

条耕模式下黑土区农田系统玉米产量及 氨挥发特征对施氮量的响应

王滢渺¹, 胡 博², 赵 闯³, 任姿姿¹, 李晓宇¹, 王少杰¹, 高 强¹, 冯国忠¹

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林省农业技术推广总站, 长春 130021;

3. 梨树县农业技术推广总站, 吉林 梨树 136500)

摘 要: 为明确条耕模式下玉米产量及氨挥发对施氮量的响应, 开展两年田间试验, 设置条耕秸秆覆盖还田(ST)、旋耕秸秆离田(RT)两种耕作模式和3个氮肥施用量(0、180、240 kg/hm²), 研究施氮量对NH₃挥发特征、玉米产量以及氮素吸收的影响。结果表明, ST处理的NH₃挥发累积量、NH₃挥发速率、玉米产量较RT处理分别提高16.1%、18.0%和9.8%, 子粒产量形成的氮生理效率提高3.8%; 处理N180与N240间玉米产量(11 861和11 709 kg/hm²)与子粒产量形成的氮生理效率(50.3和51.9 kg/kg)无明显差异, N180处理的NH₃挥发累积量较N240处理显著降低19.5%; NH₃挥发速率与土壤NO₃⁻-N、NH₄⁺-N含量呈正相关($R=0.51, P<0.05$; $R=0.59, P<0.05$), 与土壤充水孔隙度(WFPS)呈负相关($R=-0.18, P<0.05$)。条耕模式配合氮肥用量优化可以协同实现黑土区玉米增产与氨挥发减排的目标。

关键词: 玉米; 施氮量; NH₃挥发; 条耕模式

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Response of Maize Yield and NH₃ Volatilization Characteristics to Nitrogen Application under Strip Tillage System in Black Soil Regions

WANG Ying-miao¹, HU Bo², ZHAO Chuang³, REN Zi-zi¹, LI Xiao-yu¹,

WANG Shao-jie¹, GAO Qiang¹, FENG Guo-zhong¹

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;

2. Agricultural Technology Extension Station of Jilin Provincial, Changchun 130021;

3. Agricultural Technology Extension Station of Lishu County, Lishu 136500, China)

Abstract: In order to clarify the response of maize yield and NH₃ volatilization to nitrogen application under strip tillage, a two-year field experiment was conducted, which set up two tillage systems: strip tillage with straw cover(ST) and rotary tillage without straw(RT) and three nitrogen rates(0, 180, 240 kg/ha). The effects of nitrogen application on NH₃ volatilization characteristics, maize yield, and nitrogen assimilation were studied. The results showed that, the cumulative NH₃ emissions, NH₃ volatilization rate and maize yield under ST were significantly increased by 16.1%, 18.9% and 9.8% compared to RT, respectively, and the nitrogen physiological efficiency was increased by 3.8%. There was no significant difference in the maize yield(11 861 and 11 709 kg/ha) and nitrogen physiological efficiency for grain yield formation(50.3 and 51.9 kg/kg) between N180 and N240, but the cumulative NH₃ emissions of N180 was significantly reduced by 19.5% compared to N240. Positive correlations were observed between NH₃ volatilization rate and soil NO₃⁻-N and NH₄⁺-N content($R=0.51, P<0.05$; $R=0.59, P<0.05$), and a negative correlation with water-filled pore space(WFPS) ($R=-0.18, P<0.05$). Strip tillage system combined with optimized nitrogen fertilizer can synergistically achieve the goals of increasing maize yield and reducing NH₃ volatilization in black soil areas.

Key words: Maize; Nitrogen application; NH₃ volatilization; Strip tillage system

录用日期: 2024-05-09

基金项目: 吉林省自然科学基金面上项目(20230101305JC)、国家重点研发计划项目(2022YFD1500702)

作者简介: 王滢渺(1998-), 女, 吉林人, 硕士, 主要研究方向为黑土区春玉米耕作模式与氮肥施用环境效应研究。

E-mail: wangyingmiao1019@163.com

冯国忠为本文通信作者。E-mail: gzf@jlau.edu.cn

东北地区是中国主要的粮食生产区,该地区的玉米产量占全国玉米总产量的30%^[1]。当前,在玉米获得高产的同时,农田中化肥投入量也在不断增加。过量施用氮肥可能刺激玉米生产中 NH_3 挥发的高排放^[2]。因此,优化农田氮肥用量对于降低农田 NH_3 挥发和提高氮肥利用率具有重要意义。

自21世纪以来,我国逐步开展保护性耕作实践^[3]。条带耕作作为一种新型的保护性耕作制度,在东北地区进行了大量的研究^[4]。条带耕作能够综合实现秸秆还田提高土壤肥力、保持土壤水分、减少土壤侵蚀以及改善苗带土壤环境的目标^[5-6]。目前,关于耕作模式对农田系统 NH_3 挥发影响的研究结果不同。Bünemann等^[7]研究发现,小麦秸秆覆盖可能会刺激土壤微生物活性,从而增加尿素水解、土壤 NH_4^+-N 含量进而促进 NH_3 挥发。Griggs等^[8]研究表明,耕作对氨挥发无明显影响。

前人关于土壤耕作和氮肥施用等单一农业管理措施对农田系统 NH_3 挥发影响方面已开展大量研究工作。随着农田管理措施的不断完善,耕作制度与氮肥优化策略的结合已经开始,由于土壤类型和地理位置的差异,这种组合策略也将对 NH_3 挥发产生

不同的影响。此外,在国家黑土地保护利用大背景下,东北黑土的环境因素包括土壤无机氮、土壤充水孔隙度(WFPS)、土壤温度的变化趋势与农田系统 NH_3 挥发之间的关系尚不清楚。因此,研究条耕模式和施氮量双因素田间试验下的农田系统 NH_3 挥发特征、玉米产量形成及氮素利用状况,选择能协同实现玉米增产与农田系统 NH_3 挥发减排的综合生产方式,可以为黑土地保护利用与农田施肥减排的绿色生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验地点位于吉林省四平市梨树县三棵树村(N43°20′24.19″,E124°06′18.01″)。供试土壤为黑土,供试玉米品种为德美亚3号。该田间试验于2017年开始,本研究在2021–2022年进行。供试期间试验区降雨量及大气温度如图1所示,2021年和2022年玉米生长季总降雨量以及气温分别为573.1 mm、720.2 mm和17.6℃、18.1℃。表层(0~20 cm)土壤有机质含量22.0 g/kg,pH值5.6,全氮1.4 g/kg、速效磷38.0 mg/kg,交换性钾114.0 mg/kg。

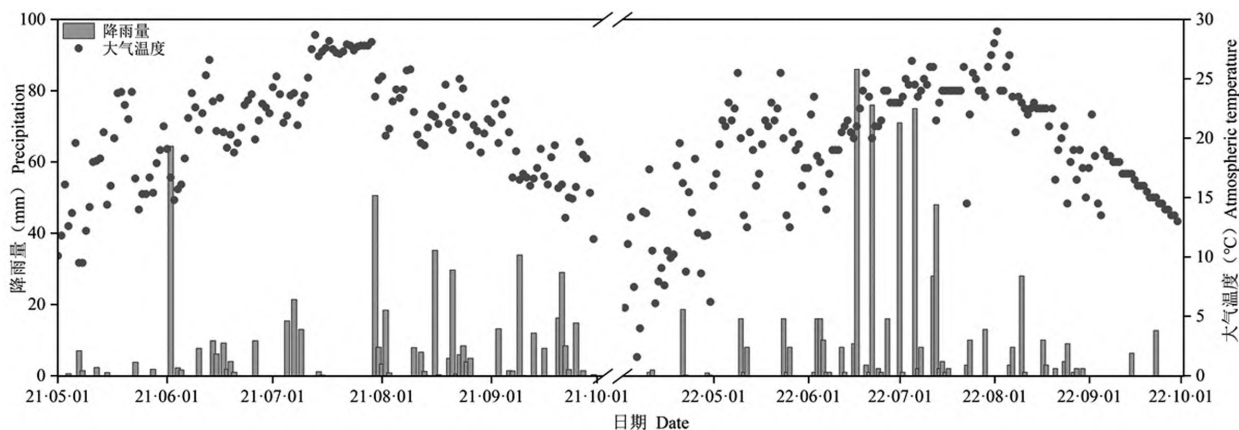


图1 玉米生育期内降雨和温度统计

Fig.1 Statistics of rainfall and temperature during rice growing period

1.2 试验设计

采用耕作模式、施氮量两因素裂区设计,主区为耕作方式,分别为条耕秸秆覆盖还田(ST)、旋耕秸秆离田(RT);副区为施氮量不施氮(N0)、180 kg/hm²(N180)、240 kg/hm²(N240)。各处理的磷钾肥投入量一致,均为90 kg/hm²(以 P_2O_5 计)和90 kg/hm²(以 K_2O 计),氮磷钾肥均做基肥一次性施入。本试验采用随机区组设计,3次重复,共18个试验小区,小区面积108 m²。试验地全年无灌溉,其他管理措施与当地农民常规措施一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤 NH_3 挥发测定

NH_3 采用通气法^[9]测定,浸提液用AA3流动分析仪测定过滤液中的铵态氮含量。采样时间:施肥后第1周,每天取样1次;第2~3周,根据测到的氨挥发量,每3~5 d取样1次,之后取样间隔可延长7~15 d,直至监测不到氨挥发时为止。土壤 NH_3 挥发速率的计算公式如下:

$$N_i = \left[\frac{M}{(A \times D)} \right] \times 0.01$$

式中: N_i 为土壤氮挥发速率; M 为通气法装置平均每次测得的氮量($\text{NH}_3\text{-N}$, mg); A 为捕获装置的横截面积(m^2); D 为每次连续捕获的时间(d)。累积 NH_3 挥发量的计算公式如下:

$$\sum \text{NH}_3\text{-N} = \sum \left[\frac{(N_{i+1} + N_i)}{2} \right] \times (C_{i+1} - C_i)$$

式中: N_i 为第*i*次采样时氮挥发量; C_i 为第*i*次采样时间(d)。

单位玉米产量氮挥发量=累积 NH_3 挥发量/玉米产量

NH_3 的排放系数=(施氮区 NH_3 挥发量-不施氮区 NH_3 挥发量)/施氮量 $\times 100\%$

1.3.2 土壤与植株样品的采集与测定

在采集气体期间,每个小区取0~20 cm土层土壤样品,测定土壤硝态氮和铵态氮含量以及土壤含水量。在成熟期采集玉米植株样品,每个小区采取3株长势均匀的玉米植株,将样品分为秸秆和子粒两部分,105℃杀青30 min,75℃烘干至恒重后测定其干物重量。样品粉碎后过0.05 mm筛,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消煮,用凯氏定氮法测定秸秆和子粒氮素含量^[10]。通过计算子粒产量形成的氮生理效率,反映作物利用吸收的氮素形成子粒产量的能

力。计算公式如下:
子粒产量形成的氮生理效率=子粒产量/地上部吸氮量

1.3.3 玉米产量的测定

在玉米成熟期时,选取小区中间24 m²的面积进行测产,脱粒后称重,计算单位面积玉米产量。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用Microsoft Excel 2019进行数据处理,所有数据均使用Origin 2023软件制作。试验数据采用SPSS 26.0软件对数据采用LSD法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 条耕与施氮量对玉米产量以及氮素吸收利用的影响

从表1可以看出,年际、耕作模式与施氮量及其交互作用显著影响玉米产量及其构成要素。其中,2021年的玉米产量、穗粒数及百粒重较2022年分别提高7.1%、15.2%和8.1%,主要原因与2022年降雨量过高、农田出现涝害;ST处理的玉米产量显著高于RT处理,增幅为9.8%,并且ST处理的穗粒数以及百粒重相比RT处理分别增加5.4%和5.6%,穗数差

表1 不同处理对产量、穗数、穗粒数以及百粒重的影响

Table 1 The effects of different treatments on yield, ear number, grain number, and 100-grain weight

处 理 Treatment	产量 (kg/hm ²) Grain yield	穗数(×10 ⁴ 穗/hm ²) Ear number	穗粒数 Kernels per ear	百粒重(g) 100-grain weight
年际 Y				
2021	9 942.0 a	6.5 a	491.6 a	30.6 a
2022	9 282.0 b	6.4 a	426.7 b	28.3 b
耕作 T				
条 耕	10 062.0 a	6.5 a	471.2 a	30.3 a
旋 耕	9 162.0 b	6.4 a	447.1 b	28.7 b
氮肥 N				
N0	5 266.0 b	6.3 a	384.2 b	24.7 b
N180	11 861.0 a	6.6 a	492.0 a	32.3 a
N240	11 709.0 a	6.5 a	501.4 a	31.3 a
ANOVA				
年际 Y	0.000 358***	—	0.000 001***	0.000 141***
耕作 T	0.000 008***	—	0.008 652**	0.005 388**
氮肥 N	0.000 001***	—	0.000 001***	0.000 001***
年际×耕作 Y×T	—	—	0.013 032*	—
年际×氮肥 Y×N	—	0.002 061**	0.007 515**	0.035 886*
耕作×氮肥 T×N	—	—	—	—
年际×耕作×氮肥 Y×T×N	—	—	—	—

注:“*、**、***”即 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 。不同小写字母表示存在显著差异。下表同。
Note: *, **, *** means $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$. Different lowercase letters indicate significant differences. The same below.

异不显著。增施氮肥可以显著改善玉米产量及其构成要素,N180和N240处理间玉米产量及其构成要素无明显差异。年际与耕作模式的交互作用对穗粒数有显著影响,2021年ST处理的穗数较RT处理增加10.0%,2022年ST与RT处理的穗数无明显差异。年际与施氮量的交互作用对穗数、穗粒数及百粒重有显著影响,2021年N180处理的穗数较N240处理提高4.0%,穗粒数与百粒重差异不显著;2022年N180处理的穗数、穗粒数及百粒重较N240处理分别降低3.0%、5.0%和3.6%。

从表2可以看出,年际、耕作模式与施氮量及其交互作用显著影响地上部吸氮量与子粒产量形成的氮生理效率,2021年玉米子粒、秸秆以及植株吸氮量相较于2022年显著提高35.9%、48.1%和39.9%,氮生理效率显著降低14.2%,这是由于2021年的植

株吸氮量显著增加,进而降低了子粒产量形成的生理效率。ST处理的子粒、秸秆、植株吸氮量和氮生理效率相比RT处理分别增加7.0%、9.9%、8.0%和3.8%;N180和N240处理间植株吸氮量、子粒产量形成的氮生理效率无明显差异。年际与施氮量的交互作用对地上部吸氮量存在显著影响,2021年N180处理的子粒吸氮量与植株吸氮量较N240处理增加11.7%和7.6%,秸秆吸氮量无明显差异;2022年N180和N240处理间的子粒吸氮量与植株吸氮量无明显差异,秸秆吸氮量降低1.85%。耕作与施氮量的交互作用对子粒吸氮量与氮生理效率有显著影响,ST处理下N180处理的子粒吸氮量较N240处理增加5.3%,RT处理的子粒吸氮量的增幅则为10.2%;ST处理下N180处理较N240处理的氮生理效率的降幅是RT处理下降幅的两倍。

表2 不同处理对子粒吸氮量、秸秆吸氮量、植株吸氮量与氮生理效率的影响

Table 2 The effects of different treatments on grain nitrogen content, straw nitrogen content, plant nitrogen content, and N physiological efficiency

处 理 Treatment	子粒吸氮量 (kg/hm ²) Grain nitrogen content	秸秆吸氮量 (kg/hm ²) Straw nitrogen content	植株吸氮量 (kg/hm ²) Plant nitrogen content	子粒产量形成的氮生理效率N(kg/kg) Physiological efficiency for grain yield formation
年 际 Y				
2021	135.4 a	67.4 a	202.8 a	56.7 b
2022	106.0 b	48.2 b	154.2 b	66.1 a
耕 作 T				
条 耕	127.0 a	61.5 a	188.4 a	62.5 a
旋 耕	114.4 b	54.1 b	168.5 b	60.2 a
氮 肥 N				
N0	42.6 c	21.8 b	64.4 b	
N180	165.6 a	75.5 a	241.0 a	50.3 a
N240	154.0 b	76.1 a	230.0 a	51.9 a
ANOVA				
年 际 Y	0.000 001***	0.000 001***	0.000 001***	0.000 001***
耕 作 T	0.001 145**	0.021 785*	0.001 646**	—
氮 肥 N	0.000 001***	0.000 001***	0.000 001***	0.000 001***
年际×耕作 Y×T	—	—	—	—
年际×氮肥 Y×N	0.002 293**	0.00 3791**	0.000 351***	—
耕作×氮肥 T×N	0.043 065*	—	—	0.000 024***
年际×耕作×氮肥 Y×T×N	—	—	—	—

2.2 条耕与施氮量对NH₃挥发累积量、单位玉米产量氨挥发量与NH₃排放系数的影响

从表3可以看出,耕作模式和施氮量显著影响农田NH₃挥发累积量与单位玉米产量氨挥发量,ST处理的NH₃挥发累积量与单位玉米产量氨挥发量相比RT处理分别显著提高16.1%和6.9%,而ST与RT处理的平均NH₃排放系数差异不明显;N180处理的

NH₃挥发累积量、单位玉米产量氨挥发量和NH₃排放系数分别较N240处理降低19.5%、20.2%和13.0%。耕作和施氮量对NH₃挥发累积量、单位玉米产量氨挥发量和NH₃排放系数均不存在交互作用。在NH₃排放系数方面,ST处理下N180处理相较于N240处理的增幅是RT处理的两倍。

表3 不同处理对单位玉米产量氨挥发量、NH₃累积排放量、NH₃排放系数与排放最高峰值的影响
Table 3 The impact of different treatments on ammonia volatilization per unit maize yield, cumulative NH₃ emissions, NH₃ emissions factor and peak emissions

处 理 Treatment		NH ₃ 累积排放量 (kg/hm ²) Cumulative NH ₃ emissions		单位玉米产量氨挥发量(g/t) Ammonia volatilization per unit maize yield		NH ₃ 排放系数 (%) NH ₃ emissions factor		排放最高峰值 [kg/(hm ² ·d)] Peak emissions	
		2021	2022	2021	2022	2021	2022	2021	2022
耕 作	条 耕	32.9±0.4 A	30.6±0.1A	3.1±0.1 A	3.1±0.1 A	0.11±0.01 A	0.11±0.01 A		
	旋 耕	28.6±1.0 B	26.2±0.6 B	2.9±0.1 B	2.9±0.1 B	0.11±0.01 A	0.11±0.01 A		
氮 肥	N0	15.2±0.5 c	13.2±0.4 c	2.6±0.1 c	2.7±0.1 c				
	N180	35.2±0.7 b	31.7±0.5 b	2.8±0.1 b	2.8±0.1 b	0.10±0.01 b	0.10±0.01 b		
	N240	42.8±0.5 a	40.4±0.5 a	3.6±0.1 a	3.5±0.1 a	0.12±0.01 a	0.11±0.01 a		
ST	N0	17.7±1.1 A c	15.6±0.4 A c	2.7±0.1 A c	2.9±0.1 A b			1.2	1.2
	N180	36.9±0.7 A b	33.7±0.2 A b	2.9±0.1 A b	2.9±0.1 A b	0.11±0.01 A a	0.10±0.01 A b	2.6	2.9
	N240	44.1±0.3 A a	42.6±0.4 A a	3.7±0.2 A a	3.5±0.1 A a	0.11±0.01 A a	0.11±0.01 A a	2.5	3.1
RT	N0	12.7±1.1 B c	10.7±0.8 B c	2.6±0.1 A c	2.6±0.1 B b			1.2	1.2
	N180	31.6±1.2 B b	29.8±1.2 B b	2.7±0.1 B b	2.6±0.1 A b	0.10±0.01 A b	0.11±0.01 A a	2.1	2.5
	N240	41.4±0.7 B a	38.2±1.3 B a	3.6±0.1 A a	3.4±0.1 A a	0.12±0.01 A a	0.11±0.01 A a	2.2	2.7
ANOVA									
	耕作 T	0.000 003***	0.000 002***	0.008 143**	0.010 809*	—	—		
	氮肥 N	0.000 001***	0.000 001***	0.000 001***	0.000 005***	0.004 899**	0.008 147**		
	耕作×氮肥 T×N	—	—	—	—	—	—		

注:不同大写字母表示耕作系统之间存在显著差异。
Note: Different capital letters indicate significant differences between tillage systems.

2.3 耕作模式对耕层土壤环境的影响

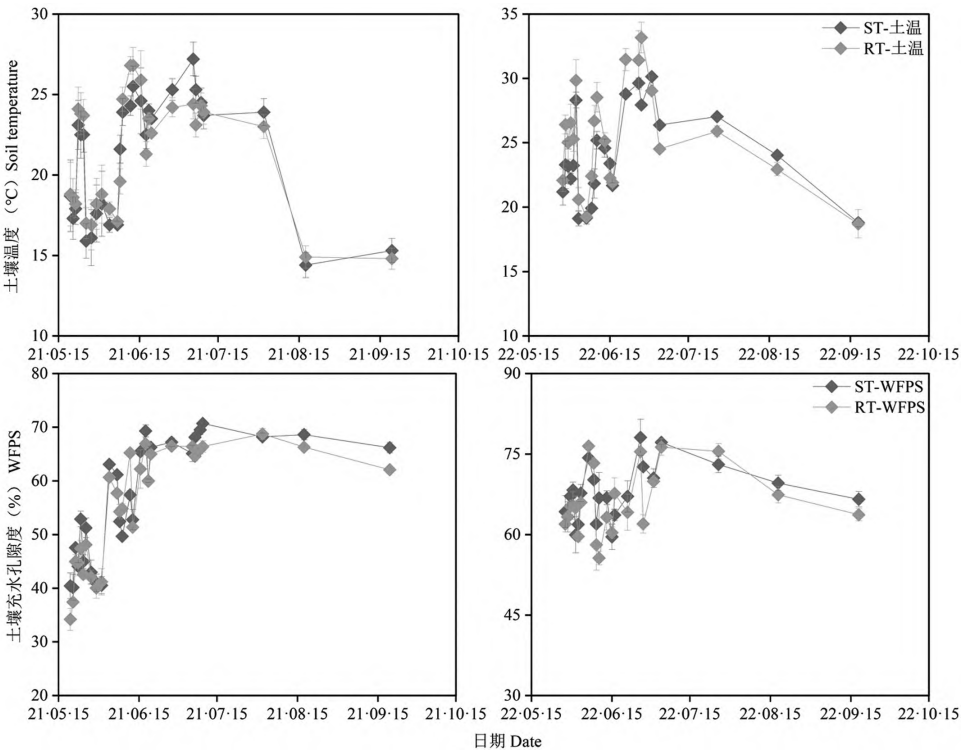
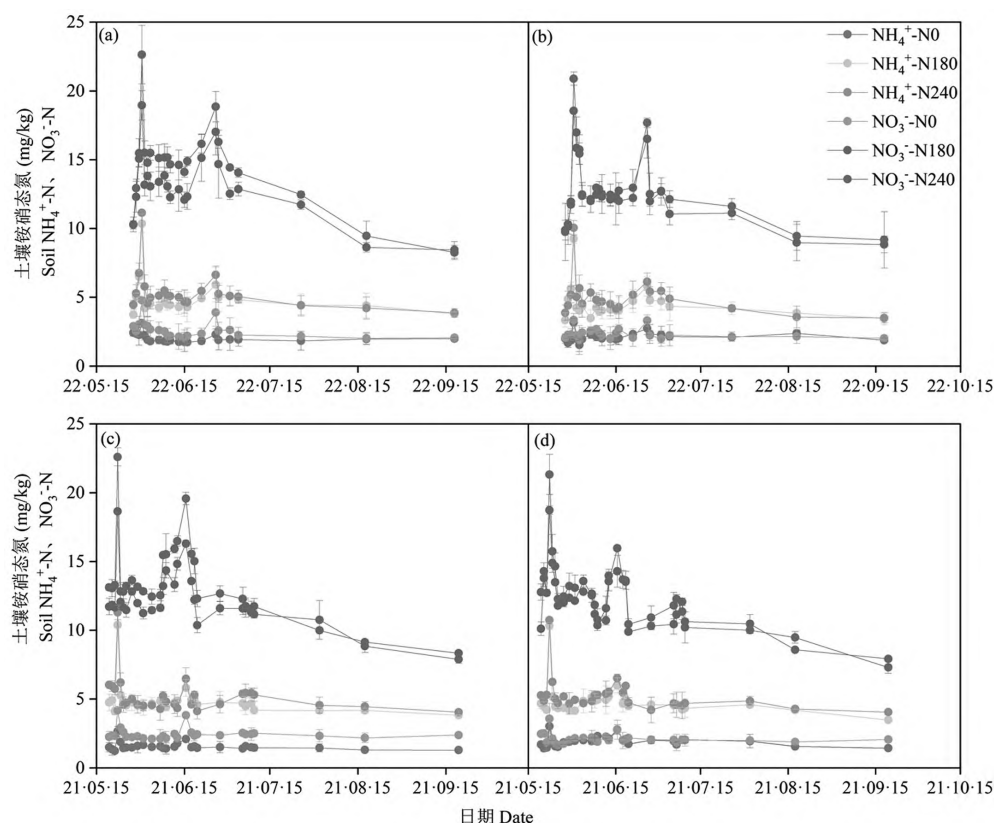


图2 2021–2022年不同耕作模式下土壤温度和WFPS
Fig.2 Soil temperature and WFPS under different tillage in 2021–2022

从图2可以看出,在试验期间不同耕作模式下土壤温度与土壤充水孔隙度(WFPS),与RT处理相比,ST处理的土壤温度在玉米生长前期下降了5.7%,在玉米生长后期上升了4.3%。ST处理的平均WFPS(61.6%)比RT处理(60.1%)增加2.5%,表明ST处理有效增加了土层含水量,减少了水分的蒸发,保水性能较好。

从图3可以看出,在不同耕作模式中,施入氮肥后3~5 d,土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量出现最高值,随后逐渐下降最后趋于稳定,ST处理下土壤 NO_3^- -N

和 NH_4^+ -N含量在1.7~22.6 mg/kg,略高于RT处理(1.4~21.3 mg/kg)。在施入氮肥后1个月内,土壤无机氮含量最高,此时ST处理下土壤 NO_3^- -N含量和 NH_4^+ -N含量相比RT处理分别增加20.2%和5%。在施氮量方面,N180处理下土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量分别为4.8 mg/kg和12.5 mg/kg,较N240处理降低8.3%和6.7%,其中ST处理下N240处理的土壤 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N含量最高,其含量分别为22.6和11.3 mg/kg。



注:(a)、(c)为条耕模式;(b)、(d)为旋耕模式。

Note: (a) and (c) represents strip tillage; (b) and (d) represent rotary tillage.

图3 2021–2022年玉米土壤硝态氮和铵态氮含量

Fig.3 Nitrate nitrogen and ammonium nitrogen content in maize soil in 2021–2022

2.4 条耕与施氮量对农田 NH_3 挥发速率的影响

从图4可以看出,在试验期间施入氮肥后,各处理中 NH_3 挥发速率呈先升高后缓慢下降的趋势。在施入氮肥后第3~4天,各处理的 NH_3 挥发速率均出现峰值。其中,2021年ST处理下N180的 NH_3 排放速率最高,为2.6 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),显著高于RT处理下N180和N240处理的 NH_3 排放速率,其峰值分别为2.1和2.2 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$);2022年ST处理下N240和N180处理的 NH_3 排放速率峰值分别为3.1和2.9 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$),均明显高于RT处理。在施入氮肥后一个月内,土壤

NH_3 挥发速率从排放高峰逐渐趋于平缓,期间土壤 NH_3 挥发速率在整个玉米生育期内最高,ST处理下的 NH_3 速率为0.7 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$)高于RT处理[0.6 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$)],增幅为17.7%。N0、N180和N240处理的 NH_3 挥发速率变化范围分别在0.1~1.2、0.1~2.9和0.1~3.1 kg/($\text{hm}^2 \cdot \text{d}$)。两年内在ST与RT处理下各施氮处理间 NH_3 挥发速率均表现为ST-N240>RT-N240>ST-N180>RT-N180>ST-N0>RT-N0,ST处理下配合较低施氮量可以有效降低 NH_3 挥发速率。

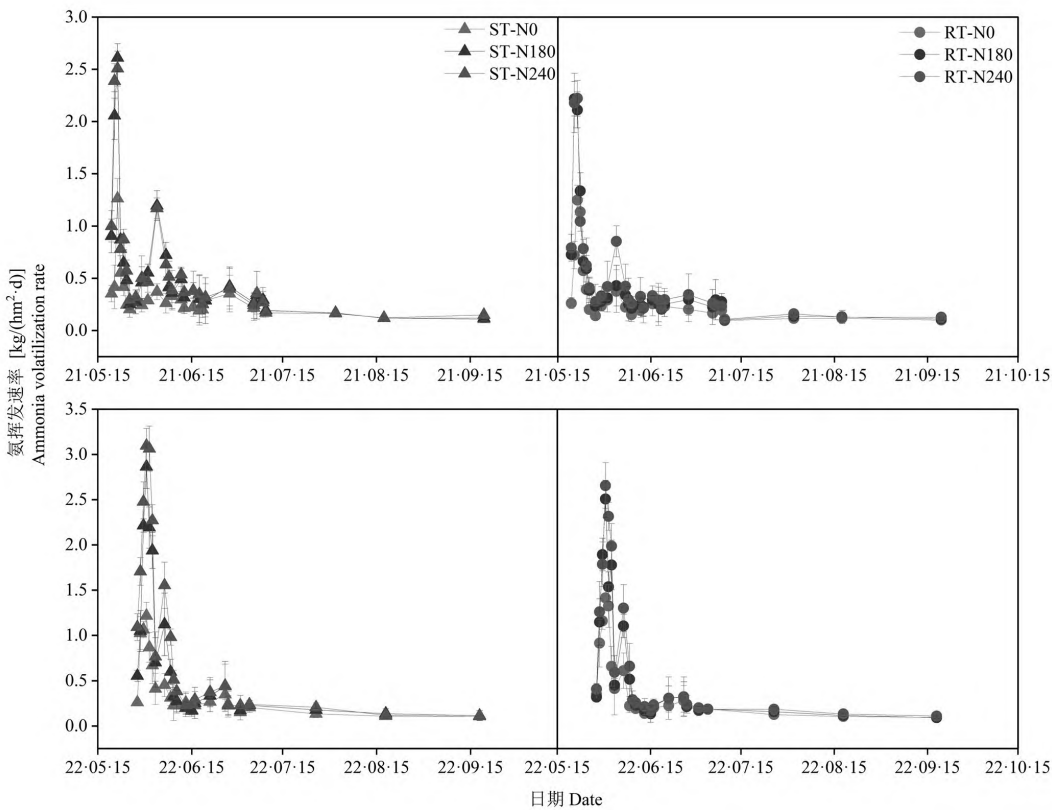
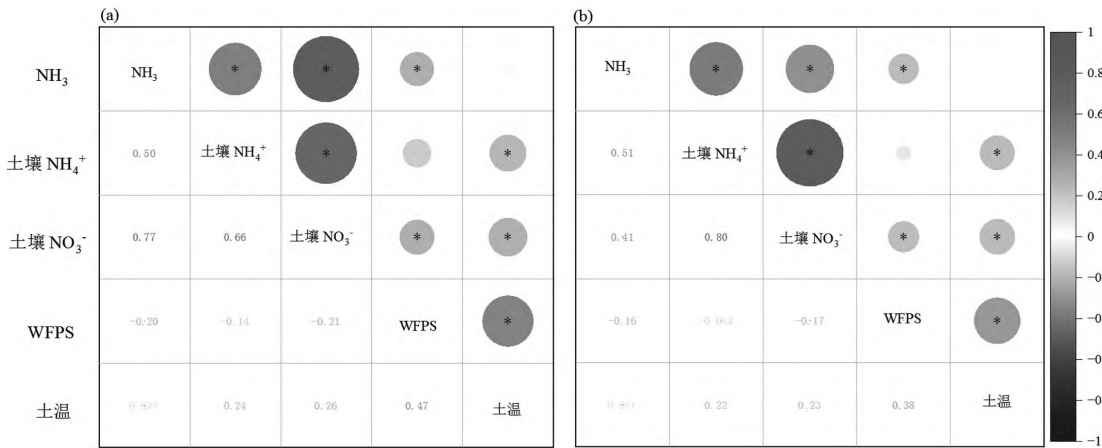


图4 2021–2022年玉米农田系统NH₃挥发速率

Fig.4 NH₃ volatilization rate in maize farmland system in 2021–2022



注:(a)为ST下相关性;(b)为RT下相关性。
Note: (a) is the correlation under ST, and (b) is the correlation under RT.

图5 NH₃挥发速率与土壤变量之间的相关性

Fig.5 Person correlation between NH₃ volatilization rate and soil variables

从图5可以看出,不同耕作下施肥后农田NH₃挥发速率与NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、WFPS、土壤温度的相关性,在两种耕作模式下NH₃挥发速率均与土壤NO₃⁻-N、NH₄⁺-N含量呈显著正相关,与WFPS呈显著负相关,与土壤温度无显著相关。2022年当施入氮肥后第4天,ST处理下土壤NO₃⁻-N、NH₄⁺-N含量

及NH₃挥发速率均达到最高值,分别为15.5 mg/kg、8.2 mg/kg及2.4 kg/(hm²·d),高于RT处理[14.3 mg/kg、7.4 mg/kg及2.2 kg/(hm²·d)];在施入氮肥后1个月内,期间土壤无机氮含量与NH₃挥发速率均达到最高,进一步验证了在土壤无机氮含量较高时土壤NH₃挥发速率也在增强。可见土壤无机氮含量是影响NH₃

挥发速率的主要因素。

3 结论与讨论

本研究中条耕能够改善植株氮素吸收利用状况并显著提高玉米产量,ST处理的植株吸氮量较RT处理增加19.9 kg/hm²,主要原因是条耕模式配合氮肥施用增加了土壤氮素养分含量,并且秸秆还田增加了土壤微生物数量,加强了土壤酶活性,有利于作物增加对氮素吸收的能力^[11]。ST处理的子粒产量形成的氮生理效率较RT处理增加2.3 kg/kg,表明ST处理利用吸收的氮素形成子粒产量的能力较高;ST处理的玉米产量较RT处理增加了900 kg/hm²,Chen等^[12]研究表明,秸秆还田有利于后期干物质积累,促进子粒形成。Sha等研究发现,条耕模式下玉米子粒粒重高于旋耕,有助于玉米产量的稳定,并且ST处理的单位玉米产量氨挥发量较RT处理显著提高了6.9%,这与以往的研究结果一致^[13-14];同时条耕显著提高了玉米农田系统NH₃挥发累积量,ST处理的NH₃挥发累积量相比RT处理显著提高15.9%,这与Rochette等^[15]、Afshar等^[16]研究结果一致,主要原因在于少耕条件下耕层土壤脲酶活性要高于旋耕,促进了氮肥的水解^[17],并且少耕中土壤表面的残留物减少了肥料与土壤颗粒的接触,降低了土壤颗粒对氮肥的固定,促进了土壤氨挥发^[18]。

过量施氮并不能有效增加玉米产量^[19-20],本研究中,N180和N240处理间玉米产量没有显著差异,而N180处理的单位玉米产量氨挥发量较N240处理降低25.2%,显著降低了基于产量比计算的NH₃排放量;同时优化施氮可以降低土壤NH₃挥发累积量和NH₃挥发排放系数^[21-23],N180处理的NH₃挥发累积量和排放系数分别为33.5 kg/hm²和0.10%,相比N240处理(41.6 kg/hm²和0.12%)分别降低19.5%和16.7%。综合考虑土壤耕作与氮肥用量的因素,我们发现ST-N180在保持玉米产量的同时显著降低NH₃挥发累积量18.6%。

本研究中土壤环境显著影响土壤NH₃挥发速率,并且NH₃挥发速率与土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量呈显著正相关,其中直接因素是土壤NH₄⁺-N含量^[24]。NH₃挥发速率与WFPS呈显著负相关,通过对两年施入氮肥10 d后NH₃挥发速率与WFPS的比较发现:2021年和2022年的平均WFPS、土壤NH₃挥发速率分别为66.6%、0.32 kg/(hm²·d)和69.8%、0.23 kg/(hm²·d),这可能是由于当土壤含水量较高时,土壤当中储存空气的孔隙就会减少,导致土壤当中的气压降低,进一步减缓NH₃排放^[25]。

综上,本试验条件下,条耕模式配合氮肥用量优化可以协同实现玉米子粒产量增加与农田系统氨排放减排的目标,关于长期条耕模式的农田环境效应评估,有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] YANG L, WANG L, LI H, et al. Impacts of fertilization alternatives and crop straw incorporation on N₂O emissions from a spring maize field in Northeastern China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(4): 881-892.
- [2] ISLAM S M M, GAIHRE Y K, BISWAS J C, et al. Different nitrogen rates and methods of application for dry season rice cultivation with alternate wetting and drying irrigation: Fate of nitrogen and grain yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 196: 144-153.
- [3] XUE L, KHAN S, SUN M, et al. Effects of tillage practices on water consumption and grain yield of dryland winter wheat under different precipitation distribution in the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 191: 66-74.
- [4] SHA Y, LIU Z, HAO Z, et al. Root growth, root senescence and root system architecture in maize under conservative strip tillage system [J]. *Plant and Soil*, 2024, 495(1): 253-269.
- [5] SYSWERDA S P, CORBIN A T, MOKMA D L, et al. Agricultural management and soil carbon storage in surface vs. Deep Layers[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(1): 92-101.
- [6] LOWRY C J, ROBERTSON G P, BRAINARD D C. Strip-tillage decreases soil nitrogen availability and increases the potential for N losses in a cover cropped organic system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 319: 107524.
- [7] BÜNEMANN E K, SCHWENKE G D, ZWIETEN L. Impact of agricultural inputs on soil organisms—a review[J]. *Soil Research*, 2006, 44(4): 379-406.
- [8] GRIGGS B R, NORMAN R J, WILSON C E J, et al. Ammonia volatilization and nitrogen uptake for conventional and conservation tilled dry-seeded, delayed-flood rice[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(3): 745-751.
- [9] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等. 北方冬小麦/夏玉米轮作体系土壤氨挥发的原位测定[J]. *生态学报*, 2002(3): 359-365.
WANG C H, LIU X J, JU X T, et al. In situ determination of ammonia volatilization from wheat maize rotation system field in North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002(3): 359-365. (in Chinese)
- [10] 何刚,王朝辉,李富翠,等. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1657-1671.
HE G, WANG C H, LI F C, et al. Nitrogen, phosphorus and potassium requirement and their physiological efficiency for winter wheat affected by soil surface managements in dryland [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(09): 1657-1671. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)

- [12] CHEN J, ZHENG M, PANG D, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(8): 1708–1719.
- [13] WANG X, WU H, DAI K, et al. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 132: 106–116.
- [14] ZHANG P, WEI T, JIA Z, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. *Geoderma*, 2014, 230–231: 41–49.
- [15] ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(2): 310–315.
- [16] AFSHAR R, LIN R, MOHAMMED Y A, et al. Agronomic effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and nitrogen utilization in a dryland farming system: Field and laboratory investigation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 4130–4139.
- [17] ZANG J S, ZANG F P, YANG J H, et al. Emissions of N_2O and NH_3 , and nitrogen leaching from direct seeded rice under different tillage practices in central China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1–2): 164–173.
- [18] 曹凑贵, 李成芳, 寇志奎, 等. 不同类型氮肥和耕作方式对稻田土壤氮挥发的影响[J]. *江西农业大学学报*, 2010, 32(5): 881–886.
- CAO C G, LI C F, KOU Z K, et al. Effects of n source and tillage on NH_3 volatilization from paddy soils [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2010, 32(5): 881–886. (in Chinese)
- [19] AZIZAH F N, PURWANTO B H, TAWARAYA K, et al. Characterization of yield and cumulative nitrous oxide emission of maize varieties in responses to different nitrogen application rates[J]. *Helicon*, 2023, 9(6): e17290.
- [20] PAREJA-SÁNCHEZ E, CANTERO-MARTÍNEZ C, ÁLVARO-FUENTES J, et al. Impact of tillage and N fertilization rate on soil N_2O emissions in irrigated maize in a Mediterranean agroecosystem [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 287: 106687.
- [21] LIU T Q, FAN D J, ZHANG X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 80–90.
- [22] SUN L, WU Z, MA Y, et al. Ammonia volatilization and atmospheric N deposition following straw and urea application from a rice–wheat rotation in southeastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 181: 97–105.
- [23] YU Q, YE J, YANG S, et al. Effects of nitrogen application level on rice nutrient uptake and ammonia volatilization[J]. *Rice Science*, 2013, 20(2): 139–147.
- [24] YANG Y, ZHOU C, LI N, et al. Effects of conservation tillage practices on ammonia emissions from Loess Plateau rain-fed winter wheat fields[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 104: 59–68.
- [25] WEERDEN T J, KELLIHER F M, DE KLEIN C A M. Influence of pore size distribution and soil water content on nitrous oxide emissions[J]. *Soil Research*, 2012, 50(2): 125–135.

(责任编辑: 栾天宇)