carbon, and pH are the key factors affecting the emission of greenhouse gases and ammonia volatilization. On the basis of the findings of this study, we recommend a fertilization scheme comprising the combined application of organic and chemical fertilizer, which can ensure economic benefits and also takes into account ecological and environmental factors.

Keywords: long-term positioning vegetable field; fertilization method; greenhouse gas; ammonia volatilization

农业生产过程中排放的大量温室气体(CH_4 、 N_2O 、 CO_2)成为全球气候变暖的重要驱动因素之一^[1]。化肥氮是 N_2O 排放的主要来源,在氮肥种类中尿素投入农田产生的 N_2O 显著高于其他氮肥,且 N_2O 的排放量与氮肥的投入量存在显著正相关关系^[2-3]。有研究表明,氮肥深施以及分次施肥能显著降低 N_2O 排放量^[4]。有机肥为土壤提供有机质底物,会促进 N_2O 排放^[5]。一般认为,有机肥会向农田提供 CH_4 前体,从而促进 CH_4 排放^[6]。新鲜有机肥会导致 CH_4 排放率高,施用充分腐熟发酵的有机肥能降低 CH_4 排放量^[7]。有研究认为化肥对 CH_4 排放的影响主要与土壤C/N有关。相对于水田,旱地的 CH_4 排放量较低,因为旱地土壤为好氧环境,氧化作用较强^[8]。土壤 CO_2 是土壤中植物根系、土壤微生物、土壤动物等呼吸排放的共同产物。有机肥可以促进土壤 CO_2 的排放,因为外源有机物质的投入能改善土壤理化性质,显著促进土壤微生物活性,进而促进了土壤 CO_2 的排放。尿素和碳铵相较于其他氮肥会造成更多的氨挥发^[9]。有机肥能增加土壤有机质,土壤有机质对 NH_3 和 NH_4^+ 的吸附能力较强,能使反应底物浓度降低,抑制氨挥发^[10]。也有学者研究表明,有机无机肥料配合施用可为土壤微生物提供充足有效的碳源和氮源,使微生物对氮素

的固定和释放得到调控,促进作物对氮素的吸收利用,降低氨挥发损失^[11-12]。有研究表明,氮肥投入量是影响蔬菜产量的关键因素,在氮肥等氮投入的情况下,有机无机肥配施相较于单施化肥或有机肥效果更优^[13]。蔬菜有机肥养分投入量明显增加,化肥氮和磷的投入量呈现下降趋势^[14]。农田生态系统综合增温趋势能够综合且精准地评价农田生态系统的增温趋势^[15]。施肥措施对土壤碳氮循环有直接影响,是温室气体排放的关键影响因素,进而影响全球增温趋势。在提高生产力的同时,要尽可能减少外源投入,降低综合增温趋势。研究表明,有机无机肥配施可以改善土壤理化性质,在一定程度上缓解因长期施用无机肥引起的土壤板结、养分失衡、作物产量下降等问题^[16]。

集约化蔬菜生产过程中氮肥投入量大导致菜田生态系统成为温室气体和活性氮的重要排放源^[17]。洱海流域位于大理州的核心地带,是大理州蔬菜主要产区之一。在流域农业生产过程中,就污染物而言,蔬菜种植中的总氮污染在种植业中占比较高。施肥方式是农田生态系统温室气体排放和氨挥发的主要影响因子之一^[18-20],但目前鲜见长期定位背景下不同施肥方式对温室气体和氨挥发的影响研究,因此在保障作物产量、改善农产品品质的同时,利用科学的施

肥技术控制农业面源污染,减少农业温室气体排放和氨挥发,缓解农业生产过程中产生的环境负担显得尤为重要。化肥减量增效后的农学以及生态效应是研究关键。本研究以大理洱海流域始于2007年连续种植15 a的长期定位露地菜田为研究对象,通过对比研究不同施肥方式对露地菜田的温室气体和氨挥发的影响,分析不同有机无机肥配施下,蔬菜田温室气体和氨排放特征,以期为洱海流域露地菜田的施肥模式提供理论依据和科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期定位试验基地位于云南省大理白族自治州下关街道大庄村(25°09′45″N, 100°12′14.3″E),试验始于2007年。试验地距离洱海500 m,海拔1 980 m,属北亚热带高原季风气候类型,温差小,四季不明显,地貌类型为山地,地形为缓坡(6°),种植方式为大田种植,土壤质地为壤土。试验设5个处理,每个处理3次重复,小区面积24 m²。0~20 cm供试土壤采样时间为2007年8月25日,基本理化性质如下:硝态氮14.30 mg·kg⁻¹,铵态氮5.14 mg·kg⁻¹,有机质23.30 g·kg⁻¹,全氮1.32 g·kg⁻¹,全磷1.40 g·kg⁻¹,有效磷77.76 mg·kg⁻¹,pH 6.63。蔬菜田一个轮作周年种植三茬作物,轮作模式为甘蓝-茼蒿-茼蒿。种植前按照当地农户生产习惯对土壤进行常规翻耕。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设置

本研究试验采用气体数据为连续定位试验的第15年茼蒿茬数据:2022年8月17日—9月28日,土壤数据为此茬茼蒿收获后土壤测得的数据。茼蒿品种为早青圆叶,前茬作物为甘蓝。设5个处理:(1)CK,不施任何肥料,只种植作物,田间管理措施相同。(2)

OM,只施有机肥,有机肥种类为当地农户所用牛粪,以烘干基计算N投入量,419.79 kg·hm⁻²。(3)NPK+OM,施化肥和有机肥,根据当地施肥状况、作物产出、土壤养分状况推荐的作物施肥方案,有机氮投入89.96 kg·hm⁻²,无机氮投入329.83 kg·hm⁻²。(4)NPK+OM+N,在NPK+OM处理的基础上,化肥氮投入量为NPK+OM处理的150%。(5)NPK+OM+P,在NPK+OM处理的基础上,化肥磷投入量为NPK+OM处理的150%。有机肥品种为牛粪,所有需要施牛粪的处理牛粪均作为基肥一次施入。施用化肥为尿素(46% N)、普钙(17% P₂O₅)和硫酸钾(50% K₂O)。NPK+OM、NPK+OM+N、NPK+OM+P处理:牛粪作为基肥,化肥施用中20%氮肥、全部磷肥、60%钾肥作为基肥,剩余的80%氮肥与40%钾肥作为追肥。基肥在2022年8月15日撒施并进行翻耕,在2022年8月17日进行菜秧移栽,移栽后第26天(2022年9月12日)追肥,种植方式用小苗移栽。整个种植过程采用1次基肥和1次追肥的施肥方式,基肥撒施,追肥穴施。各处理养分投入量详见表1。

1.2.2 土壤温室气体取样与测定

土壤温室气体采用静态箱法测定^[21]。采样频率:施肥后第1、2、3、5、7、9天及此后每隔7 d一采,直至收获。气体采样装置分为底座和箱体两部分。箱体为PVC材质,外层刷反光漆,防止采样时升温过快,侧面预留小孔用于安装气体采样管路。底座为不锈钢材质(长×宽×高=50 cm×50 cm×15 cm),配套顶箱(长×宽×高=50 cm×50 cm×60 cm)。套入一株长势均匀的植株,所测数据包括植株和土壤向大气产生的CO₂总排放值。每次采样时(9:00—11:00)将顶箱嵌入底座上部的凹槽中,用水密封,以阻断箱内外空气交流。记录采样前、后静态箱旁5 cm土壤温度(探针式电子温度计记录)、大气温度、气压(田边环境监测

表1 试验处理肥料投入量

Table 1 Fertilization treatments in the field experiment

处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer/(kg·hm ⁻²)			追肥 Topdressing/(kg·hm ⁻²)			总施肥量 Total amount/(kg·hm ⁻²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
OM	419.79	735.08	1 558.92	—	—	—	419.79	735.08	1 558.92
NPK+OM	155.92	322.49	558.92	263.87	—	149.93	419.79	322.49	708.85
NPK+OM+N	188.91	322.49	558.92	395.80	—	149.93	584.71	322.49	708.85
NPK+OM+P	155.92	404.95	558.92	263.87	—	149.93	419.79	404.95	708.85

注:NPK+OM、NPK+OM+P处理有机氮、无机氮占施氮总量的21.43%、78.57%。NPK+OM+N处理有机氮、无机氮占施氮总量的15.38%、84.62%。

Note: Organic nitrogen and inorganic nitrogen accounted for 21.43% and 78.57% of total nitrogen in NPK+OM and NPK+OM+P treatments. Organic nitrogen and inorganic nitrogen accounted for 15.38% and 84.62% of the total nitrogen in NPK+OM+N treatment.

气象站记录)。每个静态箱扣上箱子后于0、15、30 min 3个时段各采集气体1次,每次采样都记录箱内温度,用带三通阀的50 mL医用注射器每针取28 mL气体后,将气体立即注射到真空气瓶中。

温室气体排放通量计算公式^[21]:

$$F = \frac{dc}{dt} \times D \times \frac{V}{A} = \frac{dc}{dt} \times \frac{P}{RT} \times H$$

式中: F 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; dc/dt 为采样时间内气体浓度变化的直线斜率; D 为箱内气体的密度, $\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$; $D=n/v=P/RT$, n 为气体的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; V 为气体体积, m^3 ; A 为底座面积, m^2 ; P 为箱内气压, Pa ; T 为采样时箱内平均华氏温度, K ; R 为气体常数, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; H 为取样箱内的净高度, m 。

累积排放通量计算公式:

$$M = \sum \left[\frac{F_{i+1} + F_i}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 10^{-2} \times 24 \right]$$

式中: M 为气体累积排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; i 为第 i 次采样; $t_{i+1}-t_i$ 为相邻两次采样间隔时间, d ; 10^{-2} 为单位转换系数;24为时间转换系数。

1.2.3 土壤氨挥发取样与测定

土壤氨挥发采用田间原位-密闭室间歇抽气法(2%硼酸吸收)测定^[22]。采样装置为PVC材料所制,采样频率:施肥后第1、2、3、5、7、9天及此后每隔7 d一采,样品当天采回滴定,直至监测到的数据与对照相似为止(根据测到的氨挥发量调整测定频率)。采样时间为9:00—11:00。

氨挥发排放通量计算公式^[23]:

$$F = \frac{V \times C \times 0.014 \times 12 \times 10^3}{\pi r^2 \times 24}$$

式中: F 为氨挥发排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; V 为滴定的标准硫酸用量, mL ; C 为滴定硫酸标定浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; 0.014为氮原子相对原子质量, $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; 12为24 h与日氨挥发收集时间2 h的比值; 10^3 为单位转换系数; 24为时间转换系数; r 为气室半径, $r=0.12 \text{ m}$ 。

氨挥发累积排放量计算公式:

$$E = \sum_{i=1}^n \left[\frac{F_i + F_{i+1}}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \times 10^{-2} \times 24 \right]$$

式中: E 为氨挥发累积排放量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F_i 为第 i 天采样日氨挥发排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; i 为第 i 次采样; $t_{i+1}-t_i$ 为两次采样测定的时间间隔, d ; 10^{-2} 为单位转换系数;24为时间转换系数。

1.2.4 温室效应测算方法

全球增温潜势(Global warming potential, GWP , $\text{kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)为温室气体排放的综合指标,一般用 CO_2

表示, CH_4 、 N_2O 用 CO_2 当量(CO_2e)表示, CH_4 和 N_2O 在100年尺度上为 CO_2 的28倍和265倍^[24]。

$$GWP = F_{\text{N}_2\text{O}} \times 265 + F_{\text{CH}_4} \times 28 + F_{\text{CO}_2}$$

温室气体排放强度(Greenhouse gas intensity, $GHGI$, $\text{kg CO}_2\text{e} \cdot \text{kg}^{-1}$)表示单位产量的全球增温潜势。

$$GHGI = \frac{GWP}{Y}$$

式中: Y 为该处理单位面积平均产量,成熟期按照小区进行产量测定,每个小区采用双行平行式随机采集10株植株,计算产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

1.2.5 土壤取样与测定

在收获后,按“S”形选取5点,用内径为5 cm的土钻采集0~20 cm土层土样,按照《土壤农化分析》^[25]中的方法测定土壤理化指标。

1.3 数据统计分析

数据采用Microsoft Excel和IBM SPSS Statistics 27.0.1软件进行处理分析。采用GraphPad Prism 9.5.0软件作图。采用CANOCA5.0进行环境因子与温室气体和土壤氨挥发排放通量之间的冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对菜田土壤养分的影响

如表2所示,15 a长期定位试验后的土壤与基础土壤相比,CK处理有机质含量降低了58.58%。OM处理土壤全氮、有机质、有效磷含量显著增高。OM与NPK+OM+N处理相比全氮含量显著增加35.70%,与NPK+OM+P处理相比有效磷含量显著增加14.40%。NPK+OM、NPK+OM+N、NPK+OM+P处理的 NO_3^- -N含量显著高于OM和CK处理,表明在等氮条件下,与单施有机肥相比,长期有机无机肥配施能显著增加菜田土壤 NO_3^- -N含量。NPK+OM、NPK+OM+N、NPK+OM+P处理pH显著低于OM,说明单施有机肥能缓解土壤酸化,其中NPK+OM+N处理pH比NPK+OM显著降低9.27%,说明长期增施氮肥会导致土壤pH显著降低,导致土壤酸化。

2.2 土壤温室气体和氨挥发排放通量动态变化和累积排放量

2.2.1 土壤温室气体和氨挥发排放通量动态变化

CO_2 排放通量动态变化如图1A所示。莴苣整个生育期内,各处理 CO_2 排放通量具有相似的波动规律,即在施肥后迅速释放,然后在8月21日(移栽后第4天)回落至较低。OM处理相较其他处理有明显的变

表2 不同施肥处理的蔬菜收获后农田土壤养分情况

Table 2 Field soil nutrients of vegetables with different fertilization treatments after harvest

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium/ (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)	有效磷 Olsen-P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/ (mg·kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N/ (mg·kg ⁻¹)	pH
CK	2.12±0.08d	0.41±0.05b	9.07±1.46a	9.65±0.69c	64.48±3.49c	34.53±1.65c	2.3±0.6c	50.8±9.3c	7.24±0.10a
OM	5.17±0.25a	0.68±0.03a	8.20±0.34a	31.62±2.17a	213.98±30.21a	339.86±71.83b	5.8±1.5b	82.1±4.2b	6.87±0.11b
NPK+OM	3.44±0.19c	0.72±0.14a	8.31±0.24a	21.13±3.48b	185.03±4.60b	565.06±203.20a	10.3±1.0b	103.1±0.9a	4.53±0.12c
NPK+OM+N	3.81±0.05b	0.68±0.11a	8.91±1.07a	21.15±0.36b	210.21±17.30ab	614.15±63.45a	16.3±5.4a	102.3±2.1a	4.11±0.06d
NPK+OM+P	3.64±0.18bc	0.71±0.07a	9.48±0.36a	20.89±2.31b	187.04±2.58b	471.94±72.42ab	10.5±2.1b	100.8±4.2a	4.49±0.05c

注:数据为平均值±标准差;同一列中不同英文小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data are represented with mean ± standard deviation. Different letters indicate significant differences among treatments at 0.05 level. The same below.

幅,范围在1 134.79~4 393.47 mg·m⁻²·h⁻¹,在8月18日(移栽后第1天)、19日(移栽后第2天)、24日(移栽后第7天)出现了较大的观测值,分别为4 221.57、4 393.47、4 005.00 mg·m⁻²·h⁻¹。CK、NPK+OM、NPK+OM+N、NPK+OM+P处理变幅较小,总体范围在113.19~967.79 mg·m⁻²·h⁻¹。OM处理CO₂排放通量在莴苣生育期内始终显著高于其他处理。

N₂O排放通量动态变化如图1B所示。除CK外的其他处理均具有相似的波动规律,即排放量在8月21日(移栽后第4天)处于较低水平,8月24日—9月14日呈下降趋势。NPK+OM+N处理相较其他处理有明显的变幅,变幅范围在0.94~11.23 mg·m⁻²·h⁻¹,在8月24日出现最大观测值11.23 mg·m⁻²·h⁻¹。NPK+OM+N处理的N₂O排放通量从追肥后第2天(9月14日)至收获(9月28日)呈现上升趋势。NPK+OM+N处理N₂O排放通量在莴苣整个生育期内除8月21日(移栽后第4天)和9月21日(追肥后第9天)外都显著高于其他处理。

CH₄排放通量动态变化如图1C所示。OM处理相较其他处理有明显的变幅,范围在-0.02~2.12 mg·m⁻²·h⁻¹。在8月18日—9月13日期间OM处理的CH₄排放通量均高于其他处理,在移栽后的第1天(8月18日)观测到最大值为2.12 mg·m⁻²·h⁻¹,之后逐渐降低趋于平缓。CK、NPK+OM、NPK+OM+N、NPK+OM+P处理的CH₄排放通量和变幅较小,且无明显趋势,总体范围在-0.23~0.36 mg·m⁻²·h⁻¹。

NH₃排放通量动态变化如图1D所示。CK、OM处理在整个生长期未出现较为明显的排放趋势,比较平缓。NPK+OM+P、NPK+OM+N、NPK+OM处理NH₃排放通量具有相似的波动规律,在移栽后第1天有明显排放量,随后降低趋近于零,在追肥后第3天(9月

15日)出现排放峰值,分别为22.81、17.30、4.79 mg·m⁻²·h⁻¹,随后降低并在9月21日趋近于零。

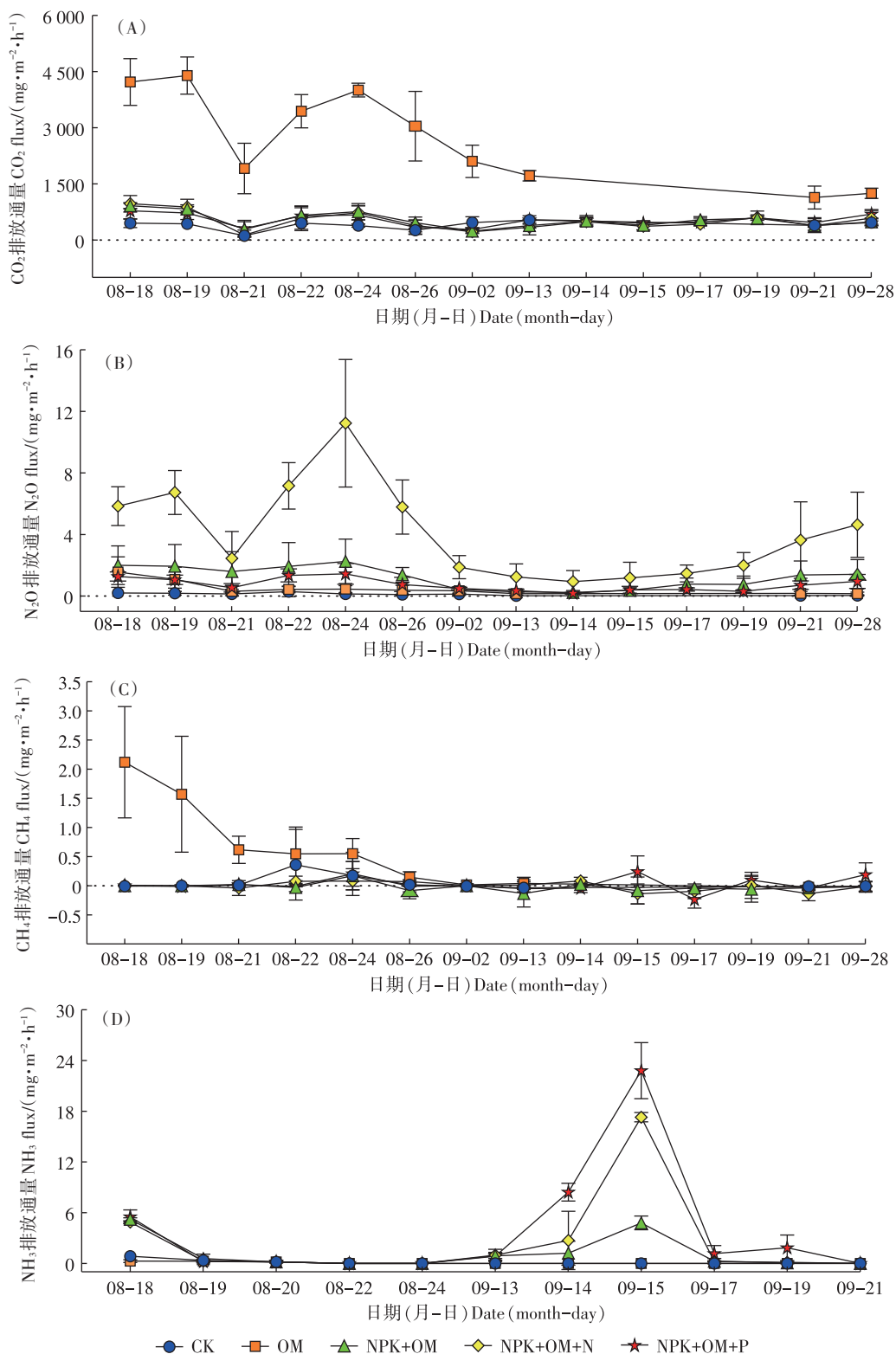
2.2.2 土壤温室气体和氨挥发累积排放量

CO₂累积排放量见图2A。OM处理排放量显著高于其他处理,达(22 489.29±1 562.91)kg·hm⁻²。相较于NPK+OM处理,OM处理显著增加375.9%。CK、NPK+OM、NPK+OM+N、NPK+OM+P处理间无显著差异。因此,单施有机肥会导致CO₂累积排放量显著升高。

N₂O累积排放量见图2B。NPK+OM+N处理的排放量显著高于其他处理,累积排放值为(38.33±10.74)kg·hm⁻²。与NPK+OM处理相比,NPK+OM+N处理的排放量显著升高257.6%。OM处理与NPK+OM、NPK+OM+P处理间无显著差异。以上说明过量施用氮肥会导致N₂O排放量显著升高。

CH₄累积排放量见图2C。OM处理的排放量显著高于其他处理,累积排放值为(1.95±1.31)kg·hm⁻²。NPK+OM处理在莴苣生育期内CH₄累积排放量均为负值,基肥期累积排放(-0.20±0.39)kg·hm⁻²,追肥期累积排放(-0.16±0.28)kg·hm⁻²,即NPK+OM处理表现为CH₄库效应。与NPK+OM处理相比,OM处理的排放量显著增加118.6%,说明单施有机肥可显著提升CH₄累积排放量。

NH₃累积排放量见图2D。NPK+OM+P、NPK+OM+N、NPK+OM处理在基肥期NH₃累积排放量无显著差异,而在追肥期排放量表现为NPK+OM+P>NPK+OM+N>NPK+OM,且处理间存在显著差异。NPK+OM+P、NPK+OM+N、NPK+OM处理累积排放量分别为(13.24±3.83)、(8.59±0.88)、(3.83±0.79)kg·hm⁻²。CK与OM处理在整个生育期内排放量均无显著差异,累积排放量分别为(0.36±0.01)kg·hm⁻²和(0.19±0.03)kg·hm⁻²。因此,施化肥处理相较于单施

图1 不同施肥措施土壤 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 和 NH_3 排放通量动态变化Figure 1 Dynamic changes of soil greenhouse gas fluxes of CO_2 , N_2O , CH_4 and NH_3 under different fertilization practices

有机肥会增加氨挥发。相较于 NPK+OM 处理, NPK+OM+P、NPK+OM+N 处理分别使 NH_3 排放量显著增加 245.7%、124.3%, 说明不平衡的施肥处理会导致氨挥

发排放量增加。

2.3 蔬菜产量、GWP 和 GHGI

如表 3 所示, OM 处理的 GWP 显著高于其他处理,

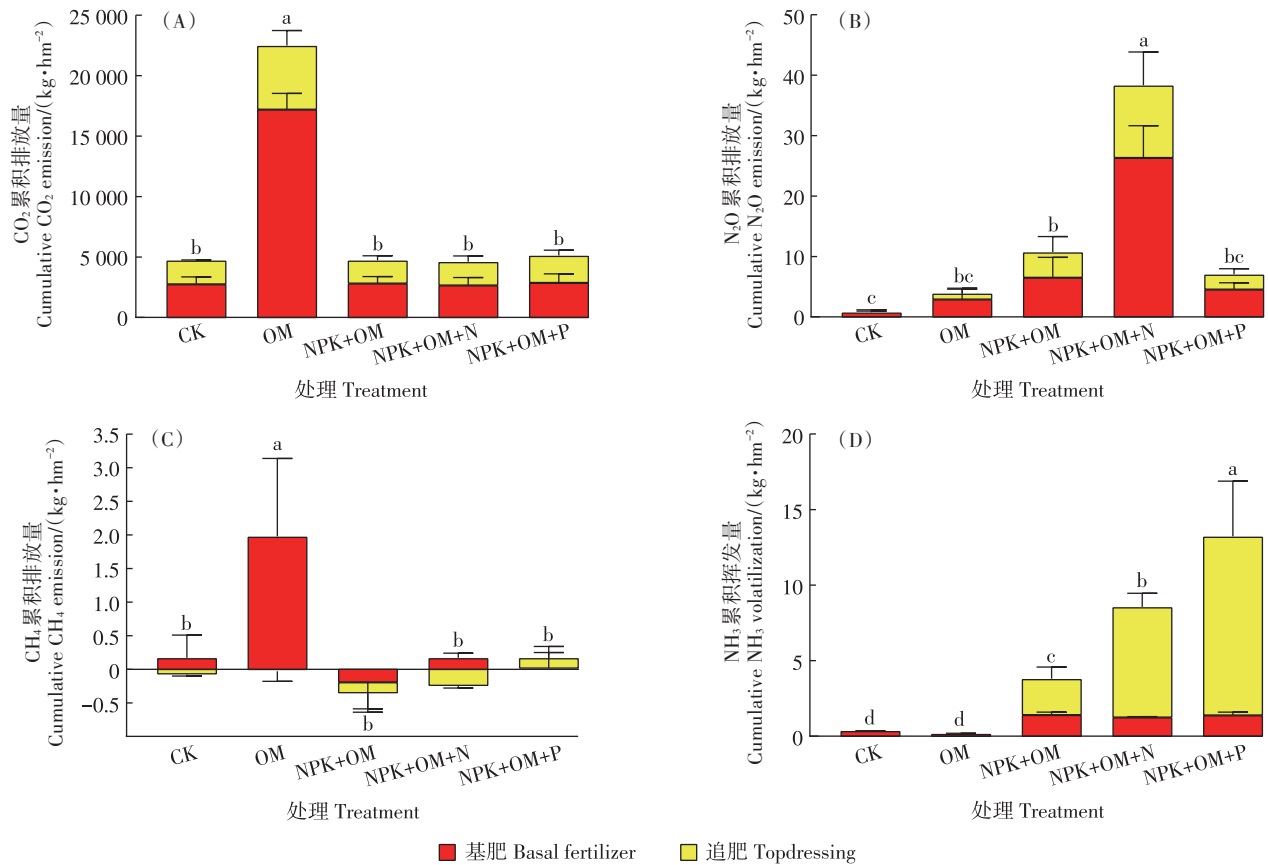


图2 不同施肥措施土壤温室气体CO₂、N₂O、CH₄和NH₃累积排放量

Figure 2 Cumulative emissions of CO₂, N₂O, CH₄, and NH₃ from soil under different fertilization practices

表3 全球增温潜势、产量和温室气体强度

Table 3 Global warming potential, yield and greenhouse gas intensity

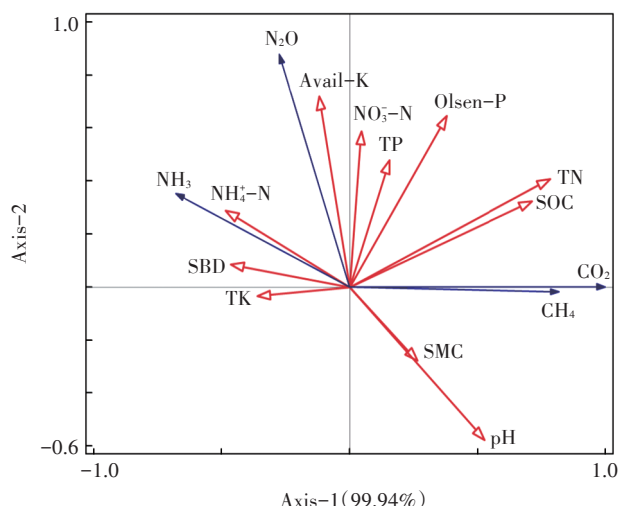
处理 Treatment	全球增温潜势 GWP/(kg·hm ⁻²)	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	温室气体排放 强度 GHGI/ (kg·kg ⁻¹)
CK	4 976.58±702.74c	1 849.81±30.81c	0.18±0.02b
OM	23 576.96±2 050.20a	3 183.81±293.88a	0.50±0.06a
NPK+OM	7 557.44±2 426.97c	2 401.20±373.52b	0.22±0.09b
NPK+OM+N	14 768.54±3 704.73b	2 454.56±373.52b	0.42±0.15a
NPK+OM+P	7 010.31±1 180.67c	2 579.07±222.16b	0.18±0.04b

NPK+OM+N处理显著高于NPK+OM、NPK+OM+P、CK处理。NPK+OM与OM处理相比GWP显著降低67.95%，与NPK+OM+N相比显著降低48.83%。OM处理产量显著高于其他处理，NPK+OM处理产量比CK显著增加29.81%。OM和NPK+OM+N处理的GHGI显著高于其他处理，NPK+OM处理相较于OM处理GHGI显著降低56.00%。这表明单施有机肥和增施氮肥会显著增加GWP和GHGI，单施有机肥虽然能显著增加蔬菜产

量，但造成的GWP和GHGI也是最大的。因此，综合产量和温室效应来看，NPK+OM可在保持产量的前提下有效降低GWP和GHGI。

2.4 温室气体排放和氨挥发与环境因素关系

土壤理化性质与温室气体、氨挥发累积排放量的冗余分析(图3)表明，pH、全氮、有机碳、全磷、全钾、容重、速效钾、有效磷、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、土壤含水率11个土壤理化性质指标对菜田土壤温室气体和氨挥发排放影响的解释率可达到99.94%。土壤CO₂排放量与全氮、有机碳、pH呈显著正相关；土壤N₂O排放量与pH呈显著负相关，与速效钾呈显著正相关；土壤CH₄排放量与全氮呈显著正相关，与NH₄⁺-N呈显著负相关；土壤NH₃排放量与pH呈显著负相关，与NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、速效钾呈显著正相关。由蒙特卡罗检验结果可知，全氮($F=20.6, P<0.05$)、有机碳($F=13.4, P<0.05$)、pH($F=160, P<0.05$)对土壤温室气体排放和氨挥发的影响达到显著水平。由此可知，全氮、有机碳、pH是影响温室气体和氨挥发排放的关键因素。



TN 为全氮,TK 为全钾,TP 为全磷,Avail-K 为速效钾,Olsen-P 为有效磷,SOC 为有机碳,SBD 为土壤容重,SMC 为土壤含水率。

TN is total nitrogen,TK is total potassium,TP is total phosphorus,Avail-K is quick available potassium,Olsen-P is available phosphorus,SOC is organic carbon,SBD is soil bulk density,SMC is soil moisture content.

图3 土壤理化性质与温室气体、 NH_3 累积排放量的冗余分析

Figure 3 Redundant analysis of soil physical and chemical properties and cumulative emissions of greenhouse gases and NH_3

3 讨论

3.1 不同施肥处理对土壤理化性质的影响

本研究中 NPK+OM+N 处理的土壤全氮含量和 NPK+OM+P 处理的土壤全磷含量并不是最高的(表 2),可能的原因是降雨和灌溉过程产生径流,使氮磷流失,有研究结果表明增加氮肥和增加磷肥能够增加氮磷流失量^[26]。增施氮肥会导致 N_2O 排放量显著升高(图 2B),氮素以 N_2O 的形式流失。有研究表明过量施氮可破坏农田土壤结构,降低团聚体的稳定性,增加 N_2O 的排放量^[27]。OM 处理土壤全氮、有机质和有效磷含量显著增高,说明有机肥能提高土壤肥力。有研究表明 100% 有机肥替代化肥处理的土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量最高^[28]。OM 与 NPK+

OM+P 处理相比有效磷含量显著增加 14.40%,因为 OM 处理要满足氮的投入,相应就会投入大量有机磷,甚至大于 NPK+OM+P 处理的磷投入量。但为追求产量盲目施用有机肥会增加氮磷径流流失风险,有研究表明单施牛粪和鸡粪导致径流水总磷浓度比常规施用化肥提高 49.1% 和 12.3%^[29]。有机肥与化肥以 1:1 配施可有效降低菜田氮磷排放,蔬菜产量和氮肥利用率分别提高 25% 和 23%^[30]。在本研究中长期定位 15 a 的 CK 处理的全氮含量高于基础土壤,追溯种植过程分析原因可能是每茬蔬菜收获后土壤中留有根系残茬。本研究中与单施有机肥相比,长期有机无机肥配施能显著增加菜田土壤 NO_3^- -N 含量。有研究表明配施有机肥可以通过提高土壤有机质含量,增强土壤表层对 NO_3^- -N 的吸附固持^[31]。本研究中 NPK+OM+N 处理 pH 显著低于其他处理,说明长期增施氮肥会使土壤 pH 显著降低,导致土壤酸化,这与毛妍婷等^[32]的研究结果一致。有研究表明,有机肥与化肥配施可以提高土壤 C/N,有效缓解土壤酸化^[33]。然而本研究中 NPK+OM 处理缓解土壤酸化的效果不显著,这可能与有机肥投入的比例有关,本研究中有机肥氮的含量仅占总氮含量的 21.43%。有研究表明维持土壤不酸化的有机肥替代化肥氮的比例随施氮量增加而增大^[34]。本研究中 OM 处理 pH 显著高于其他施肥处理,是因为土壤有机质中弱酸性官能团解离形成中性分子的有机阴离子质子化是施肥诱导土壤 pH 缓冲能力和土壤抗酸性增强的主要机制^[35],因此有机质是长期施肥下延缓土壤酸化的关键因素。

3.2 不同施肥处理对土壤温室气体排放和氨挥发的影响

施肥可能会影响土壤养分转化,并对农业生态系统的温室气体排放产生深远影响。本研究中 OM 处理会导致 CO_2 和 CH_4 排放量显著升高,NPK+OM+N 处理会导致 N_2O 排放量显著升高。因为有机肥影响土

表4 土壤理化性质与温室气体、氨挥发累积排放量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between soil physical and chemical properties and cumulative emissions of greenhouse gases and ammonia volatilization

	SOC	pH	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	TP	Olsen-P	TK	Avail-K	SBD	SMC
CO_2	0.713**	0.525*	0.783**	0.045	-0.485	0.157	0.379	-0.36	-0.12	-0.464	0.264
N_2O	0.088	-0.649**	0.143	0.503	0.385	0.376	0.461	0.069	0.664**	0.202	-0.316
CH_4	0.441	0.49	0.561*	-0.091	-0.598*	-0.004	0.165	-0.261	-0.213	-0.504	0.164
NH_3	0	-0.945**	-0.13	0.666**	0.858**	0.485	0.358	0.189	0.696**	0.159	-0.252

注:*表示在 $P<0.05$ 水平的显著相关性,**表示在 $P<0.01$ 水平上的显著相关性。

Note:* indicates significant correlation at $P<0.05$ level,** indicates significant correlation at $P<0.01$ level.

壤细菌生物多样性,是温室气体重要排放源。有机肥直接影响产甲烷菌群落和硝化细菌群落,从而加速 CH_4 排放^[36]。王晓娇等^[37]采用Meta分析得出,有机肥施用显著提高 CO_2 排放量,且有机无机肥配施能减少 CO_2 排放量。施用有机肥对 N_2O 减排效果不显著,因为为了满足氮素供应,过量投入有机肥也会导致 N_2O 排放量高,引起土壤酸化^[38-39]。农田是 NH_3 的主要排放源,本研究中增施氮肥和磷肥都会显著增加土壤 NH_3 排放。研究表明,花椰菜和大白菜季土壤氨挥发量随化学氮肥用量的增加而增加^[40],合理控制氮肥用量是降低土壤氨挥发最有效的措施^[41]。施磷量相同时,氨挥发量随施氮量增加而增加;施氮量相同时,高磷和低磷处理氨挥发量均高于优化处理^[42],这与本研究结论一致,因此合理平衡的施肥方式是减少土壤氨挥发损失的关键。在本研究中,温室气体 CO_2 排放通量OM处理较高,可能是因为长期施用有机肥增加了土壤有机碳含量,促进了酶活性和有机质分解,造成 CO_2 排放通量增加^[43]。但也有研究表明有机肥对 CO_2 排放通量没有太大的影响^[44],原因可能是因为施肥处理仅为一季,土壤理化性质缺乏稳定性,因此在短期施肥处理背景下的 CO_2 排放通量测算缺乏可靠性。本试验施肥处理长达15 a,气体采集和测算具有可靠性和参考价值。 N_2O 排放通量一般随氮肥用量的增加而增加^[45],因此增氮处理(NPK+OM+N) N_2O 排放通量较高。试验结果中8月18日—8月24日的 N_2O 、 CO_2 排放通量产生两个高峰期,原因是排放总体呈现升高趋势,但8月21日 CO_2 、 N_2O 排放量突然降低,通过查阅分析天气情况可知,其可能是因为自8月20日起气温降低并产生降雨,土壤温度降低,研究表明 CO_2 、 N_2O 释放与温度呈正相关关系^[46]。氨挥发在基肥期低是因为施基肥后翻耕覆土,并且化肥施用20%氮肥作为基肥。9月中旬追肥后 NH_3 排放通量产生高峰,原因是9月中旬气温高,追肥方式为穴施,并且施用80%氮肥作为追肥。施入农田的尿素在脲酶的作用下水解为 NH_4^+ ,高温和光照促进 NH_4^+ 转化为 NH_3 ,当 NH_4^+ 减少到一定水平后氨挥发就开始减少,这就是氨挥发动态高峰出现在追肥后第3天的原因^[47]。氮肥对 CH_4 的影响表现为 NH_4^+-N 或 NH_4^+ 对 CH_4 的氧化有抑制作用,从而增加 CH_4 的排放,有机肥的施用会向农田提供更多的 CH_4 前体,从而增加 CH_4 排放^[48]。

3.3 温室气体排放、氨挥发、蔬菜产量、GWP与环境因素关系

N_2O 的排放主要集中在施肥后,这与有机氮和无

机氮能提供充足底物有关。有研究表明有机肥促进微生物与无机氮产生强烈的竞争,从而降低 N_2O 排放^[49]。相对于水田,旱地的 CH_4 排放量较低,本研究中 CH_4 排放通量存在负值,因为旱地土壤为好氧环境,氧化作用较强,因此旱地土壤通常被认为是 CH_4 的吸收汇^[50]。在本研究中,NPK+OM的GWP和产量显著低于OM,这与前人研究结果一致,土壤有机碳的增加能达到显著增产效果,但会导致GWP增加^[51]。本研究中,施肥后土壤 NH_4^+-N 含量与氨挥发速率呈正相关,pH则与氨挥发呈负相关,这与李菊梅等^[52]的研究结论相反,这是因为本试验中NPK+OM+N处理长期增施氮肥使土壤pH显著降低,导致了土壤酸化,且NPK+OM+N处理施氮量高,所以尽管pH低但也产生了大量氨挥发。杨淑莉等^[53]也得出过相似的结论。另外土壤氨挥发在旱地和水田中的排放机制不同,其同时也受温度、水分、施肥种类和方式、土壤类型等众多影响因素制约,其机理还有待进一步研究。GWP是描述温室气体排放的综合指标,GHGI是评价环境效益与作物经济效益的综合指标^[54]。从本研究综合产量和温室效应来看,NPK+OM处理能在保持产量的前提下有效降低GWP和GHGI,这与前人^[55-56]的研究结论一致。

4 结论

(1)长期施有机肥能显著增加菜田土壤全氮、有机质、有效磷含量。在等氮条件下,长期有机无机肥配施能显著增加菜田土壤 NO_3^--N 含量。长期增施氮肥会使土壤pH显著降低,导致土壤酸化,但施用有机肥能缓解土壤的酸化。

(2)单施有机肥会导致土壤 CO_2 和 CH_4 排放量显著升高,增施氮肥会导致 N_2O 排放量显著升高。氨挥发主要集中在追肥后,增施氮肥和增施磷肥都会显著增加土壤 NH_3 排放,说明不平衡的施肥方式会导致 NH_3 排放量增加。

(3)单施有机肥虽然能显著增加蔬菜产量,但会显著增加全球增温潜势(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)。综合产量和温室效应来看,NPK+OM处理能在保持产量的前提下有效降低GWP和GHGI。

(4)通过土壤理化性质与温室气体、氨挥发累积排放量的冗余分析可知全氮、有机质、pH是影响温室气体和氨挥发排放的关键影响因素。

参考文献:

[1] 范紫月, 齐晓波, 曾麟岚, 等. 中国农业系统近40年温室气体排放

- 核算[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9470–9482. FAN Z Y, QI X B, ZENG L L, et al. Accounting of greenhouse gas emissions in the Chinese agricultural system from 1980 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9470–9482.
- [2] 王文赞, 韩建, 倪玉雪, 等. 有机肥替代化肥氮对苹果产量、品质及温室气体排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(3): 437–448. WANG W Z, HAN J, NI Y X, et al. Effects of substituting chemical nitrogen fertilizer with organic fertilizer on apple yield, quality, and greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(3): 437–448.
- [3] 沈仕洲, 王凤, 薛长亮, 等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6): 1–8. SHEN S Z, WANG F, XUE C L, et al. Research advances on effect of organic fertilizer on farmland greenhouse gas emissions[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015(6): 1–8.
- [4] 徐钰, 刘兆辉, 张建军, 等. 不同氮肥管理措施对华北地区夏玉米田增产减排的效果分析[J]. 中国土壤与肥料, 2018(1): 9–15. XU Y, LIU Z H, ZHANG J J, et al. Effect of different nitrogen management measures on yield and nitrous oxide emission of summer maize field in North China Plain[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018(1): 9–15.
- [5] 陈召月, 段巍巍. 旱地农田 N_2O 、 CO_2 排放主要影响因素及减排措施研究进展[J]. 现代农业科技, 2020(24): 140–142. CHEN Z Y, DUAN W W. Research progress on main influencing factors and emission reduction measures of N_2O and CO_2 from dryland farmland[J]. *Xiandai Nongye Keji*, 2020(24): 140–142.
- [6] 贾小玉, 闫伟明, 上官周平. 生物炭对农田土壤温室气体排放强度的调控机理研究进展[J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022, 2(2): 62–73. JIA X Y, YAN W M, SHANGGUAN Z P. Research progress on the regulation mechanism of biochar on soil greenhouse gases emission intensity in farmland[J]. *Terrestrial Ecosystem and Conservation*, 2022, 2(2): 62–73.
- [7] 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, 27(4): 740–749. LI J, WANG M X, WANG Y S, et al. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 740–749.
- [8] 谢立勇, 许婧, 郭李萍, 等. 水肥管理对稻田 CH_4 排放及其全球增温潜势影响的评估[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 958–967. XIE L Y, XU J, GUO L P, et al. Impact of water/fertilizer management on methane emission in paddy fields and on global warming potential[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(7): 958–967.
- [9] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149–162. LU L L, WU G Y. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(1): 149–162.
- [10] 伊英杰, 韩坤, 赵斌, 等. 长期不同施肥措施冬小麦-夏玉米轮作体系周年氨挥发损失的差异[J]. 中国农业科学, 2022, 55(23): 4600–4613. YI Y J, HAN K, ZHAO B, et al. The comparison of ammonia volatilization loss in winter wheat–summer maize rotation system with long-term different fertilization measures[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(23): 4600–4613.
- [11] 司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1124–1131. SI H L, JI L D, LI L, et al. Effects of long-term application of bioorganic fertilizer on soil nutrients and biological characteristics of saline alkali land in Ningxia[J]. *Soils*, 2022, 54(6): 1124–1131.
- [12] 邱子健, 申卫收, 林先贵. 化肥减量增效技术及其农学、生态环境效应[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 237–248. QIU Z J, SHEN W S, LIN X G. Chemical fertilizer reduction technology and its agronomic and ecological environment effects[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(4): 237–248.
- [13] 王伊琨, 王维瑞, 王胜涛, 等. 长期不同施肥处理对设施蔬菜产量及土壤肥力的影响[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(1): 113–115. WANG Y K, WANG W R, WANG S T, et al. Effect of different long-term fertilization on yields and soil nutrients in a greenhouse vegetable field[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(1): 113–115.
- [14] 刘苹, 李彦, 江丽华, 等. 施肥对蔬菜产量的影响: 以寿光市设施蔬菜为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1752–1758. LIU P, LI Y, JIANG L H, et al. Effects of fertilizer application on greenhouse vegetable yield: a case study of Shouguang City[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1752–1758.
- [15] 和骅芸, 胡琦, 李子怡, 等. 华北平原夏玉米不同施氮措施的综合增温潜势研究[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(6): 73–87. HE H Y, HU Q, LI Z Y, et al. Study on the global warming potential of summer maize under different nitrogen application rates in North China Plain[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(6): 73–87.
- [16] 许丹阳, 李虹颖, 孙义祥, 等. 不同比例有机无机肥配施对水稻产量与氮素利用率的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(31): 1–5. XU D Y, LI H Y, SUN Y X, et al. Combined application of different proportions of organic and inorganic fertilizers: effects on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(31): 1–5.
- [17] 奉小明. 洞庭湖地区蔬菜地氧化亚氮和一氧化氮排放通量观测研究[D]. 南宁: 广西大学, 2018: 8–9. FENG X M. Study of nitrous oxide and nitric oxide fluxes from the vegetable field in Dongting Lake area[D]. Nanning: Guangxi University, 2018: 8–9.
- [18] DU Y, CUI B, ZHANG Q, et al. Effects of manure fertilizer on crop yield and soil properties in China: a meta-analysis[J]. *Catena*, 2020, 193(5): 104617.
- [19] MA R Y, ZOU J W, HAN Z Q, et al. Global soil-derived ammonia emissions from agricultural nitrogen fertilizer application: a refinement based on regional and crop-specific emission factors[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(4): 855–867.
- [20] 张媛, 郑朝霞, 赵志远, 等. 有机无机肥长期配施对果园土壤碳库及温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(10): 5823–5831. ZHANG A, ZHENG C X, ZHAO Z Y, et al. Effects of long-term combined application of organic and inorganic fertilizers on soil carbon pool and greenhouse gas emissions in orchards[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(10): 5823–5831.

- [21] NIU S L, WU M Y, HAN Y, et al. Nitrogen effects on net ecosystem carbon exchange in a temperate steppe[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(1):144-155.
- [22] 郭刚, 袁嫚嫚, 曹哲伟, 等. 江淮丘陵区不同氮肥管理模式下稻田氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4):285-288. WU G, YUAN M M, CAO Z W, et al. Study on the ammonia volatilization under different nitrogen schemes from paddy field in Jianghuai Hilly region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4):285-288.
- [23] 盛伟红, 刘文波, 赵晨光, 等. 优化施肥对不同轮作系统稻田氨挥发的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7):45-53. SHENG W H, LIU W B, ZHAO C G, et al. Effect of optimized fertilization on ammonia volatilization of paddy rice under different rotation systems[J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed)*, 2018, 46(7):45-53.
- [24] IPCC. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Climate Change 2013. The physical science basis[R]. Cambridge, United Kingdom and New York N Y, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2007. BAO S D. Agrochemical analysis of soil[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [26] 陈永高, 张瑞斌. 不同施肥模式对太湖流域农田土体氮磷流失与营养累积的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2):115-119. CHEN Y G, ZHANG R B. Effects of fertilization patterns on loss of soil nitrogen, phosphorus and nutrients accumulation in farmlands of Taihu Lake basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2):115-119.
- [27] 陈津赛, 孙玮皓, 王广帅, 等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N_2O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11):3961-3968. CHEN J S, SUN W H, WANG G S, et al. Effects of different nitrogen application rates on soil water stable aggregates and N_2O emission in winter wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11):3961-3968.
- [28] 马凡凡, 邢素林, 甘曼琴, 等. 有机肥替代化肥对水稻产量、土壤肥力及农田氮磷流失的影响[J]. 作物杂志, 2019(5):89-96. MA F F, XING S L, GAN M Q, et al. Effects of organic fertilizer substituting for chemical fertilizer on rice yield, soil fertility and nitrogen and phosphorus loss in farmland[J]. *Crops*, 2019(5):89-96.
- [29] 韩笑, 席运官, 田伟, 等. 有机肥施用模式对环水有机蔬菜种植氮磷径流的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(3):465-473. HAN X, XI Y G, TIAN W, et al. Effects of different organic fertilization patterns on the nitrogen and phosphorus runoff losses in organic agriculture in watershed areas[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(3):465-473.
- [30] 王春梅, 蒋治国, 赵言文. 太湖流域典型蔬菜地地表径流氮磷流失[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):36-40. WANG C M, JIANG Z G, ZHAO Y W. Nitrogen and phosphorus runoff in the typical vegetable fields in Tai Lake basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):36-40.
- [31] 张敏, 姚元林, 曾科, 等. 配施有机肥减少太湖地区稻田土壤硝态氮淋失的机理研究[J]. 土壤, 2020, 52(4):766-772. ZHANG M, YAO Y L, ZENG K, et al. Study on mechanism of reducing nitrate leaching with organic addition from paddy field in Taihu Lake region[J]. *Soils*, 2020, 52(4):766-772.
- [32] 毛妍婷, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期施用有机肥对减缓菜田耕层土壤酸化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(9):1784-1791. MAO Y T, LIU H B, CHEN A Q, et al. Effects of long-term application of organic fertilizers on reducing soil acidification of plough layer in vegetable fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(9):1784-1791.
- [33] 雷宝坤, 刘宏斌, 陈安强, 等. 长期定位施肥对土壤的碳氮共济效应情景分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10):1567-1573. LEI B K, LIU H B, CHEN A Q, et al. Scenario analysis on effects of long-term fertilization on soil carbon and nitrogen codependency[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(10):1567-1573.
- [34] 蔡泽江. 有机物料调控红壤化学氮肥致酸效应的差异与机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019:29-30. CAI Z J. Effectiveness and mechanisms of organic materials alleviating red soil acidification from chemical N fertilizer[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019:29-30.
- [35] SHI, LIU R Y, LI Z D, et al. Mechanisms for increasing soil resistance to acidification by long-term manure application[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 185:77-84.
- [36] YOU X X, WANG S, DU L, et al. Effects of organic fertilization on functional microbial communities associated with greenhouse gas emissions in paddy soils[J]. *Environmental Research*, 2022, 213.
- [37] 王晓娇, 张仁陟, 齐鹏, 等. Meta分析有机肥施用对中国北方农田土壤 CO_2 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):99-107. WANG X J, ZHANG R Z, QI P, et al. Meta-analysis on farmland soil CO_2 emission in northern China affected by organic fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(10):99-107.
- [38] 陈晨, 许欣, 毕智超, 等. 生物炭和有机肥对菜地土壤 N_2O 排放及硝化、反硝化微生物功能基因丰度的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(5):1912-1920. CHEN C, XU X, BI Z C, et al. Effects of biochar and organic manure on N_2O emissions and the functional gene abundance of nitrification and denitrification microbes under intensive vegetable production[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(5):1912-1920.
- [39] QU Z, WANG J, ALMOY T, et al. Excessive use of nitrogen in Chinese agriculture results in high $N_2O/(N_2O+N_2)$ product ratio of denitrification, primarily due to acidification of the soils[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(5):1685-1698.
- [40] 罗健航, 赵营, 任发春, 等. 有机无机肥配施对宁夏引黄灌区露地菜田土壤氨挥发的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4):75-81. LUO J H, ZHAO Y, REN F C, et al. Effects of different combined applications of organic-inorganic fertilizers on soil ammonia volatilization in open vegetable field of the Yellow River Irrigation region in Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4):75-81.
- [41] 郑蕾, 王学东, 郭李萍, 等. 施肥对露地菜地氨挥发和氧化亚氮排

- 放的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4063–4070. ZHENG L, WANG X D, GUO L P, et al. Impact of fertilization on ammonia volatilization and N_2O emissions in an open vegetable field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(12): 4063–4070.
- [42] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893–900. TIAN Y H, HE F Y, YIN B, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu Lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 893–900.
- [43] 任立军, 赵文琪, 李金, 等. 不同施肥模式对设施土壤 CO_2 排放特征及碳平衡的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 874–881. REN L J, ZHAO W Q, LI J, et al. Characteristics of soil CO_2 emission and carbon balance in greenhouse soil under different fertilization patterns[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 874–881.
- [44] 郭耀东, 郭刚, 武小平, 等. 不同施肥方式对玉米产量和温室气体排放的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(10): 1067–1070. GUO Y D, WU G, WU X P, et al. Influence of different fertilization modes to corn production and greenhouse gas emissions[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2012, 40(10): 1067–1070.
- [45] 卢九斤, 聂易丰, 魏娇娇, 等. 不同施氮措施对枸杞园土壤 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 210–220. LU J J, NIE Y F, WEI J J, et al. Effects of different nitrogen application measures on NH_3 volatilization and N_2O emissions in a wolfberry orchard[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 210–220.
- [46] 翟胜, 高宝玉, 王巨媛, 等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6): 2488–2493. ZHAI S, GAO B Y, WANG J Y, et al. Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 2488–2493.
- [47] 刘伯顺, 黄立华, 黄金鑫, 等. 我国农田氨挥发研究进展与减排对策[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(6): 875–888. LIU B S, HUANG L H, HUANG J X, et al. Research progress toward and emission reduction measures of ammonia volatilization from farmlands in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(6): 875–888.
- [48] 田光明, 何云峰, 李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 土壤与环境, 2002(3): 294–298. TIAN G M, HE Y F, LI Y X. Effects of water and fertilizer management on soil methane and nitrous oxide emissions in paddy field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2002(3): 294–298.
- [49] 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 等. 不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5149–5158. SHAO X H, TANG S R, MENG L, et al. Effect of different fertilization treatments on methane and nitrous oxide emissions from rice-vegetable rotation in a tropical region, China[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(11): 5149–5158.
- [50] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体 (CO_2 、 CH_4 、 N_2O) 的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966–975. ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO_2 , CH_4 and N_2O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966–975.
- [51] 杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 等. 化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2443–2450. YANG D, YE Z H, XIAO X, et al. Effects of chemical fertilizer reduction and organic fertilizer use on the greenhouse gas emissions of early rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2443–2450.
- [52] 李菊梅, 李冬初, 徐明岗, 等. 红壤双季稻田不同施肥下的氨挥发损失及其影响因素[J]. 生态环境, 2008(4): 1610–1613. LI J M, LI D C, XU M G, et al. Ammonia volatilization and its influence factors under different fertilization in red paddy soil with double rice cropping system[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2008(4): 1610–1613.
- [53] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2010, 27(3): 415–421. YANG S L, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 415–421.
- [54] LEE J G, CHO S R, JEONG S T, et al. Different response of plastic film mulching on greenhouse gas intensity (GHGI) between chemical and organic fertilization in maize upland soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 133821.
- [55] 汤桂容, 周旋, 田昌, 等. 有机无机氮肥配施对菜地土壤二氧化碳和甲烷排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 281(3): 29–35. TANG G R, ZHOU X, TIAN C, et al. Effects of organic and inorganic nitrogen fertilizer on soil carbon dioxide and methane emissions of lettuce (*Lactuca ativa* L.)[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019, 281(3): 29–35.
- [56] ZHENG J, ZHANG X, LI L, et al. Effect of long-term fertilization on C mineralization and production of CH_4 and CO_2 under anaerobic incubation from bulk samples and particle size fractions of a typical paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 120(2/3/4): 129–138.