文章编号:1000-7601(2020)01-0059-07

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.08

渭北旱塬苹果园不同施肥处理 N, O 排放特征

朱志军,杨莉莉,冯 涛,同延安

(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘 要:通过研究苹果园生态条件下减施化学氮肥与有机无机配施 N₂O 排放规律,为准确估算渭北旱塬区域 N₂O 排放提供数据支撑。采用静态箱-气相色谱法对渭北旱塬苹果园不同施肥制度下(2017 年 10 月—2018 年 10 月)N₂O 排放通量进行田间监测。结果表明:苹果膨大期是渭北旱塬苹果园 N₂O 排放的主要时期;各施肥处理 N₂O 年累积排放总量在 1.14~4.46 kg·hm⁻²之间,与常规施肥处理相比,优化减氮和有机无机配施处理N₂O排放总量分 别降低了 43.3%、42.6%;常规高氮、优化减氮与有机无机配施处理年排放系数分别为 0.27%、0.22%、0.22%;温度是 限制苹果成熟期和膨大期土壤 N₂O 排放的决定因子;施肥后,随着时间的推移,底物浓度不足将逐渐成为限制 N₂O 排放的重要因子。因此,有机无机配施作为苹果园推荐施肥模式的同时能够显著降低 N₂O 排放,并且降雨前施肥可 以降低 N₂O 排放峰值。

关键词:N₂O 排放;减氮施肥;有机无机配施;苹果园 中图分类号:S143.1;S661.1 文献标志码:A

Characteristics of N₂O emissions from different fertilization treatments in Weibei dryland apple orchard

ZHU Zhijun, YANG Lili, FENG Tao, TONG Yan'an

(College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Studying N_2O emission characteristics of reducing chemical nitrogen (N) fertilizer and organic substitution in apple orchards under ecological conditions can provide data support for estimating regional N_2O emissions in Weibei dry land. In this experiment, static box-gas chromatography was used to monitor N_2O emission flux under different fertilization systems in apple orchards in Weibei dryland for a period of one year (Oct. 2017–Oct. 2018). The results showed that the apple expansion period was the main period of N_2O emission from apple orchards on Weibei dry plateau. The total annual cumulative N_2O emission of each fertilization treatment was between 1.14 kg \cdot hm⁻² and 4.46 kg \cdot hm⁻². Compared with conventional fertilization treatment, the total N_2O emission of optimized N reduction and organic-inorganic combined fertilization treatments decreased by 43.3% and 42.6%, respectively. The annual emission coefficients of conventional high nitrogen, optimized N reduction, and organic-inorganic combined treatments were 0.27%, 0.22%, and 0.22%, respectively. Temperature was the decisive factor limiting N_2O emission from soil during apple maturity and expansion. After fertilization, with the passage of time, insufficient substrate concentration gradually became an important factor to limit N_2O emission. Therefore, as the recommended fertilization mode for apple orchards, organic and inorganic fertilizers can significantly reduce N_2O emission, and fertilization before rainfall can reduce N_2O emission peak value.

 $Keywords: N_2O \text{ emission; nitrogen reduction and fertilization; organic fertilizer substitution; apple orchard$

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0200106)

收稿日期:2019-03-09 修回日期:2019-04-16

作者简介:朱志军(1993-),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为果园氮素管理和温室气体排放。E-mail:zhuzhijun7651@163.com 通信作者:同延安,教授,主要从事土壤化学、植物营养、农业环境保护等方面的研究。E-mail:tongyanan@nwsuaf.edu.cn

氧化亚氮(N,O)因能够吸收地球长波辐射而 导致温室效应。大气层中 N2O 的增加量主要来自 土壤的排放,而大量氮肥的施用是造成农田土壤 N2O排放的主要原因^[1-2]。农田土壤 N2O 排放受施 肥、土壤水分、温度、质地、pH值、无机氮含量和比例 等因素影响^[3], IPCC 报告指出:农业土壤 N₂O 排放 估算存在很大的不确定性[4]。同时中国幅员辽阔, 各地区农田生态系统间的气候、土壤、耕作制度等 因素差异巨大,农田土壤 N₂O 排放具有巨大的时空 变异性[5]。为了减小这种估算上的不确定性,研究 不同典型农田类型区域 N20 排放十分有必要。渭 北旱塬属于干旱半干旱地区,是中国苹果优势主产 区.30 多个主产区县苹果园种植面积已占该区域总 耕地面积的 50%~70%,试验地(洛川县)苹果种植 面积占该县总耕地面积的78%^[6],但目前该地区苹 果园整年的 N,O 排放研究少见报道。为了准确估 算该地区农业土壤 N₂O 排放量,开展整年或多年的 研究是非常必要的[7],研究渭北旱塬苹果园不同施 肥制度下 N₂O 排放特征可以为该地区 N₂O 排放区 域估算提供数据支撑。

庞军柱等^[7]在黄土高原多年监测发现苹果园 N,0年际排放变化较大,排放系数在 0.035%~ 0.082%之间。该研究施纯氮量为 311.5 kg · hm⁻², 但近年来农户为增加苹果产量盲目增施氮肥,至 2015、2016年渭北旱塬苹果主产区县纯氮投入量超 过1000 kg·hm^{-2[9-10]}。苹果树体年需氮量在172.3 kg · hm⁻²左右^[9-10],剩余的氮素除了在土壤中迁移 累积^[12-13],也会显著增加 N₂O 排放^[1]。采用合理 的施肥管理模式是减少 N2O 排放的重要措施。苹 果园推荐施肥模式为有机无机配施,在有机肥投入 40~60 t · hm⁻²的基础上,建议施用化肥纯氮 240~ 360 kg · hm^{-2[14]}。研究表明,有机物在分解过程中 会消耗土壤 O,从而抑制硝化作用[15],减少 N,O 排 放。也有研究认为,有机物分解耗氧形成的局部厌 氧环境有利于反硝化作用,从而促进 N,O 排放^[16]。 在渭北旱塬自然生态条件下,施用有机肥是否促进 N₂O 排放需要进一步研究。2015 年国家农业部要 求大力推进化肥减量提效,到2020年主要农作物化 肥使用量实现零增长[16],这就要求苹果园在施肥管 理中优化施肥量与施肥模式。因此,通过设置不同 施肥处理,探明渭北旱塬生态条件下 N,O 排放规 律,以及减施化学氮肥与有机无机配施相对于农户 高化学氮肥投入下 N₂O 的减排潜力,对准确估算渭 北旱塬农田土壤 N₂O 区域排放量具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在延安市洛川县西北农林科技大学苹果 试验站进行。试验站位于黄土高原地区,平均海拔 1 072 m;年平均气温 9.1℃,平均年降水量 616 mm, 雨热同期,无霜期达到167 d。试验前0~40 cm 土 层基础养分为:有机质 8.5 g · kg⁻¹, 硝态氮(NO₃⁻-N)16.4 mg · kg⁻¹, 铵态氮(NH₄⁺-N)1.3 mg · kg⁻¹, 速效磷(P)16.7 mg · kg⁻¹,速效钾(K)136.3 mg · kg⁻¹, pH 值为 8.1, 耕层土壤(0~20 cm) 容重为 1.47 g·cm⁻³,田间持水量为 27.2%(0~20 cm)。供试果 树栽于 2012 年,品种为晚熟矮化延长红,正处于盛 果期,植株密度为1250棵·hm⁻²(株行距为2m×4 m)。施肥方式为双沟条施,即在距树干约70 cm 左 右的两侧,分别开一条宽和深皆为 20 cm 左右的条 状沟,施肥后覆土。每年施两次肥,在成熟期(10月 份)施基肥和膨大期(第2年7月份)进行追肥。供 试氮、磷、钾分别为尿素(N 46%)、重过磷酸钙 (P₂O₅44%)、硫酸钾(K₂O 51%);生物有机肥(有机 质≥46%,全N6%)。

1.2 试验设计

施肥处理设置不施氮肥(CK)、常规高氮(HF)、 优化减氮(RF)、有机无机肥配施(OR)4个处理,每处 理设3次重复,每个重复包含6棵果树,随机区组排 列。常规高氮处理为苹果优生区大部分农户平均施 肥量,设纯N用量为800kg·hm⁻²;优化减氮处理为 专家推荐施肥量,设纯N用量为400kg·hm⁻²;有机 无机肥配施处理为苹果园推荐施肥模式,纯N用量与 优化减氮处理相同,但其中的氮来源于生物有机肥和 尿素,生物有机肥供氮和尿素供氮各占50%。磷、钾 肥分别为300、400kg·hm⁻²,生物有机肥和磷肥全部 基施,氮肥基追比为6:4,钾肥基追比为3:7。

1.3 气体采集及测定方法

采用静态箱-气相色谱法监测苹果园 N₂O 排放 通量。静态箱由箱体和底座两部分组成:箱体由 5 mm 厚铁板制成,规格为 50 cm×50 cm×50 cm,外部 粘有隔热层,内部装有小风扇(12 V,0.5 A)、温度 传感器和采样管^[8]。底座为 50 cm×50 cm×20 cm 且上部带有方形凹槽的铁质框架。静态箱布置在 施肥带上,底座埋入土壤 20 cm。采样时,将凹槽内 注满水,将静态箱罩上,形成一个密闭性气体空间, 取样前启动箱内风扇混样 20 s,然后从箱体侧端的 取样口用注射器取样置于 200 ml 铝箔气袋中,每次 取样 60 ml。样品采集时间为采样当天上午9:0011:00之间,以秒表计时且间隔 15 min 采集一次, 在盖箱后 0、15、30、45 min 时共采集 4 次气体样 品^[18-19]。同时采用今明公司生产的手持式 JM624 数字温度计(温度范围-50℃~199℃,测量准确度为 ±0.2%,读数分辨率为 0.1℃)记录箱内的初始温度 和终止温度。气体样品带回实验室并在 1 周内完成 测定。N₂O 样品采用美国 Agilent7890A 型气相色谱 仪分析,采用 Porapak Q 填充柱,柱箱温度为 50℃, 检测器 ECD 工作温度为 350℃,高纯度 N₂载气;北 京兆格气体科技有限公司标准气体。

2017年10月11日施基肥,苹果成熟期土壤温 度较低(图1),气体连续采集10d。2018年1月24 日之后,出现降雪,箱内气温降至0℃以下,停止采 样,直到2018年3月5日恢复正常。2018年4月 12日降雨量为32.8 mm、5月21日降雨量为20.8 mm、6月8日降雨量为26.3 mm、6月25日降雨量为 32.5 mm。2018年7月3日进行追肥,由于苹果膨大 期土壤温度较高,样品连续采集20d,2018年7月4 日降雨量为25.4 mm、7月9日降雨量为24.6 mm、7 月16日降雨量为25.6 mm、8月14日降雨量为35.6 mm(图2)。样品采集遇降雨量≥15 mm时,连续采 集3d或5d,其余时间约每2周采集一次。

N2O 排放通量计算公式^[20]:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \Delta C / \Delta T \times 273 / (273 + \theta)$$

式中,F 为氧化亚氮排放通量($mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); ρ 为 箱内气体密度($g \cdot cm^{-3}$);V 为静态箱实际体积 (cm^{3});A 为静态箱底面积(m^{2}); $\Delta C/\Delta T$ 为单位时 间静态箱内的氧化亚氮气体浓度变化率($\mu L \cdot \mu L^{-1}$ · h^{-1}), θ 为测定时箱体内平均温度(\mathbb{C})。 N₂O 的年排放量将不同时段的 N₂O 排放量(将 可决系数 R²<0.85 的数据舍弃)加起来,每两个相邻 采样日期之间的 N₂O 排放量 X_n用以下公式计算^[8]:

$$X_n = \frac{f_n + f_{n+1}}{2} \times (D_n - D_{n+1})$$

式中, f_n 表示特定时间段的最后一天的 N₂O 排放量 ($\mu g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), f_{n+1} 表示特定时间段的初始一天 的 N₂O 排放量($\mu g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), D_n 是特定时间段 的最后一天, D_{n-1} 是特定时间段的初始一天。整个 苹果园土壤 N₂O 年排放量通过对施肥区与不施肥 区年排放量进行面积加权获得,用静态箱覆盖的区 域代表施肥带 N₂O 排放^[8],占比为 1/4,另外 3/4 用 CK 处理代替估算 N₂O 排放通量。

N₂O 排放系数=(施氮处理 N₂O 累积量-不施 氮处理 N₂O 累积量)×0.636/施氮量×100 其中,不施氮处理 N₂O 累积量为 CK 的 N₂O 累积 量,0.636 为 N₂O 中 N 元素所占比重。

1.4 土壤水分、温度和气象数据

气体样品采集的同时,测定表层土壤水分和5、 10 cm 土层地温(图1)。其中表层(0~20 cm)土壤 体积含水量采用 EM50 数据采集器(北京力高泰科 技有限公司,每1 h 读数1次)监测,配置北京时阳 电子科技有限公司数据采集探头(0~50% VWC,±1 ~2% VWC),使用样品采集时间段(9:00— 11:00)数据;土壤容重采用环刀法,每3个月测定 一次。地温采用曲管地温计(温度范围-20℃~ 50℃)测定,气体第一次采集时,记录初始地温,气 体采集结束后,记录终止地温,二者平均值代表气 体采集期间土壤地温;气象数据(降雨、气温)从距 离试验地约300 m 的气象站获得。



1.5 数据处理

所有数据采用 SPSS 17.0 软件进行显著性分析,采用 Excel 2016 软件对数据进行处理并制图。

2 结果与分析

2.1 苹果园不同施肥处理 N₂O 日排放速率季节 变化

图 3 表明,苹果生育期 N₂O 日排放通量主要发 生在膨大期。2017 年 10 月苹果成熟期施基肥后第 9 天达到排放峰值,CK、常规高氮、优化减氮和有机 无机配施处理 N₂O 排放峰值分别为 12.24、30.91、 25.75、50.26 μg·m⁻²·h⁻¹,各施肥处理 N₂O 排放差 异不明显。在休眠期、萌芽期、花期和幼果期各处 理 N₂O 日排放速率在 1.17~50 μ g · m⁻² · h⁻¹之间。 2018 年 7 月 3 日进行膨大期追肥,在施肥后第 10、 12 天达到 N₂O 排放峰值,CK、常规高氮、优化减氮 和有机无机配施处理 N₂O 排放峰值分别为 54.13、 444.34、289.21、222.28 μ g · m⁻² · h⁻¹。其中,常规高 氮 N₂O 排放峰值分别是 CK、优化减氮、有机无机配 施 N₂O 排放峰值的 8.21 倍、1.54 倍和 2 倍。优化减 氮和有机无机配施处理 N₂O 排放速率在 8 月初与 CK 之间差异较小,常规高氮处理到 9 月初与其他处 理之间差异较小。各处理在花期、幼果期和膨大期 前期对降雨的响应较弱,而在膨大期追肥时比较明 显,可能与花期、幼果期和膨大期前期土壤表层(0~ 20 cm)硝化和反硝化底物浓度不足有关。



图 2 洛川苹果试验站降雨量和日平均气温







2.2 苹果园不同施肥处理 N₂O 排放通量与排放 系数

从 2017 年 10 月 12 日—2018 年 10 月 11 日各 处理 N₂O 累积排放总量在 1.14~4.46 kg · hm⁻²之间 (表1),常规高氮与优化减氮、有机无机配施处理之 间 N,O 累积排放总量差异极显著。优化减氮和有 机无机配施处理与常规高氮处理相比,累积排放总 量分别降低了 43.3% 和 42.6%, 但优化减氮和有机 无机配施处理之间 N,O 累积排放总量差异不显著。 常规高氮、优化减氮和有机无机配施 N,O 年排放系 数分别为0.27%、0.22%和0.22%,各处理间差异不 显著。CK、常规高氮、优化减氮和有机无机配施处 理 N₂O 年均排放速率分别为 20.44、103.60、61.11 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ 和 57.01 $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ (表 2)。CK 与 常规高氮、优化减氮和有机无机配施处理 N,O 年均 排放速率差异都极显著,常规高氮与优化减氮、有 机无机配施处理差异极显著,而优化减氮和有机无 机配施之间差异不显著(表2)。

表1 苹果园不同施肥处理 N₂O 排放总量与排放系数

Table 1 Total N₂O emissions and emission coefficients

from different fertilization treatments

处理 Treatment	时间段 Period	累积量 Cumulative emission /(kg・hm ⁻²)	排放系数 Emission factor/%
СК	2017-10-12-2018-10-11	1.14±0.26Cc	-
常规高氮 High nitrogen fertilizer	2017-10-12-2018-10-11	4.46±0.55Aa	0.27±0.04a
优化减氮 Reduce nitrogen fertilizer	2017-10-12-2018-10-11	2.53±0.07Bb	0.22±0.01a
有机无机配施 Organic fertilizer substitution	2017-10-12-2018-10-11	2.56±0.21Bb	0.22±0.03a

注:不同小写字母表示处理间在 P<0.05 水平上差异显著,不同 大写字母表示处理间在 P<0.01 水平上差异显著,下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments at P < 0.05 level. Different capital letters indicate significant difference among treatments at the level of P < 0.01, the same below.

表 2 苹果园不同施肥处理 N₂O 年平均排放速率

Table 2	Annual average	emission	rate of N	1,0	under	different	fertilization	treatments
	0			2. C				

处理 Treatment	年平均排放通量	最小值	最大值	变异系数
	Annual average emission rate	Minimum value	Maximum value	Coefficient of
	$/(\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	$/(\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	$/(\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1})$	variation/%
СК	20.44±19.68Cc	1.17	105.48	96.30
常规高氮	102 60 120 044	4 20	444.24	120.02
High nitrogen fertilizer	103.00±129.94Aa	4.39	444.54	129.95
优化减氮 Reduce nitrogen fertilizer	61.11±82.26Bb	5.51	319.09	134.61
有机无机配施 Organic fertilizer substitution	$57.01{\pm}67.74\mathrm{Bb}$	5.57	241.39	118.81

2.3 苹果园不同施肥处理 N₂O 排放通量与环境因

子间相关性分析

土壤温度和湿度能够影响硝化微生物的活动, 是 N_2O 生成的基础^[21]。将不同施肥处理 N_2O 季节 排放通量作为一个整体,采用典型相关分析探讨果园 N_2O 排放通量与环境因子之间的相关性,其特征值和 典型相关系数结果见表 3。结果表明,第一对典型变 量 V_1 和 W_1 之间存在显著相关性(P<0.001),贡献率 为 44.6%;其他 3 对典型变量之间相关性不显著,贡 献率不足 2%。第 1 对标准化典型变量表示如下:

 $V_1 = 0.161x_1 - 0.045x_2 - 0.974x_3 - 0.159x_4$

 $W_1 = -0.944y_1 - 2.509y_2 + 0.525y_3 + 2.044y_4$ 其中, x_1 为5 cm 土壤温度, x_2 为土壤孔隙充水率 (WFPS), x_3 为10 cm 土壤温度, x_4 为气温, y_1 为CK, y_2 为常规高氮, y_3 为优化减氮, y_4 为有机无机配施。 可见,典型变量 V_1 (环境因子)主要取决于10 cm 土 壤温度,其系数绝对值最大。典型变量 W_1 (N₂O 排放

表 3 苹果园不同施肥处理整体 N₂O 排放通量 与环境因子间的典型相关分析

Table 3 Typical correlation analysis between overall

 $\mathrm{N}_{2}\mathrm{O}$ emission flux and environmental factors

under different fertilization treatments

特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate	典型相关系数 Canonical correlation coefficient	P值 P value
1.102	0.446	0.724	< 0.001
0.217	0.023	0.422	0.083
0.033	< 0.001	0.179	0.614
0.009	< 0.001	0.094	0.451

通量)中常规高氮和有机无机配施处理 N₂O 排放通 量占了较大比重,说明不同施肥处理会影响 N₂O 排 放通量对温度的响应。从苹果整个生育期 N₂O 排 放通量看,N₂O 累积排放量的 57.7%~79.2%发生在 土壤表层(0~10 cm)温度为 15℃~25℃时。 3 讨 论

3.1 土壤含水量和温度对苹果园不同施肥处理 N₂O排放的影响

O₂浓度可以控制土壤 N₂O 产生量与产生途径, 但研究中很少直接测量 O2浓度,而土壤含水量通常 被认为是 0,有效性的可观测替代指标^[22]。研究表 明反硝化作用最佳土壤孔隙充水率在70%~90%之 间,而认为在土壤孔隙充水率较低时,N₂O的产生主 要来源于硝化作用中氨氧化和硝化细菌反硝化过 程^[23]。土壤微生物硝化作用适宜温度为 15℃~ 35℃,其中最适温度为25℃~35℃,土壤表层(0~10 cm)温度与N₂O日排放速率之间极显著正相关^[24]。 氨氧化形成的中间产物(NH₂OH)能在生物和非生 物条件下产生 N₂O。马兰等^[25]研究表明,在偏碱性 的果园中 NH₂OH 产生 N₂O 的主要途径为非生物过 程, NO_{2}^{-} -N产生 N,O 的主要途径为生物过程。 2017 年苹果成熟期土壤温度(0~10 cm)在 6.5℃~ 10℃之间,施用氮肥为硝化微生物提供了大量氮源。 但土壤(0~10 cm)低温抑制了硝化微生物将氨氮氧 化成 NH₂OH 以及硝化细菌反硝化过程,从而抑制 了硝化过程中N,O的产生。苹果树(3~10 a)径向1 m 主要根群集中在 20~60 cm 深的土层中^[26],根系 耗氧形成的局部厌氧多存在于土壤下层,并且产生 的 N₂O 不易扩散。同时土壤表层(0~20 cm)较好 的通气性会抑制土壤反硝化作用的进行。所以苹 果成熟期不同施肥处理没有明显促进 N₂O 排放。 2018 年膨大期土壤温度(0~10 cm)在 19℃~25℃ 之间,有利于氨氧化和硝化细菌反硝化过程,在适 宜的温度条件下提供充足的氮源是导致膨大期 N,O 大量排放的主要原因,而在本研究的试验条件下, 反硝化作用产生的 N,O 对土壤 N,O 排放的贡献量 无法确定。

苹果整个生育期间土壤孔隙充水率(0~20 cm) 都<50%(图1),并且成熟期基肥量高于膨大期追肥 量。典型相关分析表明,第一对典型变量中环境因 素主要由土壤温度(0~10 cm)决定。因此,土壤温 度(0~10 cm)是导致 2017 年成熟期和 2018 年膨大 期施肥后 N₂O 排放差异的主要原因。氨氧化作用 是硝化过程的限速步骤^[27],休眠期、萌芽期、花期和 幼果期由于没有外源氮肥投入,所以底物浓度不足 也是限制硝化细菌反硝化和微生物反硝化作用的 重要因素。

3.2 降雨对苹果园不同施肥处理 N₂O 排放的影响 研究表明,降雨和灌溉能够促进 N₂O 排放,土

壤由干变湿的过程产生的 N₂O 随土壤含水量的增 大而增大,而土壤孔隙充水率为70%时土壤由湿变 干的过程产生的 N₂O 量最高^[28]。膨大期(6-8月) N₂O 排放总量占全年 N₂O 排放总量的 46.8%~ 69.1%,同期降雨量占全年降雨量的45.3%。庞军 柱等^[8]在研究黄土高原苹果园土壤 N₂O 排放时,也 有类似结论:整个夏季 N₂O 的排放量占到了全年总 排放量的47.9%,并且 N₂O 排放因降雨量差异年际 排放变化较大。土壤水分状况不仅影响 N2O 产生 途径和产生量,也影响 N20 从土壤孔隙向大气的扩 散^[29],所以膨大期降雨(≥20 mm)后(7月9日和 16日、8月14日)的第二天都出现N,O排放低谷, 并且降雨能够提高由温度条件决定的 N₂O 排放强 度^[30]。在花期(4月12日)、幼果期(5月21日)和 膨大期前期(6月8日、6月25日)出现不同强度降 雨(≥15 mm),但降雨并没有明显促进 N₂O 排放, 主要原因可能是受土壤温度(0~10 cm)和底物浓度 共同限制硝化细菌反硝化和反硝化过程。研究表 明,当土壤中存在限制 N,O 产生和排放的因子时, 土壤含水量对 N,O 排放的影响则不会明显表现 出来^[31-32]。

3.3 有机肥对苹果园 N₂O 排放的影响

土壤有机质通过改变土壤有机碳的有效性,影 响硝化和反硝化作用的底物浓度,而影响土壤 N₂O 的排放,2017年苹果成熟期,生物有机肥的施入为 土壤带入了大量易分解有效性碳,同时也带入了大 量的微生物。有机无机配施可以降低土壤 C/N,而 土壤低 C/N 会增加氨氧化细菌(AOB)的代谢活 性[34],从而促进硝化作用的发生[35],所以有机无机 配施处理 N,O 日排放速率在成熟期比其他处理高。 与优化减氮处理相比,有机无机配施处理没有明显 促进成熟期 N₂O 的排放,可能主要原因是土壤(0~ 10 cm 土层)温度低抑制了硝化微生物活性,限制了 有机物对 N₂O 排放的促进效果。但也有研究认为 有机物分解消耗土壤 O,能够抑制硝化作用,同时有 利于反硝化的发生[35],而反硝化微生物适宜的温度 为5℃~75℃^[36]。从成熟期土壤表层(0~20 cm)土 壤孔隙充水率来看(图1),土壤表层有利的通气条件 并没有达到微生物反硝化所需的厌氧环境,所以有机 物分解耗氧对反硝化作用的促进效果十分有限。

4 结 论

1)苹果膨大期是渭北旱塬苹果园 N₂O 排放的 主要时期。各施肥处理 N₂O 年累积排放总量在1.14 ~4.46 kg·hm⁻²之间,与常规施肥处理相比,优化减 氮和有机无机配施处理 N₂O 排放总量分别降低了 43.3%、42.6%。常规高氮、优化减氮与有机无机配 施处理年排放系数分别为 0.27%、0.22%、0.22%。

2)温度是限制苹果成熟期和膨大期土壤 N₂O 排放的决定因子;施肥后,随着时间的推移,底物浓 度不足将逐渐成为限制 N₂O 排放的重要因子。

参考文献:

- [1] 李虎, 王立刚, 邱建军. 农田土壤 N₂O 排放和减排措施的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (5):1-5.
- [2] 刘杏认, 董云社, 齐玉春. 土壤 N₂O 排放研究进展[J]. 地理科学 进展, 2005,24(6):50-58.
- [3] Xiong Z Q, Xing G X, Zhu Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen[J]. Pedosphere, 2007, 17(2): 146-155.
- [4]I PCC. Atmospheric chemistry and greenhouse gases [M]. New York: Cambridge University Press, 2001.
- [5] 卢燕宇. 基于模型和 GIS 技术的中国农田化学氮源 N₂O 直接排放 量估计[D].南京:南京农业大学,2007.
- [6] 张社红,李军,王学春,等. 渭北旱塬苹果园地产量和深层土壤水 分效应模拟[J]. 生态学报, 2011,31(13):3767-3777.
- [7] Barton L, Kiese R, Gatter D, et al. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semiarid climate [J]. Global Change Biol., 2007,14 (1):177-192.
- [8] 庞军柱,王效科,牟玉静,等.黄土高原苹果园土壤 N₂O 排放研究
 [J].环境科学学报,2010,(12):2518-2525.
- [9] 杨秀山,赵鲁邦,张东,等.洛川县苹果果园施肥现状与对策[J].陕西农业科学,2017,63(1):61-63.
- [10] 胡道春,金龙,武瑞婵.黄土高原苹果园施肥现状调查分析[J].
 陕西农业科学,2017,63(11):44-49.
- [11] 樊红柱.苹果树体生长发育、养分吸收利用与累积规律[D].杨 凌:西北农林科技大学,2006.
- [12] 卢树昌,陈清,张福锁,等.河北省果园氮素投入特点及其土壤 氮素负荷分析[J].植物营养与肥料学报,2008,14(5):858-865.
- [13] 寇长林, 巨晓棠, 张福锁. 三种集约化种植体系氮素平衡及其对 地下水硝酸盐含量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(4): 660-667.
- [14] 赵佐平,高义民,刘芬,等.化肥有机肥配施对苹果叶片养分、品质及产量的影响[J].园艺学报,2013,40(11):2229-2236.
- [15] Beauchamp E G, Trevors J T, Paul J W. Carbon Sources for Bacterial Denitrification[M]. New York: Springer, 1989.
- [16] Dambreville C, Morvan T, Germon J C, et al. N₂O emission in maize-crops fertilized with pig slurry, matured pig manure or ammonium nitrate in Brittany[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008,123(1):201-210.
- [17] 尤迪, 房杰, 于双成, 等. 吉林省多措并举全面推进化肥使用量

零增长行动[J]. 农业与技术, 2015,35(23):159-160.

- [18] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 不同耕作措施的温室气体排放日 变化及最佳观测时间[J]. 生态学报, 2012,32(3):879-888.
- [19] 李增全. 地膜覆盖对稻—油轮作农田温室气体排放的影响研究 [D]. 重庆:西南大学, 2016.
- [20] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化 亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008,19(1):99-104.
- [21] 高琳. 不同农作措施对旱地农田温室气体排放的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [22] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils [J]. Science Society of America Journal, 1984,48(3):647-653.
- [23] Venterea R T, Dolan M S, Ochsner T E. Urea decreases nitrous oxide emissions compared with anhydrous ammonia in a minnesota corn cropping system [J]. Science society of America Journal, 2010, 74 (2):407-418.
- [24] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997,18(5):3-7.
- [25] 马兰,李晓波,李博伦,等.土壤中羟胺和亚硝态氮非生物过程 对 N₂O 排放的贡献[J].土壤学报,2016,53(5):1181-1190.
- [26] 李泽. 渭北旱塬苹果园土壤呼吸的时空变异特征及其影响因子 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
- [27] 蔡延江,丁维新,项剑. 土壤 N₂O 和 NO 产生机制研究进展[J]. 土壤, 2012,44(5):712-718.
- [28] 梁东丽,同延安, Ove Emteryd, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002,8(3):298-302.
- [29] Anderson I C, Poth M A. Controls on fluxes of trace gases from brazilian cerrado soils [J]. Journal of environmental quality, 1998, 27 (5):1117-1124.
- [30] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N₂O产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996,7(3):273-279.
- [31] 胡晓航,周建朝,王秋红,等.温度、水分和施肥对甜菜黑土氮素 迁移转化的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):82-88.
- [32] 徐新超,伏广农,谢小茜,等.农田氧化亚氮排放的主要影响因 素及其作用机制[J].广东农业科学,2013,40(11):171-176.
- [33] Stehfest E, Bouwman L. N₂ O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: Summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. Nutrient cycling in Agroecosystems, 2006,74(3):207-228.
- [34] Chu H, Fujii T, Morimoto S, et al. Population size and specific nitrification potential of soil ammonia-oxidizing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008,40(7);1960-1963.
- [35] Llera C M, Stevensb R J, Laughlin R J. Evidence of carbon stimulated N transformations [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35 (02) ;285-293.
- [36] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版 社, 1991.