

半干旱草原温室气体排放/吸收 与环境因子的关系研究*

王跃思 王明星 胡玉琼
黄耀 杜睿 郑循华

5812 A

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100083)

纪宝明 王艳芬

(中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要 静态箱-气相色谱法对内蒙古半干旱草原连续两年的实验观测研究结果表明, 内蒙古草原是大气 CO_2 和 N_2O 的排放源, 而是 CH_4 的汇。在植物生长不同季节, 草原生态系统排放/吸收温室气体 CO_2 , CH_4 和 N_2O 的日变化形式各有不同, 其中在植物生长旺季日变化形式最具特征。3种温室气体的季节排放/吸收高峰主要出现在土壤湿度较大的春融和降雨较为集中时期。所有草原植物生长季节 CO_2 净排放日变化形式均为白天出现排放低值, 夜间出现排放高值。较高的温度有利于 CO_2 排放, 地上生物量决定着光合吸收 CO_2 量值的高低。影响半干旱草原吸收 CH_4 和排放 N_2O 日变化形式的关键是土壤含水量和供氧状况。日温变化则主要影响日变化强度。吸收 CH_4 和排放 N_2O 的季节变化与土壤湿度季节变化分别呈线性反、正相关, 相关系数均在 0.4~0.6 之间。自由放牧使 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 交换速率日较差降低, 同时使 N_2O 和 CH_4 年度排放/吸收量减少和 CO_2 年度排放量增加。

关键词: 日变化; 季变化; 温度; 湿度; 温室气体

1 引言

我国温带草原约为 $2.3 \times 10^8 \text{ km}^2$, 占国土面积的 24%, 其中大多数为半干旱和干旱草原^[1]。由于过度放牧、农垦等人为活动和全球气候变暖, 华北干旱等全球或区域自然与人为因素的影响, 我国气候脆弱带温带半干旱草原—内蒙古大草原退化日趋严重, 与此同时, 半干旱草原作为一种重要的生态系统类型, 对温室气体的源汇效应直接影响着地球大气圈温室气体的平衡。盲目增加放牧量和不恰当的农垦, 极有可能使我国内蒙古大草原退化进入恶性循环, 并有可能加剧中国北方沙尘暴和增加全球变暖的速度。

CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是大气中最主要的 3 种温室气体, 它们浓度的持续增长是导致全球变暖的直接原因。许多研究表明, 施用有机肥可增加稻田排放 CH_4 产量, 渍水稻田 CH_4 排放量与土壤温度变化成正比^[2~4]; 施用氮肥可引起农田生态系统 N_2O 排放量增加, 旱作农田 N_2O 排放速率随土壤含水量增加而增加, 在土壤含水量一定时, N_2O

2000-11-01 收到, 2002-07-29 收到再改稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地生态系统碳收支研究”(KZCX1-SW-01) 资助

排放速率随温度的增加而增大^[4~6]。早在“八五”和“九五”期间杜睿等^[7]、王艳芬^[8]和王跃思等^[9,10]就对内蒙古草原部分地区温室气体 N_2O 和 CH_4 排放开始了初步实验观测及研究工作;“十五”期间,这一工作仍在进行^[11,12]。但我国对温带半干旱草原温室气体源汇研究尚处起步阶段,到目前为止,仍未见对我国半干旱草原温室气体排放或吸收与土壤湿度、温度等环境因子关系的系统研究报导。

2 观测区域、实验方法和数据校正

2.1 观测地点背景资料

本研究选择的实验区位于锡林河流域中国科学院内蒙古草原生态系统定位站(以下简称“定位站”)附近。该区域草地原始面貌保存较好,气候、植被、动物和土壤等方面在中国温带草原及整个欧亚大陆草原区域均具明显代表性。实验区域属温带大陆性季风气候。四季分明,冬季严寒漫长,无霜期短,年平均气温约为 1°C , 气温年较差和日较差较大,日照充分。降水集中于 6~8 月并且年际变率极大。年降水量由东南向西北递减,而温度(及潜在蒸发量)则沿此方向递增。为研究不同类型、不同放牧压力草原排放/吸收温室气体与环境因子之间的关系,本文研究选择了以下 3 种典型草原区域作为主要采样点。

2.1.1 天然羊草草原

该采样点设在锡林河南岸、益和乌拉分场葛根萨拉以南、依和都贵北面的低邱宽谷地带,面积约 0.5 km^2 , 其土壤类型为暗栗钙土。围栏封育前此处是一片由于过度放牧而导致严重退化的羊草草原,定位站于 1983 年开始围栏封育,禁止放牧。经十多年的封育,群落优势虽尚未恢复到羊草草原的原生群落外貌,但已是这一区域最接近原生草原的样地。本文暂称其为天然羊草草原。

2.1.2 自由放牧羊草草原

该实验区域在 20 世纪 50 年代以前基本无人类活动,1950 年居民仅 20 人,而当前区域内已有万人以上。该区主要的人类活动为割草、放牧和农垦。从对自然生态系统的影响分析,割草对自然生态系统影响很小,但过度放牧和农垦可使原生草原迅速退化。近 50 年来,草原的载畜量迅速增加,草地农垦亦有一定的规模,已经构成使草原退化的重大压力。该采样点选择在围栏外自由放牧区,距离天然羊草草原采样点约 80 m,本文暂称其为自由放牧羊草草原。

2.1.3 天然大针茅草原

该采样点设在天然羊草草原以西,即额尔根陶勒盖以西、巴葛乌拉以东的一级玄武岩台地上。采样点为另一种围栏封育的恢复草原类型,其土壤类型为典型栗钙土,沙壤至壤砂质地,大针茅群落组成不如羊草丰富,以大针茅为代表的旱生密丛禾草占显著优势。群落草丛高度达 85 cm,有明显草层分化,覆盖度较小,一般为 25% 左右,丰水年可达 50%。本文暂称其为(天然)大针茅草原。

2.2 实验方法和数据校准

半干旱草原是 CH_4 的弱汇, N_2O 的弱源,交替排放,吸收 CO_2 。虽然内蒙古草原不乏找到适合微气象法观测温室气体排放净通量的下垫面,但与农田相比,内蒙草地属

温带半干旱草原, 地下生物量大大超过地上生物量, 碳、氮在生态系统中周转周期较长, 与大气间的交换通量低, 因此难以使用微气象法得到准确的观测效果。相反, 对使用箱法观测非常有利。因此, 本观测实验最终选择采用的是静态箱-气相色谱法。采样箱由有机玻璃板(暗箱用 PVC 材料或用锡箔遮盖明箱)和不锈钢板制成, 有大(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=90 cm $\times$ 90 cm $\times$ 35 cm)、中一(65 cm $\times$ 65 cm $\times$ 70 cm)、中二(40 cm $\times$ 40 cm $\times$ 35 cm)、小一(20 cm $\times$ 20 cm $\times$ 25 cm) 4 种型号方形采样箱, 和一种圆形(直径 20 cm, 高 25 cm, PVC 材料)采样箱。为确保数据的有效性, 使用不同的采样箱对不同类型天然草原、放牧草原和农垦麦田 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的排放(吸收)观测。明箱和暗箱对比采样, 用于研究温度和太阳辐射对排放的影响。通过对气相色谱进样、分析和检测系统气路的改进, 一次进样可在同一台仪器上完成所有 3 种温室气体的分析和检测。实验观测方法本文作者已有详述^[9,10,13]。

1998~2000 年, 对天然羊草草原、自由放牧羊草草原、大针茅草原、冷蒿-小禾草草原、草甸草原和草甸草原开垦的农田进行了每周 1~2 次的连续实验观测。为获得较大的数据量, 我们在相同区域设置 6 个采样点用 3 只采样箱分两组轮流采样, 对观测结果取平均, 这样不仅可以减少对采样点的扰动, 而且降低了排放/吸收的空间变异给实验结果带来的偏差。同时在上述前 4 种草原进行每月一次(非生长季)或两次(生长季)连续 24 h(每 2 小时一次)的日变化观测。利用相对固定的日变化形式可以计算每一观测时刻温室气体排放/吸收量与日平均值之间的校正系数, 原理上可通过观测日(如每周一次)任意时间单次测定结果, 比较准确地计算出观测日平均排放量, 同时也可通过每周 1 次观测得到的通量结果对日变化幅度进行校准。本文研究采用的数据, 是基于 1998 年 4 月~2000 年 4 月两年相同(或相近)时间观测结果的小时、日、旬、月平均值。

3 主要结果与讨论

静态箱-气相色谱法对内蒙古半干旱草原连续两年的实验观测研究表明, 在植物生长不同季节, 草原生态系统排放/吸收温室气体 CO₂、CH₄ 和 N₂O 的日变化形式各有不同, 其中在植物生长旺季日变化形式最具特征; 季变化形式表明 3 种温室气体的排放/吸收高峰主要出现在土壤湿度较大的春融和降雨较为集中时期。土壤湿度、温度、孔隙度和地表生物量是影响内蒙古草原温室气体排放/吸收日变化和季变化的关键因子, 但不同的因子对不同的草原生态类型和不同的温室气体作用并不完全相同。

3.1 草原温室气体排放/吸收日变化与环境因子的关系

3.1.1 CO₂ 排放日变化

植物光合作用吸收 CO₂, 土壤和植物呼吸排放 CO₂, 本节使用的数据是采用透明采样箱/气相色谱法得到的草原陆地生态系统与大气间交换 CO₂ 速率的动态结果。从图 1 可以看出, 内蒙古典型草原 CO₂ 日排放变化模态基本相同。一天之中虽然有时为大气 CO₂ 的汇, 有时又是 CO₂ 的源, 但日排放量大于吸收量, 净结果为向大气排放 CO₂。晴天时, CO₂ 排放峰值均出现在夜间, 黎明时, 排放通量迅速降低到 0 值附近,

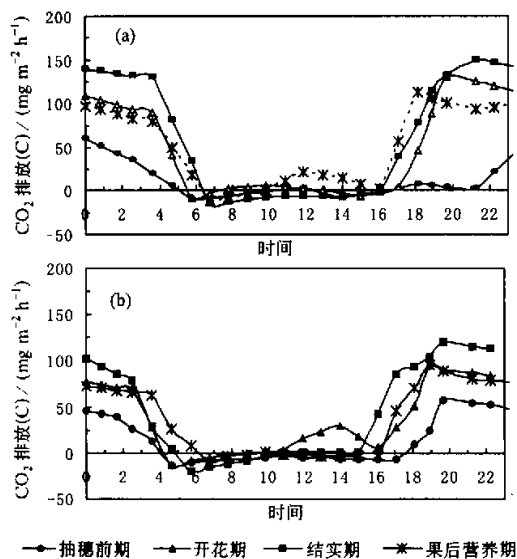


图1 羊草草原 CO_2 排放日变化
(a) 天然羊草草原; (b) 自由放牧羊草草原

然后又缓慢增加。植物生长旺季, 白天吸收值往往大于排放值, 即出现负排放。在草原植物生长的4个季节, 排放最低点均出现在清晨6~7时, 此时光合作用吸收 CO_2 已经达到动态平衡点, 但土壤温度最低, 植物和土壤呼吸最弱, 排放 CO_2 最少, 双重作用致使在清晨出现日排放通量最低值。与之相反, CO_2 排放最高值则是出现在晚上天黑之后20~21时, 此时光合吸收 CO_2 完全终止, 而土壤温度仍维持在较高水平, 植物与土壤呼吸强烈, CO_2 排放出现日变化中最高值。

为了更加清楚地分析草

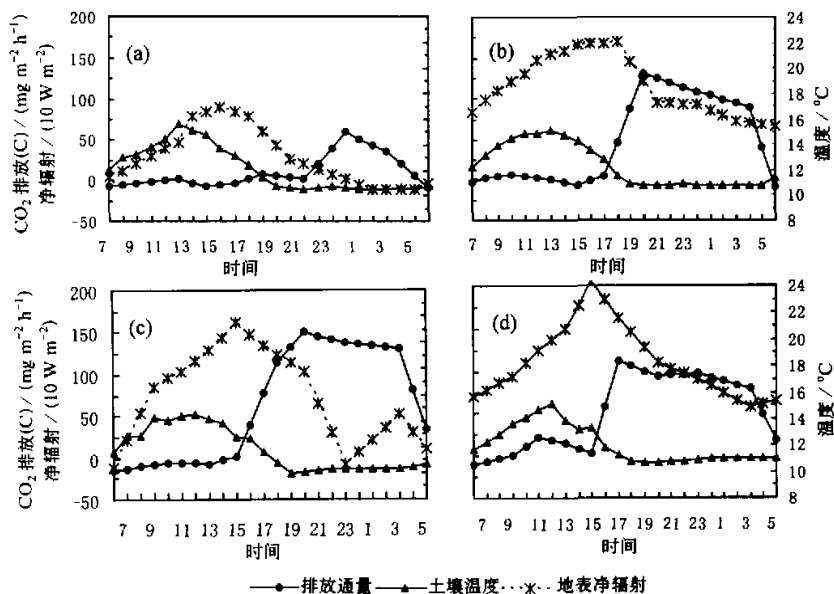


图2 内蒙古草原 CO_2 排放日变化与净辐射和土壤温度的关系
(a) 抽穗前期; (b) 开花期; (c) 结实期; (d) 果后营养期
左纵坐标为 CO_2 排放量和地表净辐射, 右纵坐标为土壤温度

原 CO_2 日变化与辐射和土壤温度的关系, 将图 1a 分成白天时间段和夜间时间段重新作图 2, 并与净辐射和土壤日温变化相比较。从图 2 可以看出, 草原白天 CO_2 低排放时间段与净辐射大于零时间段有较好的吻合, 但排放通量并不与净辐射强度呈反线性相关。即当净辐射达到一定量值时, 草原植物光合吸收 CO_2 达到饱和, 而与太阳光辐射是否继续加强无关。仔细分析图 1 和图 2, CO_2 排放通量实际分成白天和夜晚两个时间段与日温变化均呈正相关。白天随着土壤温度的升高, CO_2 在较低的排放率下排放通量也缓慢升高; 夜间随着温度的下降, CO_2 排放量逐渐下降, 但下降率较快。因此, 影响 CO_2 日排放变化形式的关键因子是太阳辐射, 土壤温度和地表生物量, 其中土壤温度和地下生物量对夜间 CO_2 的排放强度, 太阳辐射和地上生物量对白天光合吸收 CO_2 的强度影响作用最为关键。本实验结果表现为土壤、植物 (包括根) 呼吸排放 CO_2 量高于植物光合吸收 CO_2 量。

3.1.2 N_2O 排放日变化

本研究项目对土壤 N_2O 微生物产生过程培养实验研究发现, 内蒙古半干旱草原排放的 N_2O 主要来自于异氧硝化过程, 由于异氧硝化菌的硝化活性和强度都远低于自氧硝化菌, 致使草原陆地生态系统排放的 N_2O 日较差偏低, 变化形式复杂。但在草原植物生长旺季, 尤其是开花期, N_2O 日排放变化仍然十分明显。由图 3 可以看出, 在土壤湿度相对较大 ($>15\%$) 和通气性较好的情况下, N_2O 排放通量在中午前后出现高峰, 而在夜间土壤温度较低时出现排放低值。这可能是由于硝化过程产生 N_2O 与土壤温度呈正相关, 使排放通量日变化与土壤日温变化亦呈正相关。图 3b、c 和图 4b 土壤日平均湿度分别为 15.0% 、 20.3% 和 14.5% , 它们的排放通量日变化均与日温变化有较

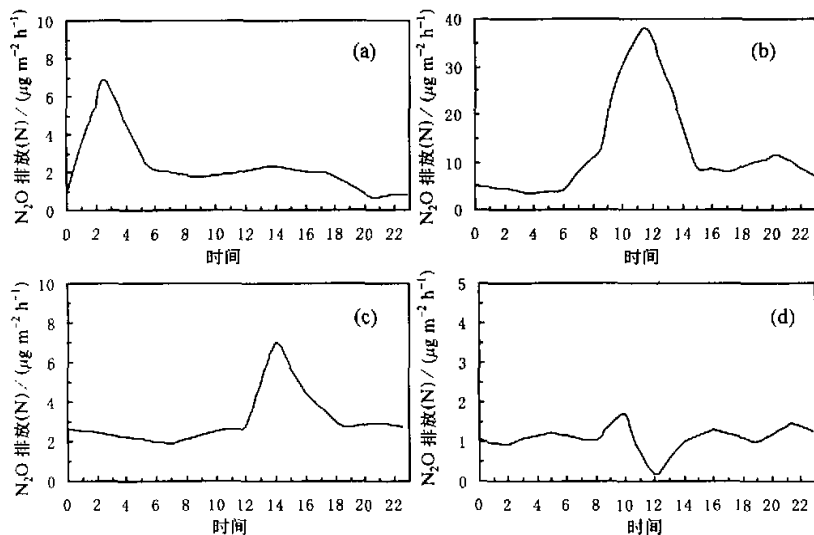


图 3 天然羊草草原不同生长期排放 N_2O 通量日变化
(a) 抽穗前期; (b) 开花期; (c) 结实期; (d) 果后营养期

好的正线性相关。这一观测结果,与华东旱作农田 N_2O 排放研究中观测到的日变化形式基本相同^[16,14]。图 3c 与上述规律相反,土壤日平均湿度为 19.9%,但 N_2O 日变化与日温变化呈反相关。这可能是由于在春融或降雨比较集中的季节,土壤湿度较高时,特别是在表层土壤持水能力较低的放牧草原易产生厌氧微区^[15],此时草原排放的 N_2O 则主要来自于反硝化过程。在厌氧反硝化过程中,产生的 N_2O 与氮气的比值 ($\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$) 与温度呈反相关。即温度越高,反硝化过程生成的氮气越高,生成的 N_2O 越少,因此 N_2O 日排放变化与日温变化整体也呈反相关。图 4c 和 3a 夜间出现的 N_2O 排放峰值有可能是反硝化过程所致。在硝化和反硝化过程同时存在时, N_2O 日变化更加复杂,图 4c 在 16 时左右出现的 N_2O 排放次峰和图 4a 出现的峰值,也是硝化过程产生 N_2O 与日温变化呈正相关的一种体现,只不过是放牧使草原表层土壤和地表生物量发生了较大的变化,致使峰值推移。在果后营养期,草原植物开始凋落,已接近立枯,同时,温度下降,降雨减少, N_2O 日排放通量变化不大,与其他季节相比,日变化已无明显意义,图 3d 和图 4d 土壤湿度日平均仅约为 8%,日较差低,排放通量变化与日温变化也没有显著相关性 ($r^2 < 0.1$)。

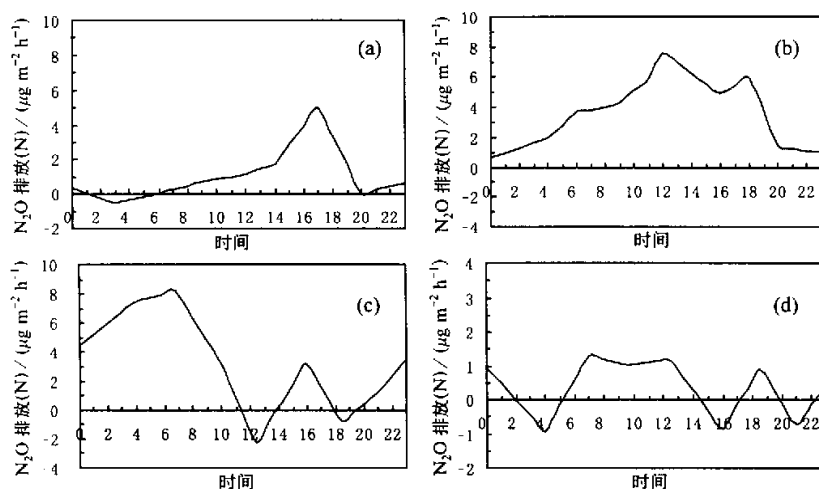


图 4 自由放牧草原不同生长期排放 N_2O 通量日变化
(a) 抽穗前期; (b) 开花期; (c) 结实期; (d) 果后营养期

综上所述,影响半干旱草原 N_2O 排放日变化形式的关键是土壤含水量和表层土壤理化特性,日温变化主要影响日变化强度。

3.1.3 草原吸收 CH_4 日变化

草原吸收 CH_4 的日变化形式主要受土壤水分含量、土壤孔隙度(主要影响输送氧气的能力)、温度和植物生长状态的影响。从图 5 和图 6 可以看出,孔隙度丰富的土壤(禁牧草原),含水量在 15%~20%之间,吸收 CH_4 的能力与土壤日温变化呈正线性相关;湿度低于 15%,吸收 CH_4 的能力则与日温变化呈反线性相关。放牧使草原吸收

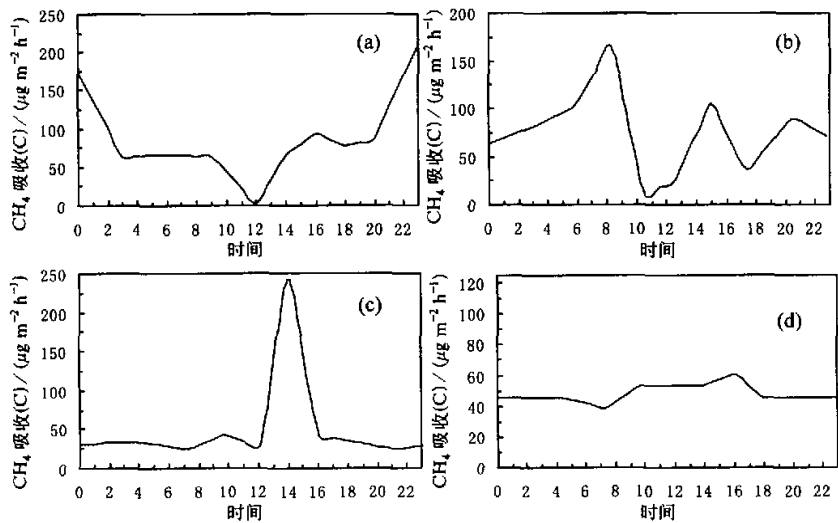


图5 天然羊草原不同生长期吸收CH₄通量日变化
(a) 抽穗前期; (b) 开花期; (c) 结实期; (d) 果后营养期

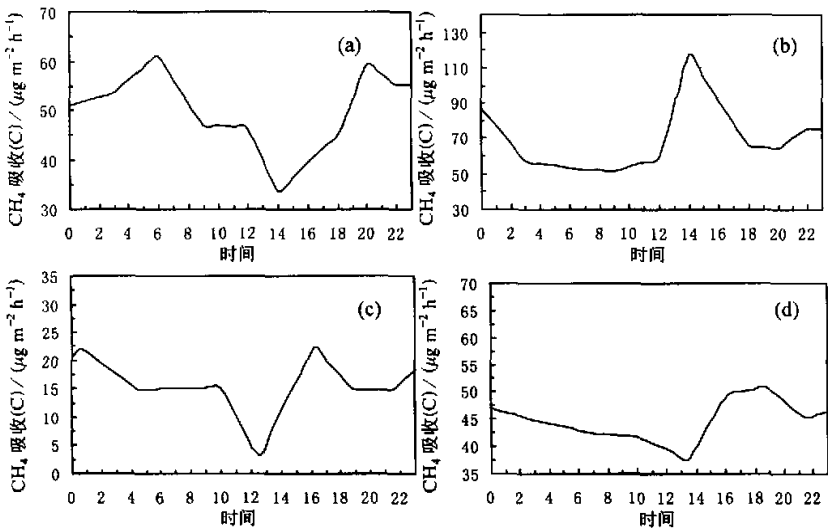


图6 自由放牧羊草原不同生长期吸收CH₄通量日变化
(a) 抽穗前期; (b) 开花期; (c) 结实期; (d) 果后营养期

CH₄ 的日较差大幅度降低。图 5c 和图 6b 土壤日平均含水量分别为 15% 和 19.9%，表现出禁牧草原结实期和放牧草原开花期草原生态系统吸收 CH₄ 的日变化形式与日温变化呈正相关。其中两个特例，图 6c，即放牧草原结实期，由于土壤湿度较大（日平均

为 20.3%), 牛羊践踏产生的厌氧微区不但使土壤吸收 CH_4 的能力大幅度降低, 并且还可能产生 CH_4 (在降雨后, 时常可观测到 CH_4 排放), 厌氧条件下, CH_4 的产生和排放均与土壤温度成正相关^[2,4,16], 因此图 6c 土壤吸收 CH_4 与日温变化成反比是一种可以解释的现象。图 5d, 虽与上述规律相悖, 但日较差仅是其他季节的 $1/8 \sim 1/10$, 其日变化对校正相同时间段 CH_4 日吸收平均值意义不大。

综上所述, 影响草原 CH_4 日变化形式的关键因子是土壤水分和供氧状况, 而温度和植物的生长状况则影响吸收强度, 在讨论草原吸收 CH_4 日变化的原因时, 要考虑多种因素的共同作用, 还要考虑它们之间的相互影响。

3.1.4 土壤湿度、孔隙度及放牧对草原温室气体日排放/吸收的影响

放牧没有改变草原作为大气 CO_2 、 N_2O 源和 CH_4 汇的功能, 也没有改变 CO_2 排放日变化形式, 但使 N_2O 和 CH_4 排放或吸收通量日变化强度发生了不同程度的改变, 并大幅度降低了 3 种温室气体排放通量的日较差 (图 7 和表 1), 其中吸收 CH_4 下降最为突出。放牧行为降低草原排放 N_2O 和吸收 CH_4 日变化幅度的同时, 也大幅度降低了二

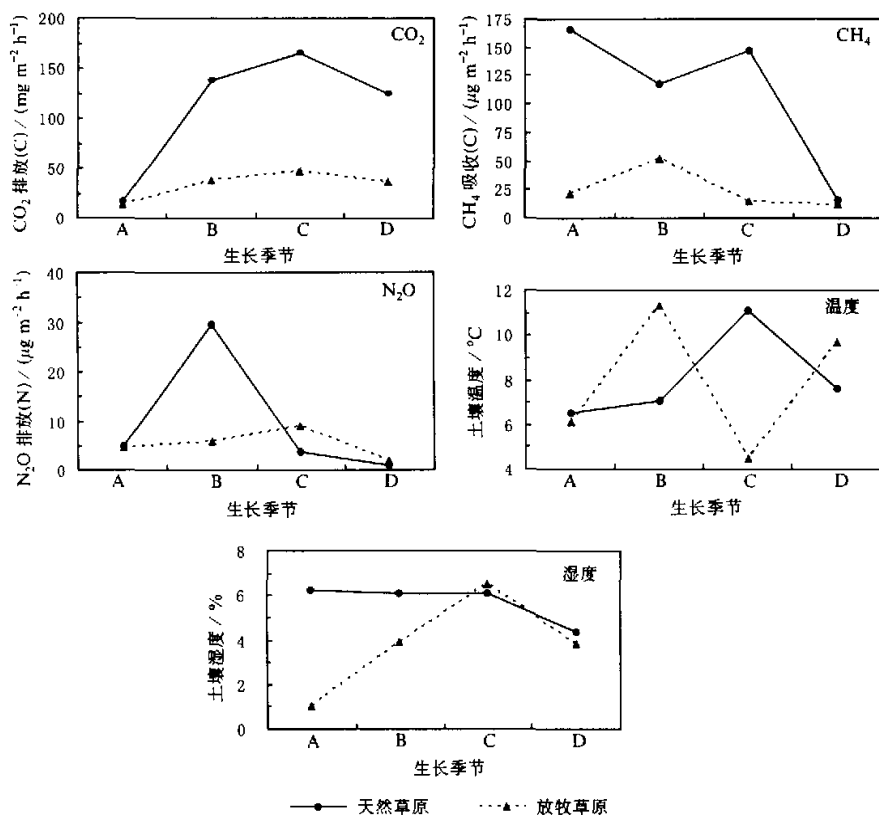


图 7 不同生长季节草原温室气体排放/吸收与主要环境因子的日较差比较
横坐标中 A 为抽穗前期, B 为开花期, C 为结实期, D 为果后营养期

表 1 内蒙古草原温室气体排放与环境因素日较差比对

天然羊草草原 CO ₂ 排放通量 (C)(mg m ⁻² h ⁻¹)					放牧羊草草原 CO ₂ 排放通量 (C)(mg m ⁻² h ⁻¹)			
	最高	最低	平均	日较差	最高	最低	平均	日较差
a	7.9	-9.3	10.8	17.2	56.9	-13.3	70.2	13.1
b	129.8	-8.3	48.3	138.1	95.2	-13.9	109.1	37.6
c	150.0	-15.6	63.0	165.6	115.6	-20.3	135.9	47.0
d	111.9	-11.1	50.9	123.0	96.1	-9.7	105.8	36.8
天然羊草草原吸收 CH ₄ 通量 (C)(μg m ⁻² h ⁻¹)					放牧羊草草原 CO ₂ 排放通量 (C)(μg m ⁻² h ⁻¹)			
	最高	最低	平均	日较差	最高	最低	平均	日较差
a	184.3	19.1	84.8	165.2	58.6	36.6	49.9	22.0
b	134.1	16.9	75.2	117.1	104.7	52.1	70.0	52.5
c	173.5	26.0	50.0	147.5	21.0	6.9	15.8	14.1
d	56.9	41.4	48.3	15.4	50.5	38.9	44.8	11.6
天然羊草草原 N ₂ O 排放通量 (N)(μg m ⁻² h ⁻¹)					放牧羊草草原 N ₂ O 排放通量 (μg m ⁻² h ⁻¹)			
	最高	最低	平均	日较差	最高	最低	平均	日较差
a	5.6	0.7	2.3	4.9	4.1	-0.4	1.0	4.5
b	33.3	3.8	12.3	29.5	6.9	1.0	3.6	5.9
c	5.9	2.0	3.1	3.8	7.9	-1.0	3.3	9.0
d	1.5	0.6	1.1	0.9	1.2	-0.8	0.3	2.0
天然羊草草原土壤温度 (C)					放牧羊草草原土壤温度 (C)			
	最高	最低	平均	日较差	最高	最低	平均	日较差
a	17.0	10.5	13.0	6.5	23.5	10.9	19.0	6.1
b	22.1	15.0	18.6	7.1	25.2	13.9	18.5	11.3
c	21.5	10.4	15.9	11.1	19.4	14.9	16.8	4.5
d	22.5	14.9	18.3	7.6	25.4	15.7	20.6	9.7
天然羊草草原土壤湿度 (%)					放牧羊草草原土壤湿度 (%)			
	最高	最低	平均	日较差	最高	最低	平均	日较差
a	15.4	9.2	11.6	6.2	9.4	8.4	8.7	1.0
b	18.2	12.1	15.0	6.1	15.5	11.6	14.5	3.9
c	23.4	17.3	20.3	6.1	24.0	17.5	20.0	6.5
d	11.8	7.4	8.8	4.4	9.9	6.1	8.1	3.8
净辐射 (W m ⁻²)								
	最高	最低	平均	日较差				
a	685	-115	138	800				
b	630	-77	171	707				
c	527	-172	99.6	699				
d	614	-79.5	126	693				

注：a 抽穗前期、b 开花期、c 结实期、d 果后营养期

者的年度排放/吸收总量；而在降低 CO₂ 日变化幅度的同时，却大大增加了整个年度 CO₂ 排放总量。

导致自由放牧草原日较差大幅度下降的主要原因是放牧不同程度地破坏了草原表层土壤的水、气通道—土壤毛细孔。由于牛羊践踏，草原表层土壤容重和硬度增加，不但使土壤毛细孔密度减少，而且土壤表层几乎见不到可保持土壤水分的凋落物，腐殖质层也很薄^[15]；特别是在雨季，由于含水量增加，土壤相对松软，牛羊在土表留下的脚印在雨水的作用下易形成厌氧微区，微区内土壤呈还原状态，没有足够的氧气以维持 CH₄

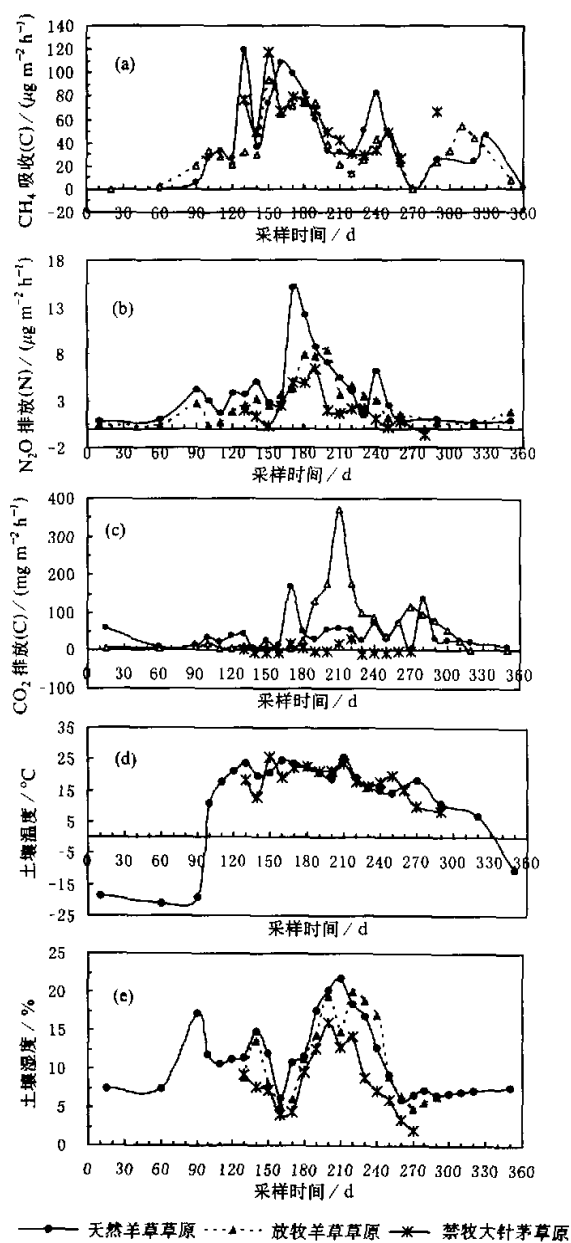


图8 草原温室气体排放/吸收季变化与主要环境因子的关系
(a) CH_4 ; (b) N_2O ; (c) CO_2 ; (d) 土壤温度; (e) 土壤湿度

氧化菌的活性;相反,厌氧 CH_4 生成菌活跃,在适当的温度下,可分解土壤中的有机质产生 CH_4 [2]。在一定土地面积内,吸收和排放同时存在,很显然会降低微量气体交换的日较差。同时,产生 N_2O 的硝化过程由于供氧不足而减缓,反硝化过程产生 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 的比例增加。硝化过程产生 N_2O 与温度变化成正相关,反硝化过程 $\text{N}_2\text{O}/\text{N}_2$ 与温度变化成反相关,与日温变化的两种相反关系是 N_2O 排放日较差降低的主要原因。由于地表硬度增加、毛细孔减少、输送氧气的能力下降,使土壤中的微生物、小动物和植物(地下部分)呼吸受到限制,排放 CO_2 减少;牛羊啃食致使草原地上生物量减少,白天光合作用吸收 CO_2 量降低,双重作用致使 CO_2 排放日较差大幅降低。禁牧草原由于无牲畜干扰,土壤毛细孔丰富,持水能力和输送水分的能力强,对降雨引起的土壤水分增加和蒸腾引起的土壤水分降低反应比较灵敏,水分平衡速度快,因此,在植物生长的每个季节土壤湿度的日变化幅度均保持在较高水平,约为 6% 左右(参见图 7-湿度和表 1);而放牧草原由于持水能力降低,水分输送途径不畅,温室气体日较差变化趋势与湿度日较差变化趋势呈现一致性。研究还发现,土壤排放 N_2O 和吸收 CH_4 的高峰并不是出现在土壤含水量最高和最低时期,而是出现在土壤水分变化剧烈时期。这一结果与 Moiser^[17]1991 年在美国克罗拉多短草原观测到的结果一致。

3.1.5 土壤温度日变化与草原温室气体日排放/吸收的相关性

经过 1998~2000 年两年的系统研究发现,我国内蒙古草原 3 种主要温室气体的排放/吸收日变化与日温变化存在着或正或负的线性相关。

对 32 组排放/吸收通量与温度数据的线性回归分析发现,显著相关($r^2 \geq 0.50$)为 17 组,占总样本数的 53%;基本不相关($r^2 \leq 0.01$)为 2 组,仅占总数的 6%;具有相关性,但相关不十分显著($0.01 \leq r^2 \leq 0.50$)的有 13 组,占 41%(见表 2)。因此可以认为草原温室气体排放日变化与温度日变化成线性正或反相关,即在同一生长季内,日温变化对排放/吸收通量的日变化幅度—日较差影响较大,对日变化模态影响较小。

3.2 草原温室气体排放/吸收季变化与环境因子的关系

3.2.1 CH_4 季变化

温带半干旱草原是大气 CH_4 的一个重要汇,对大气 CH_4 收支平衡起着重要作用。从图 8 可以看出,内蒙古半干旱草原对大气 CH_4 的主要作用是吸收。3 种类型草原吸收 CH_4 的季变化形式相同,观测年份均出现 5 个吸收峰值,放牧草原出现吸收 CH_4 的峰值时间一般比禁牧草原提前或错后 10 天左右,造成这种现象的原因,正是土壤持水能力变化影响了土壤湿度变化,从而影响了土壤吸收 CH_4 的变化过程。草原土壤水分增加除春季春融外,主要由降雨引起,当湿度达到吸收 CH_4 最佳湿度时,就会出现吸收峰值。一般认为,含水量在 15%~20%之间为土壤吸收 CH_4 最佳湿度,此时土壤中的 CH_4 氧化菌活性最强^[18],而土壤含水量在 28%~35%之间会减弱 CH_4 的氧化。显然,降雨使持水能力低的放牧草原土壤首先达到吸收 CH_4 的最佳湿度范围,这有可能是在季节变化中放牧草原吸收大气 CH_4 峰值比天然草原提前的原因;第 240~260 天左右放牧草原比天然草原推迟出现峰值的原因,可能是由于湿度过大的土壤(实测超过了 20%)向低湿度变化时,孔隙度较丰富的天然草原首先达到土壤吸收 CH_4 最佳湿度,因此天然草原比放牧草原先出现吸收峰值。虽然季变化形式相似,但吸收强度有所差别。观测期内大针茅草原吸收 CH_4 通量值范围是 $0.75 \sim 173 (\text{C}) \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$;羊草草

原为 $1.1 \sim 165$ (C) $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 放牧羊草草原为 $0.83 \sim 138$ (C) $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。年平均吸收强度顺序为: 大针茅 > 羊草 > 放牧草原。回归分析发现, 内蒙古地区不同类型和不同放牧压力的草原生态系统对 CH_4 吸收的季节变化与土壤湿度变化呈显著反线性相关 (参见图 9)。与图 8 土壤水分季节变化图比较不难看出, 土壤对 CH_4 的吸收峰值均出现土壤含水量发生变化时期, 过低 ($< 8\%$) 和过高 ($> 20\%$) 的土壤含水量均不利于草原生态系统对 CH_4 的吸收。土壤干/湿不断交替变化, 有利于草原土壤对大气 CH_4 的吸收。这一结果, 与日变化中得到的结论一致。

表 2 内蒙古草原温室气体排放与土壤温度的相关性

禁牧羊草草原 CO_2 排放 (白天)					禁牧羊草草原 CO_2 排放 (夜间)			
	A	B	r^2	n	A	B	r^2	n
a	2.83	-37.4	0.60	12	21.3	-199.2	0.08	7
b	0.26	-4.8	0.01	12	20.1	-234.5	0.63	9
c	1.26	-29.0	0.89	10	1.76	114.7	0.34	8
d	3.8	-64.6	0.56	9	4.2	20.6	0.90	11
放牧羊草草原 CO_2 排放 (白天)					放牧羊草草原 CO_2 排放 (夜间)			
	A	B	r^2	n	A	B	r^2	n
a	0.31	-13.9	0.59	12	3.42	-1.8	0.79	8
b	2.96	-57.3	0.78	12	14.5	-127.7	0.53	9
c	4.96	-91.1	0.90	9	18.4	-213.0	0.42	11
d	2.47	-49.2	0.09	11	10.8	-137.0	0.59	13
禁牧羊草草原 N_2O 排放					放牧羊草草原 N_2O 排放			
	A	B	r^2	n	A	B	r^2	n
a	-0.044	3.02	0.04	12	0.11	-0.97	0.36	24
b	1.22	-13.9	0.29	13	0.33	-3.12	0.86	26
c	0.22	-0.63	0.49	11	-0.76	16.5	0.57	22
d	-0.014	1.39	0.08	12	0.029	0.31	0.07	24
禁牧羊草草原 CH_4 吸收					放牧羊草草原 CH_4 吸收			
	A	B	r^2	n	A	B	r^2	n
a	-5.5	169.9	0.56	20	-0.7	63	0.56	20
b	-2.02	118.6	0.07	26	1.05	48.7	0.13	26
c	7.13	-69.7	0.31	26	-0.62	26.6	0.18	22
d	0.79	33.1	0.75	24	-0.23	49.7	0.15	26

注: a: 抽穗前期, b: 开花期, c: 结实期, d: 果后营养期; A: 排放量/温度, B: 0℃时的排放量, r: 相关系数, n: 样本数

3.2.2 N₂O 季变化

从图 8 可以看出, 内蒙古半干旱草原对大气 N_2O 的作用有吸收和排放两种形式, 但排放远远大于吸收, 净结果为大气 N_2O 源。3 种类型草原排放 N_2O 的季节变化形式基本相同, 但排放通量强度有所差别。每年分别在 3 月和 7 月出现两次吸收峰, N_2O 排放通量与土壤含水量基本成线性正相关, 最强吸收峰一般出现在年度降水量最大的 6~7 月份。如果冬季草原降水量大, 积雪丰富, 3 月份春融引起的 N_2O 爆发式排放有可能使其月平均通量值跃居至年排放最高值。3 类草原年平均排放 N_2O 强度顺序为: 天然羊草草原 > 放牧草原 > 天然大针茅草原。不同的草原土壤类型、植被和地下生物量情况, 对土壤水分变化引起 N_2O 排放量增加的反应各不相同^[6,19], 与 CH_4 的反线性相

关类似, N_2O 排放的季节变化与土壤湿度呈显著正线性相关。(图 10)。

3.2.3 CO_2 季变化

从图 8 可以看出, 天然羊草草原和放牧羊草草原季变化始终表现为大气 CO_2 的源, 而大针茅草原有时排放 CO_2 , 有时吸收 CO_2 。观测期内大针茅草原 CO_2 排放通量范围是 $-11 \sim 80$ (C) $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 月平均最强吸收峰值出现在 9 月, 为 3.0 (C) $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 月平均排放最大值出现在 6 月, 为 6.2 (C) $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$, 总平衡为大气 CO_2 的弱源, 年度平均排放 CO_2 为 102 (C) $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ 。天然羊草草原 CO_2 排放量高于大针茅草原, 而自由放牧又比天然草原增加了 CO_2 排放量, 并且年度排放范围有所增大。土壤温度升高有利于壤微生物、动物和植物呼吸, 可促进 CO_2 排放。植物光合作用吸收 CO_2 , 光照充沛时, 随地表生物量增加吸收 CO_2 量也增加; 相反, 地表生物量减少, 会直接降低植物的光合作用, 表现为 CO_2 净排放量增加。从图 8 (放牧草原和天然草原基本相同) 可以看出土壤温度变化形式与 CO_2 排放有一定的对应, 放牧草原 CO_2 排放峰值出现在 7~8 月 (180~240 天之间), 这一时期阳光照射强且充分, 日净辐射强度在 $400 \sim 600 \text{ W m}^{-2}$ 。此时也是草原年度气温最高时期, 温度升高使土壤中的微生物和地下生物量呼吸加强, CO_2 排放量增加; 由于牲畜啃食, 自由放牧草原地上生物量远不及禁牧的天然草原, 致使植物光合作用吸收 CO_2 量大幅度降低, 净结果为 7~8 月自由放牧羊草草原排放 CO_2 出现一年之中的最强峰值; 由于天然羊草草原围栏禁牧, 地上生物量明显高于自由放牧草原, 在同一时间段内, 土壤和植物呼吸排放 CO_2 速率略大于植物光合作用吸收 CO_2 速率, 净结果为在较低的排放速率下, CO_2 排放通量并没有太大波动。草原吸收 CO_2 存在光合作用饱和点, 而排放速率与土壤温度、湿度呈正相关, 但在观测年份相关系数不高。

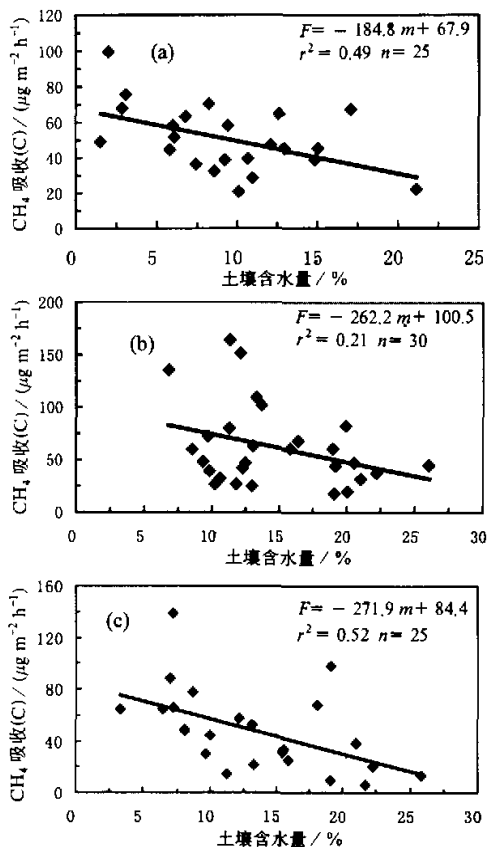


图 9 不同放牧压力下草原 CH_4 吸收通量与土壤含水量的关系
(a) 大针茅草原; (b) 天然羊草草原; (c) 放牧羊草草原

4 结论

(1) 影响 CO_2 日排放变化形式的关键因子是太阳辐射和土壤温度。温度变化和地

下生物量对夜间 CO_2 的排放强度影响显著。影响天然禁牧草原 CO_2 年度吸收和排放的最关键因子是土壤含水量, 影响自由放牧草原另一个决定性的因素则是放牧强度。天然草原基本能够保持 CO_2 的收支平衡, 但自由放牧草原排放远大于吸收。

(2) 影响半干旱草原吸收 CH_4 和排放 N_2O 日变化形式的关键是土壤含水量和供氧状况, 日温变化则主要影响日变化强度。吸收 CH_4 和排放 N_2O 的季节变化与土壤湿度季节变化分别呈线性反、正相关, 相关系数均在 0.4~0.6 之间。

(3) 自由放牧草原土表形成“厌氧微区”是致使 3 种温室气体日较差比天然羊草草原大幅降低的直接原因; 土壤湿度是决定 N_2O 排放和 CH_4 吸收日变化形式的最关键因子, 而日温变化仅影响排放或吸收强度; 3 种温室气体的季排放或吸收高峰均发生在温度和湿度较高的植物生长旺盛季节。

土壤类型、植被类型、降雨、辐射和温度影响草原温室气体交换

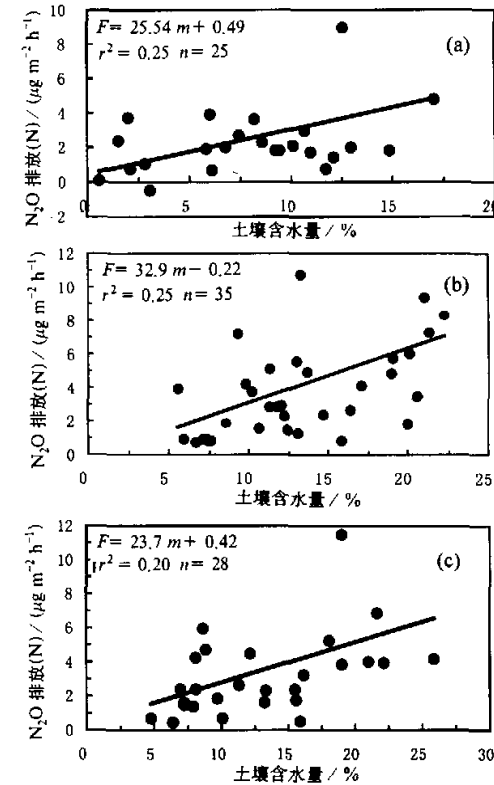


图 10 不同放牧压力下草原 N_2O 排放通量与土壤水量的关系

(a) 大针茅草原; (b) 天然羊草草原; (c) 放牧羊草草原

量均是一种自然行为, 而放牧对交换量的影响乃是人为因素。仅对温室气体而言, 放牧对草原减少 N_2O 排放因而减少的温室气体排放量, 相比对 CH_4 吸收的减少, 特别是对 CO_2 排放量的增加则微不足道。为此我们何不尝试“围栏圈养牛羊”以恢复“原生草原”和降低温室气体排放?

致谢 感谢刘广仁高工、张文研究员、骆冬梅工程师、李香真博士、汪诗平博士和牛海山博士的帮助; 感谢中国科学院内蒙古草原生态系统定位站提供的气象数据和为采样提供的交通工具; 感谢陈佐忠、王庚辰、吕达仁研究员和韩新国所长对本研究工作的支持和指导; 特别感谢中国科学院大气物

理研究所硕士研究生孙杨、徐新、王迎红、谭雪青、顾青峰、陈清美、周在兴和毛敬秋等同学在本研究项目中进行的大量野外观测实验和数据前期处理工作。

参 考 文 献

- 1 陈佐忠主编, 锡林河流域地形与气候概况, 草原生态系统研究文集3, 北京: 科学出版社, 1988, 1~22.
- 2 Wang Mingxing, Zheng Xunhua and Wang Yuesi et al., CH_4 Emission from Various Rice Fields in PR China, *Theoretical and Applied Climatology*, 1996, **55**(1), 129~138.
- 3 Huang Yao, R. L. Sass and F. M. Fisher, Model estimates of methane emission from irrigated rice cultivation of China, *Global Change Biology*, 1998, **4**, 809~821.
- 4 Zheng Xunhua, Wang Mingxing and Wang Yuesi et al., Characters of greenhouse gas (N_2O , NO , CH_4) emissions from croplands of Southeast China, *World Resource Review*, 1999, **11**(2), 229~246.
- 5 陈冠雄, 商曙晖, 植物释放 N_2O , 应用生态学报, 1990, **1**(1), 94~96.
- 6 Zheng Xunhua, Wang Mingxing and Wang Yuesi, 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*, 1999, **17**(1), 83~92.
- 7 杜春, 陈冠雄, 吕达仁等, 土壤含水量与温度对羊草、大针茅典型草原土壤-植物系统温室气体收支影响的初步研究, 气候与环境研究, 1997, **2**(3), 273~279.
- 8 王艳芬, 内蒙古典型草原 N_2O 研究刍议, 气候与环境研究, 1997, **3**, 280~284.
- 9 王跃思, 纪宝明、王明星等, 农田 $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 自动采样观测系统, 中国科学院研究生学报, 1997, **14**(1), 17~22.
- 10 王跃思, 纪宝明, 王明星等, 半干旱草原地-气温室气体 CO_2 , CH_4 和 N_2O 交换速率测定方法研究, 环境科学, 2000, **21**(3), 6~10.
- 11 李玉娥, 林而达, 天然草地利用方式改变对土壤排放 CO_2 和吸收 CH_4 的影响, 农村生态环境, 2000, **16**(2), 14~16.
- 12 Dong Yunshe, Zhang Shen and Qi Yuchun et al., Fluxes of CO_2 , N_2O and CH_4 from a typical temperate grassland in Inner Mongolia and its daily variation, *Source Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(17), 1590~1594.
- 13 王跃思, 郑邦华, 刘广仁等, 静态箱/气相色谱法自动检测农田 N_2O 排放, 分析测试技术与仪器, 1997, **3**(1), 10~15.
- 14 Zheng Xunhua, Wang Mingxing and Wang Yuesi et al., N_2O and CH_4 Emission from Rice Paddies in Southeast China, *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1997, **21**(2), 167~174.
- 15 贾树海, 牧压梯度上土壤物理性质的变化, 草原生态系统研究, 1997, 第五集, 12~16.
- 16 Huang Yao, R. L. Sass and F. M. Fisher, A semi-empirical model of methane emission from flooded rice paddy soils, *Global Change Biology*, 1998, **4**, 247~268.
- 17 Mosier, A., D. Schumel and D. Valentine et al., Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands, *Nature*, 1991, **350**, 330~332.
- 18 Martin K. and C. Ralf, Effect of CH_4 concentrations and soil conditions on the induction of CH_4 oxidation activity, *Soil Bio and Biochem*, 1995, **27**, 1517~1527.
- 19 李香真, 陈佐忠, 不同放牧率对草原植物与土壤C、N、P含量的影响, 草地学报, 1998, **6**(2), 90~98.

Study on Relationship between the Variations of Greenhouse Gases Efflux/ Uptake and the Key Environmental Factors in Mongolia Semi-Arid Grasslands

Wang Yuesi, Wang Mingxing, Hu Yuqiong,
Huang Yao, Du Rui, and Zheng Xunhua,

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,

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

Ji Baoming and Wang Yanfen

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

Abstract Static chamber-gas chromatographic techniques were used for measuring efflux/uptake of CO_2 , CH_4 and N_2O in Inner Mongolia semi-arid typical grasslands. Our data indicates that the Inner Mongolia semi-arid grassland represent a significant global source of CO_2 and N_2O , and a significant sink of CH_4 . There are different patterns of diurnal variations in different season, but the most significant pattern is in summer time or early fall. The most intensive seasonal efflux/uptake of CO_2 , CH_4 and N_2O occurs when the soils much wetter for raining or spring-melting. There is a general diurnal variation pattern on CO_2 efflux, the efflux is low during the day while the efflux is high in the late evening. The higher the temperature is, the higher the efflux of CO_2 occurs; the more prosperous the biomass above the ground is, the higher the uptake of CO_2 occurs. The diurnal variation patterns of CH_4 and N_2O are controlled by the key factors that are soil moisture and the capacity of transporting oxygen, the range of diurnal uptake/emission flux of CH_4 and N_2O depends on the variation of diurnal temperature. The significant positive/negative correlation were found between the seasonal variation of efflux/uptake of $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ and the variation of temperature ($r=0.4\sim 0.6$). Diurnal range of efflux/uptake of $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ decreased for free grazing in Inner Mongolia grasslands, simultaneity, the quantity of annual efflux/uptake of $\text{N}_2\text{O}/\text{CH}_4$ decreased either, while the annual efflux of CO_2 increased.

Key words: diurnal variation; seasonal variation; temperature; moisture; greenhouse gas