文章编号:1000-7601(2023)03-0186-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.03.24

有机-无机肥配施对黄土高原半干旱区农田土壤 N_2O 排放的影响

杜梦寅[1],袁建钰[1],李 广[1],闫丽娟[2],郭 疆[1],姚武扬眉[1]

(1.甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探明不同施肥方式对旱作麦田土壤 N_2O 排放的影响,以不施肥(CK)为对照,设置单施有机肥(M)、单施无机肥(N)、有机-无机肥配施(MN)3 种施肥方式,采用静态箱-气相色谱法对春小麦地土壤 N_2O 排放通量进行测定,并对其影响因子(NO_3^--N、NH_4^+-N、土壤温度、土壤含水量)和春小麦产量进行同期测定。结果表明:春小麦地在整个生育期内表现为 N_2O 排放源,各处理均在施肥后出现 N_2O 排放峰。不同处理土壤 N_2O 累积排放量表现为 N>MN>M>CK,N_2O 净损失量(以氮计算)为 1.175 8~1.428 kg·hm^{-2},占当季施氮量的 1.12%~1.36%,有机-无机肥配施降低了氮肥中氮素以气态形式的损失量。MN、N、M 处理春小麦产量分别较 CK 处理增加了 45.1%、31.0%、18.8%,各处理土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 因施肥和追肥的影响而显著升高,并随春小麦生育期推进呈平稳下降趋势,不同处理间土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量均以 N 处理最高。相关分析表明,CK 处理土壤温度、水分和 NH_4^+-N 是影响 N_2O 排放的最显著因素;而在施肥后,土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 是影响土壤 N_2O 排放的主导因子,且表现为极显著正相关关系。综上所述,施肥对旱作麦田土壤 N_2O 排放影响较大,施肥后土壤 N_2O 排放通量对温度及水分的响应降低;另一方面,MN 处理相较 N 和 M 处理在不显著增加土壤 N_2O 排放量的基础上极大地提高了作物产量。因此,综合考虑 N_2O 排放量和作物产量,黄土高原半干旱区以 MN 处理为最优施肥方式。

关键词:春小麦;N_2O 排放;施肥方式;有机/无机肥

中图分类号:S143.6;S19 **文献标志码**:A

Effects of combined organic-inorganic fertilizer application on soil N_2O emissions from farmland in the semi-arid area of the Loess Plateau

DU Mengyin[1], YUAN Jianyu[1], LI Guang[1], YAN Lijuan[2], GUO Jiang[1], YAO Wuyangmei[1]

(1. *College of forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*;
2. *College of agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: To explore the effects of different fertilization methods on N_2O emission from dryland wheat field soil, three fertilization methods of single application of organic fertilizer (M), single application of inorganic fertilizer (N) and combined application of organic and inorganic fertilizer (MN) were arranged with no fertilization (CK) as the control. The soil N_2O emission flux in spring wheat field was determined by static box-gas chromatography, and the related factors affecting soil N_2O emission (NO_3^--N, NH_4^+-N, soil temperature, soil water content) and spring wheat yield were determined simultaneously. The results showed that the spring wheat field was the N_2O emission source in the whole growth period, and the N_2O emission peak appeared in each treatment after fertilization. The order of cumulative N_2O emissions from soil under different treatments was N>MN>M>CK, the net loss of N_2O (calculated as N) was 1.1758~1.428 kg·hm^{-2}, accounting for 1.12%~1.36% of the nitrogen application amount in the current season. The combined application of organic and inorganic fertilizers reduced the loss of nitrogen in nitrogen fertilizers in the form of gas. Compared with the CK treatment, the spring wheat yields of the MN, N

收稿日期:2022-03-12 **修回日期**:2022-04-22

基金项目:国家自然科学基金项目(32160416);甘肃省重点研究发展计划项目(20YF8NA135);甘肃省财政专项(GSCZZ 20160909);甘肃省重点人才项目(LRYCZ-2020-1);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-15)

作者简介:杜梦寅(1998-),男,黑龙江泰来人,硕士研究生,研究方向为土壤氮循环。E-mail: 920446333@qq.com

通信作者:闫丽娟(1974-),女,甘肃民勤人,副教授,主要从事农业系统工程研究。E-mail:yanlj@gsau.edu.cn

and M treatments increased by 45.1%, 31%, and 18.8%, respectively. The soil NO_3^--N and NH_4^+-N of each treatment increased significantly due to the influence of fertilization and topdressing, and showed a steady downward trend with the advancement of spring wheat growth period. The contents of soil NO_3^--N and NH_4^+-N among different treatments were the highest in N treatment. Correlation analysis showed that soil temperature, moisture and NH_4^+-N were the most significant factors affecting N_2O emission under CK treatment. After fertilization, soil NO_3^--N and NH_4^+-N were the dominant factors affecting soil N_2O emissions, and correlation analysis showed that both were extremely significant positive correlations. In summary, fertilization had a greater impact on soil N_2O emissions from dry-fed spring wheat fields, and the response of soil N_2O fluxes to temperature and water decreased after fertilization. On the other hand, compared with N and M treatments, MN treatment greatly improved crop yield without significantly increasing soil N_2O emissions. Therefore, comprehensively considering N_2O emissions and crop yield, MN treatment was the best fertilization method in semi-arid areas of the Loess Plateau.

Keywords: spring wheat; N_2O emission; fertilization methods; organic/inorganic fertilizers

氧化亚氮(N_2O)是大气中重要的温室气体之一,百年尺度下单位质量其增温潜势是 CO_2 的 296 倍,能长期滞留在大气中并参与多种光化学反应,对臭氧层进行破坏[1]。研究表明,农田土壤是 N_2O 的重要排放源,其年均排放量已达到全球排放总量的 38%以上[2]。在影响农田 N_2O 排放的诸多因子中,化学氮肥的施用是最为重要的一项技术措施[3]。增施氮肥可以迅速提高土壤所需养分浓度,满足作物生长的需要,从而显著提高作物产量,但随着氮肥用量的快速增加,也造成了严重的环境问题[4]。因此,选择合理的施肥方式是提高作物产量、保持土壤肥力和减少因施氮肥所造成的环境污染的关键,对于减少农田土壤 N_2O 排放和缓解温室效应显得尤为重要。

陇中黄土高原位于我国中部偏北部,干旱、水土流失严重已成为该地区主要生态环境问题。春小麦因其抗旱性强、生育期短、产量可观等优点,已成为黄土高原半干旱区种植的首选作物[5]。有机/无机肥料联合施用技术是农业可持续发展的首选,对改善土壤结构、形成土壤团聚体,提高氮素利用效率以及产量等都有显著作用,但其引发的环境效益仍尚存分歧[6]。Ding 等[7]研究发现,有机/无机肥配施能够有效降低农田土壤 N_2O 的排放,董玉红等[8]研究证实,在等氮条件下,与单施化学氮肥相比,有机肥代替部分无机氮肥会降低土壤 N_2O 的排放。相反,陈晨等[9]在宁夏油葵田的研究结果表明,在不同的氮肥施用方式下,有机无机肥配施处理土壤 N_2O 排放量显著高于单施无机氮肥处理。也有研究报道[10],与单施氮肥相比,有机肥配合无机肥施用对土壤 N_2O 排放并无显著差异。综上所述,不同施肥方式对土壤 N_2O 排放特征在不同温度、水分、作物类型的差异下均有不同的结果。当前,大多数研究已经证实有机/无机肥配施在协调作物养分平衡、减肥增产的方面具有重大作用,但对影响旱地农田土壤 N_2O 排放的关键因素及其响应机制尚不清楚,需进一步研究。

为了更好揭示有机/无机肥配施下土壤理化性质及环境因子对土壤 N_2O 排放的影响,本试验以黄土高原 4 种施肥方式下的春小麦地为研究对象,综合分析了有机/无机肥配施下土壤 N_2O 的排放特征及其环境影响,探究二者之间的相关关系,揭示土壤 N_2O 排放对不同施肥方式的响应机制,从而提出增产减排的最优施肥方式,为寻求区域合理的土壤培肥方式及优良生态环境建设提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地位于甘肃省定西市安定区安家坡村甘肃农业大学旱农综合试验站(35°64′N,104°64′E),该地区平均海拔 2 000 m,属温带半干旱气候,年均气温 6.4℃,年均≥0℃年积温 2 933.5℃ · d^{-1},年均≥10℃年积温 2 239.1℃ · d^{-1},年均降水量 394.1 mm,主要集中在 7—9 月份(图 1),年潜在蒸发量约为降水量的 4 倍,气候干燥,无霜期平均 140 d,属于典型的半干旱雨养农业区。试验地平坦无起伏,土壤类型为黄绵土,土层深厚,土质绵软且质地均匀,蓄水性能良好。土壤容重 1.17 g · cm^{-3},土壤有机质 6.30 g · kg^{-1},全氮 0.76 g · kg^{-1},全磷 0.32 g · kg^{-1}。

1.2　试验设计

试验以不施肥(CK)为对照,布设单施有机肥(M)、单施无机肥(N)、有机肥与无机肥配施(MN:50%M+50%N)3 种施肥处理。选用当地春小麦‘甘春 27 号’为供试品种,于 2020 年 3 月 25 日播种,8 月

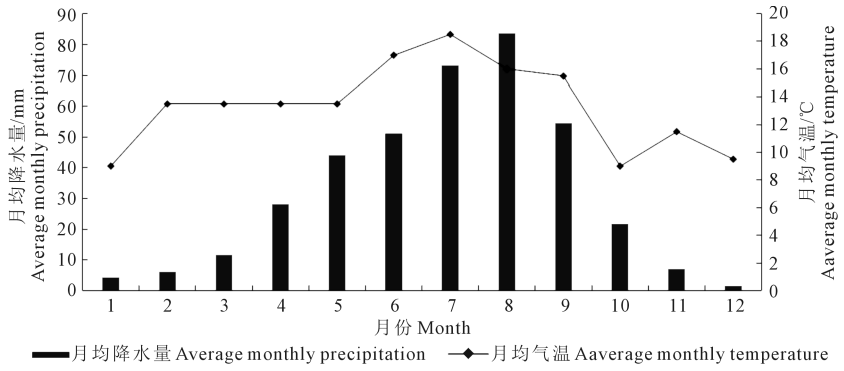


图1 2020年试验区月均降雨和气温变化图

Fig.1 Map of average monthly rainfall and temperature changes in 2020

5日收获。供试无机肥为尿素(含N 46.2%),有机肥为农家肥(主要为猪粪,养分含量为N 0.56%、P_2O_5 0.40%、K_2O 0.46%),施肥量以当地常规施用氮肥(施尿素折合年施氮含量105 kg·hm^{-2})用量为基准,根据含氮量计算尿素和有机肥的施用量,各施肥处理间遵循等氮量原则(表1)。施肥分两次施入,第一次于播种前(3月31日)随基肥混合施入,第二次在分蘖期(4月25日)进行追施,施肥深度为7~10 cm。每个处理设置3个重复,总计12块样地,样地面积统一为24 m^2,每块样地播种量为187.5 kg·hm^{-2},行距25 cm。配施150 kg·hm^{-2}过磷酸钙(含16% P_2O_5)作为基肥,于播种时一次性施入,并采用随机区组排列。

1.3 土壤气体的采集与分析

采用静态箱-气相色谱法测定土壤N_2O通量。在春小麦生长季,从播种到收获按照其主要生育期的时间界定,平均每隔20 d测定1次,并综合种子萌发时间与肥料肥效对土壤N_2O排放的影响,在基肥施入与追肥后第5天进行加测。采样时间为9:00—11:00。静态箱为50 cm×50 cm×50 cm无底正方体暗箱,箱壁用1 mm厚304K薄不锈钢板制成,箱外用隔温材料包裹以确保箱内热量不散发,顶箱上端装有两个空气风扇搅拌,箱侧装有风扇电源插头、采气管接口和测温接口,底座尺寸为50 cm×50 cm×20 cm,上部有密封水槽。当测定时,将不锈钢底座固定于土壤中。采样时底座水槽内加水密封,进行气体样品采集。扣箱后立即用100 ml注射器采集第一次样品,每隔8 min取100 ml气体保存,罩箱40 min,共取样5次。采样后立即将样品带回实验室并于一周内对土壤N_2O完成分析,确定不同处理下N_2O排放特征。

测定期内N_2O排放通量可通过式(1)进行计算:

表1 试验处理春小麦地有机氮肥和无机氮肥施用量/(kg·hm^{-2})

Table 1 The application amount of organic fertilizer nitrogen and inorganic fertilizer nitrogen in spring wheat field was tested

处理 Treatment	基肥(播种) Basal fertilization (sowing)		追肥(分蘖期) Topdressing (tillering stage)	
	有机肥 Organic fertilizer	无机肥 Inorganic fertilizer	有机肥 Organic fertilizer	无机肥 Inorganic fertilizer
CK	0	0	0	0
M	52.5	0	52.5	0
N	0	52.5	0	52.5
MN	26.25	26.25	26.25	26.25

$$F = \frac{C_2 \times V \times M_0 \times 273/T_2 - C_1 \times V \times M_0 \times 273/T_1}{A \times (t_2 - t_1) \times 22.4} \quad (1)$$

式中,F为土壤N_2O排放通量(mg·m^{-2}·h^{-1});A为采样箱底面积(m^2);V为采样箱体积(m^3);M_0为气体分子量;C_1、C_2分别为采样箱关闭时和开启前箱内气体的体积浓度单位;T_1、T_2分别为采样箱关闭和开启前箱内温度(K),t_1、t_2为测定开始和结束的时间。

农田土壤N_2O累积排放量可通过式(2)进行计算:

$$M = \sum (F_{N+1} + F_N) \times 0.5 \times (t_{N+1} + t_N) \times 24 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中,M为整个生育期内土壤N_2O排放量(kg·hm^{-2});F为土壤N_2O排放通量(mg·m^{-2}·h^{-1});N为采样次数;t为距离初次采样的时间。

1.4 土壤样品的采集与处理

采集气体的同时,每块样地在靠近底座的周边位置随机选取三个点,由于N_2O排放与土壤表层理化性质有极强的相关性,并且施肥深度较浅。因此选择直径为5 cm的土钻取0~10 cm土壤样品,剔除杂质后装入自封袋放置于装有冰袋的样品箱中低温运输,带回实验室测定各项指标。采用铝盒烘

干法测定土壤含水量,空铝盒称重后放入土样,置于 105~110℃烘箱中烘干至恒重,测得土壤干重,再根据该值计算水分重量的百分比从而得到土壤含水量数据。采用 MgO-戴氏合金蒸馏法测定土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量,将土样过 2 mm 筛后称取 10 g,加入 KCl 溶液 100 ml,放于摇床震荡 1 h 后静置 30 min 等待澄清,吸取 20 ml 上清液,加 0.5 g MgO 于凯氏定氮仪中蒸馏 3 min,在定氮仪冷凝管出口加 5 ml 硼酸溶液用于对氨的吸收,用 H_2SO_4 溶液进行滴定,测定土壤 NH_4^+-N 含量;蒸馏后溶液加 1ml 氨基磺酸,再加 0.5 g 戴氏合金粉,放入凯氏定氮仪蒸馏 3 min,在冷凝管出口加 5ml 硼酸溶液吸收,用 H_2SO_4 溶液滴定,测定土壤 NO_3^--N 含量。采用 EM50 长期监测土壤温度[11]。小麦成熟后,每试验区随机选取 9 行小麦计算产量、穗粒数及千粒重等各项指标。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理下春小麦地土壤 N_2O 排放通量的动态变化

不同施肥处理下春小麦地土壤 N_2O 排放通量的动态变化如图 2 所示。播种后各处理排放通量均处于较低水平,待基肥施入后,N_2O 排放通量迅速上升并于 4 月 5 日左右出现第 1 次排放峰,其中排放量最高的处理为 N,排放通量达到 0.1146 mg · m^{-2} · h^{-1}。进入分蘖期,伴随一定量的追肥,M、N、MN 处理在 4 月 30 日左右再一次出现 N_2O 排放峰,其中 N 处理最大(0.1545 mg · m^{-2} · h^{-1}),其次是 MN、M、CK。说明施肥促进土壤 N_2O 排放,以单施无机肥处理尤为明显。此后至成熟期,各处理间差异缩小,随温度水分的升高和土壤微生物活性的增强,N_2O 排放通量于 7 月 15 日左右再次出现小型排放峰,其中以 M 处理最大(0.0642 mg · m^{-2} · h^{-1})。

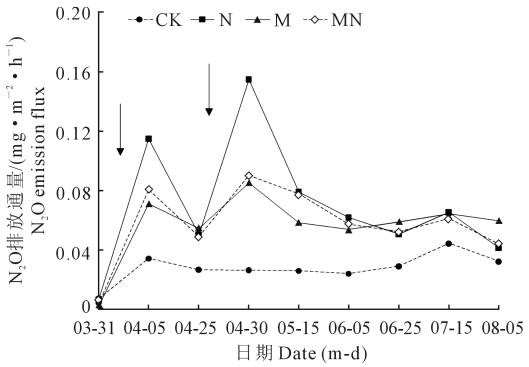
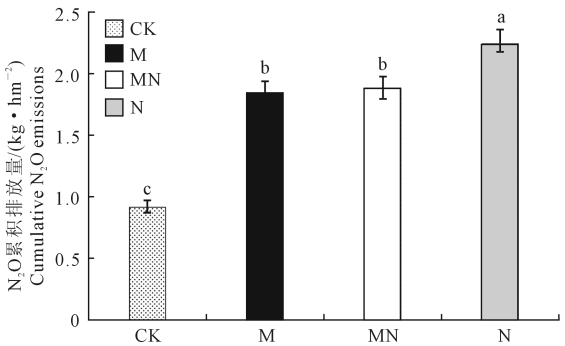


图 2　不同施肥处理下春小麦地土壤 N_2O 排放通量的动态变化

Fig.2　Dynamic changes in soil N_2O emission fluxes from spring wheat fields under different fertilization treatments

2.2　不同施肥处理下土壤 N_2O 累积排放量及其产量的变化规律

整个春小麦生育期中,不同施肥处理下土壤 N_2O 累积排放量大小顺序为 N>MN>M>CK(图 3)。N、M、MN 处理较 CK 处理 N_2O 累积排放量分别增加了 144.0%、101.3%、105.7%,各处理与 CK 处理均达到显著水平($P<0.05$)。N_2O 净损失量(以氮计算)为1.175 8~1.428 kg · hm^{-2},占当季施氮量的 1.12%~1.36%。说明施氮肥是刺激旱地农田土壤 N_2O 排放的关键因素之一。施肥对提高春小麦产量具有重要的作用。由表 2 可知,各处理间产量关系为 MN>N>M>CK,与 CK 相比,MN、N、M 处理产量分别增加了 45.1%、31.0%、18.8%,其中,MN 处理下的春小麦产量、株高、穗粒数以及千粒重均达到最大值。由此可见,结合春小麦产量及 N_2O 排放量,同一施氮水平下,MN 处理可作为黄土高原半干旱区最适宜的施肥方式。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$). The same below.

图 3　不同施肥处理下春小麦地土壤 N_2O 累积排放量

Fig.3　Cumulative soil N_2O emissions from spring wheat fields under different fertilization treatments

表 2　不同施肥处理下春小麦产量及其构成要素

Table 2　Spring wheat yield and its constituent factors under different fertilization treatments

处理 Treatment	株高/cm Plant height	穗粒数 Number of panicles	千粒重/g 1000-grain weight	产量 Yield /(kg · hm^{-2})
CK	96.72c	28±0.58c	42.30±0.60c	1803.79±80.10c
N	101.87ab	32±0.58b	47.52±0.55b	2363.19±48.80ab
M	98.46bc	31±0.88b	46.43±0.45b	2142.11±72.74b
MN	104.63a	35±0.33a	54.24±1.25a	2617.58±83.26a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

2.3 不同施肥处理下土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 的动态变化

不同施肥处理下春小麦全生育期 0~10 cm 土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量变化特征如图 4 所示。试验期间,土壤 NO_3^--N 含量因施肥和追肥的影响而显著升高,并随春小麦生育期推进呈平稳下降趋势。整个生育期不同处理间土壤 NO_3^--N 含量都是以 N 处理最高,最大值为 42.07 mg·kg^{-1}。N、M、MN、CK 处理下 NO_3^--N 平均含量分别为 32.90、31.02、31.32、21.56 mg·kg^{-1}(图 4A)。整体来看,土壤 NH_4^+-N 含量在施入基肥和进行追肥后均有所升高,其中以 N 处理最为明显,并在 4 月 5 日左右第一次出现峰值,追肥后(4 月 30 日左右)再一次出现峰值(图 4B)。N、M、MN、CK 处理下土壤 NH_4^+-N 平均含量分别为 17.17、16.49、16.53、11.60 mg·kg^{-1}。可以明显看出,CK 处理下土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量在整个生育期内处于较低水平,且远低于其他施肥处理,说明施肥对土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量影响较大。相关分析表明(表 3),CK 处理下 N_2O 排放通量与土壤 NO_3^--N 含量未达到显著水平,与 NH_4^+-N 含量呈极显著正相关,而 N、M、MN 处理与土壤 NH_4^+-N,NO_3^--N 则均表现为极显著正相关,说明 NO_3^--N、NH_4^+-N 是影响施肥后春小麦地土壤 N_2O 排放的主要因素。

2.4 环境因子对不同施肥处理下土壤 N_2O 排放的影响

试验期间,春小麦地土壤含水量因降雨等原因在 8.51%~12.88%范围内波动(图 5),5 cm 耕层下土壤温度波动范围为 5.9~23.8℃。整个生育期内土壤温度变化相对稳定,各处理间差异不大,具体变

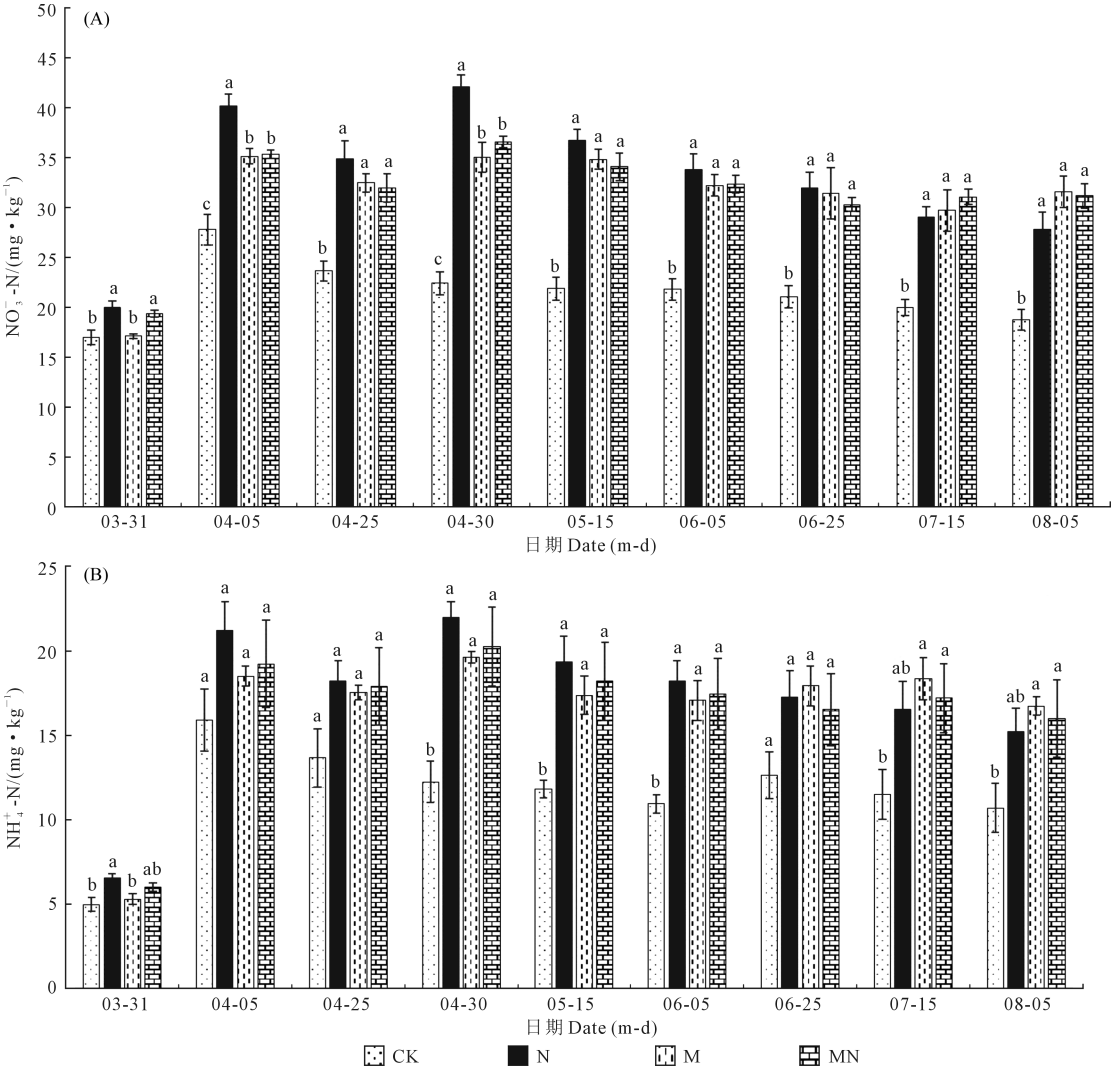


图 4 不同施肥处理下春小麦全生育期 0~10 cm 土壤 NO_3^--N、NH_4^+-N 含量变化特征

Fig.4 Characteristics of NO_3^--N and NH_4^+-N content in 0~10 cm soil at the full growth stage of spring wheat under different fertilization treatments

化特征如图 6 所示。相关分析显示(表 3),CK 处理下,土壤温度、含水量与排放通量分别表现为极显著和显著正相关,M 处理与土壤温度达到显著正相关,其余处理则均未达到显著水平,说明不施肥条件下土壤温度及水分是影响春小麦地土壤 N_2O 排放的主导因子。

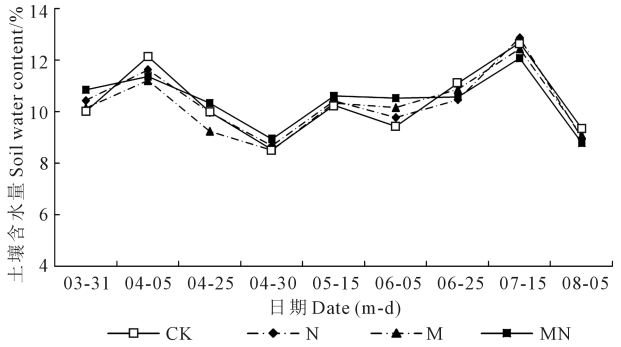


图 5　不同施肥处理下 0~10 cm 土层土壤含水量变化情况

Fig.5　Changes in soil moisture content in 0~10 cm soil layer under different fertilization treatments

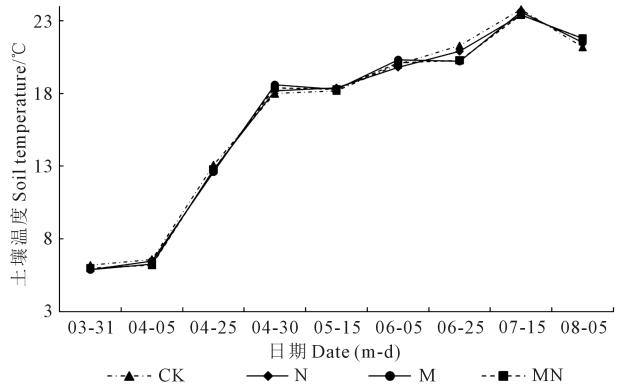


图 6　不同施肥处理下 5 cm 土层土壤温度变化情况

Fig.6　Changes in soil temperature in 5 cm soil layer under different fertilization treatments

表 3　春小麦地土壤 N_2O 排放通量与其影响因子间的相关关系

Table 3　Correlation between soil N_2O emission fluxes and their impact factors in spring wheat fields

处理 Treatment	NO_3^--N	NH_4^+-N	土壤温度 Soil temperature	土壤含水量 Soil moisture content
CK	0.339	0.517**	0.507**	0.482*
N	0.855**	0.764**	0.067	-0.117
M	0.847**	0.905**	0.459*	0.042
MN	0.917**	0.723**	0.290	-0.068

注:* 和 * * 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。

Note: * and * * indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels respectively.

3　讨　论

3.1　施肥方式对土壤 N_2O 排放通量及春小麦产量的影响

农田土壤是 N_2O 排放的重要来源,其产生与排放主要受耕作、施肥、降雨等多方面因素影响。前人研究发现[12],农田土壤 N_2O 排放高峰集中在施肥或追肥后 2~7 d,随后开始下降并逐渐趋于稳定。本研究中土壤 N_2O 排放通量在 4 月 5 日左右首次出现排放峰,这是因为播种时随基肥施入有机和无机肥,肥料发挥肥效为硝化和反硝化反应提供充足的氮源,进而促进 N_2O 排放。待春小麦进入分蘖期后进行追肥,5 d 后采集气体发现,除 CK 外,其余处理再次达到排放高峰,各施肥处理间尤其 N 处理,能够短时间内迅速提高土壤中无机氮含量,从而刺激 N_2O 大量排放。随春小麦生长至 7 月 15 日左右,此阶段由于良好的水热条件,土壤微生物活性增强,硝化和反硝化反应也随之增强,但因土壤肥力大幅度下降,N_2O 排放量相对较少,因此只出现小型排放峰。从整个生育期来看,施肥处理显著增加了土壤 N_2O 排放量,其中 N 处理排放最高。孙赫阳等[13]在华北平原沙壤土地的试验中证实,在等施氮量情况下有机肥配施无机肥可有效降低土壤 N_2O 排放量。奚雅静等[14]通过研究发现,有机肥部分代替化肥的施肥模式能极大减少石灰性壤质潮土 N_2O 的排放强度、系数以及总量。姜姗姗等[15]研究了氮减排和不同肥料的联合施用对稻田土壤 N_2O 排放的影响,并得出有机/无机肥以一定比例配施对减排效果最好的结论。上述结论均与本研究结果一致,这是因为有机肥料的矿化速率较慢,土壤微生物在养分积累的过程中会固定土壤中的氮素,从而减少土壤微生物可直接利用的无机氮含量[16];另一方面,施用有机肥会增加土壤中有机质含量,有机质的分解会消耗土壤中的氧气,进而通过抑制硝化作用来降低土壤 N_2O 排放量。也有研究认为,由于有机肥含有大量的可溶性有机碳,施入土壤后微生物活性比单施化肥处理强,硝化和反硝化过程共同产生的 N_2O 增高,从而排放通量较高[17]。与本研究结果不一致的原因可能与有机肥的肥效有关,本试验的监测时间仅在春小麦生长季,且有机肥的肥效缓慢,持续时间较长,导致对施用有机肥后春小麦土壤 N_2O 排放水平的降低。

本研究结果表明,与 CK、N、M 三种处理相比,MN 处理可以显著提升春小麦产量。孟琳等[18]认为有机/无机肥配施可通过协调相关微生物活性来

平衡土壤供氮与作物需氮的关系,充分提升了氮素利用效率。也有研究表明[19],配施有机肥可改善土壤理化性质,增加土壤中团聚体的数量,优化土壤结构,并为作物额外带入所需微量元素,促进其根系生长。周江明[20]通过研究发现有机无机肥配施条件下可以显著增加作物单位面积的穗数与穗粒数,从而达到高产的目的。上述结论均与本研究结果一致,由此可见,有机无机肥配施在春小麦生育期能有效保证氮素的持续输入,充分起到增产、稳产、提升地力的作用,适合黄土高原半干旱区长期推广使用。

3.2 土壤环境因子及 NO_3^--N、NH_4^+-N 对 N_2O 排放通量的影响

土壤的硝化和反硝化过程是 N_2O 产生和排放的两条主要途径,硝化过程是指微生物将 NH_3 氧化成 NO_2 或者 NO_3^- 的过程,其中间产物会释放出 N_2O,反硝化作用是指 NO_3^- 或 NO_2 在厌氧条件下通过反硝化细菌还原成 N_2O 等气体的过程。试验中肥料的施用会向土壤中提供大量 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 来作为硝化反硝化反应底物,以此影响土壤 N_2O 的排放[21]。本试验结果显示,N_2O 排放通量与施肥处理下土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量均呈现极显著正相关,在不施肥处理下只与土壤 NH_4^+-N 含量呈极显著正相关,这是因为施肥直接增加了土壤中的氮素,从而影响土壤微生物活动,改变土壤 C/N 及氮素在土壤中的形态,进而影响 N_2O 的排放[22]。而不施肥情况下,由于试验区土壤为碱性,N_2O 还原酶活性较强,易将反硝化作用产生的 N_2O 还原为 N_2,因此导致 N_2O 排放通量与 NO_3^--N 含量相关性较弱[23]。李燕青等[24]认为,不同肥料施用对土壤中无机氮的形态影响不同,进一步影响氮素循环,造成不同施肥处理中土壤 N_2O 产生途径的差异。毕智超[25]和梁东丽等[26]在蔬菜地的研究中也均得出相似结论,与本研究结果一致。

土壤水热情况是影响农田 N_2O 排放的主要环境因子,有研究表明[27],N_2O 排放通量与土壤温度呈现正相关,而本试验结果表明,只有未施肥及单施有机肥处理下土壤温度与 N_2O 排放通量达到极显著或显著正相关,其余处理均未达到显著水平。这是因为硝化和反硝化反应在 5~35℃的范围内都可以进行,且温度每升高 10℃,反硝化细菌的活性则会提高 1.5~3.0 倍;另一方面,土壤温度升高促进土壤中微生物的呼吸作用,导致土壤微域氧气缺失,为反硝化生物创造了厌氧条件,反硝化作用产生的 N_2O 随之增加[27]。春小麦由于生育期较短,温度变化幅度小,监测期间施肥弱化了土壤温度对 N_2O 排放所造成的影响,因此导致以上结果。徐文彬等[28]研究发现 N_2O 排放通量与气温或土温的相关性微弱甚至不相关,温度对 N_2O 释放的刺激作用仅是短期效应,在较短的时间尺度内,当影响土壤 N_2O 释放的其它因子维持相对恒定时,温度变化被认为是影响 N_2O 释放的唯一重要因子,但随着肥料施用以及时间的延长,土壤中氮素的过渡性积累为硝化和反硝化反应提供充足底物,进而掩盖了微生物对温度变化的响应。周鹏等[29]在华北平原玉米田中的研究也得出,施肥和降水等因素的综合作用会掩盖温度对土壤 N_2O 排放的影响。土壤含水量主要通过改变土壤透气性、土壤氧化还原状况和微生物活性进而影响 N_2O 的排放[30],本研究表明,不施肥处理下春小麦地土壤 N_2O 排放通量与土壤含水量呈显著正相关,而各施肥处理则均未达到显著相关水平,这是因为不施肥处理下水分含量的提高会增加土壤有效性碳氧的富集,进而影响氧气浓度在土壤中的分布以及硝化和反硝化微生物的活性,从而引起 N_2O 排放[19]。而旱地麦田含水情况较差,土壤水分大部分被小麦根系吸收利用,参与硝化反硝化过程的水分较少,因此各施肥处理所提供的大量硝化反硝化反应底物对 N_2O 排放产生的影响掩盖了水分对 N_2O 产生过程中的作用。可见,旱作春小麦地土壤 N_2O 排放规律在施肥条件下受土壤温度水分影响较小。

4 结 论

1)旱作春小麦地土壤 N_2O 排放通量与施肥密切相关,N_2O 净损失量(以氮计算)为 1.1758~1.428 $kg \cdot hm^{-2}$,占当季施氮量的 1.12%~1.36%。不同施肥处理下 N_2O 累积排放量大小顺序为 N>MN>M>CK,产量关系为 MN>N>M>CK。以经济效益和环境效益为基础,黄土高原半干旱区应以 MN(有机/无机肥配施)处理为最优施肥措施。

2)旱作麦田不施肥时,土壤 N_2O 排放主要受土壤水热因素影响,施肥后,土壤 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量成为影响春小麦地土壤 N_2O 排放的主导因子。

参 考 文 献:

[1] RAVISHANKARA A R, DANIEL J S, PORTMANN R W. Nitrous oxide (N_2O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123-125.

[2] PLATTNERK G. IPCC, 2014: climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups Ⅰ, Ⅱ and Ⅲ to the fifth assessment re-

port of the intergovernmental panel on climate change[J]. Journal of Romance Studies, 2014, 4(2): 85-88.

[3] SNYDER C S, BRUULSEMA T W, JENSEN T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 133(3/4): 247-266.

[4] 李玥, 巨晓棠. 农田氧化亚氮减排的关键是合理施氮[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 842-851.
LI Y, JU X T. Rational nitrogen application is the key to mitigate agricultural nitrous oxide emission[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 842-851.

[5] 张娟, 李广, 袁建钰, 等. 水氮调控对旱作春小麦土壤、叶片养分含量的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1750-1759.
ZHANG J, LI G, YUAN J Y, et al. Effects of water and nitrogen regulation on soil and leaf stoichiometric characteristics of spring wheat in dry farming[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1750-1759.

[6] 刘明月, 张凯鸣, 毛伟, 等. 有机肥长期等氮替代无机肥对稻麦产量及土壤肥力的影响[J]. 华北农学报, 2021, 36(3): 133-141.
LIU M Y, ZHANG K M, MAO W, et al. Effects of long-term substitution of inorganic fertilizers with organic fertilizers on rice and wheat yields and soil fertility[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(3): 133-141.

[7] DING W X, LUO J F, LI J, et al. Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N_2O and fertilizer-induced N_2O emissions from an intensively cultivated soil[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465: 115-124.

[8] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 不同施肥方式对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007,(4): 34-39.
DONG Y H,OUYANG Z, LI Y S, et al. Influence of different fertilization on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007,(4): 34-39.

[9] 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.

[10] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对华北典型潮土 N 分配和 N_2O 排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6197-6203.
MENG L, CAI Z C, DING W X. Effects of long-term fertilization on N distribution and N_2O emission in fluvo-aquci soil in North China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6197-6203.

[11] 刘帅楠, 李广, 宋良翠, 等. 早播及耕作措施对黄土高原半干旱区春小麦土壤氮磷元素的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1367-1375.
LIU S N, LI G, SONG L C, et al. Effects of early sowing and tillage measures on nitrogen and phosphorus in the soil supporting spring wheat in the semi-arid area of the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1367-1375.

[12] 汤桂容, 周旋, 田昌, 等. 有机无机氮肥配施对莴苣土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2019, 51(4): 641-647.
TANG G R, ZHOU X, TIAN C, et al. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizers on soil nitrous oxide emission from lettuce (*Lactuca sativa* L.) fields[J]. Soils, 2019, 51(4): 641-647.

[13] 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 等. 有机肥与无机肥配施对潮土 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1474-1481.
SUN H Y, WAN Z M, LIU D Y, et al. Effect of organic fertilizer and inorganic fertilizer application on N_2O emissions from fluvo-aquic soil in the North China plain[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1474-1481.

[14] 奚雅静, 刘东阳, 汪俊玉, 等. 有机肥部分替代化肥对温室番茄土壤 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(20): 3625-3636.
XI Y J, LIU D Y, WANG J Y, et al. Effect of organic partial replacement of inorganic fertilizers on N_2O emission in greenhouse soil [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(20): 3625-3636.

[15] 姜珊珊, 庞炳坤, 张敬沙, 等. 减氮及不同肥料配施对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1741-1750.
JIANG S S, PANG B K, ZHANG J S, et al. Effects of reduced nitrogen and combined application of different fertilizers on CH_4 and N_2O emissions in paddy fields[J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1741-1750.

[16] 毕智超, 张浩轩, 房歌, 等. 不同配比有机无机肥料对菜地 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 154-161.
BI Z C, ZHANG H X, FANG G, et al. Effects of combined organic and inorganic fertilizers on N_2O emissions in intensified vegetable field[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(1): 154-161.

[17] MILLER M N, ZEBARTH B J, DANDIE C E, et al. Crop residue influence on denitrification, N_2O emissions and denitrifier community abundance in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(10): 2553-2562.

[18] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分化肥氮对稻谷产量的影响及替代率[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 532-542.
MENG L, ZHANG X L, JIANG X F, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and their proper substitution rate[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 532-542.

[19] LIU C A, LI F R, ZHOU L M, et al. Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2013, 117: 123-132.

[20] 周江明. 有机-无机肥配施对水稻产量、品质及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 234-240.
ZHOU J M. Effect of combined application of organic and mineral fertilizers on yield, quality and nitrogen uptake of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 234-240.

[21] 殷全玉, 孟祥瑞, 赵世民, 等. 有机无机氮肥配施下洛阳烟田土壤 N_2O 排放特点及其控制因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 330-337.
YIN Q Y, MENG X R, ZHAO S M, et al. The N_2O emission characteristics and controlling factors in Luoyang tobacco field under the combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizer[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 330-337.

[22] 王利利, 董民, 张璐, 等. 不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(9):

1073-1077.
WANG L L, DONG M, ZHANG L, et al. Effects of organic manures with different carbon-to-nitrogen ratios on soil microbial biomass of organic agriculture[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2013, 21(9): 1073-1077.

[23] 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5668-5676.
XU H W, LI N, FENG Y Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw returning methods on N_2O emissions in wheat-maize rotational soils[J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5668-5676.

[24] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(11): 1835-1846.
LI Y Q, WEN Y C, LIN Z A, et al. Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(11): 1835-1846.

[25] 毕智超.有机无机肥配施对菜地 N_2O 和 NO 排放及温室效应的影响[D]. 南京:南京农业大学,2017.
BI Z C. Effects of combined organic and inorganic fertilizers on N_2O and NO emissions and global warming potential in vegetable fields [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.

[26] 梁东丽, 同延安, OVE EMTERYD, 等. 菜地不同施氮量下 N_2O 逸出量的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 73-77.
LIANG D L, TONG Y A, EMTERYD O, et al. N_2O losses from vegetable field of applying different amounts of NO_3-N[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2002, 30(2): 73-77.

[27] AGEHARA S, WARNCKE D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(6): 1844-1855.

[28] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 贵州省旱田土壤 N_2O 释放及其环境影响因素[J]. 环境科学,2000,21(1):7-11.
XU W B, HONG Y T, CHEN X H, et al. N_2O emission from upland soils in Guizhou and its environmental controlling factors[J]. Environmental Science, 2000, 21(1): 7-11.

[29] 周鹏, 李玉娥, 刘利民, 等. 施肥处理和环境因素对华北平原春玉米田 N_2O 排放的影响——以山西晋中为例[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 179-184.
ZHOU P, LI Y E, LIU L M, et al. Effects of fertilization and environment factors on N_2O emission in spring corn field in North China plain——a case study of Jinzhong in Shanxi province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(2): 179-184.

[30] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤 N_2O 产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792-800.
ZHU Y G, WANG X H, YANG X R, et al. Key microbial processes in nitrous oxide emissions of agricultural soil and mitigation strategies [J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 792-800.

(上接第185页)

[23] WEI S S, WANG X Y, ZHANG J W, et al. The role of nitrogen in leaf senescence of summer maize and analysis of underlying mechanisms using comparative proteomics[J]. Plant Science, 2015, 233: 72-81.

[24] 汤绍虎, 罗充. 植物生理学实验教程[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 2012.
TANG S H, LUO C. Plant physiology laboratory tutorial [M]. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 2012.

[25] 王永军, 杨今胜, 袁翠平, 等. 超高产夏玉米花粒期不同部位叶片衰老与抗氧化酶特性[J]. 作物学报, 2013, 39(12): 2183-2191.
WANG Y J, YANG J S, YUAN C P, et al. Characteristics of senescence and antioxidant enzyme activities in leaves at different plant parts of summer maize with the super-high yielding potential after anthesis[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(12): 2183-2191.

[26] 司伟娜, 高梦, 程振, 等. 玉米叶片早衰突变体 les1 的生理特性及基因初步定位[J]. 玉米科学, 2021, 29(5): 50-56.
SI W N, GAO M, CHENG Z, et al. Physiological characteristics and preliminary gene mapping of maize leaf premature senescence mutant les1[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(5): 50-56.

[27] 落莉莉, 常庆瑞, 武旭梅, 等. 夏玉米叶片光合色素含量高光谱估算[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 178-183.
LA L L, CHANG Q R, WU X M, et al. Hyperspectral estimation of photosynthetic pigment contents of summer maize leaves[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 178-183.

[28] JUNKER L V, ENSMINGER I. Relationship between leaf optical properties, chlorophyll fluorescence and pigment changes in senescing Acer saccharum leaves[J]. Tree Physiology, 2016, 36(6): 694-711.

[29] TIAN G L, QI D L, ZHU J Q, et al. Effects of nitrogen fertilizer rates and waterlogging on leaf physiological characteristics and grain yield of maize[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2021, 67(7): 863-875.

[30] 朴琳, 李波, 陈喜昌, 等. 优化栽培措施对春玉米密植群体冠层结构及产量形成的调控效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3048-3058.
PIAO L, LI B, CHEN X C, et al. Regulation effects of improved cultivation measures on canopy structure and yield formation of dense spring maize population[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(15): 3048-3058.

[31] 吴雅薇, 赵波, 杜伦静, 等. 低氮胁迫对不同氮效率玉米品种苗期叶片碳氮代谢的影响[J]. 玉米科学, 2019, 27(6): 74-83.
WU Y W, ZHAO B, DU L J, et al. Effects of low nitrogen stress on carbon-nitrogen metabolites and related enzyme activities in leaves of maize varieties with contrasting nitrogen efficiency at seedling stage [J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(6): 74-83.

[32] 张仁和, 王博新, 杨永红, 等. 陕西灌区高产春玉米物质生产与氮素积累特性[J]. 中国农业科学, 2017, 50(12): 2238-2246.
ZHANG R H, WANG B X, YANG Y H, et al. Characteristics of dry matter and nitrogen accumulation for high-yielding maize production under irrigated conditions of Shaanxi[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(12): 2238-2246.