

三江平原沼泽湿地 N_2O 浓度与排放特征初步研究

刘景双,王金达,李仲根,于君宝,张学林,王春梅,王艳(中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130012)

摘要:2001 年 8 月到 9 月在三江平原沼泽湿地进行 N_2O 的原位静态箱观测.结果发现近地气层 N_2O 平均浓度为 $281.7 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$,低于大气背景浓度,说明沼泽湿地可能是人类目前了解较少但很重要的 N_2O 汇.选取积水状况和地表植被不同的毛果苔草沼泽、小叶章湿草甸(I, II)以及作为对照的小麦休耕地进行观测,发现 4 个地点的 N_2O 排放日变化形式不完全相同,除小麦田全天持续排放 N_2O 外,其余各点一天当中均出现排放与吸收交替出现的情况.温度是影响排放模式的主要因素.观测期内毛果苔草沼泽、小叶章湿草甸(I, II)和小麦休耕地 N_2O 的平均排放强度分别为 $0.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $1.75 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $1.31 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 和 $4.86 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.氧化还原电位是决定沼泽湿地 N_2O 排放特征的关键因子,地表积水情况和土壤水分状况则是影响 N_2O 排放的另一重要因素.

关键词:沼泽湿地; N_2O ;近地面浓度;排放特征;影响因素

中图分类号:X511 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)01-07-0033

N_2O Concentration and Its Emission Characteristics in Sanjiang Plain Wetland

Liu Jingshuang, Wang Jinda, Li Zhonggen, Yu Junbao, Zhang Xuelin, Wang Chunmei, Wang Yan (Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: N_2O concentration and its flux were measured in Sanjiang Plain wetland, from August to September in 2001, by using in situ closed chamber technique. The results showed that the mean N_2O concentration above the ground was $281.7 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$, lower than the atmospheric N_2O background, indicating the wetland maybe one of the important N_2O sinks which scientists hadn't pay much attention to in the past. Four observation sites: *Cares lasiocarpa*, *Ala mar-grostis angustifolia* (I, II) and wheat land (had been harvested and in fallow) were chosen according to water content and plant. The daily N_2O emission models at four sites were different from each other, except site of wheat land emitted N_2O persistently all day, the other sites emitted and absorbed alternately in one day. Temperature was the crucial factor for the diurnal variation. The mean N_2O flux at four sites from August to September was $0.22 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $1.75 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $1.31 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $4.86 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, respectively. Eh was the key factor for N_2O emission characteristic in Sanjiang Plain wetland, and water content was another important factor.

Key words: wetland; nitrous oxide; concentration above the ground; emission characteristics; affect factors

N_2O 是大气中一种痕量但非常重要的温室气体,它在大气中的浓度已由工业革命前的 $280 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 上升到 90 年代的 $310 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$,并且目前仍以每年 $0.2\% \sim 0.3\%$ 的速度递增^[1]. N_2O 在大气中的寿命可达 150 年,其分子增温潜势 (Global Warming Potential, GWP) 为 CO_2 的 250 倍^[2]; N_2O 一旦进入平流层,就会经过一系列光反应生成 NO_x ,最终导致平流层臭氧的破坏和消耗^[3].因此自从 70 年代

人类能够利用带有 ECD 的气相色谱法精确测定大气中的 N_2O 以来^[4],有关 N_2O 的源汇及其生成相关过程的研究在世界范围内勃然兴起.

遗憾的是,以往的 N_2O 研究大多集中在农田、森林和草地生态系统,对于地表重要的自然

基金项目:中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-302)
作者简介:刘景双(1956~),男,研究员,博士生导师,主要从事环境地球和生物地球化学循环方面的工作.
收稿日期:2001-12-26;修订日期:2002-06-18

综合体——沼泽湿地的研究则未见报道过,对于占世界陆面 6.4% 的湿地,由于其独特的自然条件和生态条件:地表长期积水或处于常湿状况,地表生长着沼生植被,土壤严重泥炭化和潜育化,决定了它在物质迁移转化过程中明显地区别于单一的水体系统和陆地系统^[5].因此选择沼泽湿地进行 N₂O 的观测和研究,以期发现沼泽湿地特有的排放规律和特征,可以使我们明确它对全球大气 N₂O 的“源”“汇”功能,为合理地估算各生态系统 N₂O 的生成量,编制我国的温室气体排放清单和制定相关的温室气体政策提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 实验区概况

三江平原湿地是我国连片分布,面积最大的平原沼泽湿地.实验位于中科院三江平原沼泽湿地生态实验站内(133°31' N, 47°45' E),站区海拔高度 55.4 m ~ 57.9 m,属北温带湿润大陆性季风气候,年均温 1.9℃,年降雨量 600 mm 左右,区内主要植物有:毛果苔草(*C. lasiocarpa*)、漂筏苔草(*C. pseudocuraica*)、乌拉苔草(*C. meyeriana*)、小叶章(*Cala magrostis angustifolia*)和狭叶甜茅(*Glyceria spiculosa*)等.土壤类型为草甸沼泽土和泥炭沼泽土.

1.2 采样点及方法

在实验站内的碟形洼地区,依据地表淹水状况从低到高选取 3 个观测点(图 1),即位于洼地中心,长期淹水(水深 20 cm)的毛果苔草沼泽;处于积水边缘,季节性积水的小叶章湿草甸;地表长期湿润但无积水的小叶章湿草甸.另外为了对比,选取了实验站的小麦试验田(已收割,休耕),以上 4 点位分别编号为 A、B、C、D,各点间的距离依次为 100 m、20 m、200 m.其土壤和水分理化性质见表 1.

观测期为 8 月 11 日到 9 月 5 日, N₂O 排放每星期观测 2 天,每观测日分上下午各进行 1 次,上午为 8:30 ~ 9:30,下午为 1:30 ~ 2:30. 8 月 27 日对 4 个观测地点进行了全天观测,每 3 h 观测 1 次,每次 1 h. N₂O 近地面浓度样品的采集每周进行 4 次,每次在 30 cm 高度处采集.

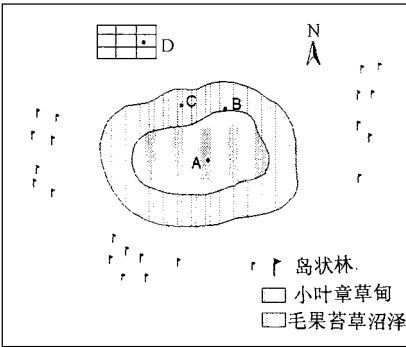


图 1 观测点示意图

Fig.1 The observation sites

表 1 4 点的土壤与水分理化性质

Table 1 The basic properties of soil and water at four observation sites

成分	A		B		C		D
	水体	草根层	水体	草根层	水体	草根层	土壤
	/ mg•L ⁻¹	/ mg•kg ⁻¹	/ mg•L ⁻¹	/ mg•kg ⁻¹	/ mg•L ⁻¹	/ mg•kg ⁻¹	/ mg•kg ⁻¹
TN	2.07	14281.3	2.58	2264.96	2.8	4670.43	1669.92
NH ₄ ⁺ -N	1.17	8.40	1.08	5.04	1.59	5.88	8.40
NO ₃ ⁻ -N	0.90	9.032	1.50	1.129	1.21	2.258	2.258
TP		1118.87		648.35		841.84	524.32
TK	4.21	1700.55	7.61	12892.9	11.12	12423.4	13899.1
pH	5.81		6.04		5.85		5.59

1.3 气体采集及分析

N₂O 气体采用有机玻璃箱进行收集,铝塑复合气袋(化工部大连光明化工研究所生产,

1 L) 储存.气样用配有⁶³Ni 电子捕获检测器(ECD)的岛津 GC-14A 气相色谱仪测定.填充柱材料为 Porapak Q,检测器、进样口、分离柱的

温度分别为 300、100 和 60℃,高纯 N₂ 作载气。
N₂O 排放通量采用下式进行计算:

$$F = \frac{\Delta m}{A \times \Delta t} = \frac{\rho \times V \times \Delta c}{A \times \Delta c} = \rho \times h \times \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中, F 是 N₂O 通量, ρ 是箱内气温和气压下 N₂O 的密度, Δm 和 Δc 分别是 Δt 时间内增加的 N₂O 质量和混合浓度, h、A 和 V 分别是箱的高度、底面积和体积。

2 结果与讨论

2.1 N₂O 的近地面浓度

通过近一个月对 4 个观测点 N₂O 离地面 30cm 处的浓度观测发现, A、B、C、D4 点的近地面 N₂O 平均浓度分别为: (280.7 ± 3.9) × 10⁻⁹ m³/m³ (n = 25), (281.8 ± 4.1) × 10⁻⁹ m³/m³ (n = 23), (281.6 ± 4.0) × 10⁻⁹ m³/m³ (n = 25), (282.9 ± 7.4) × 10⁻⁹ m³/m³ (n = 25), 平均值为 281.7 × 10⁻⁹ m³/m³, 低于全球 N₂O 大气背景浓度近 30 × 10⁻⁹ m³/m³, 这种 N₂O 低浓度现象在国内还未见报道过。王木林、程红兵等人^[6]对农科院小麦实验田的观测中发现了 N₂O 的高浓度现象(平均达 343.4 × 10⁻⁹ m³/m³), 认为

这是土壤排放的结果。因此笔者初步认为三江平原沼泽湿地中出现的 N₂O 低值现象可能是由于地表吸收的结果, 因为沼泽地区地表长期淹水, 土壤处于强烈的还原状态, 沼生植被丛生(覆盖度达 70% 以上), 并且加上沼泽湿地的冷湿效应, 均促进了 N₂O 的还原和转化。Frenney^[7]和 Ryden^[8]报道过, 在非常潮湿和遮光的草地上, 能够观测到土壤吸收大气 N₂O 的现象。另外还有人观察到, 玉米能吸收和同化大气中的 NH₃ 和 N₂O 作为其生长的 N 素^[9], 因此, 并不能排除沼泽湿地生态系统吸收 N₂O 的可能。另外一个重要原因就是, 在观测实验场周围分布着大片水稻田(洪河农场), 8 月到 9 月正是水稻生长旺季, 稻田还处于灌水阶段或晒田-灌水交替阶段, 国内很多学者的研究结果表明稻田在淹水阶段可以吸收大气中的 N₂O^[10,11], 因而这一吸收 N₂O 现象是否仅局限于近地面和夏季植物生长旺盛阶段出现有待于进一步的研究。

2.2 N₂O 日排放变化规律

8 月 27 日对 A、B、C、D4 点进行了全日观测, 结果如图 2。

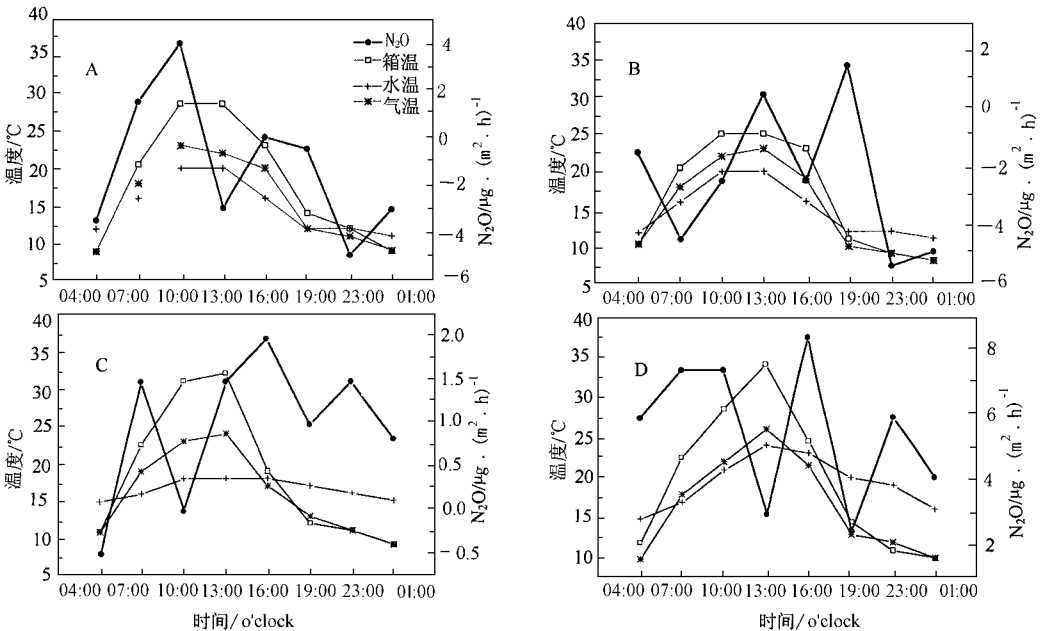


图 2 4 个观测点 N₂O 排放的日变化

Fig. 2 The diurnal variation of N₂O emission at four sites

从图 2 可以看出这 4 点 N₂O 的日排放形式 不完全相同。除 D 点全天持续排放 N₂O 外, 其

余各点一天之中均出现了排放与吸收的情况。A、B、C、D 点 N_2O 全天排放量平均值分别为 $-1.2\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $-2.4\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $0.9\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、 $5.6\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 排放或吸收量都不是很大。在 A 点上午 10:00 出现了 N_2O 全天排放最大值; 在 B 点, 则在下午 13:00 和 19:00 达到高峰, 而下午 16:00 和夜间则出现排放低值, 这与陈冠雄^[10]等人研究稻田 N_2O 排放时的情况相似; C 点全天排放高峰在下午 13:00 到 16:00 之间; D 点全天排放量相对较高, 并在下午 16:00 达到最大。纵观各图可以看出 A、B、D 点的 N_2O 排放均在凌晨到中午随着温度的升高而增加, C 点除了在上午 10:00 出现 N_2O 排放低值外, 在早晨 04:00 到下午 16:00 也出现 N_2O 排放递增现象。并且, 4 个观测点 N_2O 排放高峰都是在温度较高时出现, 而夜间普遍排放较低, 这说明温度基本上决定了 N_2O 全天的排放模式。C 点上午 10:00 出现排放低值可能是以下原因造成: ①较高的箱内温度。笔者发现利用有机玻璃箱采集气体, 在天气晴朗时, 箱内均出现明显的温室效应, 箱内外温差可达 $5\text{℃} \sim 8\text{℃}$ (内装小型风扇)。在 8 月 11 日, C 点上午 10:00 箱内气温就达到了 31℃ , 此时喜欢温凉的沼生植物为防止体内水分的散失而关闭气孔, 减少了 N_2O 的传输途径, 进而降低了排放量。而其它各点的 N_2O 排放最大值并非都出现在箱温最高时, 也与此有关。②较强的光辐射。黄国宏等人^[12]发现 N_2O 排放与光强有较密切的关系, 在一定范围内光强越强, N_2O 排放就减少。东北地区日出较早, 天气晴朗时, 上午 10:00 光照即可达到最大值, 从而刺激植物, 使其降低 N_2O 的排放。A 点和 D 点 13:00 同样出现 N_2O 的排放低值, 应与上述 2 种因素都有直接关系。

2.3 8 月到 9 月份 N_2O 的排放特征

4 个观测点 8 月到 9 月份上下午 N_2O 排放情况如图 3。

观测期内, A 点的 N_2O 排放波动范围为 $-3.93 \sim -4.42\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 平均排放强度为 $0.22\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 上下午 N_2O 的排放在不同时

段各有高低, 上午 N_2O 排放高值出现在 8 月 18 日到 8 月 29 日, 下午则仅出现在 8 月 18 日和 9 月 1 日, 与 A 点 N_2O 日排放高峰出现在上午的日变化规律相吻合。B 点 N_2O 的排放范围为 $-2.48 \sim 28.97\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 平均值为 $1.75\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 从图中可以看出, B 点具有很强的脉冲排放特点, 8 月 23 日上午出现了观测期内各点的最大值。这主要是受地表积水情况的强烈影响, 从 8 月 18 日起, B 点开始落干, 并维持 3~4 天的时间, 这样就使土壤的氧化还原电位迅速升高, 有利于土壤中硝化和反硝化过程的同时进行, 从而促进了 N_2O 的排放。C 点 N_2O 的排放范围为 $-4.42 \sim 6.87\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 平均值为 $1.31\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 上下午 N_2O 的排放变化步调较为一致, 在 8 月 26 日都达到了排放较大值。D 点 N_2O 的排放范围为 $0.49 \sim 17.18\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, 平均值为 $4.86\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。4 个观测点 N_2O 排放量大小依此为 $D > B > C > A$ 。D 点排放量最大, 但是与国内其他人^[13,14]在小麦田的研究结果相比, 还是偏低, 这可能一方面由于 D 点试验田近 2 年没有施入化学肥料, 导致土壤中有效氮素含量较常规旱地农田偏低 (表 1), 另一方面则由于小麦收割后, 土壤中的微生物将不再得到充足的营养物质——小麦根系的分泌物和植株的脱落物, 也不再有了通过植物输气组织输送氧气及排放 N_2O 的可能, 另外, 没有小麦的遮蔽作用, 土壤容易失去水分, 这些都将降低土壤中硝化和反硝化细菌的活性, 从而减少 D 点 N_2O 的生成。

2.4 影响因素分析

(1) 氧化还原电位 土壤中的 N_2O 生成与氧化还原电位密切相关。Kralova 等人^[15]利用土壤悬液研究反硝化时发现, E_h 为 0mV 时 N_2O 排放量最多, 进一步降低 E_h 将使 N_2O 排放量减少, 而使反硝化速率和 N_2 排放增加。侯爱新*利用土壤悬液实验则发现, $E_h = 150\text{mV}$

* 侯爱新. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放的相互关系及其微生物学机理. 中科院沈阳应用生态研究所博士论文, 1997.

时, N_2O 的产生速率最高, 而 $\text{Eh} < 0 \text{ mV}$ 时, N_2O 产生速率为负值. 本研究测定 A 点不同水深处的 Eh 发现(图 4), Eh 仅在水体表层 5cm 的薄层范围内为正值, 5cm 以下迅速降为负值, 并维持在 $-210 \text{ mV} \sim -289 \text{ mV}$ 之间. 说明 A 点 5cm 以下处于强烈的还原状态.

Smith 和 Patrick 报道长期厌氧环境下几乎没有 N_2O 排放^[16]. 在 A、B、C 点的长期观测中, 的确可以看出 N_2O 的排放量都不大, 并有时吸收 N_2O . 这说明 Eh 是决定沼泽湿地 N_2O 生成的关键因子, 并且决定了 N_2O 长期排放的模式.

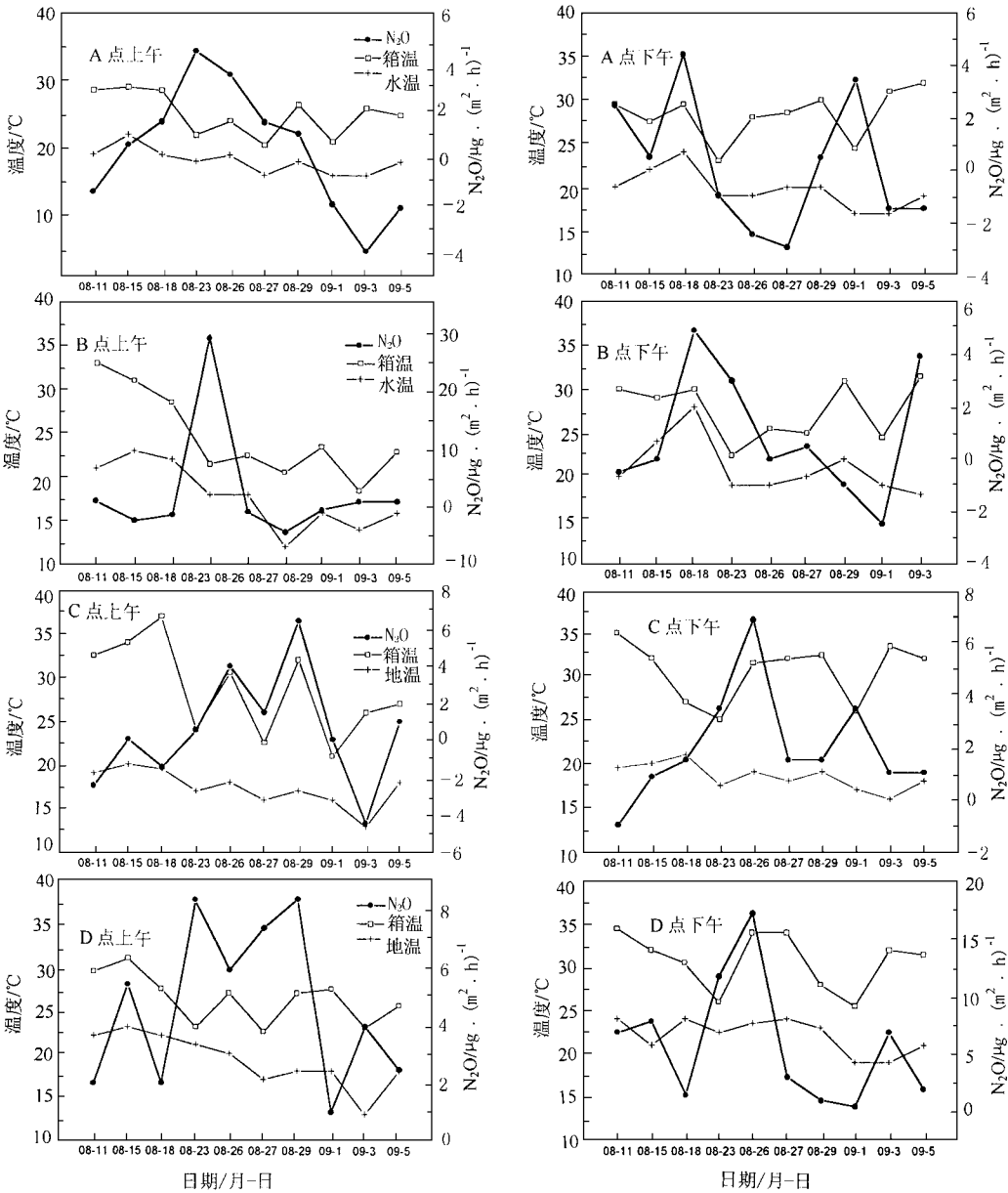


图3 8到9月份4个观测点 N_2O 的排放特征

Fig.3 N_2O emission characteristics from August to September at four sites

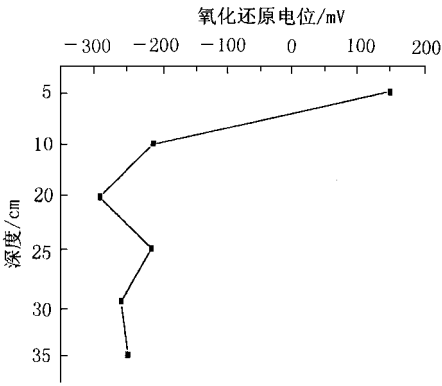


图 4 A 点不同水深处的 Eh 值
Fig. 4 Eh at different depth of site A

(2) 水分状况 水分状况不仅影响土壤 N_2O 的生成量,也极大地影响了 N_2O 向大气的传输速率.一般认为^[17],土壤 N_2O 生成与排放的最适土壤水分为 45 % ~ 75 % WFPS(充水空隙体积),即含水量相当于田间持水量时出现 N_2O 排放高峰,高于或低于此值均不利于 N_2O 的产生.在本观测的 4 个点中,A 点水分长期过饱和,C 点则长期湿润,只有 B 点的积水深度和 D 点的含水量状况波动较大(图 5),因此取这 2 点做以分析.从图 5 中可以看出,B 点 N_2O 排放强烈地受地表积水的影响,8 月 18 日地表落干以后, N_2O 排放迅速升高,而地表恢复积水后, N_2O 排放又趋于减少.当 9 月 3 日地面再次落干时, N_2O 的排放又有所升高.经分析地表积水深度与上午 N_2O 排放的相关系数为 - 0.22,与下午 N_2O 排放的相关系数为 - 0.65,可见 B 点积水深度与 N_2O 排放存在着一定的负相关性.徐华^[18]等人发现,稻田干湿交替时的 N_2O 排放是持续淹水时的 23 倍,干湿交替促进了 N_2O 的排放,在此,B 点的平均排放通量是 A 点的 8 倍,与徐华的结论一致.对于 D 点, N_2O 的排放与土壤含水率变化趋势大体一致,土壤含水率与上下午 N_2O 排放的相关系数分别为 0.52,0.77.说明土壤水分在没有达到田间持水量之前,与 N_2O 排放有着显著的正相关性,也暗示在一般的旱地农田中,土壤水分是决定其 N_2O 排放的重要因素.另外,大气降水、农事活

动(翻地)等也可直接改变土壤的水分状况,进一步影响 N_2O 的排放.

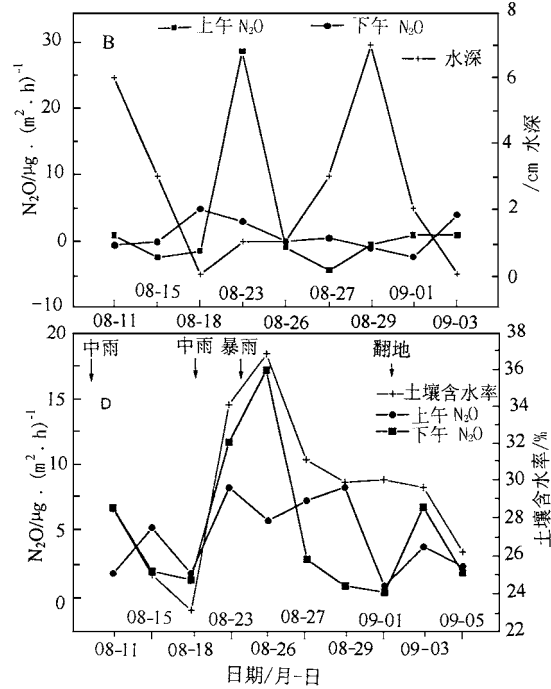


图 5 水分状况与 B、D 2 点 N_2O 排放的关系
Fig. 5 Relationship between N_2O e missin and accumulated water depth at site B and water content at site D

(3) 温度 8 到 9 月份 4 点上下午的箱温、水温(地温)变化情况如图 3 所示,可以看出,温度对 N_2O 的产生影响并不明显,这可能是因为观测期间温度一直比较高,对于硝化微生物和反硝化微生物的生长没有构成限制,并且温度在每个观测日之间变化幅度不大,因而对于 N_2O 的影响就被其它因素(Eh,水分状况等)所掩盖,但如果从一个较长时段分析,可能就会得到受温度影响明显的排放模式.

3 小结

- (1) 8 到 9 月份三江平原沼泽湿地近地面气层 N_2O 平均浓度为 $281.7 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{m}^3$, 低于大气背景浓度,说明沼泽湿地可能是人类目前了解较少但非常重要的 N_2O 汇.
- (2) 4 个观测点的日变化形式不完全相同,除小麦田全天持续排放 N_2O 外,其余各点一天当中均出现排放与吸收交替出现的情况.温度

是影响 N₂O 日排放模式的主要因素.

(3) 8 到 9 月份 A、B、C、D 点的 N₂O 平均排放强度分别为 0.22 μg/(m²·h), 1.75 μg/(m²·h), 1.31 μg/(m²·h), 4.86 μg/(m²·h), 依次为 D > B > C > A.

(4) 长期监测中 Eh、地表积水情况和土壤水分状况直接决定了沼泽湿地 N₂O 排放量的大小. 地表积水落干, 土壤水分含量降低可以促进 N₂O 的排放, 而积水加深, 土壤含水量增加减弱了 N₂O 的排放, 甚至吸收大气中的 N₂O.

参考文献:

1 Houghton J T et al. Climate Change: The IPCC Assessment on Climate Change. London: Cambridge University Press, 1990. 1.

2 IPCC, Climate Change. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, edited by Houghton J T Callander B A and Varney S K. New York: Cambridge University Press, 1992.

3 Crutzen P J, Ehhalt D H. Effect of nitrogen and combustion on the stratospheric ozone layer. *Ambio*, 1977, **6**: 112 ~ 117.

4 Wentworth W, Freeman R. Measurement of atmospheric nitrous oxide using an electron capture detector in conjunction with gas chromatography. *J. Chromatography*, 1973, **79**: 322 ~ 323.

5 吕宪国, 何岩, 杨青. 湿地碳循环及其在全球变化中的作用. 见: 陈宜瑜主编, 中国湿地研究. 长春: 吉林科学技术出版社, 1995. 68 ~ 72.

6 王木林, 程红兵, 温玉璞, 李兴生. 我国部分清洁地区大气中 N₂O 的浓度. 见: 王庚辰, 温玉璞编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 环境科学出版社, 1996. 53 ~ 60.

7 Freney J R, Denmead O T, Simpson J R. Soil as a source or

sink for atmospheric nitrous oxide. *Nature*, 1978, **273**: 530 ~ 532.

8 Ryden J C. Nitrous oxide exchange between a grassland soil and the atmosphere. *Nature*, 1981, **292**: 235 ~ 237.

9 Grundmann G L, Lensi R, Chalamet A. Delayed NH₃ and N₂O uptake by maize leaves. *New Phytol.*, 1993, **124**: 259 ~ 263.

10 陈冠雄, 黄斌, 黄国宏等. 稻田 N₂O 和 CH₄ 通量测定及总量估算. 见: 王庚辰, 温玉璞编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 环境科学出版社, 1996. 343 ~ 350.

11 卢维盛, 张建国, 廖宗文. 广州地区晚稻田 CH₄ 和 N₂O 的排放通量及其影响因素. *应用生态学报*, 1997, **8**(3): 275 ~ 278.

12 黄国宏, 陈冠雄, 黄斌等. 东北旱田生态系统 N₂O 排放量测量及总量估算. 见: 王庚辰, 温玉璞编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 环境科学出版社, 1996. 351 ~ 357.

13 曾江海, 王智平, 张玉铭等. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N₂O 通量及总量估算. *环境科学*, 1995, **16**(1): 32 ~ 35.

14 徐文彬, 洪业汤等. 贵州省旱田土壤 N₂O 释放及其环境影响因素. *环境科学*, 2000, **21**(1): 7 ~ 11.

15 Kralova M, Masscheleyn P H, Lindau C W, Patrick Jr WH. Production of dinitrogen and nitrous oxide in soil suspensions as affected by redox potential. *Water, Air, Soil Pollut.*, 1992, **61**: 37 ~ 45.

16 Smith C J, Patrick Jr WH. Nitrous oxide emission following urea nitrogen fertilization of wetland rice. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 1982, **28**: 161 ~ 171.

17 颜晓元, 施书莲, 杜丽娟, 邢光熹. 水分状况对水田土壤 N₂O 排放的影响. *土壤学报*, 2000, **37**(4): 482 ~ 487.

18 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪等. 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N₂O 排放的影响. *应用生态学报*, 1999, **10**(2): 186 ~ 188.