

太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究

姚志生^{1,2} 郑循华² 周再兴^{2,3} 谢宝华^{2,3}
梅宝玲^{2,3} 顾江新^{2,3} 王定勇¹

1 西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100083

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 2003年11月8日至2004年6月5日对太湖地区相邻的蔬菜地和稻麦轮作生态系统的冬小麦田, 在当季不施肥情况下的 N_2O 排放进行了田间同步对比观测, 分析了 N_2O 排放时间变化以及土壤湿度、土壤温度、土壤速效氮含量和农业管理措施对 N_2O 排放的影响。研究表明, 小麦播种前的耕翻(表层大约7 cm 土壤旋耕)处理不会明显改变稻麦轮作农田整个旱地阶段的 N_2O 排放总量, 但却使小麦生长季初期的 N_2O 排放明显减弱 69% ($p < 0.01$, p 为相关概率), 使小麦生长季后期的 N_2O 排放明显偏高 2.6 倍 ($p < 0.05$), 而对其余时间段的 N_2O 排放作用不明显。与长期实行稻麦轮作的旱地阶段农田相比, 由稻田改种蔬菜 20 多年的蔬菜地, 其整个观测期的 N_2O 排放总量比免耕处理小麦田同期的排放高 85% ($p < 0.05$), 比耕翻处理小麦田同期的排放高 99% ($p < 0.01$)。蔬菜地 N_2O 排放偏高的原因是土壤速效氮, 特别是铵态氮含量明显偏高 ($p < 0.01$)。

关键词 N_2O 排放 时间变化 控制因子 麦田 蔬菜地

文章编号 1006-9585 (2006) 06-0691-11 **中图分类号** X142 **文献标识码** A

Nitrous Oxide Emission from Winter Wheat and Vegetable Fields in the Taihu Region: A Comparison Case Study

YAO Zhi-Sheng^{1, 2}, ZHENG Xun-Hua², ZHOU Zai-Xing^{2, 3}, XIE Bao-Hua^{2, 3},
MEI Bao-Ling^{2, 3}, GU Jiang-Xin^{2, 3}, and WANG Ding-Yong¹

1 College of Resource and Environment, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

3 The Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on the contrast observations on the nitrous oxide (N_2O) emissions from the adjacent unfertilized vegetable field and winter wheat field of the rice-wheat rotation system in the Taihu region from 8 November 2003 to 5 June 2004, its temporal variation and the effects of soil moisture, soil temperature, available N contents and agriculture management practices were investigated and discussed. The results showed that spiral tillage by about 7cm deep in soil before winter wheat sowing had little significant effect on the total N_2O emission during the non-rice period of the rotation cycle, but it periodically impacted the N_2O emission fluxes. The tillage reduced the N_2O emission fluxes during the early period after wheat sowing by about 68% ($p < 0.01$) on average, increased the N_2O emission fluxes during the late period of the wheat season by about 2.6 folds ($p < 0.05$) on average, and had

收稿日期 2005-05-23 收到, 2006-07-03 收到修定稿

资助项目 国家杰出青年科学基金项目 40425010 和国家自然科学基金资助项目 40331014

作者简介 姚志生, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 从事环境污染化学研究。E-mail: zhishengyao@yahoo.com

little effect during the remaindering period. The total N_2O emission over the entire investigated period was significantly higher in the vegetable fields than that simultaneously observed in the non-tilled and tilled wheat fields by about 85% ($p < 0.05$) and about 99% ($p < 0.01$), respectively. This difference is most likely attributed to the significantly higher available nitrogen content, especially higher ammonium content in the soil of the vegetable fields ($p < 0.01$).

Key words N_2O emission, temporal variation, regulating factor, wheat field, vegetable field

1 引言

大气痕量气体 N_2O 被《联合国气候变化框架公约》的《京都议定书》列为仅次于 CO_2 和 CH_4 的管制温室气体。由于人类活动的影响,大气中 N_2O 的浓度(以体积分数表示)已由工业化以前的 0.27×10^{-6} 左右增至当今的 0.316×10^{-6} 左右,当前仍以每年 0.25% 的速率直线增长^[1],预计到 2050 年将增加到 $0.35 \times 10^{-6} \sim 0.4 \times 10^{-6}$ ^[1,2]。 N_2O 在对流层中化学性质较稳定,但其辐射活性却很强,单分子 N_2O 吸收红外辐射的能力约为 CO_2 的 110~200 倍^[1,3~5]。另外, N_2O 在大气中的平均寿命大约为 120 年,当其进入平流层后被光解为 NO,进而影响平流层 O_3 的浓度和分布^[6]。因此, N_2O 浓度升高对全球气候变暖和臭氧层的影响一直是国际关注的热点。

农田,尤其是旱田是全球重要的 N_2O 排放源。农田排放的 N_2O 约占全球每年排放 N_2O 的 24%^[1],约占人为排放源的 45%^[1,7]。农田土壤中, N_2O 主要产生于微生物参与下的硝化和反硝化作用。土壤微生物硝化和反硝化过程受各种物理、化学和生物因素的影响,因而影响硝化和反硝化作用的诸多因素,如土壤水分状况,土壤温度, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量,土壤有机质,耕作制度,以及作物的种植情况等等也影响土壤 N_2O 排放^[8~12]。

在 20 世纪 90 年代,中国农田因施肥而当年直接引起的 N_2O 排放量约为 $275 \times 10^9 \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (N),其中约 20% 来源于蔬菜地^[13]。由于缺乏蔬菜地 N_2O 排放实验研究结果,这一估计依据主要粮食作物农田的 N_2O 排放参数,因而,其存在很大的不确定性。随着我国农业产业结构的调整,大量的粮食作物农田已逐步改为菜地。蔬菜生长期短,产出量大,施肥和灌溉频繁且总量大,所

以由蔬菜种植引起的 N_2O 排放问题将可能会越来越突出。为此,我们通过对不施肥情况下稻麦轮作农田冬小麦生长季和相邻蔬菜地同期的 N_2O 排放进行田间对比观测研究,探讨相同气象和土壤条件下,耕作方式不同(麦田免耕和耕翻)和种植系统差异(长期实行稻麦轮作的麦田和稻田改制后 20 年来长期种植蔬菜的旱地)对 N_2O 排放的影响,为准确估算我国农田生态系统的 N_2O 排放提供科学依据。

2 材料与方法

2.1 田间试验处理

试验点位于江苏省无锡市锡山区安镇镇 ($31^\circ 37' \text{N}$, $120^\circ 28' \text{E}$) 的稻麦轮作田和相邻蔬菜地。供试蔬菜地由相同的稻麦轮作农田改制而成,20 多年来连续种植蔬菜。太湖地区属北亚热带季风气候,年降水量 1 100~1 200 mm,年平均温度约 16°C ,年日照时间 $> 2\,000 \text{ h}$,年无霜期 $> 230 \text{ d}$ 。供试稻麦轮作农田土壤为黄泥土,是太湖流域典型的水稻土类型,粘粒 ($< 0.005 \text{ mm}$) 含量 37%,耕作层厚度 $13.0 \pm 1.6 \text{ cm}$ 。小麦田土壤全 N 含量 $1.59 \pm 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $25.8 \pm 0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $1.20 \pm 0.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,总空隙度 $54\% \pm 2\%$ 。蔬菜地土壤的全 N 含量 $1.26 \pm 0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量 $20.7 \pm 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,容重 $1.30 \pm 0.03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,总空隙度 $44\% \pm 2\%$ 。

试验期为 2003 年 11 月 8 日到 2004 年 6 月 5 日 (210 d)。试验分设 3 个处理:小麦田耕翻处理(小麦播种前旋耕,深度为 7 cm 左右);小麦田免耕处理(小麦播种前不耕翻);蔬菜地处理(按照当地传统方式种植与管理蔬菜,种植每季蔬菜之前耕翻土壤 10 cm 左右)。所有处理观测期内均未施肥。每个处理均设 3 个空间重复。小麦田为长期稻麦轮作农田,试验前刚收割水稻。两个

小麦田处理的前茬作物均按当地常规方式进行完全相同的水肥管理。两个处理的冬小麦均于 2003 年 11 月 8 日播种, 2004 年 6 月 1 日收割。蔬菜地前茬种植辣椒, 并施尿素。2003 年 11 月 5 日移栽青菜 (*Brassica Chinensis* L.), 2004 年 2 月 3 日收割; 2004 年 2 月 25 日移栽茼蒿 (*Lactuca sativa* L.), 2004 年 5 月 16 日收割; 2004 年 5 月 21 日播种小白菜 (*Brassica campestris* L.), 2004 年 7 月 10 日收割。

2.2 观测方法

本试验采用静态暗箱法-气相色谱法观测 N₂O 的排放通量。每个重复设置一个固定的箱法观测位置, 直接观测面积的大小取决于采样箱底面积的尺寸。不锈钢采样箱底座 (小麦田的横截面积为 50 cm×50 cm, 蔬菜地的为 57 cm×57 cm) 长期埋于田间, 座壁插入土中约 20 cm, 每侧壁上距离地表 10 cm 以下开有 9 个直径 2 cm 的圆孔, 以利于水分、土壤动物、微生物、养分等侧向交流。箱座顶端有深、宽均为 3 cm 的密封水槽, 用于采样时与箱体密封。不锈钢采样箱 (小麦田的为 50 cm×50 cm×100 cm, 蔬菜地的为 57 cm×57 cm×100 cm) 外覆绝热材料, 温度最高时也能保证观测过程中箱内气温变化低于 3 °C。用静态密闭箱笼罩观测表面的土壤+植物大约 18 min, 期间每 6 min 用注射器从箱内抽取 60 mL 气体样品, 共取样 4 次, 并准确记录每次取样的时间和箱内气温。样品的 N₂O 浓度测定采用文献[14]描述的气相色谱方法。所用的是安装有电子捕获检测器 (ECD) 的气相色谱仪 (Agilent-4890D), 柱温为 55 °C, 检测器温度为 330 °C, 载气为纯度 99.999% 的 N₂, 载气流速为 25 mL·min⁻¹。N₂O 排放通量的计算公式如下:

$$F = \rho H \frac{dC}{dt} \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_0},$$

式中, F 为 N₂O 排放通量, ρ 为标准大气状态下 N₂O 的密度, H 为观测箱内气室高度, dC/dt 为采样期间箱内 N₂O 体积混合比浓度的变化速率, T 为采样时箱内温度, P 为采样时的气压, 取自实验地附近的自动气象站, P_0 为标准大气压。观测频率为每 3~4 d 采样 1 次, 每次均在北京时间 8:00~11:00 内进行, 采样后 10 h 之内完成样品分析。

在对 N₂O 排放进行观测的同时, 还同步地观测 8 cm 深度的土壤体积含水量和 5 cm 深度的土壤温度。用快速便携式测墒计 (MPKit-B, 南京艾格瑞生态检测技术有限公司出品) 测量土壤体积含水量, 并用经典的烘干失重法^[15] 对土壤测墒计的测定结果进行矫正, 矫正曲线为 $M=0.68m+19.6$ ($R^2=0.82$, $p<0.01$, $s=2.2\%$), 其中 m 为测墒计测定的土壤体积百分比含水量 (%), M 矫正后的土壤体积百分比含水量, R 为皮尔森相关系数, p 为相关概率, s 为矫正误差。另外, 每周用土钻对小麦田处理小区采集一次 0~10 cm 的表土层土壤混合样, 对蔬菜地每两周采一次混合样, 土样采集后进行冷藏, 分别采用 2 mol·L⁻¹ 的 KCl 溶液浸提—蒸馏定氮法和水浸提—离子色谱法测定土壤样品的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量^[15,16]。

不同处理间 N₂O 排放总量或平均排放通量的差异显著性采用单因子方差分析进行统计检验。比较不同处理间基于某一时段多次观测的差异显著性, 用重复测量设计的方差分析进行统计检验。

3 结果与讨论

3.1 N₂O 排放通量的季节变化及其环境控制

3.1.1 N₂O 排放通量的季节变化

图 1a 表明, 免耕处理小麦田的 N₂O 排放存在较明显的季节变化。较高的 N₂O 排放出现在小麦播种后的第 1 个月, 平均排放通量为 $87 \pm 21.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (以 N₂O-N 计, 下文亦同), 其余阶段平均排放通量只为 $12 \pm 2.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 明显低于第一个月 ($p<0.01$)。免耕处理 N₂O 日排放通量在观测期内的变异系数为 34%。对于耕翻处理小麦田, N₂O 排放季节变化规律不明显, 通量平均值为 $19 \pm 1.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 日排放通量在观测期内的变异系数为 10%。由于免耕处理在小麦生长季初期的 N₂O 排放明显高于同期的耕翻处理 ($p<0.01$), 导致免耕处理的日排放通量变异系数比耕翻处理偏大。

蔬菜的生育期较短, 整个观测期间经历了 3 种蔬菜的生育期。蔬菜地的 N₂O 排放通量极大值出现在观测初期及观测末期 (图 1b)。移栽青菜前的土壤耕翻和刚移栽后的浇水导致了观测初期

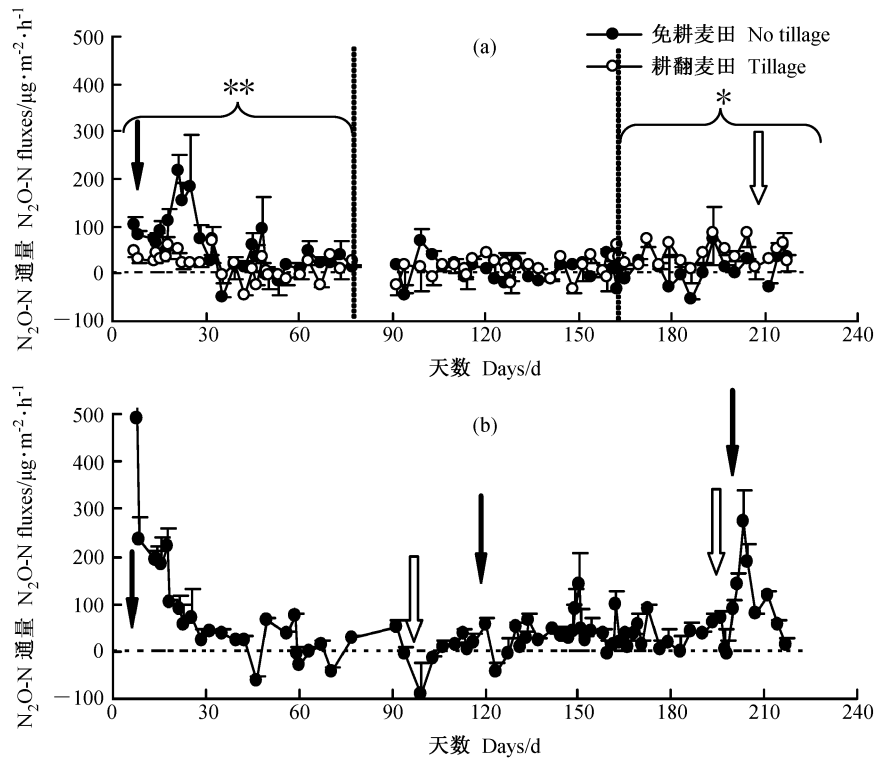


图1 小麦田和蔬菜地 N_2O 排放通量: (a) 免耕处理与耕翻处理小麦田; (b) 蔬菜地。数据点上的竖线为标准误差, ** 和 * 分别表示显著性水平 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 。实线箭头指示小麦或每季蔬菜的播种/移栽时间, 空心箭头指示小麦或蔬菜收割时间

Fig. 1 The N_2O emissions from the winter wheat and vegetable fields: (a) winter wheat fields; (b) vegetable fields. The vertical bars are standard errors. ** and * indicate a significance level of $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively. Solid arrows indicate the sowing or transplanting date. Empty arrows indicate the harvest date

的高 N_2O 排放。产生此高排放的原因可解释为: 1) 耕翻促进了矿化过程生成 NH_4^+ 和硝化作用生成 NO_3^- ; 2) 前茬施尿素可能造成土壤中还残存一部分 NH_4^+ 和 NO_3^- ; 3) 浇水 (为促进新移栽的菜秧尽快成活和返青, 移栽青菜后每天浇少量水) 促进了 NO_3^- 反硝化产生 N_2O [17]。这一解释得到了图 2 显示结果的支持: 观测初期蔬菜地土壤的 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量均相对较高, 尤其 NO_3^- 含量偏高更明显。在观测末期 (2004 年 5 月 22 日, 即 196 d 前后), 移栽小白菜之前的耕翻以及之后浇水也引起了一个明显的 N_2O 日排放高峰。蔬菜地观测期内的 N_2O 日排放通量变异系数为 22%, 介于免耕和耕翻小麦田 N_2O 日排放通量的变异系数之间。

另外, 在小麦田和蔬菜地, 都偶尔观测到了 N_2O 的吸收现象 (如图 1), 许多研究同样发现了这一现象 [18~20], 原因尚不清楚。

3.1.2 土壤湿度的影响

由图 1a 和图 3a 可知, 对于免耕处理小麦田

的整个观测期, N_2O 排放和表层土壤湿度没有明显的相关关系, 但二者却阶段性的显著相关。从小麦播种至 39 d, 如果不将降雨引起的 1 个 N_2O 爆发式排放峰值 (播种后 14 d) 考虑在内, N_2O 排放通量与土壤湿度呈显著负相关 ($p < 0.05$)。较高的土壤湿度 ($\geq 80\%$ WFPS (Water-Filled Pore Space)) 可能是产生这一阶段性显著相关的主要原因。

同样, 耕翻处理小麦田的 N_2O 排放与其表层土壤湿度 (图 1a 和图 3a) 之间也存在阶段性的显著相关。从小麦播种至 45 d, 土壤湿度平均为 61% WFPS (变化范围为 $45\% < m < 75\%$ WFPS), 明显比同期的免耕处理低 27% ($p < 0.01$)。此阶段的 N_2O 日排放通量与土壤湿度成显著正相关 ($p < 0.05$), 与同期免耕处理恰好相反。土壤湿度范围不同可能是导致这一阶段两处理之间相关性不同的原因。在小麦播种后 130~162 d, 土壤湿度变化范围为 70%~84% WFPS,

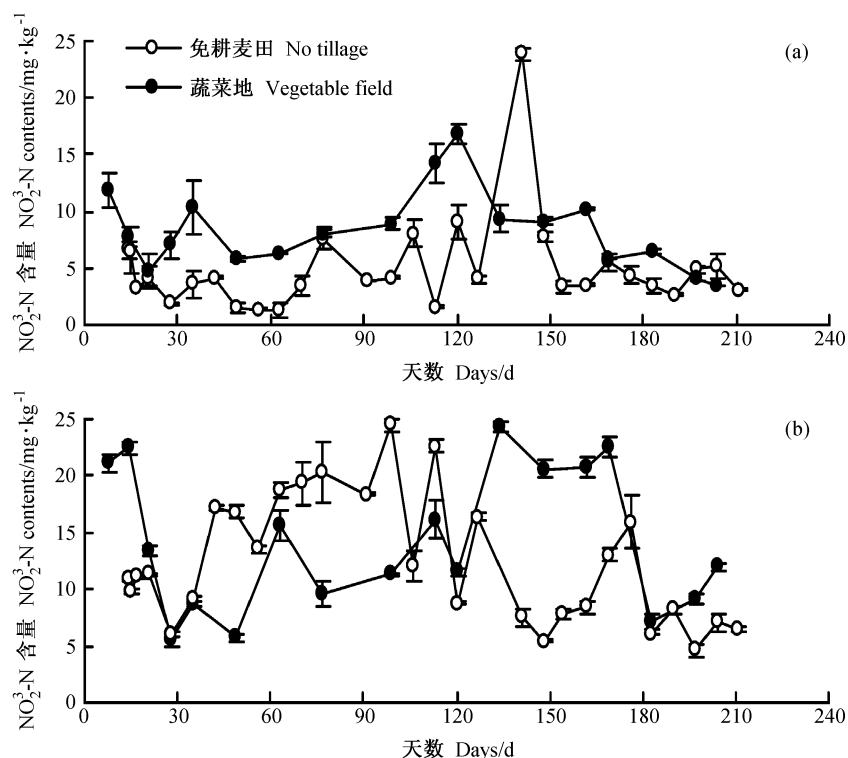


图2 小麦田(免耕处理)和蔬菜地(干土)(a) $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 (b) $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量(数据点上的竖线为标准误差)

Fig. 2 Soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$ contents in the vegetable and non-tilled winter wheat fields (dry soil): (a) $\text{NH}_4^+ \text{-N}$; (b) $\text{NO}_3^- \text{-N}$. The vertical bars are standard errors

约比同期免耕处理的土壤湿度低 7% ($p < 0.05$)。此阶段的 N_2O 排放通量随土壤湿度的增加而显著降低 ($p < 0.05$)。

耕翻处理不同阶段出现 N_2O 排放与土壤湿度之间相关性不一致的原因可用土壤中 N_2O 的产生机制来解释。Linn 和 Doran^[21] 研究指出, 土壤微生物发生反硝化作用的土壤湿度大于 60% WFPS。高土壤湿度不仅为反硝化细菌提供了适意的厌氧环境, 使反硝化细菌能够较为彻底地将 NO_3^- 还原为 N_2 , 而且使已产生的 N_2O 向大气中扩散受到限制, 增加了它在土壤中的滞留时间, 以至最后被进一步还原为 N_2 , 因而, 在较高的土壤湿度条件下, N_2O 排放随土壤湿度增加而减弱。当土壤湿度较低时, 氧气充足, 有利于硝化形成最终产物 NO_3^- , 但并不利于形成 N_2O , 因为只有当土壤湿度高到使 O_2 供应开始受到限制, 中间产物 NO_2^- 被作为替代 O_2 的电子受体被还原时, 硝化作用才形成 N_2O ^[17, 18, 22]。因而, 在相对较低的土壤湿度范围内, N_2O 排放随土壤湿度增加而增强。

以本研究中不施氮肥的稻麦轮作农田的旱地

阶段而言, N_2O 排放与土壤湿度的相关关系发生逆转的土壤湿度大约为 75% WFPS 左右; 在低于这一数值的一定土壤湿度范围内, N_2O 排放与土壤湿度呈正相关; 反之, 则呈负相关。但这一仅仅基于稻麦轮作农田小麦生长季的阶段性观测结果, 与基于整个稻麦轮作周期的观测结果^[17] 并不一致。后者给出导致 N_2O 排放与土壤湿度的相关关系发生逆转的土壤湿度大约为 99% WFPS^[17], 导致这一差异的原因尚待更深入研究和分析。

在第一茬蔬菜(青菜)的生长阶段, 土壤湿度为 75%~100% WFPS (图 3b), 平均为 91% WFPS, 其与 N_2O 排放之间没有显示出相关关系。但在第二茬蔬菜(茼蒿)的生长阶段, N_2O 排放与土壤湿度呈显著正相关, 其相关关系可以用指数函数 $F = 0.076e^{0.063m}$ ($R^2 = 0.27$, $n = 33$, $p < 0.01$) 来描述 (如图 4a), 其中 F 为 N_2O 排放通量 (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), m 为土壤湿度 (75% $< m < 100\%$ WFPS)。这一呈指数正相关的土壤湿度范围与基于对稻麦轮作周期的观测结果^[17] 一致, 但与本研究仅基于小麦生长季的观测得出的

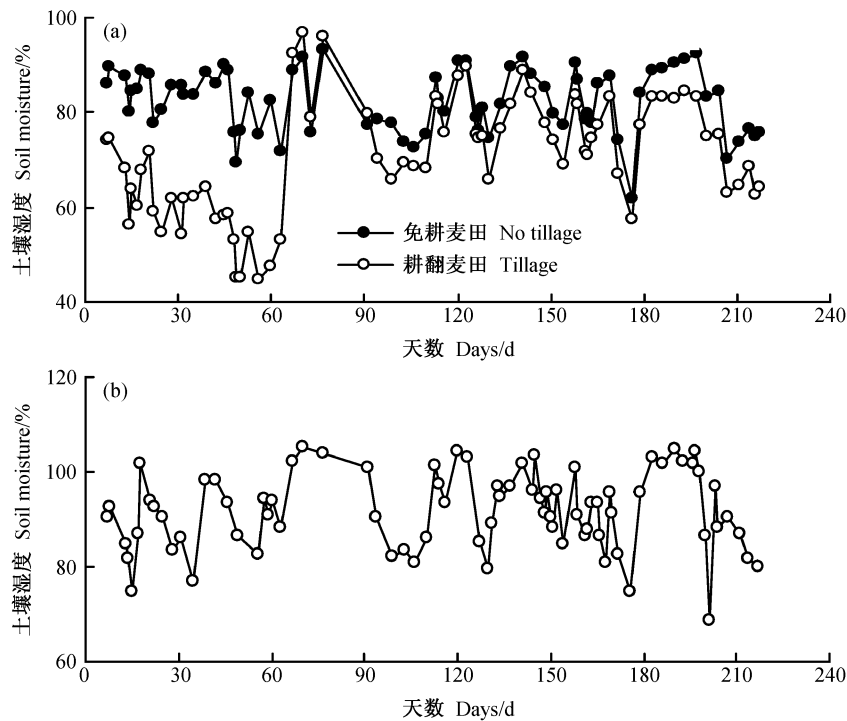


图3 土壤深度(8 cm)湿度(WFPS): (a) 小麦田; (b) 蔬菜地(测定误差数据未在图中给出)

Fig. 3 Soil (8 cm) moisture (WFPS): (a) Winter wheat fields; (b) vegetable fields. Standard errors are not shown

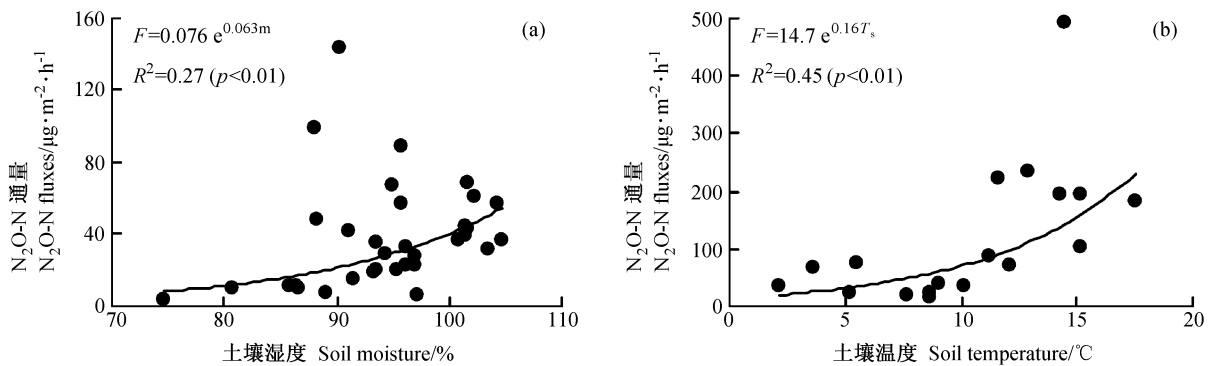


图4 蔬菜地 N_2O 排放与土壤湿度(WFPS)和土壤温度的关系: (a) 莴苣生长阶段; (b) 青菜生长阶段(测定误差数据未在图中显示)

Fig. 4 Relationship between N_2O emissions and soil moisture, soil temperature in the vegetable field: (a) during the growing period of *Lactuca sativa* L.; (b) during the growing period of *Brassica Chinensis* L. Standard errors are not shown

结果不一致。本研究只对第三茬蔬菜(小白菜)的苗期进行了观测。分析结果表明,此阶段 N_2O 排放通量与土壤湿度(80%~97% WFPS)呈显著正相关($R^2=0.96$, $p<0.01$)。

以上分析表明,在相同气候和母质条件下发育的土壤,因农业管理方式不同,可能改变了土壤结构和微生物组成,从而使适宜 N_2O 排放的土壤湿度范围发生变化。但对此问题,目前还不能给出很明确的解释,有待于进一步研究。

3.1.3 土壤温度的影响

分析免耕小麦田、耕翻小麦田和蔬菜地的土壤温度对 N_2O 排放的影响,结果(如表1)表明,从11月初小麦播种至53 d,免耕处理的 N_2O 排放随土壤温度的下降而相应下降,二者之间存在显著的指数正相关($p<0.01$)。在54~119 d阶段,土壤温度基本上都维持在5℃以下(图5a),这种温度条件不利于土壤微生物的硝化作用和反硝化作用^[23]。因此, N_2O 排放通量很低,且对温

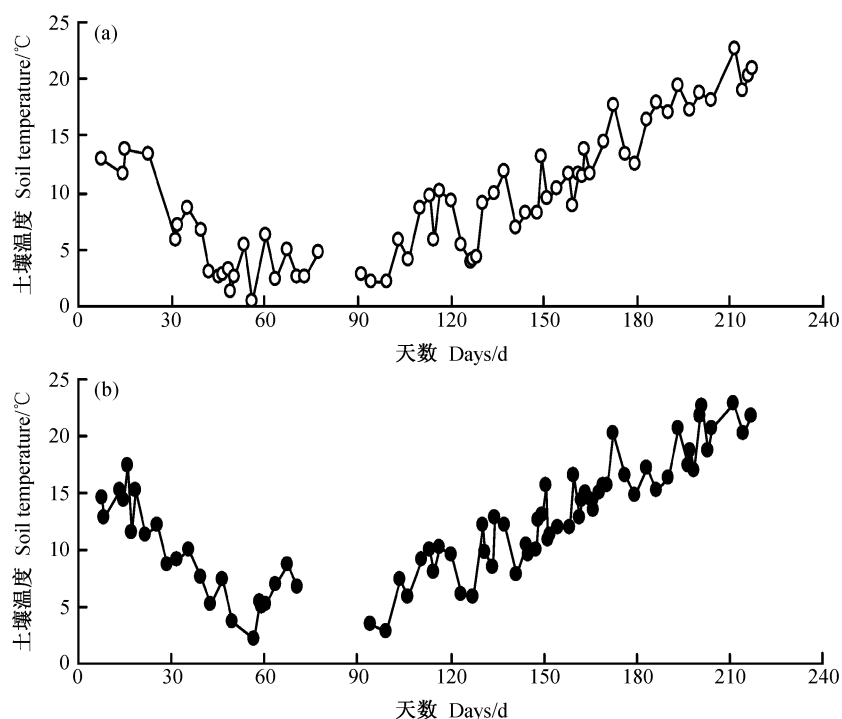


图5 土壤(深度5 cm)温度:(a)小麦田;(b)蔬菜地(测定误差数据未在图中给出)

Fig.5 Soil (5 cm) temperature: (a) winter wheat fields; (b) vegetable fields. Standard errors are not shown

度不敏感。在120 d至收割阶段,土壤温度高于 10°C ,且逐渐上升,有利于土壤中产生 N_2O ,但此阶段并未观测到明显的 N_2O 排放。这可能因为小麦田未施肥,土壤中养分不足,小麦开始返青到旺盛生长直至进入成熟期不断从土壤中吸收矿化氮,从而使用于土壤微生物硝化和反硝化作用生成 N_2O 所需的矿化氮很少。图2b的 NO_3^--N 变化佐证了这一观测结果。在此阶段,作为产生 N_2O 的主要过程——反硝化作用反应底物的 NO_3^--N ,其土壤含量明显比120 d之前的阶段偏低47% ($p < 0.01$)。这说明,在此阶段,影响免耕处理麦田 N_2O 排放的关键因素是土壤养分状况,而不是土壤温度或湿度。

如表1所示,在耕翻处理小麦田整个观测期的土壤温度变化范围($1^{\circ}\text{C} < t < 23^{\circ}\text{C}$)内, N_2O 排放通量随土壤温度的变化可用指数函数来描述。但 R^2 的取值说明,土壤温度变化仅能解释整个观测期19%的 N_2O 排放通量变化,这表明,除了微生物活性受温度控制以外,同时还有其他因子(如土壤湿度等)影响 N_2O 排放。

以上分析也说明,麦田土壤 N_2O 排放对土壤温度的依赖关系随不同的耕作方式(耕翻或免耕)

而不同。

对蔬菜地 N_2O 逐日排放通量和土壤深度(5 cm)温度(图1b与图5b)进行相关分析,结果(表1)表明:在第一茬蔬菜(青菜)的生长阶段(0~85 d), N_2O 排放(F)与土壤温度(T_s)呈显著正相关,前者对后者的依赖性可用指数函数 $F = 14.7 e^{0.16 T_s}$ ($R^2 = 0.45$, $n = 18$, $p < 0.01$)来描述(如图4b)。但土壤温度变化仅可以解释45%的 N_2O 排放变化。这表明,此阶段的 N_2O 排放同时还有其它因子影响。例如, 15°C 左右的实际观测值出现了一个偏离拟合曲线较大的排放通量奇异点(2003年11月8日),这是移栽青菜时对土壤进行耕翻引起的剧烈脉冲式 N_2O 排放^[24]。在蔬菜地整个观测期间,土壤温度与 N_2O 排放通量存在显著的相关性($p < 0.05$),但较低的 R^2 值说明,其他因素对 N_2O 排放也产生了很大影响,如每季蔬菜移栽前的耕翻和经常浇水。

从表1还可以看出,免耕处理小麦田、耕翻处理小麦田以及蔬菜地,具有不同的 N_2O 排放的 Q_{10} 值。Dobbie等^[25]报道,农田 N_2O 排放的 Q_{10} 值为2~8。本研究的结果与其基本一致,同时也说明,相同气候条件和母质上发育的土壤,其 N_2O

表 1 不同方法处理的 N_2O 排放通量 (F) 与土壤温度 (T_s) 的相关分析Table 1 Correlation between N_2O fluxes (F) and soil temperature (T_s) in the different treatments

处理 Treatment	时段 Duration	N	p	R^2	方程 Regression equations	Q_{10}
免耕小麦田 No tillage	0~53 d	20	<0.01	0.40	$F=19.9 e^{0.12T_s}$	3.3
耕翻小麦田 Tillage	0~210 d	57	<0.01	0.19	$F=15.3 e^{0.051T_s}$	1.7
蔬菜地 Vegetable field	0~85 d	18	<0.01	0.45	$F=14.7 e^{0.16T_s}$	5.0
	0~210 d	63	<0.05	0.09	$F=5.2 T_s+3.29$	—

注: N 为观测次数, p 为相关概率, R 为皮尔森相关系数, F 为 N_2O 排放通量 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), T_s 为 5 cm 土层深度的温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$), Q_{10} 为土壤温度变化 10°C 引起的 N_2O 排放变化的倍数

Note: N is the number of observations, p is correlation probabilities, R is the Pearson coefficients, F is N_2O flux ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), T_s is soil (5 cm) temperature ($^{\circ}\text{C}$), and Q_{10} is the folds of changes in N_2O emission fluxes due to a 10-degree change in soil (5cm) temperature

排放的土壤温度效应因农业管理措施不同 (如耕翻与否, 水旱轮作还是四季旱地, 种植大宗粮食作物还是蔬菜作物等) 而存在较大差异。

3.1.4 土壤 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 含量的影响

从图 1b 和图 2b 中可以看出, 蔬菜地 N_2O 排放与 NO_3^--N 含量具有比较一致的变化趋势 ($r=0.43$, $p<0.1$)。由此可以推测, 蔬菜地排放的 N_2O 可能主要来自于反硝化作用过程, 不过, 反硝化作用对蔬菜地 N_2O 排放的贡献大小, 还需深入研究。本研究中, 小麦田的 N_2O 排放与 NO_3^--N 含量没有表现出显著性相关关系, 同时, 无论蔬菜地还是小麦田, N_2O 排放与土壤 NH_4^+-N 含量之间都未表现出直接相关性。

N_2O 排放受到土壤湿度、土壤温度以及土壤速效氮含量共同控制, 在作物的不同生长时期, 主要控制因子不同。如果土壤的速效氮较低时, 即使土壤温度和土壤湿度比较适宜, 也不会发生明显的 N_2O 排放。同样, 在温度较低时, N_2O 排放随土壤速效氮增加而发生的变化也较小。如果土壤太干燥

而抑制了微生物的活动, 这时即使有充足的土壤速效氮或较适宜的温度条件, 土壤的 N_2O 排放也会很弱。

3.2 耕翻对小麦田 N_2O 排放通量的影响

如图 1a 显示, 整个小麦观测期可划分为从小麦播种后 0~60 d、61~154 d、155~210 d 3 个阶段, 其中第 3 阶段包括小麦收割后的裸地休闲期。在第 1 阶段, 免耕和耕翻处理的 N_2O 平均排放通量分别为 49 ± 7.3 和 $15 \pm 2.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 后者明显偏低 69% ($p<0.01$)。这是因为耕翻处理改变了土壤的透气透水性, 使土壤湿度比免耕处理下降了 29% ($p<0.01$), 通气状况相对较好, 易于形成硝化作用的最终产物 NO_3^- , 同时反硝化作用受到抑制, 因而影响了硝化和反硝化作用产生 N_2O 。对于免耕处理, 小麦生长季初期的土壤通气状况相对较差, 反硝化过程被促进, 可能导致产生更多中间产物 N_2O 。这一解释得到了土壤 NH_4^+ 和 NO_3^- 含量对比观测结果的支持。在小麦播种后的一个月 (图 6), 耕翻处理趋于使土壤 NH_4^+ 含量增高, 表明土

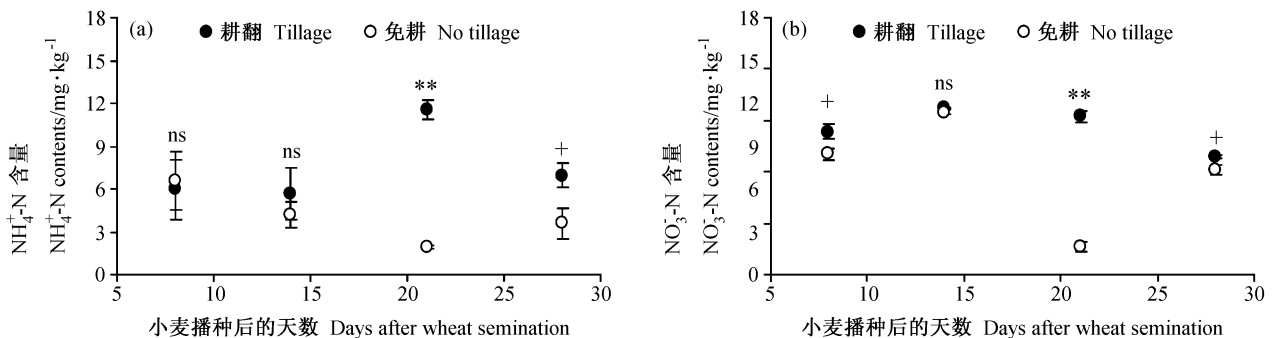


图 6 耕翻和免耕处理的 (a) NH_4^+-N 和 (b) NO_3^--N 含量对比观测结果 (干土) (数据点上的竖线段表示标准误差。*, **, +, ns 分别表示统计显著水平为 $p<0.01$, $p<0.05$, $p<0.10$ 和 $p\geq 0.10$)

Fig. 6 Comparisons of soil (a) NH_4^+-N and (b) NO_3^--N contents between the tillage and no-tillage treatments. The vertical bars are standard errors. *, **, +, ns indicate significance levels $p<0.01$, $p<0.05$, $p<0.10$ and $p\geq 0.10$, respectively

壤矿化过程因通气状况改善而被促进;同时,耕翻处理也趋于使土壤 NO_3^- 含量增高,表明土壤硝化作用过程也因土壤通气状况改善而被促进,但反硝化作用却可能因土壤通气状况改善而被抑制。封克和殷士学也曾报道过免耕土壤较常耕土壤能产生和排放更多的 N_2O ^[26]。在第2阶段,免耕和耕翻处理的 N_2O 平均排放通量分别为 10 ± 3.7 和 $11 \pm 6.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,二者差异不显著。这是因为耕翻对土壤透气状况的影响随着几次降雨、越冬期间的冻融交替以及小麦根系的穿透作用而逐渐减弱直到消失。在第3阶段,免耕和耕翻处理的 N_2O 平均排放通量分别为 10 ± 5.5 和 $36 \pm 3.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,后者显著偏高 2.6 倍 ($p < 0.05$)。在此阶段,免耕与耕翻处理小麦田的土壤湿度均相对较高(图3a),前者为 62%~92% WFPS(平均为 81% WFPS),后者为 57%~85% WFPS(平均为 74% WFPS),两者相差 10% ($p < 0.05$)。由前面的分析可知,在如此高的土壤湿度条件下,麦田的 N_2O 排放呈现随土壤湿度增高而降低的趋势。由此可见,免耕处理易于保持土壤水分可能是导致这一阶段其 N_2O 排放比耕翻处理偏低的原因。总之,小麦播种前的耕翻处理对 N_2O 排放的影响因生长阶段而异,即小麦生长季初期,耕翻减弱土壤—植物体系 N_2O 的排放,然后对土壤—植物体系 N_2O 排放的影响不明显,到小麦生长季中后期及收割后的裸地休闲阶段,耕翻又促进土壤—植物体系的 N_2O 排放。

在整个小麦田的观测期间,免耕和耕翻处理的 N_2O 平均排放通量分别为 21 ± 4.1 和 $19 \pm 1.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,季节排放总量分别为 1.1 ± 0.21 和 $1.0 \pm 0.06 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$,二者并没有明显差异。有报道^[27],在常规施肥水平下,免耕土壤 N_2O 排放量接近或高于耕翻土壤。本研究在不施肥小麦田的研究结果与文献^[27]报道的结果基本一致。

3.3 土壤-植物体系对 N_2O 排放通量的影响

蔬菜地在青菜生长期及其后的裸地阶段, N_2O 平均排放通量为 $37 \pm 9.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,莴苣生长期及其后的裸地阶段,平均排放通量为 $35 \pm 4.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于只对小白菜苗期进行观测,未计算 N_2O 平均排放通量。对于整个观测期,蔬菜地的 N_2O 平均排放通量为 $40 \pm 5.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,排放总量为 $2.1 \pm 0.25 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。

对比两种土壤—植物体系的 N_2O 排放,结果(图7)表明,蔬菜地的 N_2O 排放通量明显高于同期测定的免耕和耕翻处理小麦田,分别比免耕处理高 85% ($p < 0.05$),比耕翻处理高 99% ($p < 0.01$)。这种差异可从以下几方面来解释:1) 蔬菜地已经连续种植蔬菜 20 多年,和稻麦轮作田相比,因长期实行旱作,复种指数高,长期施肥量大,且以农家有机肥为主,导致土壤性质发生了改变,如土壤容重略偏高,土壤速效氮含量偏高等。如图2a所示,蔬菜地的 NH_4^+-N 含量明显高于免耕麦田 ($p < 0.01$),为土壤微生物的硝化反应提供了充足的底物,从而促进了蔬菜地的 N_2O 排放。2) 按照当地常规农田管理方式,稻麦轮作生态系统的冬小麦生长期不灌溉^[28],而同期的蔬菜地则多次浇水,这种频繁干湿交替也会增强土壤的 N_2O 排放^[22,29]。3) 蔬菜地的有机质含量和全氮含量均低于冬小麦田,可能导致蔬菜地土壤的可分解有机碳含量也相对较低。有报道,季节性 N_2O 平均排放通量与土壤有机碳含量及全氮含量成显著负相关^[30]。由于可分解有机碳是反硝化作用的电子供体,较高的可分解有机碳含量可能使反硝化作用的中间产物 N_2O 被进一步还原成 N_2 ,从而使冬小麦田的 N_2O 排放较低。

综上所述,对于相同土壤,不同种植制度的土壤—植物体系 N_2O 排放存在明显差异,与种植大宗粮食作物相比,长期种植蔬菜会显著增加土壤—蔬菜体系的 N_2O 排放。这表明,对于相同的农田土

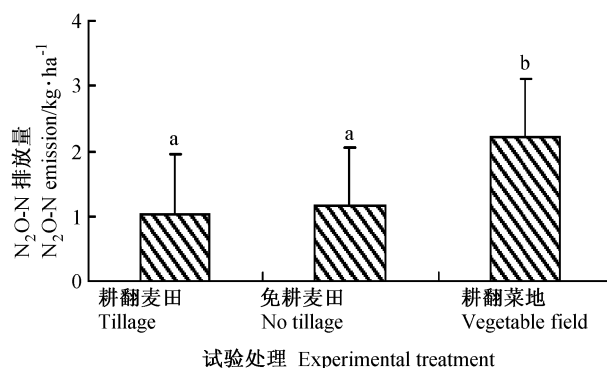


图7 小麦田与蔬菜地 N_2O 季节排放总量(柱形图上的竖线为标准误差。字母相同,表示差异不显著,不相同,表示差异显著 ($p < 0.05$))

Fig. 7 Seasonal N_2O emissions from the winter wheat and vegetable fields. The vertical bars are standard errors. Different superscripts indicate significant differences ($p < 0.05$), and same superscripts indicate no significant difference

壤, 长期实行不同种植制度, 可能会显著改变农田排放 N_2O 的潜力。

4 结论

(1) 土壤湿度、土壤温度以及土壤速效氮含量都影响土壤 N_2O 排放, 但在作物的不同生长期, 影响 N_2O 排放的主要控制因子不同。土壤温度效应因农业管理措施不同 (如耕翻与否, 水旱轮作还是四季旱地, 种植大宗粮食作物还是蔬菜作物等) 而存在差异, 在冬小麦田和蔬菜地分别观察到 1.7~3.3 和 5.0 的 Q_{10} 值。蔬菜地发生 N_2O 排放与土壤湿度正相关的土壤湿度范围 ($75\% < m < 100\%$ WFPS) 与基于对稻麦轮作周期的连续观测得出的结果一致, 但却与仅基于小麦生长季观测得出的结果不一致, 原因尚不清楚。

(2) 在当季不施肥的情况下, 小麦播种前的耕翻处理不会明显改变整个旱地阶段的 N_2O 排放总量, 但却具有明显的阶段性影响, 即使小麦生长季初期的排放明显减弱, 使小麦生长季后期的排放明显增强, 而对其余时间段的排放作用不明显。

(3) 与长期实行稻麦轮作的旱地阶段农田相比, 典型稻田土壤改制长期种植蔬菜会显著增加 N_2O 排放。

致谢 对本研究提供技术支持和帮助的有中国科学院大气物理研究所的王跃思、刘广仁、张文、韩圣慧、刘春岩、王迎红、孙杨等, 谨此致谢!

参考文献 (References)

- [1] IPCC. *Climate Change 2001-Synthesis Report: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2001
- [2] Rodhe H A. Comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science*, 1990, **248**: 1217~1219
- [3] Hao W M, Wofsy S C, McElroy M B, et al. Sources of atmospheric nitrous oxide from combustion. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**: 3098~3104
- [4] Ko M K W, Sze N D, Weisenstein D K. Use of satellite data to constrain the model-calculated atmospheric lifetime for N_2O : Implication for other trace gases. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 7547~7552
- [5] Esser G. Modeling global terrestrial sources and sinks of CO_2 with special reference to soil organic matter. In: *Soils and the Greenhouse Effect*, Bouwman A F, Ed. New York: John Wiley & Sons, 1990. 247~261
- [6] Delgado J A, Mosier A R. Mitigation alternatives to decrease nitrous oxide emissions and urea-nitrogen loss and their effect on methane flux. *Journal of Environmental Quality*, 1996, **25** (6): 1105~1111
- [7] Mosier A R, Kroeze C. Contribution of agro ecosystems to the global atmospheric N_2O budget. Proceeding of international workshop on reducing N_2O emission from agro ecosystems, March 1999, Banff, Canada
- [8] Smith C J, Delaune R D, Patrick W H. Nitrous oxide emissions from Gulf Coast wetlands. *Geochemistry Cosmochemistry Acta*, 1983, **47**: 1805~1814
- [9] Isermann K. Agriculture share in the emission of trace gases affecting the climate and some cause-oriented proposals or sufficiently reducing this share. *Environmental Pollution*, 1994, **83**: 95~111
- [10] Hansen S, Bakken L R. N_2O , CO_2 and O_2 concentrations in soil air influenced by organic and inorganic fertilizers and soil compaction. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences*, 1993, **7**: 1~10
- [11] Myrold D D. Denitrification in grass and winter wheat cropping system Oregon. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **52**: 32~40
- [12] Granli T, Bockman O C. Nitrous oxide from agriculture-Norwegian Journal of Agricultural Sciences, 1994, **12** (Suppl.): 128
- [13] Zheng Xunhua, Han Shenghui, Huang Yao, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, **18**: 2018
- [14] Wang Yuesi, Wang Yinghong. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emission from a short-plant ecosystem. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (5): 842~844
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 269~271
- [16] Lu Rukun. *Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry* (in Chinese). Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000. 269~271
- [17] 李西开 (主编). 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1984. 457pp
- [18] Li Youkai, Ed. *Routine Analysis Method of Soil Agricultural Chemistry* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984. 457pp
- [19] Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in Southeast China. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, **2**: 207~224
- [20] Blackmer A M, Bremner J M. Potential of soil as a sink for atmospheric nitrous oxide. *Geophys. Res. Lett.*, 1976, **3**: 739

- ~742
- [19] Bremner J M, Robbins S G, Blackmer A M. Seasonal variability in emission of nitrous oxide from soil. *Geophys. Res. Lett.*, 1980, **7**: 641~644
- [20] Cicerone R J. Analysis of sources and sinks of atmospheric nitrous oxide (N₂O). *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 1989, **94**: 18265~18271
- [21] Linn D M, Doran J W. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and no tilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, **48**: 1267~1272
- [22] 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. *应用生学报*, 1996, **7** (3): 273~279
Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Impact of soil humidity on nitrous oxide production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1996, **7** (3): 273~279
- [23] Batjes N H, Bridges E M. World inventory of soil emissions. *Working Paper and Preprint*, 1992, **92** (4): 204
- [24] Kessavalou A, Doran J W, Mosier A R, et al. Greenhouse gas fluxes following tillage and wetting in a wheat-fallow cropping system. *Journal of Environmental Quality*, 1998, **27**: 1105~1116
- [25] Dobbie K E, McTaggart I P, Smith K A. Nitrous oxide emission from intensive agricultural systems; Variations between crops and seasons; key driving variables; and mean emission factors. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (D12): 26891~26899
- [26] 封克, 殷士学. 影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素. *土壤学进展*, 1995, **23** (6): 35~40
Feng Ke, Yin Shixue. Influence of the edaphic factor on nitrous oxide production and emission. *Advance in Soil Sciences* (in Chinese), 1995, **23** (6): 35~40
- [27] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture; Contribution of individual gases to the radioactive forcing of the atmosphere. *Science*, 2000, **289** (5486): 1922~1925
- [28] 刁一伟, 郑循华, 王跃思, 等. 土壤温度和湿度对冬小麦田土壤空气 CO₂ 浓度的影响. *气候与环境研究*, 2004, **9** (4): 584~590
Diao Yiwei, Zheng Xunhua, Wang Yuesi, et al. Effects of soil temperature and moisture on soil CO₂ concentration of wheat fields. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (4): 584~590
- [29] Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. Mitigation options for methane, nitrous oxide and nitric oxide emissions from agricultural ecosystems. *Adv. Atmos. Sci.*, 2000, **17** (1): 83~92
- [30] Huang Y, Jiao Y, Zong L G, et al. Nitrous oxide emissions from wheat-growing season in eighteen Chinese paddy soils: an outdoor pot experiment. *Biol. Fertil. Soils*, 2002, **36**: 411~417