

内蒙古草甸草原 CH_4 和 N_2O 排放通量的时间变异

王艳芬¹ 马秀枝¹ 纪宝明¹ 杜睿² 陈佐忠¹ 王庚辰² 王跃思² 万小伟²

(1 中国科学院植物研究所, 北京 100093) (2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 1998年6月1日、7月2日、8月3日和9月1日用静态箱-气相色谱法对内蒙古锡林河流域草甸草原 CH_4 和 N_2O 排放通量的昼夜观测表明, 天然草原是 N_2O 的源、 CH_4 的汇, 其排放和吸收具有明显的昼夜变化规律。4次昼夜观测的结果还表明, 草甸草原排放 N_2O 和吸收 CH_4 的能力具有强烈的季节变化规律。方差分析表明, 不同季节 N_2O 排放通量差异显著 ($F = 6.359$, $p < 0.004$), 日均通量变化范围为 $0.282 \sim 2.134 \mu\text{g N}_2\text{O-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 而 CH_4 4次测定的日均吸收通量分别为 (-52.19 ± 19.67) 、 (-27.20 ± 10.57) 、 (-126.05 ± 9.32) 和 $(-16.45 \pm 1.31) \mu\text{g CH}_4\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 从整个生长季看表现为“高-低-高-低”的特点。锡林河流域选择 9:00 ~ 13:00 作为采样日起始采样时间, 并以该时段观测获得的温室气体地-气交换通量来代表当日通量是比较合适的。

关键词 N_2O CH_4 日变化 草甸草原 锡林河流域 内蒙古

DIURNAL AND SEASONAL VARIATION IN METHANE AND NITROUS OXIDE FLUXES IN MEADOW STEPPE OF INNER MONGOLIA

WANG Yan-Fen¹ MA Xiu-Zhi¹ JI Bao-Ming¹ DU Rui² CHEN Zuo-Zhong¹

WANG Geng-Chen² WANG Yue-Si² and WAN Xiao-Wei²

(1 Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

(2 Institute of Atmospheric Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Temperate and tropical oxic soils usually exhibit low levels of atmospheric CH_4 oxidation, which are estimated to consume about 10% of the atmospheric CH_4 . It has been reported that the semi-arid grasslands represent a significant global sink for CH_4 and a source of atmospheric N_2O . However, the spatial and temporal variability of methane is usually very high which may result in the uncertainty of the ecosystem's function in the exchange of greenhouse between ecosystem and atmosphere. In order to help define the possible range of emission of N_2O and CH_4 from temperate grassland of Inner Mongolia, diurnal variation in fluxes of methane and nitrous oxide in meadow steppe in the Xilin River basin were investigated with static-chamber and GC methods on June 1, July 2, August 3 and September 1 of 1998. Suitable sampling time was also discussed with the data of diurnal variation investigation. The native meadow steppe can act as a source of atmospheric N_2O but a sink of CH_4 in which the fluxes of the two greenhouse gases had obvious diurnal variation. ANOVA results showed that there was significant difference for the fluxes of N_2O in the four months ($F = 6.359$, $p < 0.004$), ranging between $0.282 \sim 2.134 \mu\text{g N}_2\text{O-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. These background emission rates were typically similar to those in other temperate grasslands. The diurnal mean uptake rates of methane were (-52.19 ± 19.67) , (-27.20 ± 10.57) , (-126.05 ± 9.32) and $(-16.45 \pm 1.31) \mu\text{g CH}_4\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ for the four months respectively, which has a trend of “high-low-high-low” from the end of May through the beginning of September. The methane uptake rates were similar to those in the Colorado short-grass steppe, averaging $31.2 \mu\text{g CH}_4\text{-C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, compared with varieties of temperate ecosystems. It was proved that selecting 9:00 – 13:00 as sampling time for each sampling day is suitable in Xilin River basin according to the diurnal variation measurement.

Key words N_2O , CH_4 , Diurnal variation, Meadow steppe, Xilin River basin, Inner Mongolia

随着全球变化研究的升温, 人类活动干扰下陆地生态系统温室气体的源汇研究越来越受到关注, N_2O 和 CH_4 作为两种重要的温室气体对全球变暖的贡献约为 20%, 而且过去几十年中这两种气体的浓

度一直在不断增加 (Mosier *et al.*, 1991), 许多研究发现人类的农牧业生产活动是造成大气中温室气体变化的一个重要原因, 例如草地的农牧业利用 (放牧、农垦、灌溉、施肥等) 增加了土壤-植被系统排放

N_2O 的能力, 同时降低了吸收 CH_4 的能力 (Bronson *et al.*, 1992; Bronson & Mosier, 1993; Mosier *et al.*, 1996; Groffman & Turner, 1995; Smart *et al.*, 1999; Corre *et al.*, 1999; Luo *et al.*, 1999), 改变了草地生态系统在大气 N_2O 、 CH_4 平衡中的地位和作用。然而, 尽管草地生态系统地-气交换通量特征已取得了许多野外原位观测结果, 要全面评价全球草地生态系统对全球大气的贡献仍旧十分困难, 研究方法 & 历史资料可比性差是其中的一个方面, 更重要的是大部分已有的观测工作集中在北美、欧洲、澳洲等地, 而其它地区这方面的工作相对滞后。中国拥有占世界草地面积的 12.5% 的草地, 草地生态系统温室气体研究起步却非常晚 (王艳芬等, 1998; 杜睿等, 1998; 王庚辰等, 1998; 王跃思等, 2000; 纪宝明等, 2001)。中国草地中, 有许多地区由于其独特的地理环境和景观特征被认为是全球变化研究的关键地区, 内蒙古草原便是其中之一。

内蒙古草原是欧亚大陆草原的重要组成部分, 也是目前温带地区保存较好的天然草原之一。受水分和温度驱动, 自东向西, 依次分布着草甸草原、典型草原和荒漠草原。草甸草原作为锡林河流域一个重要的草原类型, 其土壤-植被系统与大气间温室气体交换通量及其特征, 是判定锡林河流域草原对全球温室气体贡献的重要指标之一, 草甸草原是一种地带性植被类型, 可以由锡林河流域外推至内蒙古草原, 并最终定量给出内蒙古草甸草原在人类活动干扰下对大气 CH_4 、 N_2O 的贡献, 为今后该地区农牧业产业结构的调整以及社会、经济、生态环境的良性发展提供科学的决策依据。

本文主要探讨草甸草原 CH_4 、 N_2O 排放通量的昼夜、季节变化特征。

1 研究地点

锡林河流域 ($43^{\circ}26' \sim 44^{\circ}39' \text{ N}$, $115^{\circ}32' \sim 117^{\circ}12' \text{ E}$) 地处内蒙古高原东部, 锡林郭勒高平原的东部边缘。地势从东南向西北逐渐降低, 东部低山最高海拔 1 506 m, 西北锡林河下游最低处为 902 m, 全流域相对高差 600 m, 总面积 10 786 km^2 。该区地形以低山丘陵为特征, 坡度较缓, 低山相对高差不大于 300 m, 丘陵相对起伏 30 ~ 150 m。在实验区中还有锡林河及支流之间的风成沙带, 宽度最大达 10 km, 沙丘相对起伏约为 10 ~ 20 m, 具有中等复杂性的地形地貌。该区草原原始面貌保存较好, 在气候、植被、动物和土壤等方面, 不仅在中国温带草原区具有

较强的典型性, 而且对整个欧亚大陆草原区来讲也有明显的代表性。

研究区内草甸草原是以贝加尔针茅 (*Stipa baicalensis*) 为建群种的草原群落类型, 这类草原每平方米有植物种 29 ~ 39 种, 贝加尔针茅、麻花头 (*Serratula centauroides*)、线叶菊 (*Filifolium sibiricum*)、射干鸢尾 (*Iris dichotoma*) 等中生、早中生和中旱生植物为主, 占 53.3%, 植物群落总盖度为 63%。地上生物量为 96 ~ 236 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 地下生物量为 906 ~ 3 254 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, 二者的比值为 9.4 ~ 15.5。该类型草原下发育的是黑钙土, 其腐殖质层厚度为 50 cm 左右; 有机质含量达 4%; 碳酸钙淀积不明显或只形成假菌丝体, 没有明显的钙积层。研究地点描述及采样点土壤主要特征详见文献 (王艳芬等, 1998)。

2 研究方法

2.1 采样方法

本研究采用透明静态箱-气相色谱法观测 CH_4 、 N_2O 的地-气交换通量。采样分析系统主要由采样箱、样品采集系统、气相色谱分析及色谱工作站组成。采样箱截面为正方形, 边长 60 cm, 箱高 20 cm, 描述详见文献 (王跃思等, 2000)。其基座的安装深度与采样点土质状况有关, 草原土壤表层较为坚硬, 采样箱基座插入土壤不必太深。将采样箱基座嵌入采样位点, 使基座上口与地面水平尽量不扰动观测点的自然状态。一般要在正式采样前一周左右的时间将采样箱基座安装在采样点, 不破坏原有植被, 以便使人为扰动对微量气体交换速率观测的影响降到最低。所测结果为土壤-植被亚系统与大气之间的气体交换通量。

进行采样时, 首先将箱体罩在已预先安好的基座上, 同时开始计时并采集第一个样品。将注射器与箱体一侧的三通阀相联取气体样品, 取样量一般为 30 ~ 60 ml, 同时记录箱体内温度值 (空气温度、土壤表面温度和土壤 10 cm 处温度); 之后每隔 20 min 取样 1 次, 共取样 4 次。采样结束后, 将箱体移走, 样品带回实验室进行分析。样品分析仪器为 HP5890II 型气相色谱, 方法详见文献 (纪宝明等, 2001)。

于 1998 年的 6 月 1 日、7 月 1 日、8 月 2 日和 9 月 1 日对草甸草原进行昼夜变化规律观测。24 h 内每 3 h 采样 1 次, 同时测定箱体内外温度 (气温、地表温度和土壤 10 cm 温度)、土壤湿度和空气湿度。

2.2 计算方法

气体交换通量计算采用如下公式：

$$F = \frac{\Delta m}{A \cdot \Delta t} = \frac{\rho \cdot V \cdot \Delta c}{A \cdot \Delta t} = \rho \cdot H \cdot \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中， F 为测定气体的交换通量， ρ 为箱内气体密度， Δm 和 Δc 分别为 Δt 时间内箱内气体质量和混合比浓度的变化， A 、 V 、 H 分别为采样箱底面积、体积和气室高度， $\Delta c / \Delta t$ 为箱内气体浓度变化。 F 为负值时表示吸收，为正值时表示排放。具体计算时考虑对气体通量进行气压和温度校正。

3 结果与讨论

3.1 天然草甸草原 N₂O 排放通量昼夜变化规律

天然草原 N₂O 排放通量昼夜观测结果表明每日上午变化较大，尤其是早上 7:00 左右，午后出现一个通量低谷，之后又有不同程度的上升(图 1)。从生长物候期来看，6~8 月 3 个月昼夜通量变化规律较为一致，但其通量范围是不同的，方差分析表明，4 次测定 N₂O 排放通量差异显著 ($F = 6.359$, $p < 0.004$)。从 4 次观测结果(表 1)来看，8 月 3 日日均通量最大，为 $2.134 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，6 月 1 日通量最低，仅为 $0.282 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。该结果可能与 1998 年的天气条件有关系，1998 年是当地少有的丰水年，根据中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站(距采样点 20 km)的气象记录，当年总降水量达 507 mm，远远高于当地平均降水量，而且 7 月降雨约占全年降雨量的 41%，进一步的研究发现，观

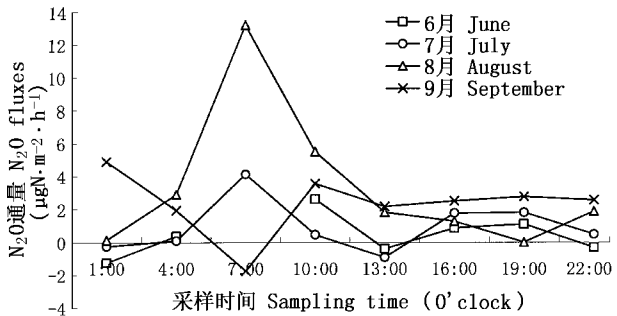


图 1 草甸草原 N₂O 排放通量昼夜变化(1998)
Fig.1 Diurnal variation of N₂O fluxes in meadow steppe in 1998

表 1 N₂O 日平均通量及其变异性

Table 1 Diurnal mean fluxes (DMF) and CV of N ₂ O				
取样时间 Sampling date (日/月 Day/month)	日平均通量 DMF (μg N ₂ O-N·m ⁻² ·h ⁻¹)			变异系数 CV (%)
	均值 Mean flux	均方差 STD		
1/6	0.282	0.802		284
2/7	0.613	1.011		165
3/8	2.134	2.766		130
2/9	1.492	1.209		81

测前三天累计降雨量以 8 月取样最大，为 21.3 mm，其它 3 个月分别为 1.9、2.0、1.0 mm，而 4 次取样的日均气温变化于 13.6~18.4 ℃ 之间，因此土壤水分状况的变化是 8 月 3 日出现高 N₂O 通量的可能原因。在累积降雨量变化不大的 3 次取样中，6 月 1 日的土壤温度(10 cm)最低，这可能是 6 月 1 日 N₂O 通量低的主要原因。由于 N₂O 主要产生于土壤硝化过程和反硝化过程(Williams *et al.*, 1992)，而这两个过程不仅受土壤理化性质(土壤有机质含量、pH、土壤容重、土壤质地等)的影响而具有强烈的空间变异性，而且受土壤温度、土壤湿度、O₂ 及碳氮底物供应能力、植物生长状况等的影响而具有明显的时间变异性，所以，在同一采样点进行的不同季节的观测结果的差异可以简单地表明 N₂O 通量的时间变异性。通量的昼夜变化范围很大，变异系数均在 80% 以上。

分析 N₂O 昼夜通量与大气温度、大气湿度、箱内空气温度及土壤 10 cm 处温度的相关性，发现 6 月 1 日与 8 月 3 日 N₂O 排放通量与箱内空气温度存在较好的正相关关系 ($R = 0.564$, $n = 6$; $R = 0.563$, $n = 8$)。

在昼夜规律观测中还有一个值得注意的是负通量的出现。除了 8 月 3 日，其它 3 次均观测到了负通量，其中 6 月 1 日出现了 3 次，7 月 2 日出现了两次，9 月 1 日 1 次。在这 6 次负通量中，夜间的 4 次分别在 22:00(1 次)、1:00(两次)和 7:30(1 次)；白天的两次均出现在 13:00。由于最大负通量(绝对值)仅为 $1.109 \mu\text{g N}_2\text{O-N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，出现的时间也没有规律，对其可能产生的机理和生态学意义目前还不能做出判断。

3.2 天然草甸草原 CH₄ 吸收通量昼夜变化规律

草甸草原 CH₄ 吸收昼夜变化的重要特征体现在日变幅(图 2)上。除 9 月初(14.19~17.75 μg CH₄-C·m⁻²·h⁻¹)以外，其它 3 个月日变幅较大，分

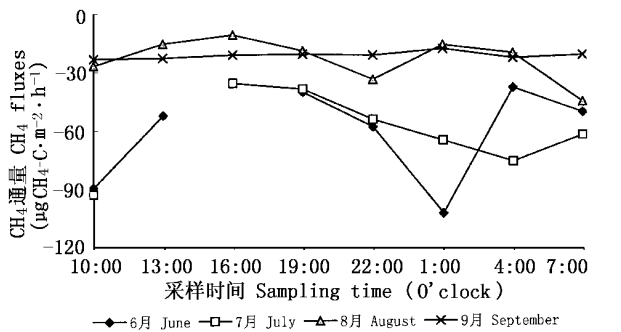


图 2 草甸草原 CH₄ 吸收通量昼夜变化
Fig.2 Diurnal change of CH₄ fluxes in meadow steppe

STD: Standard square deviation CV: Coefficient of variation

别为 30.50 ~ 77.44、26.98 ~ 69.63 和 8.48 ~ 34.74 $\mu\text{g CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。日最大吸收通量均出现在 16:00 至次日凌晨 1:00 之间,而且除 9 月初外,其它 3 个月的昼夜观测结果均发现有两个吸收高峰:6 月初峰值出现在 16:00 和次日凌晨 1:00,7 月初峰值出现在 19:00 和次日 1:00,8 月初则有所提前,出现在 13:00 和 22:00。

分析 CH₄ 吸收通量昼夜变化与大气温度、大气湿度、箱内空气温度及箱内土壤 10 cm 处温度的关系,发现除 9 月 1 日的观测中 CH₄ 吸收通量与大气温度、箱内空气温度及大气湿度存在显著相关关系之外,其它月份 CH₄ 通量与其它因子之间没有明显相关关系;CH₄ 通量与土壤 10 cm 处温度之间没有明显相关关系。这与董云社等(2000)在同一地点获得的 CH₄ 通量与土壤 5 cm 处温度的相关性有所不同,说明不同层次的土壤温度对土壤吸收 CH₄ 的影响存在差异,由此也说明目前对草甸草原土壤吸收 CH₄ 的机理尚需进一步的实验研究。

4 次昼夜观测结果表明,草甸草原吸收 CH₄ 的能力具有强烈的季节变化规律,6 ~ 9 月的月初 CH₄ 日均吸收通量分别为 (-52.19 ± 19.67) 、 (-27.20 ± 10.57) 、 (-12.05 ± 9.32) 和 (-16.45 ± 1.31) $\mu\text{g CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

3.3 N₂O 与 CH₄ 通量的关系

对 N₂O 排放通量与 CH₄ 吸收通量所作的回归分析(图 3)表明,二者具有一定的相关关系($R^2 = 0.2699$, $n = 24$),此结果与 Mosier 等(1991)在科罗拉多矮草草原所做的结果是一致的。这个现象与土壤吸收 CH₄ 的生物过程有关,土壤氧化大气中的 CH₄ 主要由甲烷专性氧化酶(MMO)催化完成(Davidson & Schimel, 1995; Conrad, 1996; Topp & Pattey,

1997),这与硝化过程中氨的氧化反应类似,只不过后一过程由化能自养硝化细菌通过氨专性氧化酶(AMO)催化完成,但是,由于两类细菌在许多方面十分相似(Topp & Pattey, 1997),甲烷氧化也可通过 AMO 完成,因此,土壤中的铵与甲烷将竞争同一氧化位点,假定 N₂O 主要产生于土壤硝化过程(Mosier *et al.*, 1991; 王艳芬等,1997),N₂O 的排放通量和 CH₄ 的吸收通量均受土壤中 AMO 的影响而可能出现此消彼长的情况。尽管如此,由于这两个过程还同时受到非生物因素的控制,这种相关关系的存在需要一定的环境条件,例如,在极干旱条件下,土壤排放 N₂O 和吸收 CH₄ 的速率都将降低(Mosier *et al.*, 1991)。

4 讨 论

由于温室气体排放具有明显的昼夜变化规律,时间变异性很大,因此,每个采样日采样时间的选择十分重要,昼夜变化规律观测对确定每日采样时间具有重要参考价值。目前国际上一般选择 9:00 ~ 12:00 作为当日采样时间(Mosier *et al.*, 1991; Mosier & Delgado, 1997; Mosier *et al.*, 1993; Kessavalou *et al.*, 1998),并假定此测定值能代表当日交换通量,Epstein 等(1998)则建议在 10:00 ~ 14:00 之间采取灵活的采样起始时间以防止总是观测到交换通量高峰。

表 2 和表 3 分别给出了草甸草原 CH₄ 和 N₂O 日平均地-气交换通量、10:00 和 13:00 时交换通量。通过简单的比较可以发现,尽管不同月份 10:00 和 13:00 的 CH₄ 和 N₂O 通量变化较大,但是 10:00 时 CH₄ 通量总比 13:00 时小,而 N₂O 通量前者总比后者大,这说明 CH₄ 和 N₂O 通量日变化规律强烈地受到节律性变化因子的控制。CH₄ 昼夜变异系数为 6.8% ~ 71.4%,这与 Mosier 等(1991)得出的 CH₄ 变化小于 10% 的结果相比大得多。N₂O 的昼夜通量变化则更大,与其它研究中报道的结果比较一致

表 2 草甸草原 CH₄ 日平均吸收通量与 10:00、13:00 瞬时通量的比较
Table 2 Diurnal mean CH₄ uptake and instantaneous uptake on 10:00 and 13:00

	CH ₄ 日平均通量	10:00	13:00
	Mean CH ₄ daily	CH ₄ 通量	CH ₄ 通量
		CH ₄ flux	CH ₄ flux
$(\mu\text{g CH}_4\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$			
6 月 June	- 52.19 ± 19.67	- 30.50	- 44.12
7 月 July	- 27.20 ± 10.57	- 29.33	- 41.25
8 月 August	- 12.05 ± 9.32	- 14.69	- 25.83
9 月 September	- 16.46 ± 1.32	- 15.94	- 16.53

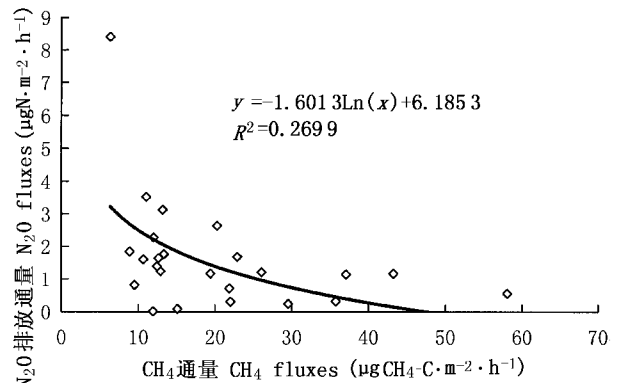


图 3 草甸草原土壤-植被系统 N₂O 排放通量与 CH₄ 吸收通量的关系
Fig.3 Relationship between N₂O emission and CH₄ consumption from soil-vegetation system in meadow steppe

表3 草甸草原 N₂O 日平均吸收通量与 10:00、13:00 通量的比较
Table 3 Diurnal Mean N₂O flux and instantaneous flux on 10:00 and 13:00

	N ₂ O 日平均通量 Mean N ₂ O daily	10:00 N ₂ O 通量 N ₂ O flux	13:00 N ₂ O 通量 N ₂ O flux
	(μg N ₂ O-C·m ⁻² ·h ⁻¹)		
6 月 June	0.282 ± 0.802	1.677	-0.239
7 月 July	0.613 ± 1.011	0.308	-0.576
8 月 August	2.134 ± 2.766	3.522	1.169
9 月 September	1.492 ± 1.209	2.277	1.391

(Slemr & Seller, 1984)。由于 10:00 ~ 13:00 之间 CH₄ 和 N₂O 通量在整个生长季的变化是单向增加或单向减少的,因此可将 10:00 和 13:00 时的通量视为一个区间的两个端点,如果把 CH₄ 和 N₂O 日平均通量落入该区间与否作为判断 10:00 ~ 13:00 之间测得的通量是否能够代表当日通量的标准,那么从整个生长季来看,10:00 ~ 13:00 的测定结果很具有代表性。

因此,在内蒙古草原选择 9:00 ~ 13:00 作为每个采样日的采样时间是比较合适的。

参 考 文 献

Bronson, K. F. & A. R. Mosier. 1993. Nitrous oxide emissions and methane consumption in wheat and corn-cropped systems. In: Harper, L. A. ed. *Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change*. Madison: American Society of Agronomy Special Publication. **55**: 133 ~ 144.

Bronson, K. F., A. R. Mosier & S. R. Bishnoi. 1992. Nitrous oxide emissions in irrigated corn as affected by encapsulated calcium carbide and nitrapyrin. *Soil Science Society of America Journal*, **56**: 161 ~ 165.

Conrad, R. 1996. Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O and NO). *Microbiology Review*, **60**: 609 ~ 640.

Corre, M. D., D. J. Pennock, C. van Kessel & D. K. Elliott. 1999. Estimation of annual nitrous oxide emissions from a transitional grassland-forest region in Saskatchewan, Canada. *Biogeochemistry*, **44**: 29 ~ 49.

Davidson, E. A. & J. P. Schimel. 1995. Microbial processes of production and consumption of nitric oxide, nitrous oxide and methane. In: Matson, P. A. & R. C. Harriss eds. *Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water*. Malden, Mass: Blackwell Science. 327 ~ 357.

Dong, Y. S. (董云社), S. Zhang (章申), Y. C. Qi (齐玉春), Z. Z. Chen (陈佐忠) & Y. B. Geng (耿元波). 2000. Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation. *Chinese Science Bulletin*, **45**: 318 ~ 322.

Du, R. (杜睿), G. C. Wang (王庚辰), G. R. Liu (刘广仁), Y. F. Wang (王艳芬), Y. S. Wang (王跃思), D. R. Li (吕达仁) & Z. Z. Chen (陈佐忠). 1998. The study on diurnal variation in greenhouse gas revenue and expenditure fluxes of *Leymus chinensis* grassland of Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), **6**: 258 ~ 264. (in Chinese with English abstract)

Epstein, H. E., I. C. Burke, A. R. Mosier & G. L. Hutchinson.

1998. Plant species effects on trace gas fluxes in the shortgrass steppe. *Biogeochemistry*, **42**: 145 ~ 168.

Groffman, P. M. & C. L. Turner. 1995. Plant productivity and nitrogen gas flux in a tallgrass prairie landscape. *Landscape Ecology*, **10**: 255 ~ 266.

Ji, B. M. (纪宝明), Y. F. Wang (王艳芬), X. Z. Li (李香真), Y. S. Wang (王跃思), Z. Z. Chen (陈佐忠) & X. H. Zheng (郑循华). 2001. CH₄ and CO₂ concentration in soils of the major grasslands of the Xilin River Basin of Inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **25**: 371 ~ 374. (in Chinese with English abstract)

Kessavalou, A., A. R. Mosier, J. W. Doran, R. A. Drijber, D. J. Lyon & O. Heinemeyer. 1998. Fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. *Journal of Environmental Quality*, **27**: 1094 ~ 1104.

Luo, J., R. W. Tillman & P. R. Ball. 1999. Grazing effects on gentrification in a soil under pasture during two contrasting seasons. *Soil Biology & Biochemistry*, **31**: 903 ~ 912.

Mosier, A., D. Schimel, D. Valentine, K. Bronson & W. Parton. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, **350**: 330 ~ 332.

Mosier, A. R. & J. A. Delgado. 1997. Methane and nitrous oxide fluxes in grasslands in western Puerto Rico. *Chemosphere*, **35**: 2050 ~ 2082.

Mosier, A. R., L. K. Klemetsson, R. A. Sommerfeld & R. C. Musselman. 1993. Methane and nitrous oxide flux in a Wyoming subalpine meadow. *Global Biogeochemical Cycles*, **7**: 771 ~ 784.

Mosier, A. R., W. J. Parton, D. W. Valentine, D. S. Ojima, D. S. Schimel & J. A. Delgado. 1996. CH₄ and N₂O fluxes in the Colorado shortgrass steppe. I. Impact of landscape and nitrogen addition. *Global Biogeochemical Cycles*, **10**: 387 ~ 399.

Slemr, F. & W. Seller. 1984. Field measurements of NO and NO₂ emissions from fertilized and unfertilized soils. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **1**: 159 ~ 169.

Smart, D. R., J. M. Stark & V. Diego. 1999. Resource limitations to nitric oxide emissions from a sagebrush-steppe ecosystem. *Biogeochemistry*, **47**: 63 ~ 86.

Topp, E. & E. Pattey. 1997. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian Journal of Soil Science*, **77**: 167 ~ 178.

Wang, G. C. (王庚辰), R. Du (杜睿), Y. F. Wang (王艳芬), G. R. Liu (刘广仁), Y. S. Wang (王跃思), Z. Z. Chen (陈佐忠) & D. R. Li (吕达仁). 1998. Characteristics of N₂O and CH₄ fluxes and their seasonal variations from Inner Mongolia grassland. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), **6**: 306 ~ 311. (in Chinese with English abstract)

Wang, Y. F. (王艳芬), Z. Z. Chen (陈佐忠) & L. T. Tieszen. 1998. Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilingole, Inner Mongolia, China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), **22**: 545 ~ 551. (in Chinese with English abstract)

Wang, Y. F. (王艳芬), Z. Z. Chen (陈佐忠) & Y. Zhou (周涌). 1997. Studies on N₂O emission from typical steppe in Inner Mongolia. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境), **2**: 280 ~ 285. (in Chinese with English abstract)

Wang, Y. S. (王跃思), B. M. Ji (纪宝明), Y. F. Wang (王艳芬), W. Zhang (张文), G. R. Liu (刘广仁), R. Du (杜睿) & D. M. Luo (骆冬梅). 2000. Measurement of the exchange rate of greenhouse gases between field and atmosphere in semi-arid grassland. *Environmental Science* (环境科学), **3**: 6 ~ 10. (in Chinese with English abstract)

Williams, E. J., G. L. Hutchinson & F. C. Fehsenfeld. 1992. NO_x and N₂O emission from soil. *Global Biogeochemical Cycles*, **6**: 351 ~ 388.