

生草栽培对桃园土壤氨挥发的影响

姜天佑^{1,2} 梁硕硕² 李程庆^{1,2} 胡留申³ 熊 帅³
吉喜燕¹ 侯梅芳¹ 曹林奎² 沙之敏^{2*}

(1. 上海应用技术大学, 上海 201418; 2. 上海交通大学, 上海 200030; 3. 上海市浦东新区农业技术推广中心, 上海 201201)

摘要 在种植业生产中, 采用常规方式种植果树引起的土壤氨挥发呈逐年增加的趋势。该研究采用密闭室便携式真空泵间歇抽气法研究生草栽培对桃园土壤氨挥发的影响, 以上海市浦东新区南汇桃园在不同生草覆盖下土壤氨挥发排放量为研究对象, 设置白三叶(*Trifolium repens*)生草覆盖栽培模式(TM)和常规施肥(NM)处理, 不施肥处理为空白对照(CK)。结果表明: NM处理下桃园周年土壤氨挥发排放量和氮(N)损失率分别为13.08 kg·hm⁻²和1.15%, 比TM的周年土壤氨挥发排放量和N损失率分别高2.91%和4.55%, CK的周年土壤氨挥发排放量为4.40 kg·hm⁻², 试验组TM和NM的周年土壤氨挥发排放量和N损失率无显著差异。主成分分析表明, 桃园土壤氨挥发与土壤铵态氮(NH₄⁺-N)含量和大气湿度(RH)呈正相关, 且与NH₄⁺-N呈高度正相关($P < 0.01$)。与中国果园平均氨排放量和长江中下游典型果园的土壤氨挥发损失相比, TM处理分别降低12.95%和76.89%。该研究表明, 白三叶生草覆盖种植模式可以降低果园土壤氨排放, 同时也具有增加果实质量的潜力。

关键词 桃园; 生草覆盖; 氨挥发; 氮肥; 铵态氮

中图分类号: A158.3 文献标志码: A doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2025.05.012

Effect of Grass Cultivation on Ammonia Volatility in Peach Orchard Soil

JIANG Tianyou^{1,2} LIANG Shuoshuo² LI Chengqing^{1,2} HU Liushen³
XIONG Shuai³ JI Xiyan¹ HOU Meifang¹ CAO Linkui² SHA Zhimin^{2*}

(1. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030; 3. Shanghai Pudong New Area Agricultural Technology Promotion Center, Shanghai 201201)

Abstract In conventional orchard planting practices, soil ammonia volatilization caused by traditional methods has shown a gradually increasing trend over the years. This study employed a portable closed chamber intermittent pumping method to investigate the effects of grass cultivation on soil ammonia volatilization in peach orchards in Shanghai. Focusing on ammonia emission levels under different vegetation cover conditions in Nanhui Peach Orchard of Pudong New District, three treatments were established: white clover cover cultivation (TM), conventional fertilization (NM), and a non-fertilized control (CK). The research revealed that the annual ammonia volatilization and nitrogen loss rate under NM treatment reached 13.08 kg·hm⁻² and 1.15%, respectively, showing 2.91% and 4.55% higher values compared to TM treatment. The control group (CK) exhibited an annual ammonia emission of 4.40 kg·hm⁻². No significant difference in ammonia volatilization and nitrogen loss rates was observed between TM and NM treatments. Principal component analysis demonstrated that soil ammonia volatilization in peach orchards was positively correlated with soil ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) content and air humidity (RH), with a particularly strong correlation to NH₄⁺-N reaching statistical significance ($P < 0.01$). Compared with average ammonia emissions from Chinese orchards and typical orchard ammonia volatilization losses in the middle-lower Yangtze River basin, TM treatment reduced the soil ammonia emissions by 12.95% and 76.89% respectively. This experiment confirmed that white clover cover cultivation served as an effective approach to mitigate soil ammonia volatilization in peach orchards. At the same time, the

基金项目: 上海市农业科技创新项目(沪农科1024001)。

第一作者简介: 姜天佑(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事果园生态效应研究。

* 通信作者: E-mail: zhiminsha@sytu.edu.cn

收稿日期: 2025年4月14日。

cultivation has the potential of increasing fruit quality.

Key words peach orchard; grass cover; ammonia volatilization; nitrogen fertilizer; ammonium nitrogen

氨挥发是肥料施入土壤后氮素气态损失的重要途径之一^[1],我国是农业大国,每年因农田施肥导致的氨排放占整个农业源氨排放量60%以上^[2]。据统计^[3-4],我国种植业因氨挥发造成的氮素损失可达施氮量的9%~42%。长期大量的氮肥投入加剧了农田氨排放^[5]。研究^[6]发现,从1980年至2018年,全球农田氨排放量增加128%。王琛等^[7]研究表明,中国2017年农田氨排放量达3 600 000 t,南方排放强度高于北方。氨气作为大气中主要的碱性气体,不仅参与氮循环,还是大气细颗粒物PM_{2.5}污染的重要推手。薛文博等^[8]基于WRF-CMAQ空气质量模型定量模拟氨排放对全国城市PM_{2.5}浓度的影响,发现氨排放对全国城市PM_{2.5}年均浓度贡献率达29.8%。而且,排放的氨气也会成为部分温室气体的潜在来源。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出,大气中约有1%的氨气会间接生成N₂O,N₂O比CO₂具有更高的增温潜势,百年增温潜势约为CO₂的298倍^[9]。因此,氨挥发已成为农田生态系统氮素损失和影响我国空气质量的重要原因之一。

果园氨排在农业生态系统中占据重要地位。全球果园平均氮输入为303 kg·hm⁻²·a⁻¹^[10],中国果园平均施氮量为592 kg·hm⁻²^[11],位于长三角地区的江苏省桃园施氮量在400~800 kg·hm⁻²·a⁻¹^[12]。中国果园氨排放平均值((14.6±15.9) kg·hm⁻²)显著高于世界其他地区的平均值((6.2±9.6) kg·hm⁻²)^[13]。在果园生态系统中,土壤中铵根离子(NH₄⁺)在利于转化为氨的因子作用下,与土壤水结合形成氨溶液,在适宜条件下转化成氨气从土壤挥发到大气中^[14]。氮肥施用是影响果园氨排放的重要因素,包括施肥量、氮肥种类、施肥时期和方式等,施肥后作用于氨转化的因子主要有土壤理化性质和气候指标等。已有研究表明,果园通过优化施肥方案,比如氮肥深施^[15-16]、有机肥和无机肥1:1配施^[17]均可有效降低土壤氨挥发量。

清耕是我国传统的果园土壤管理方式,会破坏土壤结构,降低土壤肥力,影响果树根系生长,导致水土流失、环境污染及生物多样性降低等生态问题^[18]。果园生草覆盖种植模式是20世纪80年代引入我国的栽培技术,对于果园的土壤环境、果实品质有显著影响。果园生草是指对果园

实施全园或行间生草覆盖,每年割草多次或常年不刈割的一种果园管理模式^[19],具有调节果园小气候环境的生态效应,被认为是可持续的果园管理模式^[20]。郭晓睿等^[21]采用Meta分析发现,果园连续多年生草覆盖,无论是自然生草,还是人工生草,都显著提升果园土壤质量、产量和果实品质。果园生草覆盖种植模式有诸多优点,然而,关于其在氨挥发方面的研究较少。目前,关于生草覆盖种植模式能否降低土壤氨挥发仍有争议。有研究^[22]表明,同等施氮水平下,橘园种植光叶苕子(*Vicia villosavar*)的土壤氨挥发全期累积量较仅施氮肥的处理提高23.37%~91.08%,显著增加土壤氨排放。还有研究^[23]表明,在白三叶(*Trifolium repens*)生草覆盖的桃园中,基肥期有机肥和化肥配合深施20 cm,同时添加硝化抑制剂DMPP可以有效降低氨挥发峰值。

基于以上背景开展研究,有2个目的:(1)通过开展田间试验,研究上海地区典型桃园常规栽培模式及白三叶生草栽培模式下,不同时期施肥后土壤氨挥发速率变化规律和氨挥发累积排放量的差异,比较不同模式下土壤氨挥发排放特征;(2)基于田间气象和土壤理化监测数据,研究桃园不同生草覆盖模式土壤氨挥发在相关因素影响下的变化趋势和差异,为探明桃园土壤氨挥发特征和优化生草栽培模式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2022年11月至2023年10月在上海市浦东新区南汇新城镇中日果蔬研究所桃研发基地(国家级水蜜桃标准化示范基地)进行。该基地(30°55'N,121°54'E)位于长江三角洲平原,属亚热带湿润季风气候区。试验期间日降雨量和日平均气温如图1所示。试验地土壤类型为沙壤土,土质疏松。0~20 cm表层土壤基础理化性质为有机质质量分数(27.80±1.00) g·kg⁻¹,全氮质量分数(1.10±0.40) g·kg⁻¹,铵态氮(NH₄⁺-N)质量分数(2.15±0.10) mg·kg⁻¹,硝态氮(NO₃⁻-N)质量分数(29.92±1.52) mg·kg⁻¹,全磷质量分数(0.90±0.10) g·kg⁻¹,全钾质量分数(10.70±1.10) g·kg⁻¹,pH为8.02±0.03。

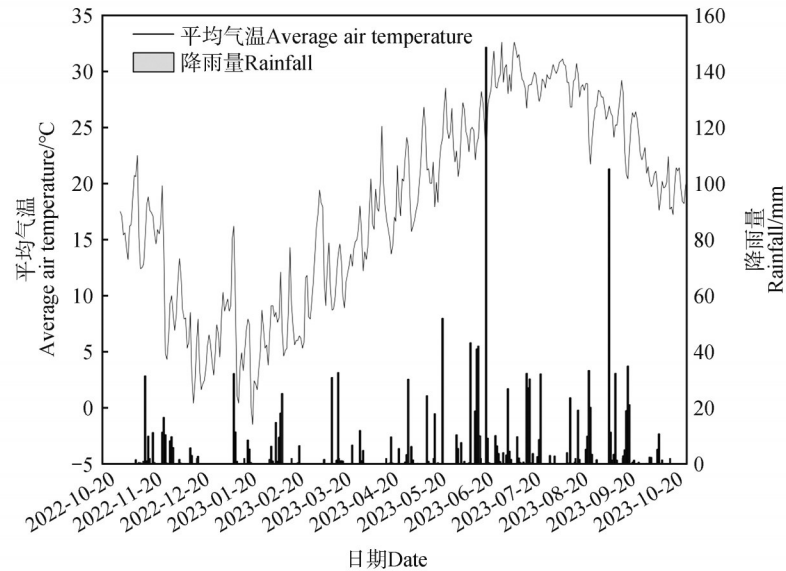


图1 2022年11月—2023年10月桃园降雨量和平均气温

Fig.1 Changes in rainfall and average air temperature in peach orchards from November 2022 to October 2023

1.2 试验设计

供试的桃树品种为湖景蜜露 (*Amygdalus persica* ‘Hujingmilu’), 果树树龄为 10 a, 果树种植行株距为 4.0 m×2.5 m。在保证桃树长势均一, 灌溉、植保和人工管理等条件一致的情况下, 本试验共设置 3 个处理: 不施肥 (CK); 常规施肥 (NM); 果园行间人工种植白三叶, 常规施肥 (TM)。每个处理随机选择 3 行树, 并在 3 行中随机选择 1 株作为监测对象, 每棵桃树为 1 个重复。

详细施肥方案如表 1 所示, TM 和 NM 处理的

施肥量和施肥方式一致, 于 11 月下旬、次年 4 月中旬和 6 月下旬分别施入基肥、花期肥和膨果期肥, 基肥深施 20 cm, 花期肥和膨果期肥浅施覆土 2 cm。周年有机肥和无机肥的氮施入比例为 1:1, 有机肥在基肥期全部施加, 无机复合肥按照 3 个时期分别施加, 钾肥仅在膨果期施加, 3 个时期的总氮施入质量比为 4:1:1, 本试验使用的复合肥含 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量为 8%。TM 处理中, 白三叶的播种密度为 $9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 在距离树干 50 cm 以外栽培生草, 50 cm 以内清耕^[24]。

表 1 桃园不同处理肥料纯氮施用量

Table 1 Amount of pure nitrogen applied into peach orchard in different fertilization treatments $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer		花期肥 Flowering fertilizer	膨果期肥 Expansion fertilizer	氮素总量 Total nitrogen
	生物有机肥 Bioorganic fertilizer	复合肥 Compound fertilizer	复合肥 Compound fertilizer	复合肥 Compound fertilizer	
白三叶生草覆盖 TM	310.5	110.5	100	100	621
常规施肥 NM	310.5	110.5	100	100	621
不施肥 CK	0	0	0	0	0

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤氨挥发通量

采用密闭室便携式真空泵间歇抽气法采集桃园土壤氨挥发通量, 采样装置如图 2 所示。在距离

树干 15 cm (非施肥区)、45 cm (施肥区)、100 cm (生草区) 处分别设置氨挥发取样点, 以这 3 处测得的氨挥发通量平均值代表该树体附近区域内的氨排放水平, 采样点布设如图 3 所示。采样时间为

每日的 07:00—09:00 和 15:00—17:00, 每次施肥后的第 1、2、3、5、7 和 9 天采集, 此后每隔 7 d 监测 1 次, 直至测定值与空白对照一致, 之后 1 个月测定 1 次。使用 $0.005 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 稀硫酸 100 mL 作为氨挥发吸收液倒入洗气瓶中, 采样结束后取洗气瓶

样液 50 mL 转入 50 mL 离心管带回实验室, 采集的样液使用靛酚蓝分光光度法在 697.5 nm 波长下测定吸光度, 使用标准曲线计算样液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度, 通过氨挥发通量公式(公式 1)计算土壤氨挥发通量。

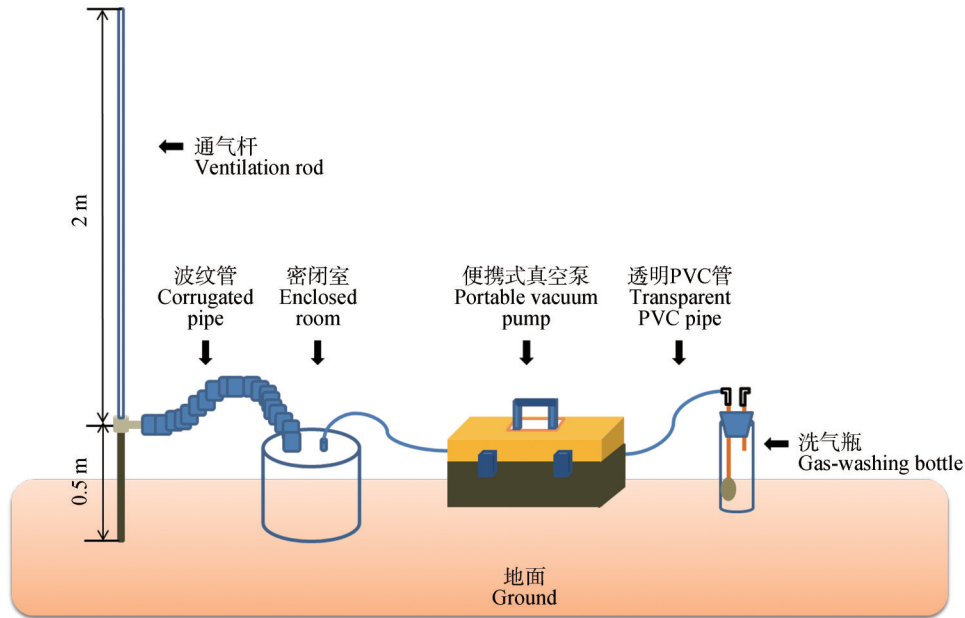


图 2 密闭室便携式真空泵间歇抽气法氨采样装置

Fig. 2 Schematic diagram of a portable intermittent pumping ammonia sampling device in a closed chamber

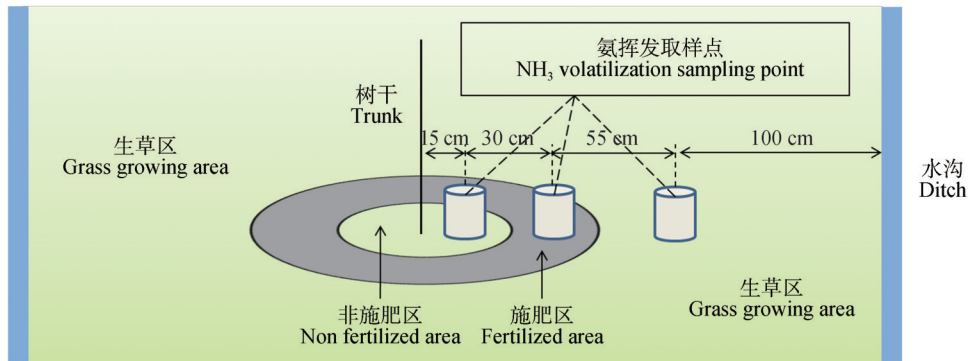


图 3 桃园施肥处理氨挥发取样点分布

Fig. 3 Distribution diagram of sampling points for ammonia volatilization of fertilization treatment in the peach orchard

1.3.2 土壤指标

每次采集氨气的同时, 在氨挥发采样点附近使用土钻取出具有代表性的 0~20 cm 表层土壤样品。取回的新鲜土样除去非土壤组成部分, 均匀混合后过 2 mm 筛, 一部分土样使用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氯化钾溶液浸提, 使用全自动间断化学分析仪 (Smartchem200) 测定土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量。另一部分土样自然晾干后, 使用雷磁 pH 计 (PHS-

3E) 测定 pH (水土比 2.5:1)。

1.3.3 气象数据

桃园的空气温度、空气湿度、降雨量等环境气象数据由拓普瑞气象参数仪 (TOPRIE TP-WS) 自动监测记录。

1.3.4 果实产量与品质

采用美乐分析电子天平 (MeilenMHL520) 称量果实质量, 使用便携式非破坏糖度仪 (Mecha-

tronics-K-BA800)测量果实糖度。

1.4 数据处理

密闭室便携式真空泵间歇抽气法的氨挥发通量计算公式为

$$F = c \times 10^{-6} \times 100 \times \frac{10^4}{\pi \times r^2} \times 6 \quad (1)$$

式中: F 为氨挥发通量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); c 为吸收液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); 10^{-6} 为质量转化系数;100为稀硫酸吸收液体积(mL); 10^4 为面积转化系数; r 为气室半径(m);6为单日24 h与日氨挥发采集时间4 h的比值。

氨挥发累积量计算公式为

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

式中: M 为氨挥发累积排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); i 为采样次数; t 为采样时间,即每次施肥后时间(d)。

氨挥发氮损失率计算公式为

$$R_{\text{NL}} = (T_{\text{AV}} - C_{\text{AV}}) / F_{\text{N}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_{NL} 为氨挥发氮损失率(%); T_{AV} 为试验组氨挥发氮累积量(kg); C_{AV} 为空白对照组氨挥发氮累

积量(kg); F_{N} 为施氮量(kg)。

采用Excel 2010和IBM SPSS Statistic 26软件进行数据分析,采用Origin 9.0作图。采用LSD方法分析数据间差异显著性($P < 0.05$; $P < 0.01$)。利用Python 3.9中Sklearn包进行主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 生草栽培对桃园氨挥发通量的影响

2.1.1 氨挥发通量变化规律

不同处理对桃园土壤氨挥发通量的影响如图4所示。在3个施肥时期,土壤氨挥发通量均表现为施入肥料后第3~5天达到峰值,随后下降,第5~9天再次上升,随后再次下降,在施肥后第16~23天,试验组TM和NM的氨挥发通量与对照组CK基本一致。3个施肥期相比,基肥期TM和NM的氨挥发通量峰值高于花期和膨果施肥期,这可能是基肥期施入的氮肥较多,导致较高的氨挥发排放量。花期和膨果施肥期间,TM和NM的氨挥发通量高于CK,但两者间差异不明显。

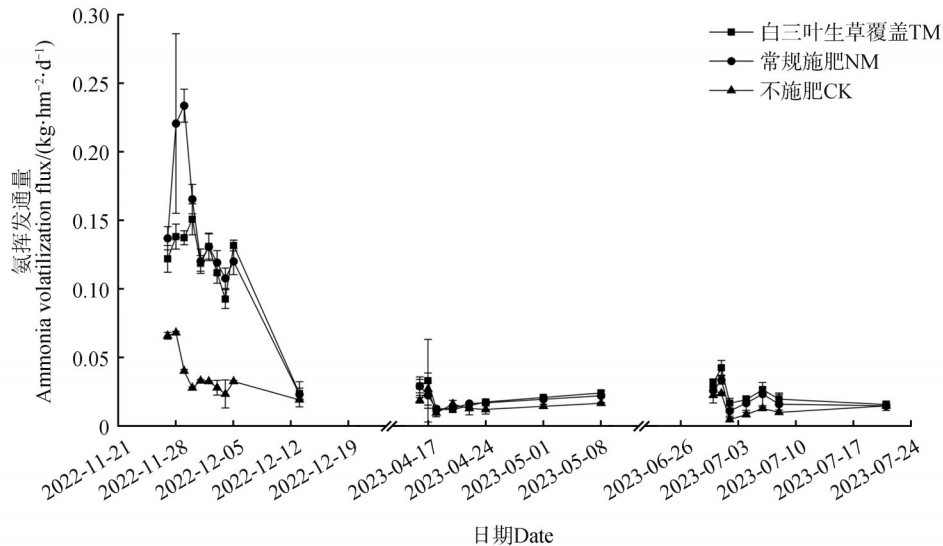


图4 桃园各施肥时期氨挥发通量

Fig.4 Ammonia volatilization flux in peach orchards during different fertilization periods

2.1.2 氨挥发累积量变化规律

由图5可知,CK、TM和NM 3种处理的氨挥发累积量变化曲线呈现相似规律:在施肥后1~3 d氨挥发累积量快速增加,3 d后氨挥发量降低,导致氨挥发累积量曲线的增长斜率呈现增加后降低的趋势。通过对比3个不同施肥期的氨挥发累积量曲线发现,基肥期TM和NM处理的氨挥发累积量

曲线斜率最大,氨挥发排放速率较花期和膨果施肥期高。在相同施肥量条件下,基肥期和花期施肥期NM的氨挥发累积量高于TM,膨果施肥期TM、NM累积量曲线基本重合。从整个施肥期氨挥发累积量曲线来看,TM和NM处理的氨挥发累积量明显高于CK处理。

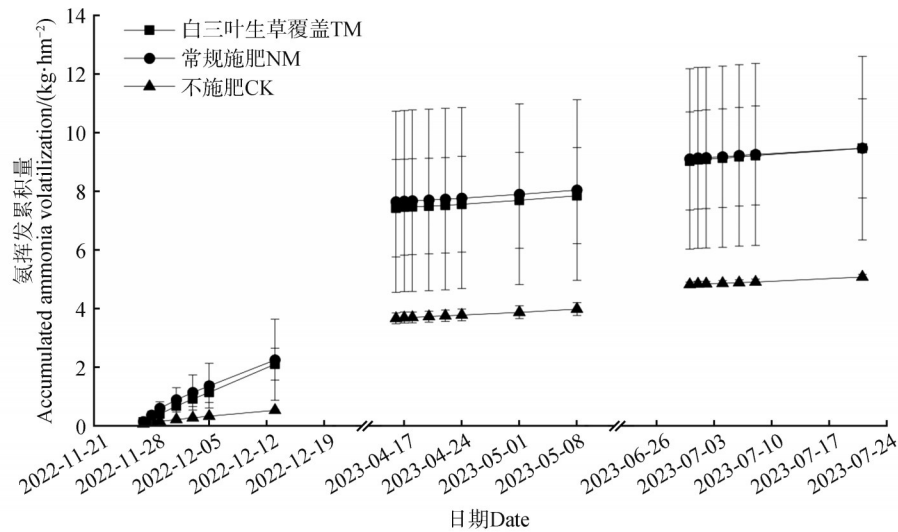


图5 桃园各施肥时期氨挥发累积量

Fig.5 Accumulation of ammonia volatilization in peach orchards during different fertilization periods

2.2 生草栽培对桃园氨挥发累积量和氮损失率的影响

由表2可知,在3个施肥期及周年,试验组TM和NM的氨挥发累积量均显著高于CK($P<0.05$)。在基肥期,NM的氨挥发累积量和氮损失率分别比TM高8.94%和12.50%,两者无显著差异。花期和膨果施肥期间的氨挥发累积量和氮损失率较低,这

2个时期TM均高于NM,但无显著差异。在花期施肥期间,TM的氨挥发累积量和氮损失率分别比NM高6.67%和25.00%;在膨果施肥期,TM的氨挥发累积量和氮损失率分别比NM高18.42%和55.56%。从桃树周年生育期来看,NM的氨挥发累积量和氮损失率分别比TM高2.91%和4.55%;间歇期的氨挥发累积量明显多于3次施肥期的累积量。

表2 不同栽培模式下各时期桃园土壤氨挥发累积量、氮损失率

Table 2 Accumulation of soil ammonia volatilization and nitrogen loss rate of peach orchard under different planting modes in different stages

施肥方案 Fertilization plan	处理 Treatment	氨挥发累积量 Accumulated ammonia volatilization/(kg·hm ⁻²)	氮损失率 Nitrogen loss/%
基肥 Basal fertilization	白三叶生草覆盖 TM	1.79±0.40 ^a	0.24±0.08 ^a
	常规施肥 NM	1.95±1.13 ^a	0.27±0.22 ^a
	不施肥 CK	0.58±0.02 ^b	
花期肥 Flowering fertilization	白三叶生草覆盖 TM	0.48±0.03 ^a	0.10±0.02 ^a
	常规施肥 NM	0.45±0.02 ^a	0.08±0.02 ^a
	不施肥 CK	0.35±0.05 ^b	
膨果肥 Expansion fertilization	白三叶生草覆盖 TM	0.45±0.04 ^a	0.14±0.03 ^a
	常规施肥 NM	0.38±0.07 ^a	0.09±0.05 ^a
	不施肥 CK	0.27±0.01 ^b	
间歇期 Intermittent period	白三叶生草覆盖 TM	10.02±1.61 ^a	
	常规施肥 NM	10.32±2.89 ^a	
	不施肥 CK	3.21±0.55 ^b	
周年 Anniversary	白三叶生草覆盖 TM	12.71±1.79 ^a	1.10±0.24 ^a
	常规施肥 NM	13.08±4.03 ^a	1.15±0.53 ^a
	不施肥 CK	4.40±0.60 ^b	

注:不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences between treatments at the $P<0.05$ level.

2.3 生草栽培对桃园土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、pH 的影响

2.3.1 生草栽培对土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量的影响

施肥后桃园土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化规律与氨挥发通量变化呈现相似的变化趋势。施入肥料后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均呈现上升趋势,且出现双峰现象(图6)。在施肥后第1~3天达到第1个峰值,在第5~9天内

达到第2个峰值,在施肥第9天后呈现下降趋势,施肥后15~20 d, TM、NM 和 CK 基本一致。在基肥期,由于肥料的大量投入,土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量整体上高于花期和膨果施肥期。在3个施肥期间, TM 处理组土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量整体上呈现低于 NM 和 CK 的现象,可能是施入的肥料,加上施肥时表层土壤的扰动,促进了土壤硝化反应的发生。

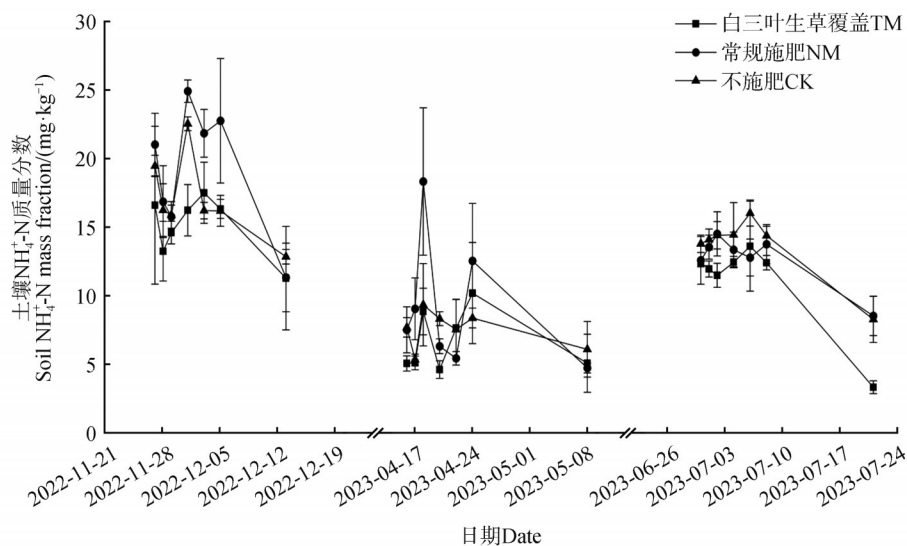


图6 各施肥时期桃园土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量分数

Fig.6 Soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$ mass fraction in peach orchard during different fertilization periods

2.3.2 生草栽培对土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的影响

施入基肥后, TM 和 NM 处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均出现了双峰现象(图7),在施肥后第1~3天达到第1个峰值,在第5~9天达到第2个峰值,在施

肥第9天后呈现下降趋势。TM 和 NM 处理的土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量波动幅度较大,波动范围分别为 $74.75\sim 138.87 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $53.33\sim 184.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这可能是基肥期施入的有机肥激活土壤微生物活性,促进

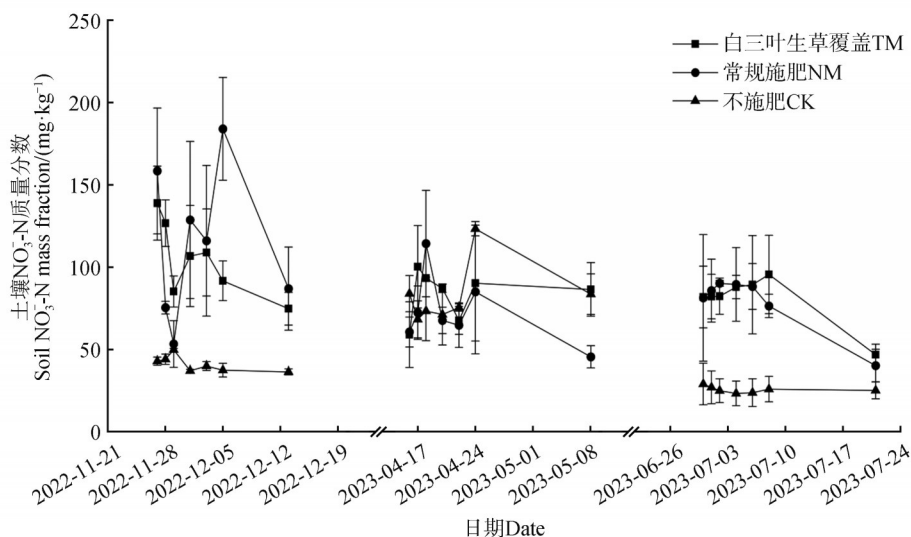


图7 各施肥时期桃园土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量分数

Fig.7 Soil $\text{NO}_3^-\text{-N}$ mass fraction in peach orchard during different fertilization periods

土壤硝化和反硝化反应,同时施入的复合肥含有 $\text{NO}_3\text{-N}$,从而使土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量产生较大变化。在花期施肥期间, TM、NM 和 CK 3 组处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量相近,且均呈现先升高后降低的趋势,这可能是春季气温上升,植物和土壤微生物活跃,加速土壤有机氮矿化,影响土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量,导致 CK 处理在未施肥的情况下土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量升高。在膨果施肥期间, TM 和 NM 处理的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量变化情况相似,且 TM 和 NM 的土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均显著高于 CK。

2.3.3 生草栽培对土壤 pH 的影响

各个时期 CK 的 pH 均高于 TM 和 NM 处理(图 8),这可能是施肥增加了土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量,土壤中 H^+ 水平增加。TM 和 NM 处理组在基肥和花期施肥期间土壤 pH 在施肥后呈现先下降后上升的趋势,而在膨果施肥期,3 组处理 TM、NM 和 CK 的 pH 均呈现先上升后下降的趋势,可能是施入的钾肥增加了土壤可溶性氧化钾(K_2O)含量,氧化钾水解产生了大量 OH^- 导致土壤 pH 升高。

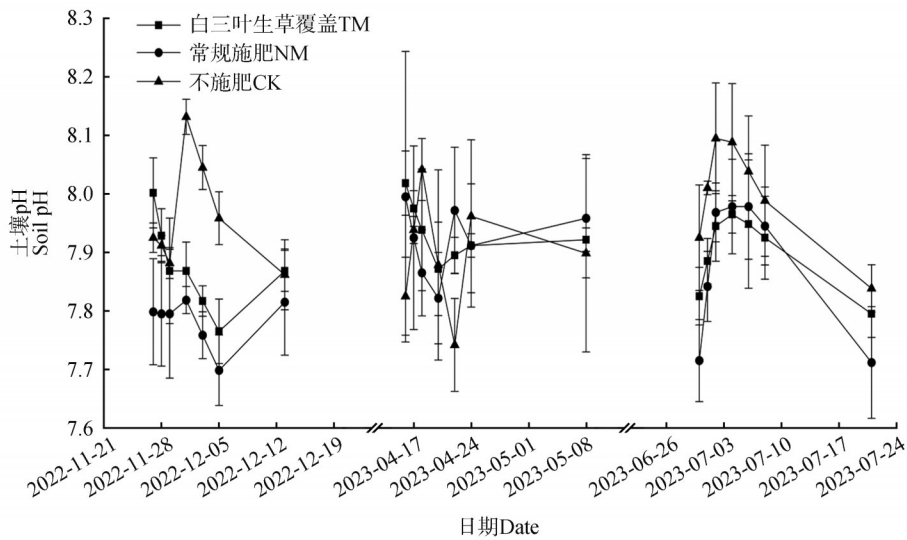


图 8 各施肥时期桃园土壤 pH

Fig.8 Soil pH in peach orchard during different fertilization periods

2.4 生草栽培模式下桃园土壤氨挥发影响因素分析

为解析土壤理化性质与环境因子对氨挥发的潜在驱动机制,将土壤无机氮($\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$)、pH、土壤温度、大气温度及湿度纳入主成分分析,结果如图 9 所示。主成分 1(PC1)与主成分 2(PC2)累积方差贡献率达 71.9% (PC1=43.1%, PC2=28.8%),说明 2 个成分能够反映数据整体结构。PC1 由土壤 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和大气与土壤温度主导,PC2 由大气湿度和降雨量主导。主成分分析表明,氨挥发通量与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量呈高度正相关,与 pH 呈高度负相关,与大气湿度和降雨量呈正相关,与土壤温度、大气温度呈负相关。

2.5 生草栽培模式下桃园果实品质与产量

TM 和 NM 处理的每株果实数量、单果质量、糖度及产量均显著高于 CK 处理($P < 0.05$),其中, NM 处理的每株果实数量最高,为 86 个,比 TM 和 CK 分别高 10.3%、473.3%, TM 处理的单果质量最高,

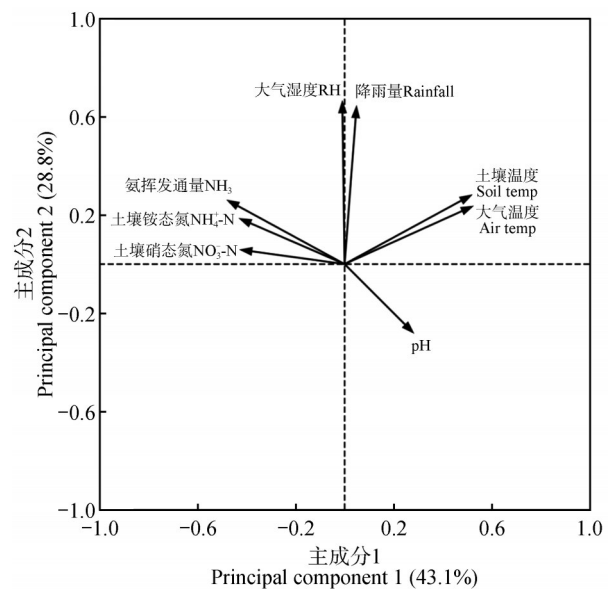


图 9 不同处理下桃园土壤氨挥发影响因素主成分分析
Fig.9 Principal component analysis of the factors impacting on soil ammonia volatilization in peach orchards under treatments

为 234.69 g, 分别比 NM 和 CK 高 6.3% 和 22.1%, NM 处理产量最高, 为 9.41 t·hm⁻², 分别比 TM 和 CK 高 3.4% 和 544.5% (表 3), 说明每株果实数量影响最终产量。TM 和 NM 处理下糖度显著高于 CK, 分

别比 CK 高 11.0%、9.1%, TM 和 NM 两者间差异不显著, 表明 TM 和 NM 处理可以提高果实糖度, 提升果实品质。

表 3 不同栽培模式下桃园果实品质与产量

Table 3 Fruit quality and yield in peach orchard under different cultivation modes

处理 Treatment	每株果实数量 Number of fruits per plant	单果质量 Mass of single fruit/g	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	糖度 Sugar content/%
白三叶生草覆盖 TM	78±10 ^a	234.69±14.23 ^a	9.10±1.56 ^a	13.56±0.28 ^a
常规施肥 NM	86±7 ^a	220.77±9.54 ^a	9.41±1.06 ^a	13.27±0.22 ^a
不施肥 CK	15±7 ^b	192.27±12.20 ^b	1.46±0.80 ^b	12.16±0.39 ^b

注:不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters indicated significant differences between treatments at the $P<0.05$ level.

3 讨论

3.1 生草栽培模式对桃园土壤氮挥发通量的影响

本研究中,基肥期桃园氮挥发通量高于花期和膨果施肥期。出现此结果主要是因为基肥期施肥量要高于后 2 个时期,而氮挥发通量与施氮量呈正相关^[25]。花期和膨果施肥期 TM 和 NM 的氮挥发通量与 CK 相近,一方面,在花期施肥期和膨果施肥期降雨量较少,氮挥发采样期间降雨量基本在 10 mm 以下,施入田间的复合肥水解缓慢;另一方面,这 2 个时期处于春季、夏季,果树生长旺盛,施入氮肥主要被植物吸收^[26],因此,施入的氮素只有少量通过气态氮损失到空气中。间歇期的氮挥发累积量显著高于 3 个施肥期,一方面,因为间歇期占据了桃树生长周期大部分时间,接近 10 个月;另一方面,施肥期间降雨量少,且施肥后未对果树浇水,复合肥水解缓慢,施肥期结束采样后复合肥并未完全溶解,未完全溶解的复合肥水解后产生的氨气被归类到了间歇期。

桃园土壤氮挥发主要来自氮肥水解,以及土壤 NH₄⁺-N 与水结合生成氨气。以往研究^[27]表明,苹果园白三叶生草覆盖可以提高酸杆菌门(Acidobacteriota)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、变形菌门(Proteobacteria)的相对丰度,促进土壤物质循环;井赵斌等^[28]研究发现,猕猴桃(*Actinidia chinensis*)园行间种植白三叶可以提高土壤过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性,促进物质分解循环;张玲玲等^[29]

研究发现,猕猴桃行间覆盖白三叶生草可以提高 AOA-*amoA* 基因丰度,促进土壤硝化反应。因此,在本研究中,白三叶生草覆盖处理(TM)土壤 NH₄⁺-N 含量与 NM、CK 相比均处于较低水平, TM 处理在基肥期和周年的氮挥发累积量(表 2)均为最大值。白三叶作为豆科(Fabaceae)牧草,具有固氮作用,为土壤提供更多的氮素。与 NM 处理相比,在相同施氮量下, TM 处理提供额外的氮素,提高了花期和膨果施肥期的氮挥发累积量, TM 和 NM 的氮挥发累积曲线在膨果施肥期基本重合。

本研究中,白三叶可以有效降低桃园氮挥发通量。TM 处理的年累积氮挥发通量为 12.71 kg·hm⁻², 比中国果园的平均氮排放通量(14.6 kg·hm⁻²)低 12.95%;白三叶生草覆盖处理的氮挥发损失率为 1.10%,要显著低于长江中下游典型果树的氮挥发损失率(平均为 4.76%)^[30]。本研究中,常规施肥处理的年累积氮挥发通量和氮挥发损失率分别为 13.08 kg·hm⁻²、1.15%,与常规施肥相比,白三叶生草覆盖栽培模式可以减少氮排放。

3.2 桃园土壤氮挥发影响因素

本研究中,氮挥发通量同时与土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 均呈高度正相关。以往研究^[31]来看,果园土壤氮挥发通量与土壤 NH₄⁺-N 含量呈极显著正相关,与 NO₃⁻-N 含量呈极显著负相关。造成这种情况的可能原因,一方面是施入的复合肥经过水解向土壤中释放 NO₃⁻-N,使土壤的 NO₃⁻-N 含量变化规律与氮排放规律相近;另一方面是 TM 和 NM 处理的土壤中可能有更强的硝化反应,施入肥料后促

进了土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化,转化生成的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 一部分被植物吸收,另一部分通过硝酸盐异构化还原为铵的氨化过程,促进了氨排放,因此,氨挥发通量与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 呈高度正相关。

本研究中,氨挥发通量与土壤 pH 呈高度负相关,原因是施入肥料后硝酸铵水解产生了大量的 H^+ ,同时,施肥可能促进土壤硝化反应,土壤中的硝化过程也会产生 H^+ ,而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在土壤中增加累积也会导致土壤酸化^[32-33],降低土壤 pH,在施肥期土壤 pH 呈现与氨挥发通量变化相反的趋势,因此会呈高度负相关。相较于 CK 处理, TM 和 NM 处理均降低土壤 pH,而土壤 pH 的降低不利于土壤氨排放。本研究中,土壤氨挥发通量均与土壤温度和大气温度负相关。以往研究^[34]表明,土壤氨挥发与温度呈极显著正相关,本研究中,处于冬季的基肥期氨排放量高于春季的花期施肥期和夏季的膨果施肥期,温度低时氨排放量高而温度高时排放量低,导致在进行主成分分析时出现了氨挥发通量与温度呈负相关的现象。因此,在这种施肥方式下,需要注意冬季的氮肥氨排放损失,制定适合的施肥方式与农田管理措施。

3.3 生草栽培模式对桃园果实产量及品质的影响

‘湖景蜜露’作为浦东新区水蜜桃主要种植品种之一,平均单果质量为 230 g ^[35],平均产量为 $9.75\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[36]。本研究中, TM 和 NM 的平均单果质量为 234.69 g 和 220.77 g ,产量为 $9.10\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $9.41\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明白三叶生草覆盖能够显著增加单果质量。有研究表明,白三叶生草覆盖能够显著提高土壤的机械稳定性和水稳性团聚体比例,增加土壤有机质含量^[37],改善土壤结构的稳定性,尤其是提升表层土壤(0~20 cm)的有机质水平^[38],与此同时,由于生草栽培模式下全氮和速效钾等关键养分含量显著增加,土壤肥力水平得到提升^[39]。此外,生草刈割后腐烂分解过程能够增加土壤孔隙度,改善土壤通气性,降低根系生长压力,进一步增强根系活力^[40]。这种优化的土壤环境为桃树生长提供了充足的养分支持,促进果实优质生长。这种优化的土壤条件为果树提供了更加适宜的水肥气热环境,有效促进叶片光合作用,从而为果实高产奠定基础,单果质量和产量均接近或超过传统栽培模式的水平,展现出提升果实品质和产量的潜力。因此,在果园中栽培白三叶有降低果园

土壤大气氨排放的趋势,且具有增加单果质量的潜力。

4 结论

本研究与长江中下游典型果园及常规施肥栽培模式相比,白三叶生草覆盖具有降低桃园氨挥发的趋势。相较于对照处理,白三叶生草栽培模式减少土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量(降低 59.11%),增加土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量(提高 86.31%), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增加可能源于豆科植物的生物固氮作用及根系分泌物促进硝化过程。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 增加一方面有利于植物养分的吸收,另一方面,硝化作用产生的 H^+ 离子导致土壤 pH 降低(由初始 8.02 降至 7.79),从而形成抑制氨挥发的酸性环境。另外,在施肥后一段时间 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量降低至与对照相当,可以降低氮淋失风险。白三叶生草覆盖栽培模式下的果实产量与常规施肥相比无差异,但是提高了果实质量和糖度,具有提高水蜜桃品质的潜力。

参 考 文 献

- [1] LIU L, ZHANG X Y, XU W, *et al.* Ammonia volatilization as the major nitrogen loss pathway in dryland agro-ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 114862.
- [2] FU H, LUO Z B, HU S Y. A temporal-spatial analysis and future trends of ammonia emissions in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 731: 138897.
- [3] ZHANG Y S, LUAN S J, CHEN L L, *et al.* Estimating the volatilization of ammonia from synthetic nitrogenous fertilizers used in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 480-493.
- [4] PAN B B, LAM S K, MOSIER A, *et al.* Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 232: 283-289.
- [5] YANG W Z, JIAO Y, JIA Y Q. The status of ammonia (NH_3) emissions and achievements of emissions reduction technology in farmland ecosystems [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(3): 296-303.
- [6] LIU L, XU W, LU X K, *et al.* Exploring global changes in agricultural ammonia emissions and their contribution to nitrogen deposition since 1980[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(14): e2121998119.
- [7] 王琛, 张秀明, 段佳堃, 等. 中国农畜牧业高分辨率氨排放清单[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(12): 1973-1980.

- WANG C, ZHANG X M, DUAN J K, *et al.* A high-resolution ammonia emission inventory for cropland and livestock production in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(12): 1973-1980.
- [8] 薛文博, 许艳玲, 唐晓龙, 等. 中国氨排放对 PM_{2.5} 污染的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(12): 3531-3539.
- XUE W B, XU Y L, TANG X L, *et al.* Impacts of ammonia emission on PM_{2.5} pollution in China[J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12): 3531-3539.
- [9] LAM S K, SUTER H, DAVIES R, *et al.* Direct and indirect greenhouse gas emissions from two intensive vegetable farms applied with a nitrification inhibitor[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 48-51.
- [10] ZHAO H Y, LAKSHMANAN P, WANG X Z, *et al.* Global reactive nitrogen loss in orchard systems: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153462.
- [11] WEI F Z, ZHENG X D, PAN H, *et al.* New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [12] 杨广, 汪玉, 王慎强, 等. 阳山水蜜桃园肥料投入及不同种植年限土壤养分累积现状[J]. *土壤学报*, 2023, 60(6): 1714-1725.
- YANG G, WANG Y, WANG S Q, *et al.* Characteristics of fertilizer inputs and soil nutrient accumulation in Yangshan juicy peach orchard with different cultivation years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(6): 1714-1725.
- [13] WANG J Y, XU P S, LIN H Y, *et al.* Gaseous reactive nitrogen losses from orchards, vegetables and tea plantations[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2023, 10(2): 155-166.
- [14] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- ZHU Z L, WEN Q X. Nitrogen in soil of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishinghouse, 1992.
- [15] 朱志军. 渭北苹果园施肥制度对氨挥发和温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- ZHU Z J. Effects of fertilization system on ammonia volatilization and greenhouse gas emission in Weibei apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.
- [16] ABASCAL S A, BUSCHIAZZO D E, MIELNIK L, *et al.* Nitrogen loss by ammonia volatilization in cultivation of olive orchards fertilized with compost[J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 52(10): 1207-1213.
- [17] 葛顶峰. 苹果园土壤氮素总硝化-反硝化作用和氨挥发损失研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- GE S F. Study on gross nitrification-denitrification and ammonia volatilization losses in apple orchard [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2011.
- [18] 王艳廷, 冀晓昊, 吴玉森, 等. 我国果园生草的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1892-1900.
- WANG Y T, JI X H, WU Y S, *et al.* Research progress of cover crop in Chinese orchard[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1892-1900.
- [19] 孟林. 果园生草技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- MENG L. Grass growing techniques in orchards[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [20] MILGROOM J, AUXILIADORA SORIANO M, GARRIDO J M, *et al.* The influence of a shift from conventional to organic olive farming on soil management and erosion risk in southern Spain [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2007, 22(1): 1-10.
- [21] 郭晓睿, 宋涛, 邓丽娟, 等. 果园生草对中国果园土壤肥力和生产力影响的整合分析[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 4021-4028.
- GUO X R, SONG T, DENG L J, *et al.* Effects of grass growing on soil fertility and productivity of orchards in China: a Meta analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 4021-4028.
- [22] 梅柯. 典型坡地橘园土壤氨挥发及主要影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- MEI K. Study on soil ammonia volatilization and main influencing factors in typical slope orange orchard[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019.
- [23] YANG G, WANG Y, WANG S Q, *et al.* Legume cover with optimal nitrogen management and nitrification inhibitor enhanced net ecosystem economic benefits of peach orchard [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162141.
- [24] 刘雅, 张晓英, 徐秋良. 桃园生草栽培优势与技术[J]. *河北果树*, 2022(2): 37-39.
- LIU Y, ZHANG X Y, XU Q L. Advantages and techniques of grass cultivation in peach orchard [J]. *Hebei Fruits*, 2022(2): 37-39.
- [25] ZHANG Z G, WANG J, HUANG W B, *et al.* Cover crops and N fertilization affect soil ammonia volatilization and N₂O emission by regulating the soil labile carbon and nitrogen fractions [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 340: 108188.
- [26] 高平生. 果树栽培特点与果树管理措施分析[J]. *农业科技与发展*, 2023, 2(5): 43-45.
- GAO P S. Analysis of fruit tree cultivation characteristics

- and fruit tree management measures [J]. *Agricultural Technology and Development*, 2023, 2(5):43-45.
- [27] 马震珠,魏倩倩,李尚玮,等.覆盖和埋置白三叶对黄土高原苹果园土壤细菌多样性的影响[J].*水土保持通报*, 2019, 39(5):143-151.
MA Z Z, WEI Q Q, LI S W, *et al.* Effects of covering or burying *Trifolium repens* on diversity of soil bacteria community in an apple orchard in loess plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5):143-151.
- [28] 井赵斌,李腾飞,龙明秀,等.生草对猕猴桃果园土壤酶活性和土壤微生物的影响[J].*草业科学*, 2020, 37(9):1710-1718.
JING Z B, LI T F, LONG M X, *et al.* Effects of planted grasses on soil enzyme activities and microbial communities in a kiwifruit orchard [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(9):1710-1718.
- [29] 张玲玲,李青梅,贾梦圆,等.覆盖作物对猕猴桃园土壤氨氧化微生物丰度和群落结构的影响[J].*植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3):417-428.
ZHANG L L, LI Q M, JIA M Y, *et al.* Effects of cover crops on gene abundance and community structure of soil ammonia-oxidizing microorganism in a kiwifruit orchard [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3):417-428.
- [30] 夏永秋,王慎强,孙朋飞,等.长江中下游典型种植业氨排放特征与减排关键技术[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(12):1981-1989.
XIA Y Q, WANG S Q, SUN P F, *et al.* Ammonia emission patterns of typical planting systems in the middle and lower reaches of the Yangtze River and key technologies for ammonia emission reduction [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(12):1981-1989.
- [31] 邢寒冰,董文旭,庞桂斌,等.不同水氮管理对梨园土壤氨挥发的影响[J].*中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(12):2013-2023.
XING H B, DONG W X, PANG G B, *et al.* Effects of different water and nitrogen management on ammonia volatilization in pear orchard soil [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(12):2013-2023.
- [32] MALHI S S, NYBORG M, HARAPIAK J T. Effects of long-term N fertilizer-induced acidification and liming on micronutrients in soil and in brome grass hay [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48(1/2):91-101.
- [33] ADAMS S N. Some effects of lime, nitrogen and soluble and insoluble phosphate on the yield and mineral composition of established grassland [J]. *The Journal of Agricultural Science*, 1984, 102(1):219-226.
- [34] 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.
- [35] 胡留申,张耀良,王建明,等.上海南汇水蜜桃历史与产业展望[J].*落叶果树*, 2023, 55(4):10-13.
HU L S, ZHANG Y L, WANG J M, *et al.* Historical origin and industrial prospect of Shanghai Nanhui honey peach [J]. *Deciduous Fruits*, 2023, 55(4):10-13.
- [36] 胡晓颖,赵杰,唐赵莲.“湖景蜜露”及其早熟、晚熟芽变种的生物学特性观测及产量对比[J].*上海农业科技*, 2020(2):58-59.
HU X Y, ZHAO J, TANG Z L. Observation of biological characteristics and yield comparison of ‘Hujingmilu’ and its early maturing and late maturing bud varieties [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2020(2):58-59.
- [37] 付学琴,杨星鹏,陈登云,等.南丰蜜橘果园生草栽培对土壤团聚体和有机碳特征及果实品质的影响[J].*园艺学报*, 2020, 47(10):1905-1916.
FU X Q, YANG X P, CHEN D Y, *et al.* Effects of sod culture on soil aggregates, organic carbon characteristic and fruit quality of Nanfeng tangerine orchard [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, 47(10):1905-1916.
- [38] 张帆,马宗桓,李文芳,等.生草类型对旱作区苹果园土壤营养及果实品质的影响[J].*甘肃农业大学学报*, 2024(1):135-143.
ZHANG F, MA Z H, LI W F, *et al.* Effects of grass types on soil nutrition and fruit quality of apple orchards in dryland area [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024(1):135-143.
- [39] 刘蝴蝶,郝淑英,曹琴,等.生草覆盖对果园土壤养分、果实产量及品质的影响[J].*土壤通报*, 2003, 34(3):184-186.
LIU H D, HAO S Y, CAO Q, *et al.* Effect of grass cover on soil nutrient and yield and quality of apple [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(3):184-186.
- [40] 王波波,王小龙,史祥宾,等.不同行内生草对葡萄果实品质的影响[J].*中国果树*, 2021(8):58-61.
WANG B B, WANG X L, SHI X B, *et al.* Effect of cover crops in intra-rows of vineyard on grape fruit quality [J]. *China Fruits*, 2021(8):58-61.