

内蒙古典型草原 N_2O 研究刍议

王艳芬

陈佐忠

周涌

(中国科学院植物研究所, 北京 100093)

(中国农业科学院土壤肥料研究所, 北京 100081)

摘要 利用中国科学院内蒙古草原生态定位研究站 (IMGERS) 的气候、土壤、植被、土地利用方式和家畜等方面的资料, 根据目前国际上 N_2O 的研究进展, 分析了内蒙古典型草原区影响 N_2O 收支作用的可能控制因子, 认为: (1) 作为 N_2O 主要来源的土壤, 其理化性状, 尤其是土壤温度、水分状况、土壤有机质和土壤结构等, 是影响该地区 N_2O 收支平衡的主要控制因子; (2) 土地利用方式的改变对 N_2O 的释放的影响还不十分清楚。草场农作与一定的耕作管理措施以及对天然草场的人为影响 (割草、放牧等) 是对 N_2O 收支平衡影响的主要方面; (3) 家畜排泄物, 无论作为本地区的主要燃料, 还是作为肥料, 在典型草原区 N_2O 的释放中起着不可忽视的作用。

关键词 典型草原 一氧化二氮

1 引言

N_2O 破坏大气圈平流层中的臭氧层的事实早已为人们所认识。作为一个重要的温室效应气体, 普遍认为, N_2O 对全球温室效应的贡献大约占 5% 左右^[1]。自然条件下, N_2O 的排放主要来源于土壤, 土壤中所发生的许多过程都会产生并影响 N_2O 及其它氮氧化物的行为。

迄今为止, 国内外研究人员已对多种生态系统, 尤其是农田生态系统进行了大量的土壤-植被 N_2O 排放研究, 但对面积占我国国土面积 34.7% 的草地生态系统, 特别是天然草原生态系统 N_2O 的研究却很少见到报道。本文利用中国科学院内蒙古草原生态定位站的气候、植被、土壤、土地利用方式和家畜等方面的资料, 根据目前国际上有关 N_2O 的研究进展, 分析了内蒙古典型草原区影响 N_2O 收支平衡的可能控制因子。

2 草地 N_2O 的产生、释放及其影响因子

2.1 N_2O 的产生

土壤是 N_2O 的主要来源。据估计, 施肥土壤每年释放的 N_2O 为 1.5 ± 1 Tg (此处指的是 N_2O 中 N), 自然土壤为 6 ± 3 Tg, 合计占全球 N_2O 已知源 (14 ± 7 Tg) 的 53.6% (平均)^[2]。

土壤中的总氮量据估计为 28.7×10^3 Tg^[3], 氮素的生物转化过程, 如硝化、反硝化过程, 和非生物转化过程, 如 NO_2^- 与有机质的化学反应过程, 都伴随着 N_2O 的释放。

土壤中 N_2O 的产生与土壤氮素的生物转化密切相关。根据已有的资料, N_2O 在硝化过程中产生的可能机制如图 1 所示^[4]。

在反硝化过程中, NO_3^- 经过下列步骤被逐步还原:



参与生物反硝化过程的微生物在合适的环境条件下完成全过程, 然而, 许多情况下只进行到其中的一步。因此, 整个过程中除了 N_2 外, N_2O 也有可能产生, 而且 N_2O 、 N_2 的比值受底物 (NO_3^- 和 NO_2^-)、 O_2 分压、有机碳的有效性、温度等的影响。Betlach 利用反硝化作用的动力学模式, 预言能引起反硝化作用总速率下降的任何因子都能导致与 N_2 有关的 N_2O 的增加^[5]。

随着人类对 N_2O 认识的深入, 越来越多的 N_2O 源为科学家所发现。目前, 高等植物被认为是一个 N_2O 源^[6]。天然草地生态系统中, 植被和家畜排泄物都直接向大气排放 N_2O 。

2.2 N_2O 的释放

由于 N_2O 能够为反硝化微生物所利用, 土壤中 N_2O 产生以后是否能够最终释放进入大气主要取决于其在释放过程中是否被还原。在嫌气条件下, 土壤通常能够积累 N_2O , 对这种结果的一种普遍解释是 NO_3^- 或 NO_2^- 比 N_2O 是更好的一种电子受体, O_2 也可以作为电子受体而起作用, 因此, 与 N_2 有关的 N_2O 的产生量随 O_2 有效性的增加而提高, 但气体产生总量有所下降^[5]。

与此相关的还有影响 N_2O 在土壤中扩散及其在土壤与大气交换的土壤参数 (如扩散系数)。而这些参数又与土壤温度、土壤水分含量、土壤液相及非液相组成等有关, 相对比较复杂^[7]。

2.3 影响内蒙古典型草原 N_2O 生成和释放的因素分析

影响内蒙古典型草原 N_2O 生成和释放的因素比较多, 土壤、植被、土地利用方式、家畜排泄物等均应进行考虑。其中, 土壤类型及其理化性状是决定 N_2O 排放量的关键因子。

2.3.1 土壤类型

内蒙古典型草原是欧亚大陆草原的重要组成部分, 该区土壤主要以栗钙土、黑钙土为主, 草甸土、沼泽土、沙土和盐土有小面积分布。在计算 N_2O 收支作用时, 可以用栗钙土和黑钙土代表该区土壤类型。

栗钙土和黑钙土的主要特征是其独特的腐殖质累积和碳酸钙淀积。一般而言, 暗栗钙土腐殖质含量均在 3% 以上^[8]。有机质中的有机氮矿化以后, 除了被植物直接吸收和

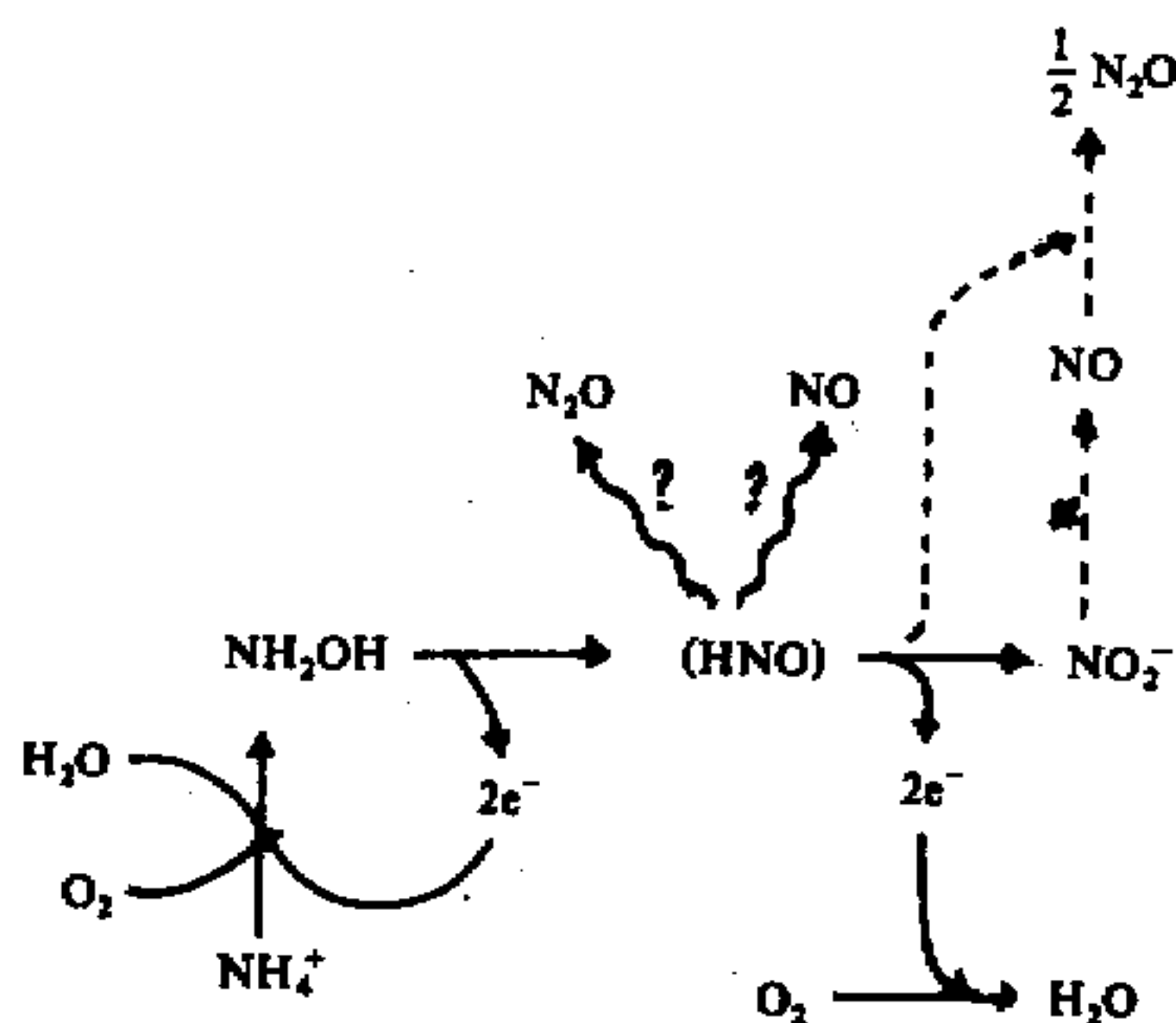


图 1 硝化过程中 N_2O 产生的可能路线

微生物再度固持外,在适宜条件下会很快被微生物转化为 NO_3^- , 继而进行反硝化反应,这两个过程均能够产生 N_2O 气体。尤其值得重视的是,土壤中大部分氮存在于分类上属于软土的土壤中^[5],而黑钙土和栗钙土均在此列。钙积化过程是干旱地区和半干旱地区土壤的重要形成过程之一,该区钙盐主要以 CaCO_3 形式发生淀积。丰富的 CaCO_3 淀积不仅使土壤 pH 值呈微碱性,而且使栗钙土的物理特性变得极为紧实,水分通透性能减弱,这使得植物根系难以下扎,主要分布在 $0\sim 50\text{ cm}$ ^[8]。同时,与上述特征相一致,土壤微生物生物量及其分布也集中在这一层次之内^[9]。土壤酶活性以表层土壤 ($0\sim 10\text{ cm}$) 为最强^[10]。

2.3.2 土壤理化性状

土壤中的硝化、反硝化过程是 N_2O 的主要来源。因此,凡是能够影响这两个过程的土壤理化性状都可能成为控制 N_2O 排放的关键因子,这些因子主要包括土壤温度、土壤水分状况、土壤有机质含量和土壤孔隙度等。

(1) 土壤温度

王少彬等^[11]在对冬小麦田 N_2O 排放观测时发现,土壤温度决定了土壤 N_2O 通量的日变化趋势。这与 Conard 等^[12]对草地 N_2O 排放的研究结果相一致,他们认为, N_2O 排放的日变化与季节变化与温度正相关,而且其排放率与土壤表层温度之间的关系服从 Arrhenius 方程式:

$$v_{\text{N}_2\text{O}} = e^{-K/T+K'} \quad K \text{ 和 } K' \text{ 为常数.}$$

该区气候类型属大陆性半干旱温带草原气候,年均气温 -0.4°C 。冬季漫长而严寒,最热月份平均气温不超过 25°C 。根据 Goodroad 和 Keeney^[13]的研究,反硝化的最适温度为 25°C ,低于 25°C 时, N_2O 的释放率随温度的升高而增加。

(2) 土壤水分

土壤水分通过影响土壤气体的组成和微生物的活性来影响氮素的转化和 N_2O 的释放。根据 Parton 和 Mosier 的实验^[14],在低土壤水分条件下,增加水分会增加 N_2O 的释放和 NO_3^- 的积累;高水分条件下,增加水分含量只有 N_2O 的释放量增加。这说明,两种情况下 N_2O 的产生过程不同,前者是硝化过程,后者是反硝化过程。

该区土壤水分主要靠天然降水补充,年降水量 $250\sim 400\text{ mm}$,主要集中在 7、8、9 月,且降水的最大入渗深度不超过 1 m ,一般只有 $30\sim 40\text{ cm}$,表土水分消耗与补偿比较频繁,因此土壤干旱是经常存在的^[15]。在此土壤水分条件下,降水过程会增加 N_2O 的释放。尽管自然条件下, NO_3^- -N 的积累取决于土壤中的矿化过程、硝化过程、反硝化过程及植物和微生物的固定过程,相对比较复杂,然而, NO_3^- -N 累积量与土壤水分和 N_2O 之间可能存在的关系,对进一步分析该区硝化和反硝化过程对 N_2O 排放量的贡献具有重要意义。

该区土壤水分变化可大致分为以下 4 个时期:(1) 3 月下旬或 4 月初,土壤开始解冻,存在一个返润期,表层土壤水分含量达 $8\%\sim 10\%$;(2) 返润至雨季前,土壤进入失水期,土壤水分迅速减少;(3) 6 月下旬至 8 月底为雨季,是土壤增水期;(4) 雨季后至结冻前,土壤存在一个缓慢的失水期^[15]。以土壤水分作为影响 N_2O 排放的控制因子,结合上述土壤水分变化特征及该地区雨热同季的特点,研究内蒙古典型草原 N_2O

排放的季节动态对于分析草原生态系统对大气 N_2O 的贡献是十分必要的。

(3) 土壤有机质

土壤有机质是土壤中最大的氮库, 而其中的有机氮化合物是土壤氮素存在的主要形式, 土壤中无机氮的水平较低。因此, 土壤有机质的矿化产物为反硝化过程提供了底物, 而且有机质本身为参与这一过程的微生物提供了能源。

根据 Minami 等人的研究, 透性良好的土壤中的 N_2O 的释放与有机 C、N 的相关系数为 0.95 (60% 水分, 30°C 好气培养 20 天)^[16]。Burford 和 Bremner 报道了水溶性 C 或可矿化 C (测定 7 天培养期内放出的 CO_2 量) 与反硝化作用之间具有高度的相关性。根据每产生 1.17 μg N_2O 形态的 N 或产生 0.99 μg N_2 形态的 N 需要 1 μg 的有效 C 的假设, Burford 和 Bremner 计算出所出现的水溶性 C 的量约为 N_2O 和 N_2 放出量的 71%^[15]。

该区暗栗钙土表层 (0~10 cm) 有机质占 3.04%, 全 N 为 0.23%, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 分别为 1.01 mg/100 g 和 1.35 mg/100 g^[17]。除全 N 相对稳定外, 速效 N 受土壤水分影响, 矿化过程、硝化过程和反硝化过程此消彼涨, 变化幅度较大, 但在生长季均出现高峰期, 说明这个时期出现速效养分积累, 这种变化趋势与 N_2O 排放的关系有待研究。

(4) 土壤孔隙度

土壤孔隙度不仅通过控制 O_2 分压决定着硝化、反硝化过程的进行的方向, 而且土壤中产生的 N_2O 是否能够最终释放进入大气层亦与此有关。一些研究结果表明, 植物根系对反硝化作用的影响限于孔隙度低的条件下, 当孔隙度低于 10%~12% 时, 根系中 O_2 的耗竭使反硝化作用增强。反硝化作用随土壤空气含量下降和土壤有机质含量的增加而呈指数增加^[18]。

2.4 土地利用方式

除了草原生态系统土壤-植被亚系统自身的特性之外, 土地利用方式对 N_2O 排放的影响亦十分重要。该区土地利用方式主要有 4 种: 刈割打草、放牧、农垦、人工半人工草地的建立, 其中刈割打草本身对草地的影响相对较小, 人工半人工草地因其面积小对该区 N_2O 排放收支影响亦不突出, 但放牧与农垦的影响却不容忽视。

放牧对 N_2O 排放的影响方式相对比较复杂。其一, 家畜的践踏在一定程度上改变了土壤的物理性状, 如土壤紧实度、孔隙度, 进而影响着 N_2O 排放; 其二, 家畜排泄物是 N_2O 的重要的源, 本地区家畜排泄物以两种方式向大气贡献 N_2O : 作为燃料燃烧后释放 N_2O 和直接向大气排放 N_2O 。近年来, 家畜排泄物作为一个重要 N_2O 源而受到人们的重视。根据 Bouwman 的统计^[19], 饲养动物排泄物直接向大气释放的 N_2O 占总排放量的 8%。Shiyomi 等人^[20]的研究表明, 牛摄取的氮素 90% 以上以排泄物的形式排出体外。汪诗平等在对羯羊进行放牧试验时发现, 一只羯羊每天的排泄物为 0.75 kg, 其中氮素利用率仅为 7%~10% (未发表)。

农垦作为天然草地主要的农业利用方式对整个草地生态系统的影响十分突出。土地利用方式的改变直接造成土壤有机质储量的减少。据有关资料, 温带草原土地改为农业利用后土壤中有机 C 损失 28.6%, 加拿大黑钙土在开垦后土壤有机质减少了 50% 以上^[21]。此外, 草地的农业利用使得土壤向大气释放的气体组成也发生变化, 但土地利

用方式的改变对 N_2O 排放源和汇的影响还不十分清楚^[2]。

2.5 植被类型

植物对 N_2O 释放的影响比较复杂。高等植物本身被认为是 N_2O 的源,同时,植物还通过影响其他环境条件而影响 N_2O 的释放。植物根系的存在因能提供 C 并使局部区域 O_2 浓度降低而促进反硝化作用。Firestone 认为,植物根系的作用:(1)能提供 C 源;(2)通过呼吸作用消耗 O_2 而形成嫌气环境;(3)通过蒸发-蒸腾作用形成根际干燥的土壤条件,增加根区 O_2 的扩散速率;(4)吸收具有潜在活力的根际土壤中的 NO_3^- 而降低其浓度^[5]。Duxbury^[22]指出种植具有固氮能力的豆科植物促进 N_2O 的释放。因此,不同草原植物群落对 N_2O 排放的影响有所不同。

3 拟开展的工作

内蒙古典型草原 N_2O 研究旨在利用区域观测和单点长期测量了解半干旱草原 N_2O 的收支作用及其控制因子,了解半干旱草原对全球 N_2O 收支的定量贡献,期望对全球 N_2O 浓度变化的发展趋势的正确评估提供依据。因此,本研究拟在以下几个方面开展。

3.1 不同类型典型草原 N_2O 通量日变化

准备就 N_2O 排放与土壤温度的关系开展研究,兼顾植被类型的影响。

3.2 不同类型典型草原 N_2O 通量的季节动态

根据以上对该区土壤水分状况变化规律的分析 and 植被生长节律对 N_2O 的排放进行季节动态研究,以探索典型天然群落和放牧条件下的收支作用,并通过后者对前者进行校正,以更接近于实际的结果推广到整个典型草原区。

3.3 不同土地利用方式对 N_2O 通量的影响

主要对天然草原群落和开垦的农田进行比较,明确土地利用方式的改变对该区 N_2O 收支作用的影响。

3.4 内蒙古典型草原 N_2O 收支作用研究

对该区收支作用进行合理估算和预测,为正确估测典型草原区对大气 N_2O 的贡献提供依据。

参 考 文 献

- 1 Houghton J. T. et al., 1990, *Climate Change: the IPCC Scientific Assessment*, Cambridge University Press, London.
- 2 蔡祖聪, 1993, 土壤痕量气体研究展望, 土壤学报, 30(2), 117~124.
- 3 Bouwman A. F., 1990, Exchange of greenhouse gases between terrestrial, In: *Soil and Greenhouse Effect*, Bouwman A. F. (Ed), John Wiley & Sons, Chichester, 61~127.
- 4 王敬国, 1993, 土壤氮素的转化过程中温室效应气体的释放和吸收, 环境科学研究, 6(5), 47~51.
- 5 I.F.J. 史蒂文森等, 1989, 农业土壤中的氮, 北京: 科学出版社.
- 6 陈冠雄等, 1990, 植物释放 N_2O 的研究, 应用生态学报, 1(1), 94~96.
- 7 G. L. Hutchinson, 1995, Biosphere-Atmosphere Exchange of Gaseous N Oxide, In: *Soils and Global Change*, R. Lal et al. (Ed.), CRC Press, 219~236.

- 8 汪久文等, 1988, 锡林河流域土壤的发生类型及其性质的研究, 草原生态系统研究 (第二集), 23~83.
- 9 廖仰南等, 1985, 内蒙古草原土壤微生物生态学研究 I. 锡林河流域土壤微生物的季节变化及其土层垂直分布, 草原生态系统研究 (第一集), 166~180.
- 10 廖仰南等, 1985, 内蒙古草原土壤微生物生态学研究 I. 锡林河流域土壤微生物生物量及其季节动态的研究, 草原生态系统研究 (第一集), 181~194.
- 11 王少彬等, 1994, 冬小麦田氧化亚氮的排放, 农业环境保护, 13(5), 210~212.
- 12 Conard R. J. 1983, *Geophys Res.*, 88(11), 6709~6718.
- 13 Goodroad L. L. and Keeney D. R., 1984, *Soil Biol. Biochem.*, 16~39.
- 14 Parton W. J., Mosier A. R. et al., 1988, *Biogeochem.*, 6~45.
- 15 李绍良, 1988, 栗钙土的水分状况与牧草生长, 草原生态系统研究 (第二集), 10~19.
- 16 Bremner J. M. and Blackmer A. M. 1981, Terrestrial nitrification as a source of atmospheric nitrous oxides, In: *Denitrification, Nitrification and Atmospheric Nitrous Oxide*, New York: John Wiley & Sons, 151~170.
- 17 康师安等, 1992, 羊草草原栗钙土养分含量与动态的研究, 草原生态系统研究 (第四集), 181~190.
- 18 鄯来斌等, 根际中碳和氮的输入及转化, 18.
- 19 Bouwman A. F., 1994, CH_4 and N_2O : Global Emissions and Controls from Rice fields and other Agricultural and Industrial Sources, NIAES, 147~159.
- 20 Shiyomi M., Kirita H. and Takahashi S., 1992, Energy, Phosphorus and Carbon Budgets at Plant, Animal and Ecosystem Levels in Grazing Grasslands In Nishinasuno Area, Japan, *Ecological Processes in Agro-Ecosystems*, NIAES Series No. 1, 173~188.
- 21 王敬国, 1992, 农业生态系统和大气间的温室效应气体交换, 环境科学, 14(2), 49~53.
- 22 Duxbury, J. M. and D. R. Bouldin, 1982, Emission from nitrous oxide from soils, *Nature*, 278, 462~464.

Studies on the N_2O Emission from the Typical Grassland in the Inner Mongolia

Wang Yanfen and Chen Zuozhong

(Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Zhou Yong

(Institute of Soil and Fertilizer, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081)

Abstract The potential factors which could have effect on N_2O flow from the typical grassland in the Inner Mongolia was analyzed in this paper, which based on the data from the Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station (IMGERS). There is abundant evidence that soil physical and chemical characteristics, especially soil temperature, soil moisture and soil organic matter, strongly influence the rate of N_2O emission. To analyze the effect of land use on N_2O emission, more data are required. N_2O emission caused by animal excreta should also be taken into account.

Key words typical grassland N_2O