

生长季与非生长季小叶章湿地 N₂O 通量特征及排放贡献

孙志高^{1,2}, 刘景双², 杨继松³, 牟晓杰¹, 王玲玲¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 3. 沈阳大学, 辽宁 沈阳 110044)

摘要: 2003 年 5 月 - 2004 年 4 月, 利用静态箱 - 气相色谱法对生长季与非生长季三江平原小叶章湿地 N₂O 通量特征及排放贡献进行了研究。结果表明, 生长季 N₂O 呈脉冲式排放, 通量介于 0.005 ~ 0.111 mg / (m² · h), 5 月较低通量与降水较多有关, 6 月通量骤然增加与冻层融通有关, 7 - 8 月与降水少及蒸发旺盛有关, 9 月与土壤中较多氮有关。N₂O 通量与 5 cm 地温呈显著正相关 ($P < 0.01$); 非生长季 N₂O 表现为“吸收 - 排放”, 通量介于 - 0.001 5 ~ - 0.049 7 mg / (m² · h)。N₂O 通量与气温、土壤融化时间均呈指数关系 ($P < 0.01$), 说明在冻结期, 温度仍是控制微生物活性的主要因素, 而在融化期, 温度和冻层融通是导致 N₂O 通量迅速增加的重要原因。总之, 生长季 N₂O 排放量为 205.54 mg N₂O / m², 为 N₂O 的“源”, 非生长季 N₂O 排放量为 - 26.97 mg N₂O / m², 为 N₂O 的“汇”, 全年 N₂O 排放量为 178.57 mg N₂O / m², 为 N₂O 重要释放“源”。

关键词: N₂O 通量; 生长季; 非生长季; 小叶章湿地; 三江平原

中图分类号: S161.2⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-5759(2009)06-0242-06

* N₂O 是仅次于 CO₂ 和 CH₄ 的重要温室气体, 其在过去 100 年中对全球温室效应的贡献达 4% ~ 7%^[1]。目前, 全球大气中的 N₂O 浓度已从工业化前的 270 × 10⁻⁹, 增加到 2005 年的 319 × 10⁻⁹, 并以每年 0.26% 的速度递增^[2]。尽管 N₂O 在大气中的浓度和年增长速率均低于 CO₂ (379 × 10⁻⁶ 和约 0.5%)^[2], 但增温效应却为 CO₂ 的 150 ~ 200 倍^[3]。由于 N₂O 在大气中的寿命可达 150 年, 所以它对全球环境的影响是长期和潜在的^[4]。N₂O 对大气环境的影响已引起国际学术界和各国政府的广泛关注。目前, 国外已在天然湿地 N₂O 排放规律、排放量估算、影响因素及环境效应等研究领域开展了大量研究^[5-11], 并取得了许多重要成果。与之相比, 国内也在该领域开展了许多工作, 且当前研究主要集中在三江平原沼泽湿地^[12-15]、若尔盖高原湿地^[16]、青藏高原湿地^[17,18]、长江口和珠江口潮滩湿地^[19,20] 及南极海岸苔原或沼泽湿地^[21,22] N₂O 释放特征、影响因素及硝化 - 反硝化等的相关探讨上。总之, 当前国内外的相关研究主要集中在植被生长季的探讨上, 对非生长季的相关研究还不多见, 而当前研究中基于较短时间尺度(如生长季)的 N₂O 排放量估算往往会影响到对 N₂O“源/汇”功能的正确认识^[2]。

三江平原是我国湿地面积较大、类型较齐全的地区之一。沼泽化草甸和沼泽是该区主要植被类型, 而沼泽化草甸又以小叶章 (*Calamagrostis angustifolia*) 群系最为普遍。小叶章湿地是该区最为普遍的湿地类型, 约占湿地面积的 34.45%, 常分布于高河漫滩、一级阶地和碟形洼地边缘, 地表无或有少量积水, 其对水分的变化极为敏感。目前, 国内关于生长季与非生长季小叶章湿地 N₂O 通量特征及排放贡献的研究还未见报道, 本试验对此进行了研究, 研究结果不仅可揭示小叶章湿地全年的 N₂O 排放规律及影响因素, 而且其对正确评估小叶章湿地 N₂O 的“源/汇”功能及其对大气环境的影响也尤为重要。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

试验于生长季(2003 年 5 - 10 月)和非生长季(2003 年 11 月 - 2004 年 4 月)在中国科学院三江平原沼泽湿

* 收稿日期: 2009-01-05; 改回日期: 2009-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40803023), 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动专项资金项目(AJ0809BX-036), 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室开放基金项目(2007KFJ01), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223; KZCX2-YW-309)和中国科学院烟台海岸带所前沿领域项目(HJ0810BX-047)资助。

作者简介: 孙志高(1979-), 男, 山东烟台人, 副研究员, 博士。E-mail: zgsun@yic.ac.cn

地生态试验站以东 12 km 的野外试验场(47°35'17.8" N, 133°37'48.4" E)进行。研究样地位于三江平原腹地的典型沼泽湿地分布区,海拔 55.4~57.9 m,属温带大陆性季风气候,冬季严寒漫长,夏季温暖湿润,1 月平均气温 -18~-21,7 月平均气温 21~22,年均气温 1.9,10 的年平均有效积温 2300 左右。该区年均降水量 600 mm 左右,60%以上集中在 6-9 月。试验场地貌类型为该区沼泽发育最为普遍的碟形洼地,面积约 20 hm²。自洼地中心到边缘分布的主要建群种为漂筏苔草 (*Carex pseudocuraica*)、毛果苔草 (*C. lasiocarpa*)、乌拉苔草 (*C. meyeriana*)和小叶章 (*C. angustifolia*)。土壤类型主要为草甸沼泽土、腐殖质沼泽土和泥炭沼泽土。

1.2 研究方法

1.2.1 样点布设及气体采集 在试验场小叶章湿地分布区内布设观测点位,采用静态箱(暗箱)法采集气体样品。为防止采样时箱内气体逸出,采样前 2 周在观测点埋入底座。生长季观测时,将静态箱扣在底座凹槽后加水密封,而在非生长季,若地表有积雪,事先将采样点积雪清除,并在静态箱扣入底座凹槽后用湿雪密封。2 个时段的采样频次分别为 4 次/月和 2~3 次/月,观测时间为当日 9:00-10:00。采样用 100 mL 玻璃注射器(装有三通阀),在 60 min 时段内每 20 min 采集 100 mL 气体置于铝塑复合气袋中。同步测定温度、降水量和冻深/融深等环境数据。

1.2.2 气体分析及通量计算 N₂O 气体样品用配有⁶³Ni 电子捕获检测器(ECD)的岛津 GC-14A 气相色谱仪测定。填充材料为 Porapak Q,检测器、进样口和分离柱的温度分别为 300,100 和 60,载气为高纯氮气(纯度 >99.999%)。N₂O 通量采用下式计算:

$$J = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times H$$

式中, J 为通量 [$\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$], dc/dt 为气体体积分数随时间变化的回归曲线斜率, M 为被测气体摩尔质量 (g/mol), P 为气压 (Pa), T 为绝对温度 (K), V_0 , P_0 , T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积 (mL/mol)、空气气压 (Pa)和绝对温度 (K), H 为箱高(m)。

1.2.3 数据处理与统计 运用 Origin 7.5 和 SPSS 10.0 软件进行作图和相关分析。

2 结果与分析

2.1 生长季 N₂O 通量特征及影响因素

小叶章湿地在生长季的 N₂O 呈脉冲式排放特征(图 1),通量介于 0.005~0.111 $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,均值为 $0.059 \pm 0.034 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (表 1)。具体而言,湿地在 5 月的排放通量很低,原因与此间降水量大(图 2),土壤较好水分状况不利于 N₂O 排放有关。至 6 月,N₂O 通量骤然增加,原因与此间土壤冻层融通有关。一般而言,小叶章湿地的冻层在 5 月末-6 月中上旬基本融通,随冻层不断融通,冻层以下在冬季累积的大量 N₂O 得以迅速释放,由此使得 N₂O 通量在此间出现较高峰值。6 月末-8 月下旬,小叶章湿地 N₂O 通量一直较高,原因与此间(特别是 8 月份)降水较少、气候干旱及水分蒸发量大有关。2003 年生长季的降水量为 302 mm(图 2),而多年平均降水量为 454 mm,相差 152 mm,说明 2003 年生长季的降水量较往年偏低。另外,就降水时间分配而言,生长季降水集中分布在 5 和 7 月,除 5 月降水量明显高于多年平均降水量外,其他各月特别是 6,8

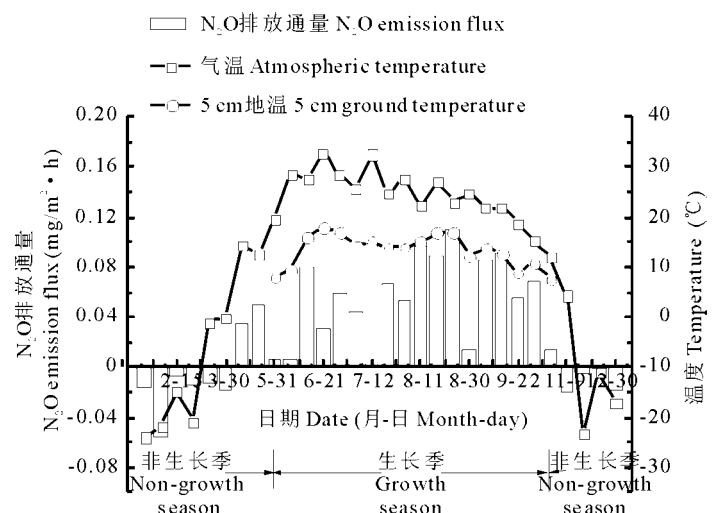


图 1 2003 年生长季与非生长季湿地 N₂O 通量、气温及地温变化

Fig. 1 Changes of N₂O flux, atmospheric temperature and ground temperature of wetland in growth and non-growth season in 2003

和 9 月的降水量较多年平均降水量均有很大降低,说明因降水较少、蒸发旺盛而使得湿地水分状况发生较大改变,这种改变又使得土壤氧化还原电位迅速升高,从而使硝化 - 反硝化作用的反应条件得以改善,进而促进 N₂O 排放。这一结论正好与 Regina^[5]所报道的湿地水位下降、土壤水分含量降低会促进 N₂O 排放的结论相吻合。8 月末,湿地 N₂O 通量出现了 1 次较为明显低值[0.014 mg/(m²·h)],原因与此间降水有关。尽管 8 月的降水量较多年平均降水量有很大降低,但因该月降水大多集中于月末,故较为频繁和较多降水又使得土壤的水分状况得以改善(局部出现地表积水),而土壤水分含量较高的土壤环境又不利于 N₂O 排放。整个 9 月,湿地 N₂O 通量均较高,原因除了与此间降水较少而引起土壤含水量较低外,更主要与土壤中用于硝化 - 反硝化的有效碳氮含量较高有关^[23~25]。9 月,小叶章处于生长末期^[26],其生长所需氮较旺期和成熟期有很大降低^[27],而此间降水又使许多氮沉降到系统中,这就在一定程度上改善了土壤的氮物质基础,进而会为硝化 - 反硝化提供较为丰富的物质反应条件。10 月上旬,湿地 N₂O 通量迅速降低,原因与生长季末温度大幅度降低有关。相关分析表明,湿地 N₂O 通量与气温的相关性很差,但与 5 cm 地温密切相关(P<0.01)(图 3),说明湿地 N₂O 通量在很大程度上受 5 cm 地温的影响。

2.2 非生长季湿地 N₂O 通量特征及影响因素

小叶章湿地在非生长季的 N₂O 通量总体表现为“吸收 - 排放”(图 1),即 2003 年 11 月上旬 - 2004 年 3 月下

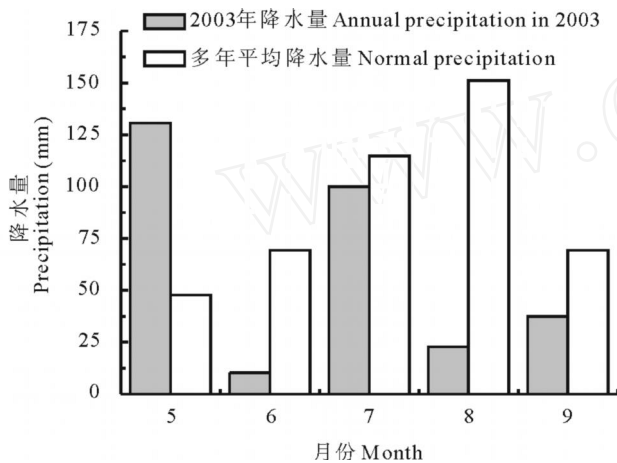


图 2 2003 年生长季降水量与多年平均降水量
Fig. 2 Precipitation and normal precipitation in growth season in 2003

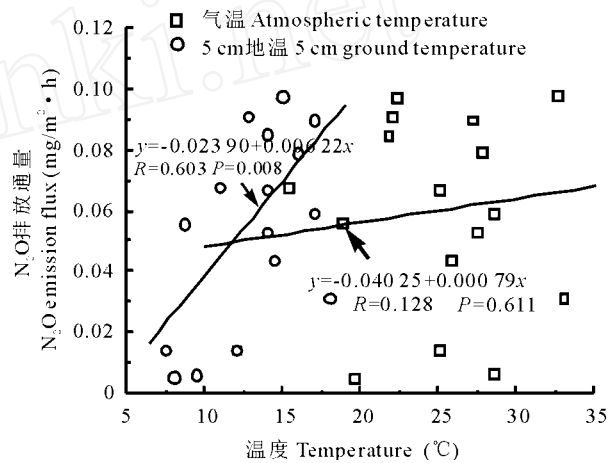


图 3 生长季温度与 N₂O 通量的关系
Fig. 3 Relationship between temperatures and N₂O fluxes in growth season

表 1 生长季与非生长季 N₂O 通量范围、均值及标准差

Table 1 Ranges, means and standard deviations of N₂O fluxes in growth and non-growth season mg/(m²·h)

| 月份 Month | 生长季 Growth season | | | 月份 Month | 非生长季 Non-growth season | | |
|-------------|---|--------------------------|---------------------------|-------------|---|----------------------------|---------------------------|
| | 范围 Range | 均值 Mean | 标准差 Standard deviation | | 范围 Range | 均值 Mean | 标准差 Standard deviation |
| 5 | - | 5.835 × 10 ⁻³ | 0 | 11 | - 5.100 × 10 ⁻³ ~ - 1.960 × 10 ⁻² | - 1.235 × 10 ⁻² | 1.025 × 10 ⁻² |
| 6 | 6.373 × 10 ⁻³ ~ 7.906 × 10 ⁻² | 4.396 × 10 ⁻² | 3.178 × 10 ⁻² | 12 | - 1.500 × 10 ⁻³ ~ - 1.810 × 10 ⁻² | - 9.800 × 10 ⁻³ | 1.174 × 10 ⁻² |
| 7 | 4.380 × 10 ⁻² ~ 9.784 × 10 ⁻² | 6.544 × 10 ⁻² | 2.361 × 10 ⁻² | 1 | - 1.560 × 10 ⁻² ~ - 5.570 × 10 ⁻² | - 3.565 × 10 ⁻² | 2.835 × 10 ⁻² |
| 8 | 1.423 × 10 ⁻² ~ 1.106 × 10 ⁻¹ | 7.795 × 10 ⁻² | 4.336 × 10 ⁻² | 2 | - | 6.800 × 10 ⁻³ | 0 |
| 9 | 5.580 × 10 ⁻² ~ 9.084 × 10 ⁻² | 7.484 × 10 ⁻² | 1.604 × 10 ⁻² | 3 | - 1.220 × 10 ⁻² ~ - 1.175 × 10 ⁻² | - 1.457 × 10 ⁻² | 2.700 × 10 ⁻³ |
| 10 | - | 1.424 × 10 ⁻² | 0 | 4 | 3.480 × 10 ⁻² ~ 4.970 × 10 ⁻² | 4.225 × 10 ⁻² | 1.054 × 10 ⁻² |
| 5~10 | 5.385 × 10 ⁻³ ~ 1.106 × 10 ⁻¹ | 5.935 × 10 ⁻² | 3.387 × 10 ⁻² | 11~4 | - 1.500 × 10 ⁻³ ~ 4.970 × 10 ⁻² | - 6.800 × 10 ⁻³ | 2.681 × 10 ⁻² |

旬,湿地土壤吸收大气中的 N₂O,而 4 月向大气排放 N₂O。总体而言,此间 N₂O 通量范围为 - 0.001 5 ~ 0.049 7 mg/(m² · h),均值为 (- 0.006 8 ± 0.026 8) mg/(m² · h) (表 1),为 N₂O 的“汇”。具体来说,11 月,湿地气温骤然降低,由此导致其对 N₂O 的吸收量一直保持在较高水平上。至 12 月中旬,湿地气温有所回升,由此使得其对 N₂O 的吸收量达到最低值。12 月末 - 1 月末,湿地气温又骤然降低,并于 1 月一直保持 - 23 左右,此间湿地对 N₂O 的吸收量不断增加,并于 1 月下旬达到最大值。2 月中旬 - 3 月下旬,尽管湿地气温逐渐回升,但此间其对 N₂O 的吸收量除 2 月中旬相对较低外,其他时期均维持在较高水平上,且变化也比较平缓。到 4 月,随冻层融化,湿地由 N₂O 的“汇”转化为“源”,且其排放量也随气温升高而迅速增加,至 4 月下旬,其通量高达 0.049 7 mg/(m² · h)。小叶章湿地非生长季 N₂O 通量与气温存在明显指数相关关系 ($P < 0.01$) (图 4),说明湿地土壤在冻结期,温度仍是控制微生物活性的主要因素,这一结论又与 Alm 等^[28]的研究结果相一致。另外,土壤融化时间与 N₂O 通量也呈较好指数关系 ($P < 0.01$) (图 5),说明湿地土壤在融化期,随温度升高,微生物活性逐渐增强,进而导致 N₂O 通量逐渐增加。此外,冬季土壤产生的 N₂O 可能因冻层存在而部分封存在冻层中,而在融化期,随冻层不断融通,这部分 N₂O 逐渐释放,进而导致 4 月后其通量迅速增加。

2.3 生长季与非生长季 N₂O 排放量及排放贡献

小叶章湿地 N₂O 排放量的估算结果表明(表 2),生长季湿地 N₂O 排放量为 205.54 mg N₂O/m²,为 N₂O 的排放“源”。比较而言,各月 N₂O 的排放贡献以 7,8 和 9 月较高且比较接近(23.48%,28.10%和 25.57%),6 月次之(15.75%),5 和 10 月较低(1.95%和 5.15%)。而在非生长季,湿地 N₂O 排放量为 - 26.97 mg N₂O/m²,为 N₂O 的“汇”。比较而言,各月湿地 N₂O 的“汇”功能以 1 月最强(100.52%),3 月次之(41.68%),11,12 和 2 月较低(25.31%,27.47%和 18.24%)。4 月,湿地发挥 N₂O 的“源”功能,其对非生长季“汇”功能的削弱贡献高达 - 113.21%。总之,小叶章湿地全年的 N₂O 排放量为 178.57 mg N₂O/m²,为 N₂O 的重要释放“源”。

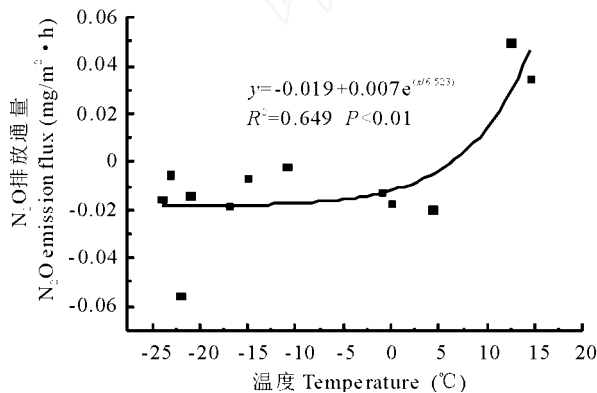


图 4 非生长季 N₂O 通量与温度的关系
Fig. 4 Relationship between N₂O fluxes and temperatures in non-growth season

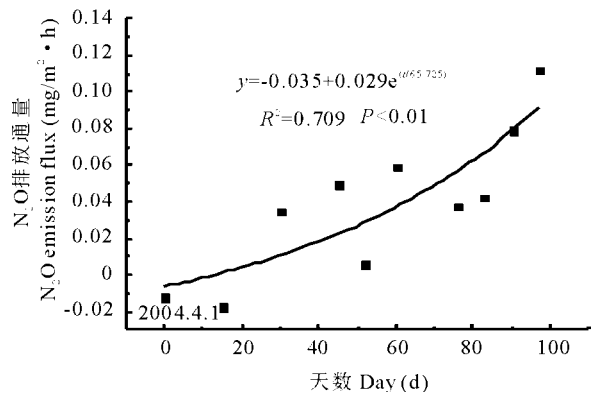


图 5 N₂O 通量与融化天数的关系
Fig. 5 Relationship between N₂O fluxes and thawing days

表 2 生长季与非生长季湿地 N₂O 排放量估算

| Table 2 Estimation of N ₂ O emission amount from wetland in growth and non-growth season | | mg N ₂ O/m ² | | | | | |
|---|------------------------|------------------------------------|---------|--------|---------|----------|---------|
| 项目 Item | 生长季 Growth season | | | | | | 总计 Sum |
| | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| N ₂ O 排放量 N ₂ O emission flux (mg N ₂ O/m ²) | 4.01 | 32.37 | 48.25 | 57.76 | 52.56 | 10.59 | 205.54 |
| 所占比例 Percent of growth season (%) | 1.95 | 15.75 | 23.48 | 28.10 | 25.57 | 5.15 | 100 |
| 项目 Item | 非生长季 Non-growth season | | | | | | 总计 Sum |
| | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | |
| N ₂ O 排放量 N ₂ O emission flux (mg N ₂ O/m ²) | - 6.80 | - 7.49 | - 27.01 | - 4.90 | - 11.20 | 30.42 | - 26.97 |
| 所占比例 Percent of growth season (%) | 25.31 | 27.47 | 100.52 | 18.24 | 41.68 | - 113.21 | 100 |

3 结论

2003年,生长季湿地 N_2O 呈脉冲式排放特征,通量为 $0.005 \sim 0.111 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$;5月较低通量与降水较多有关,6月通量骤然增加与冻层融通有关,7-8月与降水少及蒸发旺盛有关,9月与土壤中丰富的氮有关;湿地土壤 N_2O 通量与5cm地温呈线性相关($P < 0.01$)。

2003年,非生长季湿地 N_2O 表现为“吸收-排放”,通量为 $-0.0015 \sim 0.0497 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; N_2O 通量与气温、土壤融化时间均呈指数关系($P < 0.01$),说明在冻结期,温度仍是控制微生物活性的主要因素,而在融化期,温度和冻层融通是导致 N_2O 通量迅速增加的重要原因。

生长季湿地 N_2O 排放量为 $205.54 \text{ mg } N_2O/\text{m}^2$,为 N_2O 排放“源”,而在非生长季, N_2O 排放量为 $-26.97 \text{ mg } N_2O/\text{m}^2$,为 N_2O 的“汇”;湿地全年 N_2O 排放量为 $178.57 \text{ mg } N_2O/\text{m}^2$,为 N_2O 重要释放“源”。

参考文献:

- [1] Bouwman A F. Conclusions and recommendations of the Conference Working Groups[A]. In: Bouwman. Soils and the Greenhouse Effects[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1990.
- [2] IPCC. Changes in atmospheric constituents and in radioactive forcing[A]. Climate Change: The Physical Science Basis[R]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. Science, 1990, 248: 1217-1219.
- [4] Prinn R G, Cunnold D M, Rasmussen R. Atmospheric emissions and trends of nitrous oxide deduced from ten years of ALE-GAGE data[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95: 18369-18385.
- [5] Regina K. Fluxes of nitrous oxide from boreal peatlands as affected by peatland type, water table level and nitrification capacity of the peat[J]. Biogeochemistry, 1996, 25: 401-418.
- [6] Bauza J F, Morell J M, Corredor J E. Biogeochemistry of nitrous oxide production in the red mangrove (*Rhizophora mangle*) forest sediments[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55: 697-704.
- [7] Tuomainen J M, Hietanen S, Kuparinen J, et al. Baltic Sea cyanobacterial bloom contains denitrification and nitrification genes, but has negligible denitrification activity[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2003, 45(2): 83-96.
- [8] Alongi D M, Pfitzner J, Trott L A, et al. Rapid sediment accumulation and microbial mineralization in forests of the mangrove *Kandelia candel* in the Jiulongjiang Estuary, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 63(4): 605-618.
- [9] Gregorich E G, Hopkins D W, Elberling B, et al. Emission of CO_2 , CH_4 and N_2O from lakeshore soils in an Antarctic dry valley[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38: 3120-3129.
- [10] Allen D E, Dalal R C, Rennenberg H, et al. Spatial and temporal variation of nitrous oxide and methane flux between subtropical mangrove sediments and the atmosphere[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(2): 622-631.
- [11] Hashidoko Y, Takakai F, Toma Y, et al. Emergence and behaviors of acid-tolerant *Janthinobacterium* sp. that evolves N_2O from deforested tropical peatland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(1): 116-125.
- [12] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 185-192.
- [13] 王毅勇, 郑循华, 宋长春, 等. 三江平原典型沼泽湿地氧化亚氮通量[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 493-497.
- [14] 宋长春, 王毅勇, 王跃思, 等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放动态[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 7-12.
- [15] 杨继松, 刘景双, 王金达, 等. 三江平原生长季沼泽湿地 CH_4 、 N_2O 排放及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3): 432-440.
- [16] 王德宣, 宋长春, 王跃思, 等. 若尔盖高原沼泽湿地 N_2O 排放通量研究[J]. 生态科学, 2005, 24(3): 193-196.
- [17] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P, et al. Fluxes of CO_2 、 CH_4 and N_2O from alpine grassland in the tibetan Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13(1): 27-34.
- [18] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P, et al. N_2O exchange within a soil and atmosphere profile in alpine grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Acta Botanica Sinica, 2004, 46(1): 20-28.

- [19] Wang D Q, Chen Z L, Wang J, *et al.* Summer-time denitrification and nitrous oxide exchange in the intertidal zone of the Yangtze Estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 73(1-2): 43-53.
- [20] 徐继荣, 王友绍, 殷建平, 等. 珠江口入海河段 DIN 形态转化与硝化和反硝化作用[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(5): 686-692.
- [21] Zhu R B, Liu Y S, Ma J, *et al.* Nitrous oxide flux to the atmosphere from two coastal tundra wetlands in eastern Antarctica[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(10): 2437-2447.
- [22] Sun L G, Zhu R B, Xie Z Q, *et al.* Emissions of nitrous oxide and methane from Antarctic Tundra: Role of penguin dropping deposition[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(31): 4977-4982.
- [23] 吴建国, 韩梅, 裴伟, 等. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究[J]. *草业学报*, 2007, 16(6): 39-46.
- [24] 艾丽, 吴建国, 朱高, 等. 祁连山中部高寒草甸土壤有机碳矿化及其影响因素研究[J]. *草业学报*, 2007, 16(5): 22-33.
- [25] 韩方虎, 沈禹颖, 王希, 等. 苜蓿草地土壤氮矿化的研究[J]. *草业学报*, 2009, 18(2): 11-17.
- [26] 孙志高, 刘景双, 杨继松, 等. 三江平原小叶章湿地种群生物量结构动态与生长速率分析[J]. *草业学报*, 2006, 15(2): 21-29.
- [27] 孙志高, 刘景双, 王金达, 等. 三江平原不同群落小叶章种群生物量及氮、磷营养结构动态[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(2): 221-228.
- [28] Alm J, Saarnio S, Nykänen H, *et al.* Winter CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 44: 163-186.

N₂O flux characteristics and emission contributions of *Calamagrostis angustifolia* wetland during growth and non-growth seasons

SUN Zhi-gao^{1,2}, LIU Jing-shuang², YANG Ji-song³, MOU Xiao-jie¹, WANG Ling-ling¹

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130012, China; 3. Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: The nitrous oxide (N₂O) flux characteristics and emission contributions of *Calamagrostis angustifolia* wetland in the Sanjiang Plain during growth and non-growth seasons were observed *in situ* with static-chamber and GC methods from May 2003 to April 2004. The range of N₂O fluxes during the growth season was 0.005 - 0.111 mg/(m²·h) and showed pulse emission characteristics. The lower N₂O fluxes in May were correlated with abundant precipitation, while the sharply increased fluxes in June were correlated with the thaw of frozen layers. Between July and August, the N₂O fluxes were correlated with less precipitation and greater evaporation, and in September, the flux depended on available nitrogen in the soil. Further analysis indicated that the N₂O fluxes during the growth season were significantly ($P < 0.01$) positively correlated with 5 cm ground temperature. The range of N₂O fluxes during the non-growth season was -0.0015 - 0.0497 mg/(m²·h), presenting "absorption-emission" characteristics. Further analysis indicated that the relationship between the N₂O fluxes and atmospheric temperatures or soil thaw days was in accord with exponential model ($P < 0.01$) indicating that, in the frozen period, temperature was still the main factor controlling microbial activity. In the thaw period, temperature and thaw of frozen layers were important for induction of the rapid increase in N₂O fluxes. In conclusion, the N₂O emission amount during growth season was 205.54 mg N₂O/m², acting as the emission "source", while during non-growth season, it was -26.97 mg N₂O/m², the "sink". Overall, the N₂O emission over the whole year was 178.57 mg N₂O/m², an important N₂O emission "source".

Key words: N₂O flux; growth season; non-growth season; *Calamagrostis angustifolia* wetland; Sanjiang Plain