

氮素调控对冻融过程中土壤 N_2O 排放的影响

王风, 白丽静, 张克强, 黄治平, 杨鹏, 张金凤

(农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:应用室内冰柜模拟冻融过程, 研究了不同氮素形态(铵态氮、硝态氮和酰胺态氮)和浓度(40、200 和 800 mg/L)对潮土 N_2O 排放通量的影响。结果表明, 随土壤冻结时间的延长 N_2O 排放通量缓慢降低, 土壤融化初期出现一个土壤 N_2O 排放通量高峰, 而后随土壤逐渐融化的进行 N_2O 排放通量缓慢升高。3 种氮素浓度条件下, 铵态氮、硝态氮和酰胺态氮冻融过程中土壤平均 N_2O 排放通量分别为 119.01、205.28、693.95 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 611.61、1084.40、1820.02 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 和 148.22、106.13、49.74 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 而对照处理仅为 100.35 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。随氮素浓度的增加, 铵态氮、硝态氮源土壤 N_2O 累积排放通量分别比对照增加 17.49%、40.09%、425.67% 和 563.38%、915.28%、1458.6%, 且施加的浓度越高累积排放量越大, 但达到稳定 N_2O 排放通量的时间向后推移。随浓度增加酰胺态氮处理土壤 N_2O 排放通量随浓度增加而降低。建议潮土越冬水中铵态氮和硝态氮浓度应分别小于 200 mg/L 和 40 mg/L, 酰胺态氮的浓度不限, 从而减少土壤 N_2O 的排放。

关键词:冻融过程; 铵态氮; 硝态氮; 酰胺态氮; N_2O 排放通量

中图分类号: X144; S154 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)11-3142-04

Effects of Nitrogen Application on N_2O Flux from Fluv-aquic Soil Subject to Freezing and Thawing Process

WANG Feng, BAI Li-jing, ZHANG Ke-qiang, HUANG Zhi-ping, YANG Peng, ZHANG Jin-feng

(Institute of Agro-Environmental Protection, Ministry of Agriculture of China, Tianjin 300191, China)

Abstract: The experiment was conducted to investigate the effects of different forms of nitrogen application (ammonium, NH_4^+-N ; nitrate, NO_3^--N ; and amide- N , NH_2-N) and different concentrations (40, 200 and 800 mg/L) on N_2O flux from the fluv-aquic soil in a lab-simulated freezing and thawing process. N_2O flux slowly decreased with soil freezing, and then increased slowly with soil thawing, reaching a peak at the initial thawing stage. The average N_2O fluxes with addition of NH_4^+-N , NO_3^--N and NH_2-N are 119.01, 611.61 and 148.22 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ respectively at the concentration of 40 mg/L; 205.28, 1084.40 and 106.13 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ at the concentration of 200 mg/L; 693.95, 1820.02 and 49.74 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ at the concentration of 800 mg/L. The control is only 100.35 $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. N_2O flux with addition of NH_4^+-N and NO_3^--N increased with increasing concentration, ranging from 17.49% to 425.67% for NH_4^+-N , and 563.38% to 1458.6% for NO_3^--N compared with control. There was a time lag achieving stable N_2O emission flux with concentration increase. In contrast, by adding NH_2-N to soil, N_2O flux decreased with increasing concentration. In sum, inorganic nitrogen such as NH_4^+-N or NO_3^--N fertilizer incorporated in soil enhanced the cumulative N_2O flux from the fluv-aquic soil relative to amide- N . This study suggested that ammonium and nitrate concentration in overwintering water should be less than 200 mg/L and 40 mg/L in order to reduce N_2O emissions from soil, regardless of amide- N .

Key words: freezing and thawing process; NH_4^+-N ; NO_3^--N ; amide- N ; N_2O flux

氧化亚氮(N_2O)是温室气体的重要组成部分之一, 而土壤是 N_2O 的主要排放源, 占全球每年排放总量的 35% 左右。目前, 国内关于土壤 N_2O 的研究主要集中在以下两方面: 一是区域及不同农田生态系统 N_2O 的排放特征研究^[1~3]。二是排放影响因素的研究, 主要针对温湿度、氮肥形态和浓度等因素进行研究, 通常认为土壤 N_2O 的排放与施氮量和灌溉量高度相关^[4, 5]。硝态氮肥能够提高土壤反硝化速率, 但也有关于施铵态氮肥土壤 N_2O 排放量显著高于硝态氮肥的结论^[6]。不同肥料类型对土壤 N_2O 排放的影响已经有一些结论^[7, 8]。这些研究多集中在作物

生长季节, 而忽视了冻融期氮素形态对土壤 N_2O 排放的影响^[9, 10]。

冻融作用作为一种自然现象普遍存在于中、高纬度及高海拔地区^[11, 12]。冻融过程驱动土壤水分再分布, 造成微域土壤颗粒表面被冰膜^[13], 使土粒处于缺氧环境, 利于土壤微生物进行反硝化作用产生 N_2O , 同时冰膜也阻碍 N_2O 的释放^[14], 土壤融冻

收稿日期: 2008-12-27; 修订日期: 2009-03-02

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划项目(2006BAD17B02); 公益性科研院所基本科研业务专项; 农业部“948”项目(2008-Z10)

作者简介: 王风(1982~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为农田生态, E-mail: wangfeng_530@163.com

后 N_2O 得以充分排放^[15-17], 随冻结持续时间和冻融循环次数的增加融冻期 N_2O 的排放量增加^[18], 排放的 N_2O 不仅来源于表层土壤而且来源于下层土壤扩散^[14, 19]. 冻融作用改变土壤团聚体稳定性^[20], 土壤团聚体可能增加也可能减少^[21], 对于释放或包裹氮素和 N_2O 至关重要. 同时冻融作用改变土壤微生物的种群结构、数量以及生存环境^[22], 直接导致对氮素形态利用性的变化. Ludwig 等^[23] 发现俄罗斯苔原土壤因缺少反硝化底物硝态氮无 N_2O 的排放. 本研究着重分析了 3 种氮素形态和浓度对冻融过程中土壤 N_2O 排放通量的影响, 以期减少 N_2O 温室气体排放和合理进行越冬水灌溉施肥技术提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土样于 2008 年 8 月采集自天津市西青区杨柳青镇耕层土壤. 该地区气候介于大陆性气候和海洋性气候之间, 四季变化明显. 年平均气温 $11.0 \sim 12.5^\circ\text{C}$, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温始于 3 月上旬, 终于 11 月下旬, 多年平均降水量 577.8 mm, 年无霜期约为 180~190 d. 作物种植制度为冬小麦-夏玉米轮作, 采样时作物为夏玉米. 供试土壤为潮土, 耕层容重为 1.39 g/cm^3 , 田间持水量为 40.8%, 砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 62.2%、29.5% 和 8.3%, 土壤质地为砂壤土 (美国制); 耕层基础肥力全氮 0.66 g/kg , 铵态氮 4.94 mg/kg , 硝态氮 21.27 mg/kg , 全磷 0.60 g/kg , 速效磷 41.05 mg/kg , 有机质 1.12%, 土壤 pH 值为 7.98.

1.2 试验处理和测定方法

选择 750 mL 塑料广口瓶 30 个装入风干土样 150 g, 3 种氮素形态 (铵态氮 NH_4^+-N 、硝态氮 NO_3^--N 、酰胺态氮 NH_2-N , 分别以分析纯氯化铵、硝酸钾和尿素代表) 和 3 种溶液浓度 (40、200 和 800 mg/L) 随机区组设计, 共 9 个处理, 另外设置一个蒸馏水对照处理. 分别为处理 1: 铵态氮 40 mg/L; 处理 2: 铵态氮 200 mg/L; 处理 3: 铵态氮 800 mg/L; 处理 4: 硝态氮 40 mg/L; 处理 5: 硝态氮 200 mg/L; 处理 6: 硝态氮 800 mg/L; 处理 7: 酰胺态氮 40 mg/L; 处理 8: 酰胺态氮 200 mg/L; 处理 9: 酰胺态氮 800 mg/L; CK: 蒸馏水对照处理. 利用注射器分别将各溶液沿壁缓慢均匀加 60 mL (土样保持田间持水量), 所有处理重复 3 次. 加完溶液的塑料瓶开盖置于 24°C 恒温条件下培养 28 h, 之后将广口瓶放置于 -5°C 冰柜中, 将带有空

洞的木板套于广口瓶上, 木板四周与冰柜紧密接触以维持采集气体过程中广口瓶内温度, 分别在冷冻 0.5、2.5、6.5、13.5、23.5、43.5 h 加盖用 1 mL 一次性注射器采集气体 (以加盖时为 0 点, 分别于 0、10、20、30 min 采集), 之后置于 24°C 恒温室内融化, 分别在融化 1、3、6、11、20 h 加盖采集气体并上机测定.

应用岛津 GC-2010 气相色谱测定 N_2O 气体, 柱温 70°C , 转化器温度 300°C , ^{63}Ni 电子捕获检测器 (ECD) 检测, 温度为 300°C . 色谱柱为 80/100 目 PorapakQ 的填充柱. 载气为高纯 N_2 , 流速为 32 mL/min , 标气由国家标准物质研究中心提供.

数据处理和图表绘制在 Excel 2003 下完成, 试验结果方差分析和 Duncan's 新复极差比较分析在 SAS 9.0 中进行.

2 结果与分析

2.1 冻融过程土壤 N_2O 排放特征

图 1 是冻融过程中 10 个处理土壤 N_2O 排放通量均值随冻融过程变化. 可以发现, 随冻结时间的推移土壤 N_2O 排放通量逐渐降低, 并且降低趋势逐渐变缓, 说明微生物活性逐渐降低; 随后土壤 N_2O 排放通量基本稳定, 说明土壤已经达到稳定冻结阶段, 此时微生物活性最低; 在融化阶段开始不久, 出现一个 N_2O 排放通量高峰, 峰值的大小受到冻结持续的时间和冻融循环次数的影响. 该峰值出现的原因一方面是由于氧化亚氮还原酶在土壤融冻时活性增强^[24], 另一方面是因为土壤在融化后, 被封闭在土层内部的 N_2O 从土体中释放的缘故. Larsen 等^[25] 和 Priem 等^[16] 也证实随冻结持续时间的增加融冻期 N_2O 的排放量增加, 也有人认为土壤冻结导致一些细菌死亡^[25] 或土壤大团聚体破碎^[21] 释放出碳、氮营养物质, 这些营养物质被存活的微生物固持、利用, 增加土壤微生物的活性, 排放更多的 N_2O ^[22]. 这个

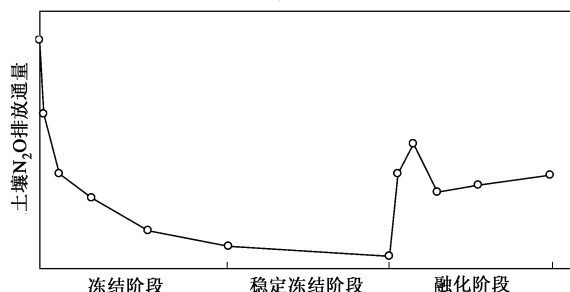


图 1 冻融过程土壤 N_2O 排放特征

Fig. 1 Sketch of N_2O flux in the freezing and thawing process

峰值之后,随着土样的融化,微生物活性缓慢增强,土壤 N₂O 排放通量逐渐增加。

2.2 氮素对冻融过程土壤 N₂O 排放通量的影响

3 种氮素形态对冻融过程中土壤 N₂O 排放通量的影响见图 2。总体变化趋势为:随氮素浓度的增加土壤达到稳定 N₂O 排放通量的时间在向后推移,例如 NH₄⁺-N 处理在 40、200 和 800 mg/L 时土壤达到稳定 N₂O 排放通量的冻结时间分别是 0.5、2.5 和 6.5 h。无论是在室温培养,还是在冻融过程中土壤 N₂O 排放通量总体呈现 NO₃⁻-N > NH₄⁺-N > NH₂-N。证实反硝化作用是冻融过程中土壤 N₂O 产生的主要途径,与 Sharma 等^[22] 和 Mirkved 等^[26] 的研究结果一致, Ludwig 等^[27] 发现反硝化作用对冻融过程中 N₂O 产生的贡献达 83%。研究过程中一个重要的现象是在 40 mg/L 氮素浓度条件下,出现 NH₂-N 处理 N₂O 排放通量高于 NH₄⁺-N 处理,丁洪等^[28] 在作物生长季节也得出相同结论。但通常来讲,CO(NH₄)₂ 需要在脲

酶作用下水解为 NH₄⁺-N,然后在硝化细菌作用下转化为 NO₃⁻-N,而 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 是微生物进行硝化或反硝化作用产生 N₂O 的 2 个重要途径,其可能的原因是土样冻结前 CO(NH₄)₂ 部分被分解,同时提高了土壤的 pH 值,但土壤 pH 值仍然在反硝化微生物最适宜的范围内,从而促进了 N₂O 的产生,但是需要进一步验证。

2.3 氮素对冻融过程土壤 N₂O 累积排放量的影响

氮素对冻融过程土壤 N₂O 累积排放量的影响见图 3。从中可以发现随铵态氮源和硝态氮源浓度的增加土壤 N₂O 累积排放量增加。40、200 和 800 mg/L 铵态氮处理分别比对照增加 17.49%、40.09% 和 425.67%,并且 800 mg/L 浓度下达到 5% 的显著水平;40、200 和 800 mg/L 硝态氮处理分别比对照增加 563.38%、915.28% 和 1458.6%,并且在 200 和 800 mg/L 浓度下达到 5% 的显著水平。酰胺态氮却随浓度增加土壤 N₂O 累积排放量降低,40、200 和 800 mg/L 处理 N₂O 累积排放量分别比对照减少 2.32%、36.41% 和 77.87%,并且 800 mg/L 浓度下达到 5% 的显著水平。可能的原因是硝化微生物和反硝化微生物适宜的最大 pH 值为 8^[29],而本研究中供试土壤基础 pH 值已经处于土壤反硝化的临界值,有研究发现尿素水解的前 4 d 土壤 pH 值持续增加 0.5^[6],土壤 pH 值的持续增加导致超出了最适宜的反硝化 pH 值范围,土壤 N₂O 的排放开始受到抑制,伴随尿素浓度的增大抑制效应越显著。

然而,将实验室模拟结果外推到田间情况时,植物的生命活动虽因较低的温度停止生长而对土壤 N₂O 排放影响较小,但不排除植物地上部枯体覆盖而抑制或延迟 N₂O 排放的可能,另外田间气象环境复杂,不同的土壤含水量、温度、风速、积雪覆盖等气

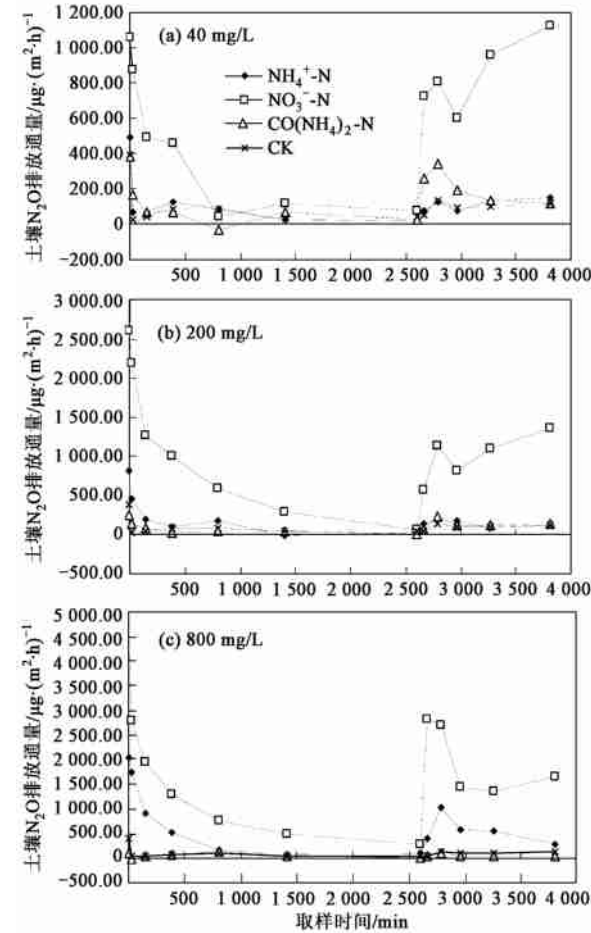
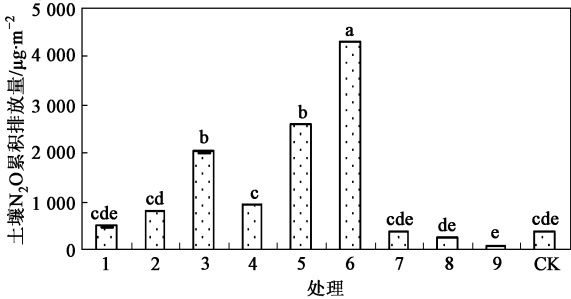


图 2 氮素形态对冻融过程中土壤 N₂O 排放通量的影响



相同的小写字母表示未达到 5% 显著水平

图 3 氮素对冻融过程土壤 N₂O 累积排放量的影响

Fig. 3 Effects of nitrogen on the N₂O accumulation emission flux in the freezing and thawing process

Fig. 2 Effects of nitrogen on the N₂O flux in the freezing and thawing process

象因素也会影响 N_2O 排放, 有待于对以上因素进行全面的研究。

3 结论

(1) 随土壤冻结的持续进行 N_2O 排放通量缓慢降低至稳定冻结排放通量, 在融化阶段初期, 出现一个土壤 N_2O 排放通量高峰, 而后随土壤融化的进行 N_2O 排放通量缓慢升高。

(2) 随氮素浓度的增加, 铵、硝态氮源土壤 N_2O 排放通量和累积排放量增加, 并且达到稳定 N_2O 排放通量的时间向后推移。随浓度增加酰胺态氮源土壤 N_2O 排放通量和累积排放量减少, 与酰胺态氮水解增大土壤 pH 值有关。在田间持水量条件下, 反硝化是土壤冻融过程中 N_2O 排放的主要途径。

(3) 从减少 N_2O 排放的角度, 潮土推荐的越冬水中铵态氮和硝态氮浓度分别不高于 200 mg/L 和 40 mg/L。酰胺态氮的浓度不限, 但应考虑完全水解后的 N_2O 排放通量。

参考文献:

- [1] 林杉, 冯明磊, 阮雷雷, 等. 三峡库区不同土地利用方式下土壤氧化亚氮排放及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1269-1276.
- [2] Zou J W, Huang Y, Lu Y Y, *et al.* Direct emission factor for N_2O from rice-winter wheat rotation systems in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(26): 4755-4765.
- [3] 丁琦, 白红英, 李西祥, 等. 作物对黄土性土壤氧化亚氮排放的影响——根系与土壤氧化亚氮排放[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2823-2831.
- [4] Hans J H, Scholz V, Kern J. Fertiliser induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(36): 8403-8411.
- [5] He F F, Jiang R F, Chen Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from an intensively managed greenhouse vegetable cropping system in Northern China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1666-1672.
- [6] 梁东丽, 方日尧, 李生秀, 等. 硝、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 67-72.
- [7] 秦晓波, 李玉娥, 刘克樱. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 143-148.
- [8] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
- [9] Freibauer A. Regionalised inventory of biogenic greenhouse gas emissions from European agriculture[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2): 135-160.
- [10] Groffman P M, Hardy J P, Driscoll C T, *et al.* Snow depth, soil freezing and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest[J]. Global Change Biology, 2006, 12(9): 1748-1760.
- [11] 赵其国, 王浩清, 顾国安. 中国的冻土[J]. 土壤学报, 1993, 30(4): 341-354.
- [12] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, *et al.* Freeze-thaw regime effects

on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(4): 641-654.

- [13] Wang L F, Cai Z C, Yan H. Nitrous oxide emission and reduction in a laboratory-incubated paddy soil response to pretreatment of water regime[J]. Journal of Environmental Sciences, 2004, 16(3): 353-357.
- [14] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(9): 1269-1275.
- [15] Mller C, Martin M, Stevens R J, *et al.* Processes leading to N_2O emissions in grassland soil during freezing and thawing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(9): 1325-1331.
- [16] Priem A, Christensen S. Natural perturbations, drying-wetting and freezing-thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(15): 2083-2091.
- [17] Zhu R B, Liu Y S, Ma E D, *et al.* Greenhouse gas emissions from penguin guanos and omithogenic soils in coastal Antarctica: effects of freezing-thawing cycles[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(14): 2336-2347.
- [18] Zhu R B, Liu Y S, Ma E D, *et al.* Nitrous oxide flux to the atmosphere from two coastal tundra wetlands in eastern Antarctica[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(10): 2437-2447.
- [19] Rver M, Heinemeyer O, Kaiser E A. Microbial induced nitrous oxide emissions from an arable soil during winter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(14): 1859-1865.
- [20] Ozas T, Fayetorbay F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1-8.
- [21] 王风, 韩晓增, 李良皓, 等. 冻融过程对黑土水稳性团聚体含量影响[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 899-900.
- [22] Shama S, Szele Z, Schilling R, *et al.* Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(3): 2148-2154.
- [23] Ludwig B, Teepe R, Lopes G V. CO_2 and N_2O emissions from gleyic soils in the Russian tundra and a German forest during freeze-thaw periods—a microcosm study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(12): 3516-3519.
- [24] Mller C, Kammann C, Ottow J C G, *et al.* Nitrous oxide emission from frozen grassland soil and during thawing periods[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2003, 166(1): 46-53.
- [25] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 21(3): 187-195.
- [26] Mirkved P T, D-rsch P, Henriksen T M, *et al.* N_2O emissions and product ratios of nitrification and denitrification as affected by freezing and thawing[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(12): 3411-3420.
- [27] Ludwig B, Wolf I, Teepe R. Contribution of nitrification and denitrification to the emission of N_2O in a freeze-thaw event in an agricultural soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004, 167(6): 678-684.
- [28] 丁洪, 王跃思, 项虹艳, 等. 灰泥土中不同氮肥品种反硝化损失与 N_2O 排放量的差异[J]. 生态环境, 2004, 13(4): 643-645.
- [29] Delwiche C C, Bryan B A. Denitrification[J]. Annual Review of Microbiology, 1976, 30: 241-262.