果 树 学 报 2019,36(7):866-874
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20180496

基于^{15}N的‘库尔勒香梨’园土壤N_2O排放特征

王前登[1],何雪菲[1,2],刘雪艳[1,2],王 成[1],柴仲平[1,2*]

([1]新疆农业大学草业与环境科学学院,乌鲁木齐 830052;[2]新疆土壤与植物生态过程重点实验室,乌鲁木齐 830052)

摘 要:【目的】N_2O作为重要的温室气体,其潜在增温作用约为CO_2的190~270倍,为准确掌握源自肥料的N_2O损失状况。**【方法】**以6年生‘库尔勒香梨’园土壤为研究对象,采用^{15}N示踪技术,密闭式静态箱-气相色谱法对梨园土壤N_2O排放通量、累积量和Ndff值(^{15}N尿素对土壤氮素气态损失的贡献率)进行监测与分析。**【结果】**施肥、灌溉及温度均会影响梨园土壤N_2O排放通量、累积量及Ndff值。施肥后N_2O排通量、累积量和Ndff值,在施基肥和追施肥处理的4 d后均达到峰值;土壤N_2O排放量在灌水时期明显增加,且土壤N_2O排放通量表现为下午(16:00—20:00)>中午(12:00—16:00)>上午(8:00—12:00)>夜间(20:00—8:00),土壤N_2O累积量表现为夜间(20:00—8:00)>下午(16:00—20:00)>中午(12:00—16:00)>上午(8:00—12:00);土壤N_2O排放与土壤温度、土壤含水量之间均呈显著正相关($p < 0.001$)。^{15}N尿素贡献的$^{15}N_2O$的Ndff值变化表现为下午(16:00—20:00)>中午(12:00—16:00)>上午(8:00—12:00)>夜间(20:00—8:00)。源于土壤原有氮素的N_2O排放量为0.893 3 g·plant^{-1},占N_2O总损失量的87.43%;而源自肥料的N_2O损失量为0.1284 g·plant^{-1},仅占总损失量的12.57%。**【结论】**‘库尔勒香梨’果园N_2O排放主要源于土壤原有氮素的N_2O排放。

关键词:‘库尔勒香梨’;果园;^{15}N-尿素;土壤;N_2O;排放特征;

中图分类号:S661.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2019)07-0866-09

N_2O emission characteristics from the soil in a ‘Kuerlexiangli’ pear orchard based on ^{15}N tracing

WANG Qiandeng[1], HE Xuefei[1,2], LIU Xueyan[1,2], WANG Cheng[1], CHAI Zhongping[1,2*]

([1]College of Pratacultural and Environmental Science, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; [2]Xinjiang Key Laboratory of Soil and Plant Ecological Process, Urumqi 830052, Xinjiang, China)

Abstract:【Objective】In Xinjiang, the cultivation of characteristic fruit trees has become an important means for farmers to increase their income. ‘Kuerlexiangli’ pear is the dominant tree species of Xinjiang’s characteristic fruit industry, and has become the dominant industry of characteristic fruit in southern Xinjiang. However, the problems in the production of ‘Kuerlexiangli’ pear is becoming more and more obvious, and the unreasonable fertilization and extensive management are becoming more and more serious, leading directly to waste of resources and environmental degradation. Nitrogen is a necessary nutrient for the growth and development of fruit trees. In some cases, increasing nitrogen application can effectively increase fruit yield and improve fruit quality. In ‘Kuerlexiangli’ pear orchards, unreasonable fertilization and excessive application of nitrogen fertilizer will not only reduce the nitrogen use efficiency, but also increase the nitrogen content in the soil, thus accelerating the Nitrous Oxide (N_2O) emission from the orchard soil. As an important greenhouse gas, N_2O has a potential warming effect, about 190 to 270 times higher than that of CO_2.【Methods】Although the ^{15}N tracer technique is widely used in the study on nitrogen cycling, the research on the use of ^{15}N technology to dis-

收稿日期:2018-12-13 接受日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金(31460548);自治区自然科学基金面上项目(2017D01A38);自治区青年科技创新人才培养工程(QN2016YX0670)

作者简介:王前登,男,在读硕士研究生,研究方向:果树营养与施肥。Tel:13039452901,E-mail:2314531200@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel:13565912598,E-mail:chaizhongpingth@sina.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tinguish N_2O sources is rare. Therefore, the six-year-old ‘Kuerlexiangli’ pear orchard was studied by applying ^{15}N tracer technique, and the closed static chamber gas chromatography method was used to monitor the soil N_2O discharge flux, incense accumulation amount and Ndff value (Contribution Rate of ^{15}N Urea to Soil Nitrogen Gas Loss). 【Results】Fertilization, irrigation and soil temperature all affected N_2O flux, accumulation and Ndff value in the orchard soil. In the afternoon of the 4th day after the application of the base fertilizer (April 5th, 16:00—20:00), the maximum flux of soil N_2O flux was 0.25 $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$. The cumulative value of N_2O peaked at the night of April 5th (20:00—8:00), which was 1.560 $g \cdot hm^{-2}$. On the 4th day (June 5th) after application of the dressing fertilizer, the N_2O emission flux in the afternoon (16:00—20:00) and the N_2O accumulation at the night (20:00—8:00) showed the second peak, which were 0.19 $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$ and 1.440 $g \cdot hm^{-2}$, respectively. On the 4th day (April 5th) after the application of the base fertilizer, the Ndff value of $^{15}N_2O$ increased significantly in each time period. Among them, the maximum peak value of Ndff of $^{15}N_2O$ (1.12%) appeared in the afternoon (16:00—20:00). On the 4th day (June 5th) after application of the dressing fertilizer, the Ndff value of $^{15}N_2O$ in each time period peaked again. Among them, the Ndff value of the $^{15}N_2O$ peak (1.09%) appeared in the afternoon (16:00—20:00). The amount of soil N_2O emissions increased significantly during the irrigation period, and the soil N_2O fluxes were expressed as follows: afternoon (16:00—20:00) ＞ noon (12:00—16:00) ＞ morning (8:00—12:00) ＞ night (20:00—8:00). The accumulation of soil N_2O was expressed as nighttime (20:00—8:00) ＞ afternoon (16:00—20:00) ＞ noon (12:00—16:00) ＞ morning (8:00—12:00). Regression analysis of soil water content and N_2O flux showed that soil water content explained 76.29% soil N_2O flux, and there was a significant positive correlation with soil N_2O flux ($p < 0.001$). However, after 10 days of watering every month, the Ndff value of $^{15}N_2O$ in the soil did not change significantly due to changes in soil water content. The soil temperature change in one day was in the ascending order: afternoon (16:00—20:00) ＞ noon (12:00—16:00) ＞ morning (8:00—12:00) ＞ nighttime (20:00—8:00), and the N_2O flux in soil was relatively consistent within one day. Regression analysis between soil temperature and N_2O fluxe indicated that soil temperature contributed 82.16% of soil N_2O flux, and showed a significant positive correlation with soil N_2O flux ($p < 0.001$). The Ndff value of $^{15}N_2O$ changes in one day was in the ascending order: afternoon (16:00—20:00) ＞ noon (12:00—16:00) ＞ morning (8:00—12:00) ＞ night (20:00—8: 00), which was consistent with the trend of soil N_2O flux. The Ndff value of $^{15}N_2O$ contributed by ^{15}N urea changed like this: afternoon (16:00-20:00) ＞ noon (12:00—16:00) ＞ morning (8:00—12:00) ＞ night (20:00—8:00). N_2O emission from soil nitrogen was 0.8933 $g \cdot plant^{-1}$, accounting for 87.43% of the total loss. The loss of fertilizer was 0.128 4 $g \cdot plant^{-1}$, accounting for only 12.57% of the total loss. 【Conclusion】There was a significant positive correlation between soil N_2O emission and soil temperature and soil water content ($p < 0.001$). Moreover, N_2O emission was mainly due to N_2O emission of soil nitrogen. Nitrogen dioxide emission from soil was affected by many factors. There may be some coupling between these factors and the mechanism needs further studies.

Key words: ‘Kuerlexiangli’ pear; Orchard; ^{15}N-urea; Soil; N_2O; Emission characteristics

土壤氮素循环包括三个方面，一部分被作物吸收利用，另一部分残留于土壤中，还有一部分通过各种途径（气态、径流或淋溶）损失[1]。不同损失中以N_2O排放备受人们关注[2-4]。N_2O、CO_2和CH_4是大气中3种最为主要的温室气体，对全球增温的贡献率达到80%，其中N_2O对全球增温的总贡献率可达到6%，且对全球增温潜势（GWP）最大，其潜在增温作用约为CO_2的190~270倍，CH_4的4~21倍[5]。农业生态系统每年的N_2O排放量占全球人为排放总量的60%，而其中约50%的N_2O排放与氮肥的不合理施

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用有关[6]，1990年我国农田土壤N_2O排放量已达到1 000~1 210 t，随着人们需求量逐渐增加，到2020年N_2O排放量将达到1990年的3.27~5.32倍[7]。

土壤N_2O的排放受多种因素影响，如土壤温度、水分和施肥等[8-10]，这些因子对不同生态系统土壤N_2O排放均有不同程度的影响，房福力等[11]观测了莴苣菜地N_2O排放通量和同位素特征值变化规律发现，N_2O排通量产生日变化的原因与土壤温度有关，相关分析表明，N_2O排通量与土壤温度呈显著正相关（R^2= 0.82，p ＜ 0.01），而与土壤充水孔隙度无显著相关性。郑欠等[12]对北京顺义潮褐土N_2O排放及同位素特征值进行监测表明，土壤含水量增加促进N_2O排放，高含水量处理中N_2O排放量最高。陈雪双等[13]在山核桃上和张蛟蛟等[14]在板栗上研究发现，施肥能够显著增加N_2O排通量，土壤N_2O排通量与土壤温度呈显著相关，而与土壤含水量间无显著相关性。马银丽等[15]研究表明冬小麦季和夏玉米季的N_2O排放通量随着施氮量的增加而增加。因此，研究‘库尔勒香梨’果园土壤N_2O排放的影响因子及其来源具有重要意义。

‘库尔勒香梨’作为新疆的特色产业，从近年来对农户施肥习惯调查发现，‘库尔勒香梨’园平均施氮量（以N计）已超过300 kg·hm^{-2}[16]，氮肥利用率仅为18.50%[17]。这与果农不合理的施肥方式和过量的施用氮肥密切相关，不仅降低氮肥利用率，还会增加土壤中氮素的含量，造成了‘库尔勒香梨’果园土壤N_2O的排放量增加。尽管^{15}N示踪技术在研究氮素循环中应用较广泛[18-20]，但是利用^{15}N技术区分N_2O来源的相关研究并不多见。因此，笔者以田间栽植‘库尔勒香梨’为供试材料，采用^{15}N示踪技术，密闭式静态箱-气相色谱法研究‘库尔勒香梨’4—9月内，土壤N_2O排放的动态变化规律及其分配源，探讨土壤环境因子变化与土壤N_2O排放变化之间的相互关系，为香梨园优化施氮，提高氮肥利用率提供理论依据，为降低化肥的气态损失、合理科学减排措施提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验地处于新疆维吾尔自治区库尔勒市恰尔巴格乡下和什巴格村5队（41°48′21″ N、86°04′22″ E），海拔918.7 m，地处塔里木盆地东北边缘，北接天山支脉，南临塔克拉玛干沙漠。试验区属于典型的暖温带大陆性干旱荒漠气候区，年均气温11.8 ℃，年降水量50~55 mm，无霜期170~227 d，日照时数为2 762.1~3 186.3 h。土壤类型为黄潮土，土壤质地为黏壤土，土壤容重为1.22 g·cm^{-3}，pH 7.9，土壤有机质含量为21.56 g·kg^{-1}，碱解氮、有效磷、速效钾的含量分别为46.22、14.41和169 mg·kg^{-1}。

田间试验以栽植6 a（年）树龄的‘库尔勒香梨’为试材，嫁接砧木为杜梨（*Pyrus betulifolia* Bge.），株行距5m×6 m。试验选取主干粗度、枝条数、枝条粗度相对一致、无病虫害、结果正常的5株香梨树挂牌标记，试验小区内土壤肥力、水分等立地条件较为一致。在香梨整个生育期施^{15}N-尿素（上海化工研究院生产，丰度10.14 %）60 g·plant^{-1}与普通尿素1 390 g·plant^{-1}，其中混合后肥料的60%在果树萌芽前施用，剩余40%在膨果前期追施。施P_2O_5 667 g·plant^{-1}，施K_2O 133 g·plant^{-1}，磷肥和钾肥在萌芽前一次性施入。肥料选用尿素（含N 46%）、重过磷酸钙（含P_2O_5 46%）和硫酸钾（含K_2O 51%）。施肥方法是距中心干50~80 cm处挖深和宽均为30 cm左右的环状沟，在沟内均匀施入肥料。灌溉采用常规漫灌，灌溉分别在4—8月的10日进行，共计5次，每次灌水量3 000 m^3·hm^{-2}，其他田间管理与果园其他区域相同。

1.2 N_2O的采集与测定

土壤N_2O的收集贯穿香梨整个生育期，分别于4—9月的5日、15日和25日进行，在各试验小区距离香梨单株树体施肥位置20 cm处，分别放置3个收集装置，于上午8:00—12:00、中午12:00—16:00、下午16:00—20:00和夜间20:00—8:00对样品进行收集。

N_2O排放：采用静态箱法采集N_2O（图1）。气体采样箱规格为内径26 cm，高40 cm，外覆绝热材料避免太阳辐射造成的温差。箱内装有风扇、温度传感器，桶顶部安装气体样品采集口。采气时将采样箱罩在底座上并注水密封，以防底座与顶箱结合处漏气，采样开始时记录罩箱时间，随后每间隔15 min用有气体链接阀的50 mL的针筒从采样箱内抽取气体样品，连续采集四次，并记录每次取样时箱内温度，收集起来的气体迅速转移到真空的铝箔采气袋中，带回实验室用气相色谱分析。每个收集点区域有3个装置，即3次重复。N_2O采用气相色谱仪（Ag-

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

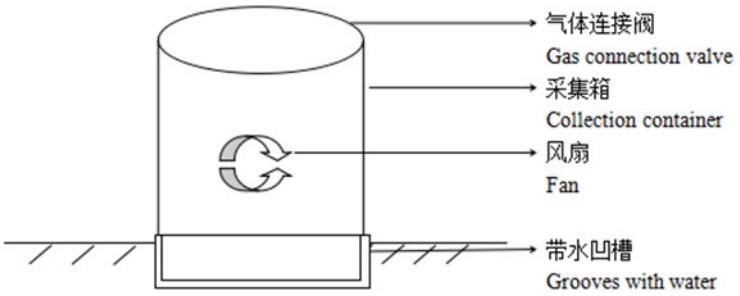

图1　‘库尔勒香梨’园土壤N_2O采集示意图

Fig. 1 The schematic diagram of soil N_2O collection in ‘Kuerlexiangli’ pear orchard

ilent7890A，USA）测定，检测器为电子捕获检测器（ECD），温度为300 ℃，柱温度为55 ℃，载气为高纯N_2，流量为30 mL·min^{-1}，通过对测定的气样浓度进行线性回归，得出气体排放速率，进而求出N_2O排放通量，N_2O的^{15}N丰度用ISOPRIME 100-TRACEGAS质谱仪测定。

1.3　数据处理与统计分析

N_2O的排放通量计算公式为：

$$F=\rho\times\frac{V}{A}\times\frac{\Delta c}{\Delta t}\times\frac{273}{273+T}$$

式中，F：N_2O的排放通量（以N计）（g·hm^{-2}·h^{-1}）；ρ：标准状态下N_2O的密度；V：密闭箱内有效的空间体积（m^3）；A：密闭箱覆盖的地面面积（m^2）；$\Delta c/\Delta t$：在特定时间内的N_2O浓度变化速率；T：采样时密闭箱平均的温度（℃）

N_2O累积量=∑（N_2O排放通量×每次连续收集的时间）

Ndff=N_2O的^{15}N原子百分超/肥料的^{15}N原子百分超×100%

氮肥损失率=（Ndff×土壤排放的N_2O）/施肥量（g）×100%

数据采用Microsoft Excel 2013软件进行处理，统计分析使用SPSS 17.0进行，用Microsoft Excel 2013软件作图。

2　结果与分析

2.1　‘库尔勒香梨’果园土壤N_2O排通量与累积量

‘库尔勒香梨’园4—9月内土壤N_2O排通量与累积量变化如图2所示，不同时间段的N_2O排通量与累积量整体趋势变化相似，均随着生育期的推移呈波动式降低。土壤N_2O排通量表现为下午（16:00—20:00）＞中午（12:00—16:00）＞上午（8:00—12:00）＞夜间（20:00—8:00），土壤N_2O累积量表现为夜间（20:00—8:00）＞下午（16:00—20:00）＞中午（12:00—16:00）＞上午（8:00—12:00），造成这种差异的原因是夜间时间要远大于其他时间段，土壤N_2O的累积量较多。在施基肥后的第4天（4月5日）

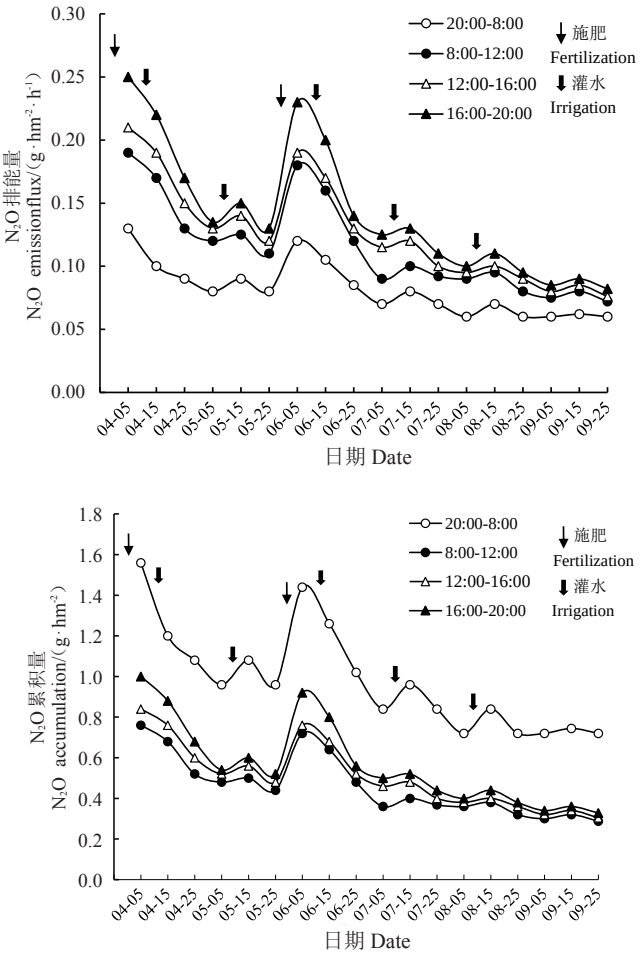

图2　‘库尔勒香梨’园土壤N_2O排通量与累积量

Fig. 2 The Nitrogen loss rate and accumulation amount of soil in ‘Kuerlexiangli’ pear orchard

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下午(16:00—20:00),土壤N_2O的排通量出现最大峰值,为0.25 $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$,$N_2O$累积量于4月5日夜间(20:00—8:00)出现最大峰值,为1.560 $g \cdot hm^{-2}$。在追施肥后的第4天(6月5日),下午(16:00—20:00)的N_2O排通量与夜间(20:00—8:00)的N_2O累积量出现次峰值,分别为0.19 $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$,1.440 $g \cdot hm^{-2}$。说明向土壤中施入氮肥在较短时间(4 d)内能增大每个时间段的土壤N_2O排通量与累积量。灌水后(5、7、8月的15日)土壤的N_2O排通量与累积量相比于灌水前(5、7、8月的5日)有所增大,说明灌水也能加快每个时间段的土壤N_2O排通量,进而增大N_2O累积量。

2.2 土壤温度与含水量对土壤N_2O排通量的影响

由图3可知'库尔勒香梨'园土壤温度随着生育期推进先逐渐增加,在8月5日的下午(16:00—20:00)达到最高为25.2 ℃,随后土壤温度随生育期推进逐渐下降。一天内土壤温度变化表现为下午(16:00—20:00)>中午(12:00—16:00)>上午(8:00—12:00)>夜间(20:00—8:00),这与N_2O排通量的变化趋势一致,说明土壤温度对N_2O排通量有显著影响。对土壤温度与N_2O排通量进行回归分析发现,土壤温度与土壤N_2O排通量呈现显著的正相关($p < 0.001$)。土壤含水量呈锯齿状分布,并于8月15日后逐渐下降,这是因为'库尔勒香梨'园在4—8月的10日进行灌水,造成4—8月的15日土壤含水量突然增高,其中夜间(20:00—8:00)的土壤含水量最高分别为34.2%、35.6%、36.8%、37.2%和36.2%。一天内土壤含水量变化幅度较小,但也有明显趋势变化即夜间(20:00—8:00)>上午(8:00—12:00)>中午(12:00—16:00)>下午(16:00—20:00)。4—8月的10日灌水造成4—8月的15日土壤N_2O排

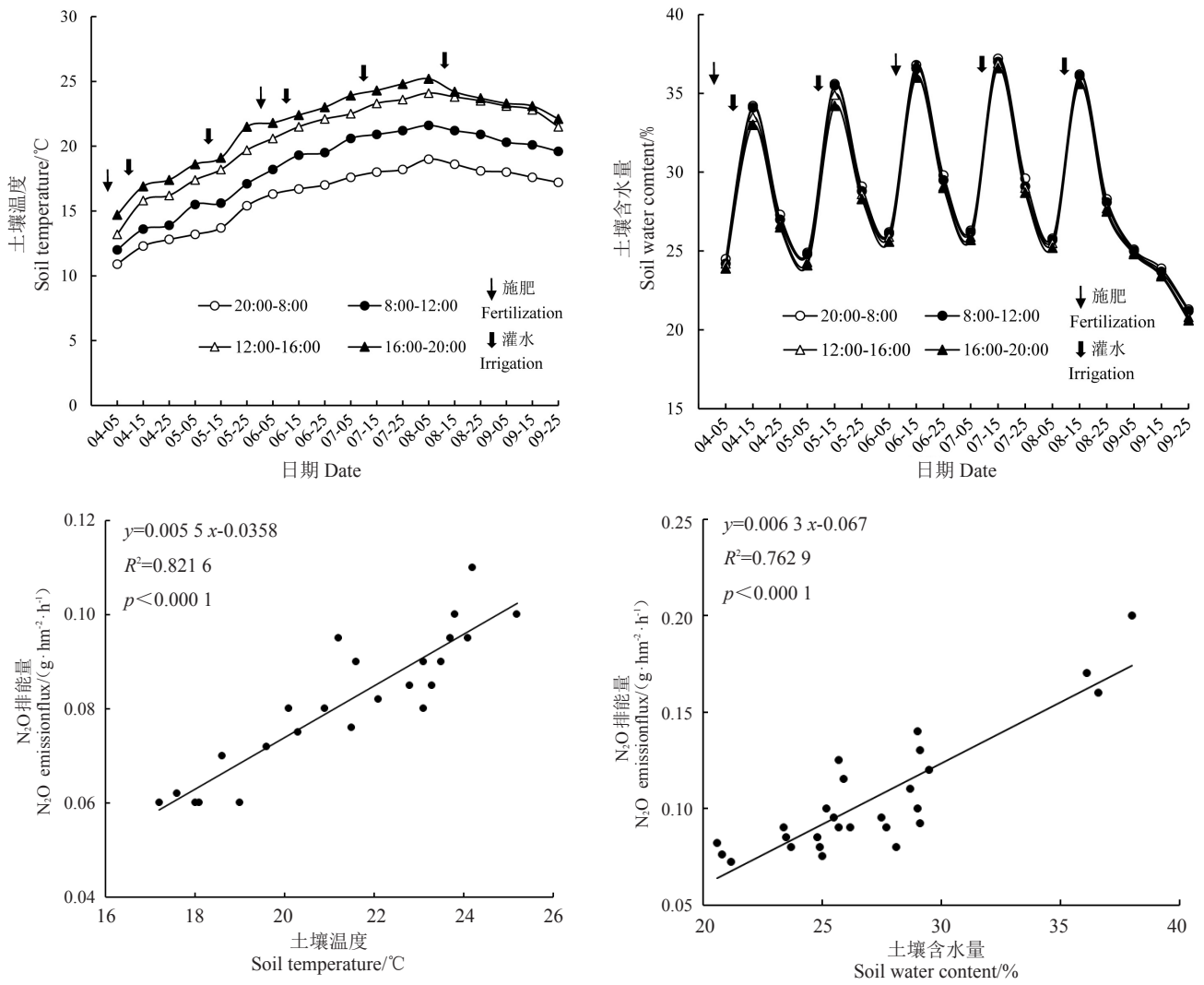

图3 土壤温度与含水量对土壤N_2O排通量的影响

Fig. 3 Effects of soil temperature and water content on soil N_2O flux

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通量的增大，对土壤含水量与N_2O排通量进行回归分析表明，土壤N_2O排通量呈现显著的正相关（$p < 0.001$）。‘库尔勒香梨’园中，土壤温度、土壤含水量的升高会加快土壤N_2O排通量，其中主控因子为土壤温度，其次为土壤含水量。

2.3 ‘库尔勒香梨’园^{15}N肥料排放$^{15}N_2O$的Ndff

Ndff可反映‘库尔勒香梨’园土壤施入^{15}N尿素后，^{15}N尿素对土壤中氮素气态损失的贡献率。如图4所示，在‘库尔勒香梨’4—9月内，随时间的推移土壤排放$^{15}N_2O$的Ndff值呈现出波动式下降。在施基肥后的第4天（4月5日）每个时间段$^{15}N_2O$的Ndff值均明显增加，其中$^{15}N_2O$的Ndff值最大峰值（1.12%）出现在下午（16:00—20:00），在追施肥后的第4天（6月5日）每个时间段$^{15}N_2O$的Ndff值再次出现高峰，其中$^{15}N_2O$的Ndff值次峰值（1.09%）出现在下午（16:00—20:00）。表明在‘库尔勒香梨’园土壤中施入^{15}N尿素后，^{15}N尿素对土壤N_2O贡献率明显增加。在‘库尔勒香梨’4—9月内，土壤排放$^{15}N_2O$的Ndff值与土壤N_2O排通量变化趋势相似，对土壤N_2O排通量与Ndff值进行回归分析发现，土壤N_2O排通量可解释81.83%的$^{15}N_2O$排放，土壤N_2O排通量与Ndff值呈现显著的正相关（$p < 0.001$）。土壤温度和土壤含水量与土壤N_2O排通量呈显著正相关（$p < 0.001$），所以$^{15}N_2O$的Ndff值在一定程度也会受到土壤温度和土壤含水量影响。一天内$^{15}N_2O$的Ndff值变化表现为下午（16:00—20:00）＞中午（12:00—16:00）＞上午（8:00—12:00）＞夜间（20:00—8:00），这主要因为随着气温的升高土壤温度也随之升高，促进硝化与反硝化作用，进而加快了$^{15}N_2O$的排放。但在每个月的10日灌水后，土壤排放$^{15}N_2O$的Ndff值并没有因土壤含水量的变化而发生显著变化，表明灌水对^{15}N尿素排放的$^{15}N_2O$影响不明显。

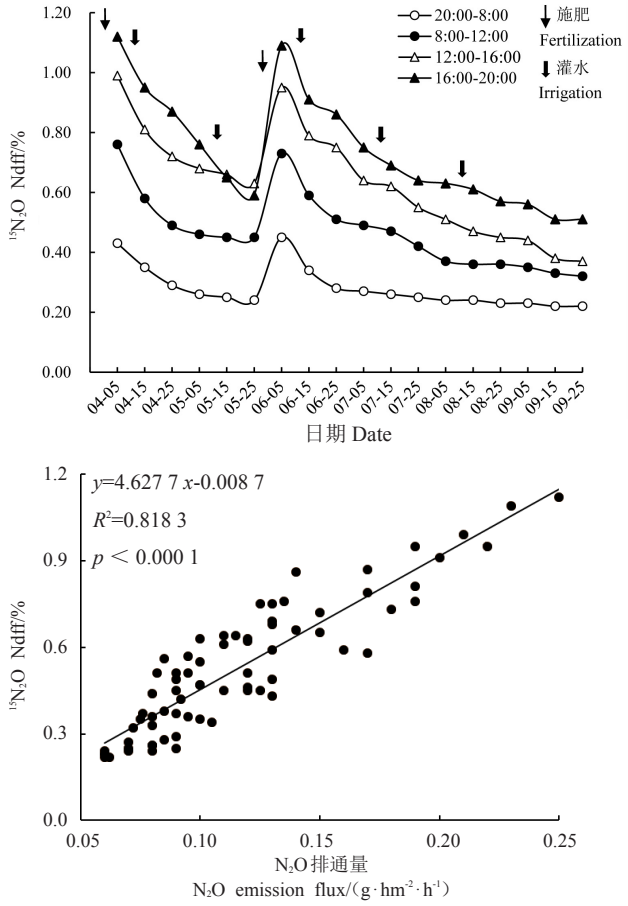

图4 ‘库尔勒香梨’园^{15}N肥料排放N_2O的Ndff

Fig. 4 The Ndff of N_2O emissions from ^{15}N fertilizer in ‘Kuerlexiangli’ pear garden

2.4 ‘库尔勒香梨’园土壤N_2O损失量与损失率

由表1可知，在‘库尔勒香梨’整个生育期内，‘库尔勒香梨’园氮素的N_2O的排放总量为每株1.021 7 g其中来源于^{15}N尿素N_2O排放量为每株0.005 4 g，损失率为0.02%，源于土壤原有氮素的N_2O排放量为每株0.893 3 g，占N_2O总损失量的87.43%，而肥料的损失量为每株0.128 4 g，仅占总损失量的12.57%。‘库尔勒香梨’果园N_2O排放主要源于土壤原有氮素的N_2O排放，因此会加快土壤原有氮素的损失，从而减少土壤氮存量。

表1 ‘库尔勒香梨’果园土壤N_2O损失量与损失率

Table 1 The Loss and loss rate of soil N_2O in ‘Kuerlexiangli’ pear orchard

损失类型 Loss type	损失量 Loss amount/(g·hm^{-2})	损失率 Loss rate/%	损失比率 Loss ratio/%
肥料（^{15}N尿素）Fertilizer	0.128 4（0.005 4）	0.02	12.57（0.53）
土壤 Soil	0.893 3	-	87.43
总量 Total amount	1.021 7	-	100.00

3 讨　论

‘库尔勒香梨’生产中一般都采用施肥后灌水，随着‘库尔勒香梨’生育期的推移，温度不断上升，降雨逐渐增多，使施入的氮肥极易发生硝化反硝化作用，导致氮素的大量气态损失[21]。本研究利用^{15}N示踪结果表明，‘库尔勒香梨’施用^{15}N尿素后，施肥、灌水和温度的变化对土壤N_2O排放有着不同程度的影响。库尔勒香梨园在4月1日和6月1日进行基施肥

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和追施肥处理，2~5 d内^{15}N尿素迅速水解为铵态氮，也为硝化作用提供了充足的底物，所以此时‘库尔勒香梨’园土壤N_2O排通量和累积量、Ndff值均达到峰值，与陈雪双等[13]在山核桃上和张蛟蛟等[14]在板栗上的研究结果一致。基肥的N_2O的排通量和累积量均明显高于追肥，说明施肥量较多时N_2O的排通量和累积量也越多，但来源于^{15}N尿素的$^{15}N_2O$的Ndff值，在基肥和追肥并无明显差异，说明施肥量对土壤中原有氮素N_2O的排通量影响显著，但对^{15}N尿素贡献的N_2O无明显影响。无论是基肥还是追肥时期，与前人研究相比[22-23]，‘库尔勒香梨’园土壤N_2O累积量较少，可能是由于沟施覆土的基肥和追肥方式比基肥撒施后旋耕更能有效减少N_2O的排放[21,24]。

N_2O排放与土壤含水量密切相关，当土壤含量水量与田间持水量相当时，N_2O排放速率最快，当土壤含量水量大于田间持水量时，反硝化作用变成为N_2O排放的主导因素；土壤含量水量小于田间持水量时，硝化作用强烈，促进N_2O排放[25-26]。王立刚等[27]认为，不同农田系统中N_2O排放通量均与土壤含水量呈正相关，其棉花地和休闲地与土壤含水量相关性不显著，冬小麦/夏玉米地与土壤含水量相关性显著。在本研究中，土壤含水量与土壤N_2O排通量呈显著正相关（$p < 0.001$），但对^{15}N尿素排放的$^{15}N_2O$影响不明显，说明4—8月的10日进行灌水处理，主要影响了土壤中原有氮素的N_2O排通量。在5、7、8月的15日对试验区进行监测后获得N_2O的累积量发现比月初（5日）和月末（25日）都相对较高，说明在这种干湿交替的过程中加快了土壤N_2O排放，这与前人研究一致[14,28-29]。

有研究结果表明，硝化微生物活动的最适温度范围是25~35 ℃，温度稍低或者稍高（＜5 ℃或＞40 ℃）时硝化作用均被抑制[30]。在这合适的温度范围内，硝化作用产物比N_2O/NO_3^-随温度的升高而增加，N_2O排放更多。本研究条件下，土壤N_2O排通量与$^{15}N_2O$的Ndff值变化趋势表现为下午（16:00—20:00）＞中午（12:00—16:00）＞上午（8:00—12:00）＞夜间（20:00—8:00），这与一天内土壤温度变化变化趋势一致，说明温度是影响N_2O排放的一个重要因素。徐文彬等[31]研究发现，温度是影响土壤N_2O日变化规律的主控因子，并与土壤N_2O存在一定的正相关关系。本研究也有类似结果，土壤温度对$^{15}N_2O$的Ndff值有明显影响，且与土壤N_2O排通量呈显著正相关（$p < 0.01$），孙向阳等[32]对林地土壤N_2O排放监测发现，土壤N_2O排放的季节性较明显，表现为夏季最高，春秋季次之，冬季最低甚至出现负值。在本研究中，N_2O排放并未随着季节变化，表现为春季最高，夏秋季次之，这种变化主要源于其它重要影响因子的作用，比如施肥与水分作用的影响大于温度时，温度的作用就不明显[33-34]。‘库尔勒香梨’园土壤的N_2O排放受多种因素的影响，这些因素间还可能存在一定的耦合作用，其中的机理有待进一步研究。

4 结 论

（1）在施基肥和追施肥后的第4天下午（16:00—20:00），土壤N_2O的排通量出现排放高峰，分别为0.25 $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$和0.19 $g \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$，$N_2O$累积量于基肥和追施肥后的第4天夜间（20:00—8:00）出现高峰值，分别为1.560 $g \cdot hm^{-2}$和1.440 $g \cdot hm^{-2}$。土壤N_2O排通量一天内的表现为下午（16:00—20:00）＞中午（12:00—16:00）＞上午（8:00—12:00）＞夜间（20:00—8:00），土壤N_2O累积量表现为夜间（20:00—8:00）＞下午（16:00—20:00）＞中午（12:00—16:00）＞上午（8:00—12:00）。灌水后（5、7、8月的15日）土壤的N_2O排通量与累积量明显大于灌水前（5、7、8月的5日）。回归分析表明，‘库尔勒香梨’园施肥、温度和灌水对土壤N_2O排放有明显影响，土壤N_2O排放与土壤温度、土壤含水量之间均呈显著正相关（$p < 0.001$）。

（2）施肥、土壤温度对^{15}N尿素排放$^{15}N_2O$有明显影响，灌水对^{15}N尿素排放的$^{15}N_2O$影响不明显；源于土壤原有氮素的N_2O排放量为每株0.893 3 g，占总损失量的87.43%，而肥料的损失量为每株0.128 4 g，仅占总损失量的12.57%，因此‘库尔勒香梨’果园N_2O排放主要源于土壤原有氮素的N_2O排放。

参考文献 References:

[1] 王西娜，王朝辉，李华，王荣辉，谭军利，李生秀 . 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报，2016，53(5): 1202-1212.
WANG Xina，WANG Chaohui，LI Hua，WANG Ronghui，TAN Junli，LI Shengxiu. Dynamics and availability to crops of residual fertilizer nitrogen in upland soil[J]. Acta Pedologica Sinica，2016，53(5): 1202-1212.

[2] 巴闯，杨明，邹洪涛，蒋一飞，王丹蕾，陈松岭，虞娜，张玉玲 . 包膜/抑制剂联合调控对农田土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响[J].

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

农业环境科学学报，2018，37(6): 1291-1299.
BA Chuang，YANG Ming，ZOU Hongtao，JANG Yifei，WANG Danlei，CHEN Songling，YU Na，ZHNAG Yulin. Combined effects of coating/inhibitors on N_2O emission and ammonia volatilization in farmland soil[J]. Journal of Agro-Environment Science，2018，37(6): 1291-1299.

[3] 万伟帆，李斐，红梅，常菲，高海燕 . 氮肥用量和脲酶抑制剂对滴灌马铃薯田氧化亚氮排放和氨挥发的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2018，24(3): 693-702.
WAN Weifan，LI Fei，HONG Mei，CHANG Fei，GAO Haiyan. Effects of nitrogen rate and urease inhibitor on N_2O emission and NH_3 volatilization in drip irrigated potato fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers，2018，24(3): 693-702.

[4] 山楠，韩圣慧，刘继培，陈清，袁玉玲，王立刚，李虎 . 不同肥料施用对设施菠菜地 NH_3 挥发和 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学，2018(10): 1-19.
SHAN Nan，HAN Shenghui，LIU Jipei，CHEN Qing，YUAN Yuling，WANG Ligang，LI Hu. Emission of NH_3 and N_2O from Spinach field applied with different fertilizers[J]. Environment Science，2018(10): 1-19.

[5] LIU Jiandong，ZHOU Xiuji，YU Qiang. Numerical analysis of the source-sink alternation of composite global warming potential of the paddy ecosystem in the Yangtze Delta[J]. Science in China. Series D: Earth sciences，2003，46(4): 385-396.

[6] SMITH P，MARTINO D，CAI Z，GWARY D，JANZEN H，KUMAR P，MCCARL B，OGLE S，O'MARA F，RICE C，SCHOLES B，SIROTENKO O，HOWDEN M，MCALLISTER T，PAN G，ROMANENKOV V，SCHNEIDER U，TOWPRAYOON S，WATTENBACH M，SMITH J. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. Philosophical Transactions Biological Sciences，2008，363(1492): 789-813.

[7] 武其甫，武雪萍，李银坤，吴会军，闫鹏，张彦才，李若楠，王丽英，王小彬，蔡典雄 . 保护地土壤 N_2O 排放通量特征研究[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(4): 942-948.
WU Qifu，WU Xueping，LI Yinkun，WU Huijun，YAN Peng，ZHANG Yancai，LI Ruonan，WANG Liying，WANG Xiaobing，CAI Dianxiong. Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science，2011，17(4): 942-948.

[8] 孙光，李果，罗遵兰，吕凤春，邹源 . 旱地土壤 N_2O 排放特征及影响因素分析[J]. 土壤通报，2018，49(5): 1220-1224.
SUN Guang，LI Guo，LUO Zunlian，LV Fengchun，ZOU Yuan. Characteristics and Influencing Factors of N_2O Emission in Dryland Soil[J]. Chinese Journal of Soil Science，2018，49(5): 1220-1224.

[9] 李昊儒，郝卫平，梅旭荣，郭瑞 . 不同灌溉施肥措施对夏玉米-冬小麦农田 N_2O 排放和产量的影响[J]. 农业工程学报，2018，34(16): 103-112.
LI Haoru，HAO Weiping，MEI Xurong，GUO Rui. Effect of different irrigation and fertilization managements on N_2O emissions and yeild in summer maize-winter wheat field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34(16): 103-112.

[10] 王从，李舒清，刘树伟，邹建文 . 大气 CO_2 浓度和温度升高对稻麦轮作生态系统 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学，2018，51(13): 2535-2550.
WANG Cong，LI Shuqing，LIU Shuwei，ZOU Jianwen. Response of N_2O Emissions to Elevated Atmospheric CO_2 concentration and temperature in Rice-Wheat Rotation Agroecosystem [J]. Scientia Agricultura Sinica，2018，51(13): 2535-2550.

[11] 房福力，李玉中 . 基于同位素特征的华北平原菜地 N_2O 排放监测中取样时间的探讨[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(4): 978-987.
FANG Fuli，LI Yuzhong. Preliminary research on N_2O sampling time based on isotopomer signature measurement of vegetable fields in the North China Plain[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science，2016，22(4): 978-987.

[12] 郑欠，丁军军，李玉中，林伟，徐春英，李巧珍，毛丽丽 . 土壤含水量对硝化和反硝化过程 N_2O 排放及同位素特征值的影响[J]. 中国农业科学，2017，50(24): 4747-4758.
ZHENG Qian，DING Junjun，LI Yuzhong，LI Wei，XU Chunying，LI Qiaozheng，MAO Lili. The effects of soil water content on N_2O Emissions and Isotopic Signature of nitrification and denitrification[J]. Scientia Agricultura Sinica，2017，50(24): 4747-4758.

[13] 陈雪双，刘娟，姜培坤，周国模，李永夫，吴家森 . 施肥对山核桃林地土壤 N_2O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2014(5): 1262-1270.
CHEN Xueshuang，LIU Juan，JIANG Peikun，ZHOU Guomo，LI Yongfu，WU Jiasen. Effects of fertilization on soil N_2O flux in Chinese *Carya cathayensis* stands[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer Science，2014(5): 1262-1270.

[14] 张蛟蛟，李永夫，姜培坤，周国模，童雪峰，周高峰 . 施肥对板栗林地土壤 N_2O 通量动态变化的影响[J]. 生态学报，2013，33(16): 4939-4948.
ZHANG Jiaojiao，LI Yongfu，JIANG Peikun，ZHOU Guomo，TONG Xuefeng，ZHOU Gaofeng. Effect of fertilization on the dynamic of soil N_2O fluxes in Chinese chestnut stands[J]. Acta Ecologica Sinica，2013，33(16): 4939-4948.

[15] 马银丽，吉艳芝，李鑫，张琳，巨晓棠，张丽娟 . 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氨挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报，2012，21(2): 225-230.
MA Yinli，JI Yanzhi，LI Xin，ZHANG Lin，JV Xiaotang，ZHANG Lijuan. Effects of N fertilization rates on the NH_3 volatilization and N_2O emissions from the wheat-maize rotation system in north China plain[J]. Ecology and Environmental Sciences，2012，21(2): 225-230.

[16] 杨婷婷，王雪梅，陈波浪，柴仲平，丁阔，蒋大勇 . 施氮对库尔勒香梨树体氮素吸收和积累的影响[J]. 中国土壤与肥料，2016(4): 103-107.
YANG Tingting，WANG Xuemei，CHEN Boliang，CHAI Zhongping，DING Kuo，JIANG Dayong. Influence on nitrogen absorption and accumulation of Korla fragrant pear tree with applying nitrogen fertilizer[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China，2016(4): 103-107.

[17] 王前登，陈波浪，玉素甫江•玉素音，王成，柴仲平 . 库尔勒香梨春季施用 ^{15}N-尿素的吸收、分配和利用特性[J]. 应用生态学报，2018，29(5): 1443-1449.
WANG Qiandeng，CHEN Bolang，YUSUFUJIANG Yusuyin，WANG Cheng，CHAI Zhongping. Characteristics of absorption,

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

utilization,and distribution of ^{15}N-urea for Korla fragrant pear in spring[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(5): 1443-1449.

[18] 丁宁,彭玲,安欣,陈倩,姜翰,姜远茂 . 不同时期施氮矮化苹果对 ^{15}N 的吸收、分配及利用[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(2): 572-578.
DING Ning, PENG Ling, AN Xin, CHEN Qian, JIANG Han, JIANG Yuanmao. Absorption, distribution and utilization of dwarf apple trees to ^{15}N applied in different growth stages[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(2): 572-578.

[19] 王芬,田歌,刘晶晶,葛顺峰,姜远茂 . 富士苹果萌芽至新梢旺长期肥料氮去向和土壤氮库盈亏[J]. 应用生态学报,2018,29(3): 931-937.
WANG Fen, TIAN Ge, LIU Jingjing, GE Shunfeng, JIANG Yuanmao. Fate of fertilizer nitrogen and soil nitrogen pool budget of Fuji apple from germination stage to new shoot growing stage [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(3): 931-937.

[20] 陈倩,丁宁,彭玲,葛顺峰,姜远茂 . 供氮水平对矮化苹果 ^{15}N-尿素吸收、利用、损失及产量和品质的影响[J]. 应用生态学报,2017,28(7): 2247-2253.
CHEN Qian, DING Ning, PENG Ling, GE Shunfeng, JIANG Yuanmao. Effects of different nitrogen application rates on ^{15}N-urea absorption, utilization, loss and fruit yield and quality of dwarf apple[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(7): 2247-2253.

[21] 谢勇,荣湘民,张玉平,何欣,石敦杰,刘强 . 控释氮肥减量施用对春玉米土壤 N_2O 排放和氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报,2016,35(3): 596-603.
XIE Yong, RONG Xiangmin, ZHANG Yuping, HE Xin, SHI Dunjie, LIU Qiang. Effects of reduced CRNF applications on N_2O emissions and ammonia volatilization in spring maize soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(3): 596-603.

[22] 苏成国,尹斌,朱兆良,沈其荣 . 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报,2003,14(11): 1884-1888.
SU Chengguo, YIN Bing, ZHU Zhaoliang, SHEN Qirong. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1884-1888.

[23] 李宗新,王庆成,刘开昌,董树亭,王空军,张吉旺,刘春晓 . 不同施肥模式下夏玉米田间土壤氨挥发规律[J]. 生态学报,2009,29(1): 307-314.
LI Zongxin, WANG Qingcheng, LIU Kaichang, DONG Shuting, WANG Kongjun, ZHANG Jiwang, LIU Chunxiao. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(1): 307-314.

[24] 李鑫,巨晓棠,张丽娟,万云静,刘树庆 . 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.
LI Xin, JV Xiaotang, ZHANG Lijuan, WAN Yunjing, LIU Shuqing. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(1): 99-104.

[25] 颜晓元,施书莲,杜丽娟,邢光熹 . 水分状况对水田土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报,2000(4): 482-489.
YAN Xiaoyuan, SHI Shulian, DU Lijuan, XING Guangxi. N_2O emission from paddy soil as affected by waters regime[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000(4): 482-489.

[26] KISSEL D E, CABRERA M L, VAIO N, CRAIG J R, REMA J A, MORRIS L A. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(5): 1744-1750.

[27] 王立刚,李虎,邱建军 . 黄淮海平原典型农田土壤 N_2O 的排放特征[J]. 中国农业科学,2008,41(4): 1248-1254.
WANG Ligang, LI Hu, QIU Jianjun. Characterization of Emissions of Nitrous Oxide from Soils of Typical Crop Fields in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1248-1254.

[28] 李香兰,徐华,蔡祖聪 . 水分管理影响稻田氧化亚氮排放研究进展[J]. 土壤,2009,41(1): 1-7.
LI Xianglan, XU Hua, CAI Zucong. Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy field:A Review[J]. Soils, 2009, 41(1): 1-7.

[29] 王少杰 . 黄土高原旱作覆膜玉米不同时期施氮效果及气态氮损失[D]. 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.
WANG Shaojie. Effects of nitrogen splits application to dry-land mulching maize on fate of nitrogen and gaseous nitrogen losses in the loess plateau[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of soil and water conservation and ecological environment, Ministry of Education), 2016.

[30] 孙波,郑宪清,胡锋,李辉信,孔滨,王帘里,隋跃宇 . 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响[J]. 环境科学,2009,30(1): 206-213.
SUN Bo, ZHENG Xianqing, HU Feng, LI Huixin, KONG Bin, WANG Lianli, SUI Yueyu. Effect of Temperature, Rainfall and Soil Properties on Farmland Soil Nitrification [J]. Environmental Science, 2009, 30(1): 206-213.

[31] 徐文彬,刘维屏,刘广深 . 温度对旱田土壤 N_2O 排放的影响研究[J]. 土壤学报,2002,39(1): 1-8.
XU Wenbing, LIU Weiping, LIU Guangshen. Effect of temperature on N_2O emission from subtropical upland soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 1-8.

[32] 孙向阳,徐化成 . 北京低山区两种人工林土壤中 N_2O 排放通量的研究[J]. 林业科学,2001(5): 57-63.
SUN Xiangyang, XU Huacheng. Emission flux of nitrous oxide from forest soils in beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 2001(5): 57-63.

[33] 徐新超,伏广农,谢小茜,张新明 . 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.
XU Xinchao, FU Guangnong, XIE Xiaoqian, ZHANG Xinming. Main influence factors and mechanisms of N_2O emissions in agricultural soils[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(11): 171-176.

[34] 胡晓航,周建朝,王秋红,王孝纯 . 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.
HU Xiaohang, ZHOU Jianchao, WANG Qiuhong, WNAG Xiaochun. Effects of temperature,water content,and fertilization on transformation and transportation of nitrogen in the black soil with sugar beet(*Beta vulgaris* L.)[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 82-88.

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net