

内蒙古羊草草原不同物候期 CH_4 通量日变化特征与日通量比较

齐玉春, 董云社^{*}, 耿元波, 杨小红, 刘立新, 李明峰, 刘杏认

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 利用静态暗箱法对内蒙古半干旱羊草草原不同物候期原状群落与土壤 CH_4 通量的日变化进行了野外定位试验研究, 结果表明: 羊草草原土壤为大气 CH_4 的吸收汇, 不同观测日 CH_4 通量的日变化特征存在较大差异; 气温及表层地温与 CH_4 吸收通量除果后营养期呈显著或极显著正相关外, 其余观测日两者的相关性不明显; 原状群落与土壤 CH_4 吸收通量间除 2002 年果后营养期以及 2003 年开花期两者差异分别达到 0.10 与 0.05 的显著性水平外, 两者在其余观测日差异均不显著; 不同物候期间 CH_4 日平均通量除原状群落开花期与结实后期间, 开花期与 2001 年果后营养期以及结实后期与 2002 年果后营养期间差异显著外, 其它不同物候期之间 CH_4 吸收通量没有显著差异。

关键词: 内蒙古; 羊草草原; CH_4 通量; 日变化; 环境因子

中图分类号: X142; P467

文章编号: 1000-0585(2004)06-0785-10

随着近年来全球气候变暖及相关环境问题的日益突出, 对于含碳温室气体的研究逐步成为全球变化与环境科学领域的研究前沿与热点^[1~3]。在各种含碳温室气体中, 甲烷 (CH_4) 作为大气中一个重要的含碳温室气体, 它对温室效应的贡献仅次于 CO_2 而居第二位^[4]。大气 CH_4 含量主要取决于自然和人为 CH_4 排放与氧化循环间的平衡, 大气 CH_4 浓度持续升高不仅是其源增加的结果, 也是其汇减小的结果^[5]。以往对于 CH_4 源汇通量的研究多集中在水稻田、湿地等 CH_4 排放源的研究上, 而相关试验研究表明, 好气的土壤环境由于其利于甲烷氧化菌的生长, 也可以氧化消耗大气中的 CH_4 , 研究表明: 排水良好的旱地土壤每年约氧化消耗大气中 10% 左右的 CH_4 ^[6], 是除大气光化学反应外陆地生态系统最大的 CH_4 汇^[7~9]。一般说来, 大气光化学反应人类很难对其进行调控, 因此, 对于 CH_4 土壤汇的强度、时空变化及其主要影响因子的研究就显得尤为重要。但目前对于土壤作为大气 CH_4 汇的研究还远没有其作为 CH_4 源的研究那么深入, 尤其是对于我国的温带半干旱草地, 只是在近几年才陆续开展了一些工作, 并且研究多数是测定去除植被后的土壤 CH_4 通量, 而在现实条件下草原群落多是存在着植被覆盖的, 有无植被覆盖不仅对土壤温度、土壤水分等环境因子影响较大^[10~12], 而且植被覆盖, 如凋落物层的存在等对 CH_4 排放与氧化吸

收稿日期: 2004-06-28; 修订日期: 2004-09-20

基金项目: 中国科学院知识创新重大项目 (KZCX1-SW-04)、中国科学院地理科学与资源研究所知识创新项目 (CXIOG-E04-03-01)、国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB412503) 资助。

作者简介: 齐玉春 (1972), 女, 山东茌平县人, 助理研究员, 博士。主要从事全球变化与温室气体排放以及碳、氮元素生物地球化学循环等方面的研究, 已发表论文 26 篇。E-mail: qiyu@igsnrr.ac.cn.

* 通讯作者: 董云社 (1964), 博士, 研究员。E-mail: dongys@igsnrr.ac.cn.

收过程也存在重要影响^[13]。因此,针对目前的相关研究现状,本研究设计采用了静态暗箱法进行相应的野外气体采样,并且在试验中对原状草地以及去除地上植被后的土壤 CH_4 通量进行了同期对比观测。静态暗箱法能够在一定程度上较好地克服扣箱后箱内温度上升过快的缺陷,从而尽可能地减小扣箱对自然状态的干扰,使我们能够较为准确地获得更接近自然状况的草原群落与大气间的 CH_4 交换量。

本研究选择了草原类型在我国温带草原中具有代表性的内蒙古草原锡林河流域作为主要试验区域,以锡林河流域分布面积最广的典型草地类型——羊草草原群落为主要研究对象,自 2001 年 9 月~2003 年 6 月针对羊草草原不同物候期先后进行了多次日变化观测,试图通过野外试验认识半干旱草地生态系统 CH_4 通量的日变化规律,评价主要环境因子对 CH_4 通量变化的定量影响,比较不同物候期 CH_4 通量的差异。

1 研究方法

1.1 试验地自然概况

羊草草原是欧亚大陆东部草原分布最广,面积最大,饲用价值较高的一个草地类型,同时也是内蒙古锡林河流域面积最大的草原群落。本研究选择的羊草采样样地位于锡林河南岸约 10 km 处 ($43^{\circ}32'45''\sim 43^{\circ}33'10''\text{N}$, $116^{\circ}40'30''\sim 116^{\circ}40'50''\text{E}$),所选样地自 1980 年起进行围栏封育试验,围栏面积 $400\text{ m}\times 600\text{ m}$,是全球变化研究中国东北样带 (NECT) 穿过的中心区域。样地内组成羊草群落的植物约 86 种,分属 28 科,67 属,其中常见者约 45 种,广旱生根茎禾草羊草 (*Leymus Chinense*) 占优势,其次是大针茅 (*Stipa Grandis*)、冰草 (*Agropyron Cristatum*)、草 (*Koeleria Cristata*) 等旱生密丛禾草,禾草以外的杂类草约 75 种,占总数的 87%,其中,大多数为多年生草本,占 88%,采样点地表有较厚凋落物层覆盖^[14,15]。土壤类型属暗栗钙土,土层深度为 100~150 cm,土壤有机层厚达 20~30 cm,土壤质地粘粒平均为 21%,沙粒为 60%。年降水量 350~450 mm,年均气温 $-0.3\sim 1^{\circ}\text{C}$, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 1800~2000 $^{\circ}\text{C}$ 。草原植物每年约在 4 月底返青,10 月初枯黄,生长期约 150 天左右。

1.2 气体样品的采集与分析

CH_4 通量日变化特征的研究从 2001 年 9 月开始,至 2003 年 6 月结束,在此期间分别选择了拔节孕穗期,开花期、结实后期、果后营养期四个主要物候期(以建群种羊草的物候期为准)进行了五次日变化观测。 CH_4 气体主要利用静态暗箱法采集,采样箱用 5mm 厚不透明有机玻璃制成,箱体底面积 $50\text{ cm}\times 45\text{ cm}$,高度为 30 cm。采样时选择地势较平坦的样方放置采样箱,每次测定设 3 个重复,采样箱随机放置,观测时将采样箱放入已插入土壤 5cm 深处的不锈钢底座外缘四周的凹槽中,并用蒸馏水密封。采样箱箱盖装有空气搅拌小风扇、温度计以及用于采气用的硅胶导管、采气三通阀,每次采气持续时间为 21 min,分别采集盖箱后 0 min, 7 min, 14 min 以及 21 min 时的气体样品,采样时抽取采样箱内气体约 500 ml 置于密封气袋中,用于 CH_4 气体浓度的分析,因采样时间少于半小时,对采样点自然状况基本无明显扰动。此外,为对比有无地上植被覆盖对 CH_4 气体通量特征的影响,试验同时设原状草地以及裸地两个处理进行同期观测采样。因此文中下面提到的原状群落 CH_4 通量主要是指包含植物活体、立枯、凋落物以及土壤在内的整个草原群落的 CH_4 通量,而土壤 CH_4 通量则是指去除地上植被后的 CH_4 通量。日变化研究中气体采样一般从上午 8:30~9:30 左右开始,至次日 9:00~10:00 左右结束,每隔 2 个半小时采集一组气样。

此外, 在每次气体采集的同时, 同步采集气温, 0、5、10 cm 地温, 箱内温度以及土壤水分数据。其中, 箱内温度利用水银温度计, 气温与 0、5、10 cm 地温利用北京师范大学司南仪器厂生产的 SN2002 型数字测温仪测得, 土壤表层含水量利用烘干法测定。气体样品从野外采回后, 主要利用惠普 5890 II 型气相色谱仪测定气体样品的 CH₄ 浓度, CH₄ 检测器为离子火焰化检测器 (FID), 利用长度为 3.68 m 的 80~100 目 Porapak Q 充填物分离柱 (直径 3.15 mm) 完成 CH₄ 的分离, 分离柱工作温度 90℃, 检测器工作温度 150℃, 载气为高纯氮气, 流速 23 mlmin⁻¹。其仪器精度为在 8 h 之内对标气反复多次测定, 测定结果的变异系数为 0.3%~0.6%。CH₄ 浓度测定后, 通量计算方法参见参考文献 [16], 对通量数据的统计分析主要利用 SPSS11.0 软件包完成。

2 结果与分析

2.1 羊草草原不同物候期原状群落与土壤 CH₄ 通量日变化规律及主要影响因子分析

图 1~图 4 为羊草草原不同物候期原状群落以及土壤 CH₄ 通量的日变化情况。观察图 1~图 4 可以看出, 除个别观测时段 CH₄ 通量出现正排放之外, 在草原植物的不同物候期, CH₄ 气体的通量均为负值, 这说明, 草地生态系统对 CH₄ 气体具有一定的吸收作用, 是大气 CH₄ 的吸收汇。

此外, 对比图 1~图 4 可以看出, 不同物候期 CH₄ 通量的日变化形式存在较大差别。其中, 对于 6 月初的拔节孕穗期, 原状群落 CH₄ 吸收通量在凌晨 6:30 左右出现最大值, 在午后 14:00 左右出现次高值, 而其中的土壤 CH₄ 吸收通量最高值与次高值则分别出现在夜间 22:00 左右与凌晨 6:20 左右 (见图 1)。无论是原状群落还是土壤 CH₄ 通量在凌晨都出现较高的 CH₄ 吸收通量, 且都呈现较大的日变幅, 其日标准偏差分别达到 0.0587 mgm⁻²h⁻¹ 及 0.0647 mgm⁻²h⁻¹, 变异系数分别为 1.03 与 1.44, 为各次观测的最高值 (见表 1)。此外, 观察图 1, 原状群落与土壤在 6 月 8 日 12:00 左右以及 6 月 9 日 8:00 左右的观测中还出现了 CH₄ 的正排放。分析原因, 由于土壤氧化菌多为专性好氧细菌, 且属于中温性微生物, CH₄ 氧化菌生长的适宜温度范围一般为 20~30℃, 温度过高或过低都会抑制 CH₄ 的氧化, 当土壤温度超过 37℃ 时, 土壤中大多数 CH₄ 氧化菌就会停止生长^[17]。而本试验中, 参照 8 日气温的日变化, 8 日 12:00 左右的土壤地表温度达 49.5℃, 有植被覆盖的处理其地表温度也高达 39.9℃, 在 12:00 左右的采样时温度已远超过 CH₄ 氧化菌的适宜温度范围, CH₄ 氧化因此受到抑制, 而产甲烷菌的适宜温度在 30~40℃ 内, 此时, 在产甲烷菌的作用下, 尽管土壤含水量较低, 在局部厌氧区域仍有极少量的 CH₄ 产生并释放出来, 从而表现出了较低的 CH₄ 正通量。而 6 月 9 日凌晨 8:00 左右的正排放则主要是降水所带来的影响, 在 6 月 9 日早 5:30~5:45 左右, 试验区域下了自 5 月 24 日以来的首次小雨, 此前 5 月 14 日~5 月 24 日也只有 1.1 mm 的降水, 土壤十分干燥。由于降水的影响, 使得土壤的水分条件迅速发生改变, 在较短时间内使土壤表层含水量达到 CH₄ 氧化菌的适宜水分条件, 加大了土壤对 CH₄ 的吸收氧化, 出现了凌晨 6:20 左右的吸收高峰, 这与王跃思等人^[18] 得出的土壤对 CH₄ 的吸收峰值往往出现在土壤湿度干湿交替变化期的研究结论是十分吻合的。而据 Striegl R G^[19], Adamsen A P S^[20], Whalen S C^[7] 等人的研究结果: CH₄ 在气相中的扩散能力约为在水相的 1 万倍, 因此, 随着降水的逐渐下渗, 在降水以后的一段时间内表层充足的土壤水分又在一定程度上阻碍了大气 CH₄ 向土壤中的扩散, 影响了土壤氧化 CH₄ 的能

力,同时形成的局部厌氧区域还可能有利于CH₄的产生,形成短时间的CH₄正排放。由此可见,在土壤极端干旱以及土壤干湿交替时,土壤水分将是决定CH₄通量强度的主导环境因子。此外,Mosier等人^[21]的研究认为:土壤在很干燥的状态时,CH₄吸收量很低,直到土壤含水量升高才会增加,由于本观测日大部分时间土壤均处在极端干燥的状态,9日凌晨虽由于降雨影响土壤含水量较高,但此时该观测日已进入观测尾声,因此,降雨虽然加大了该日CH₄通量的日变异,但并没有对该观测日的CH₄日吸收量产生太大的影响,该日土壤CH₄日吸收量处于各观测日的最低水平,原状群落CH₄日吸收量与其他观测日相比也较低(见表1)。

表 1 不同物候期羊草草原原状群落与土壤 CH₄日吸收量及其变异系数比较
Tab 1 The comparison of CH₄ flux variance coefficient and daily consumption in *Leymus*

Chinese grassland in different phenologies						
物候期	观测日期	A: 原状群落日 CH ₄ 吸收量 (mgm ⁻²)	B: 土壤 CH ₄ 日 吸收量 (mgm ⁻²)	B/A	原状群落日 CH ₄ 吸收量变异系数	土壤日 CH ₄ 吸收量变异系数
拔节孕穗期	2002 06 08/09	-1.25760	-1.19424	0.95	1.03 (n= 11)	1.44 (n= 11)
开花期	2003 06 28/29	-0.93833	-1.31346	1.40	0.33 (n= 11)	0.12 (n= 11)
结实后期	2002 08 14/15	-1.95370	-1.63316	0.84	0.46 (n= 11)	0.45 (n= 11)
果后营养期	2001 09 18/19	-1.43765	-1.51060	1.05	0.53 (n= 11)	0.44 (n= 11)
	2002 09 13/14	-1.15288	-1.60527	1.39	0.41 (n= 11)	0.56 (n= 11)

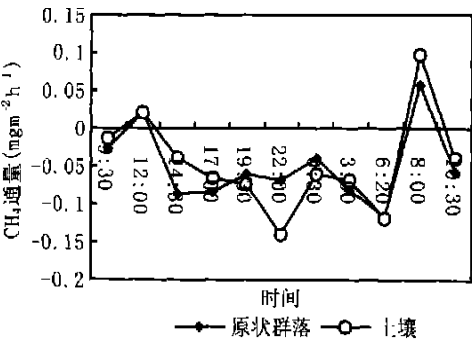


图 1 羊草草原拔节孕穗期原状群落与土壤 CH₄通量日变化
Fig. 1 The diurnal variation of CH₄ flux in the *Leymus Chinense* grassland during jointing to booting stage

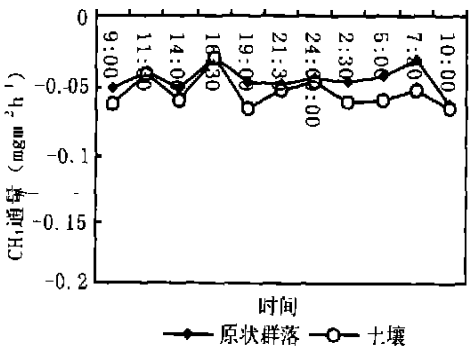


图 2 羊草草原开花期原状群落与土壤 CH₄通量日变化
Fig. 2 The diurnal variation of CH₄ flux in the *Leymus Chinense* grassland in flowering stage

图2为羊草草原开花期CH₄通量日变化,从图2可以看出,尽管原状群落与土壤CH₄通量存在着近乎相同的日变化模式,但日变化形式却较复杂,尤其是土壤CH₄通量,吸收峰值与吸收谷值交替出现。另外,该观测日原状群落CH₄日吸收总量仅为0.93 mgm⁻² d⁻¹,土壤CH₄日吸收总量也只有1.31 mgm⁻² d⁻¹,只高于拔节孕穗期的观测值,而低于其他的诸次日变化观测,分析原因可能与该日全天阴天有关。阴天时太阳光照强度弱,白天气温与地温上升不大,同时,由于低空较多云量的影响,夜间气温与地温下降也比较缓慢,全天平均气温为14.25℃,各层次土壤温度也均在13.5~14.5℃之间,昼夜温差较小,气温与土壤温度日变异系数为0.11~0.23。尽管利用烘干法测得当日平均土壤重量含水量为17.55%,土壤含水量较适宜CH₄的氧化,但由于该日气温与地温偏低,CH₄氧化菌的活性

始终较弱，CH₄的日吸收量较低。此外，由于原状群落与土壤 CH₄吸收通量的日变化与温度及水分等条件密切相关，因此，本观测日较低的温度与水分日变幅也直接导致了较低的 CH₄吸收通量日变幅，从表 1 可以看出，原状群落 CH₄通量与土壤 CH₄通量日变异系数分别为 0.33 与 0.12，低于其他观测日的变异系数。

在羊草草原的结实后期（见图 3），无论是原状群落还是土壤 CH₄通量均在午后 13:30 和凌晨 4:30 左右出现两次吸收峰值，夜间吸收值始终较低。凌晨 CH₄吸收通量高峰值的出现可能是由于夜晚露水的影响，土壤表层较其他时间更为湿润，相对较好的水分条件在一定程度上促进了 CH₄的氧化吸收。而午后出现的吸收峰值更主要的是温度的影响，在中午时气温与各土层土壤温度通常在一天中都是最高的，且结实后期正午时土壤 5 cm 及 10 cm 地温均在 20℃~25℃之间，因此中午前后出现 CH₄的吸收峰值是不难理解的。然而，虽然从前面的分析可以看出，在本观测日中温度和水分条件对 CH₄通量的吸收峰值存在较大影响，但从一日内总的情况来看，各温度因子与原状群落及土壤 CH₄通量的相关性均未达到 0.05 的显著性水平（见表 2）。由此可以推断，在温度和水分条件都处于亚适宜水平的结实后期，此时整个群落及土壤对 CH₄的吸收更主要的是取决于土壤水分与温度的配合程度而非某个单因子。另外，由于草原结实后期植物生长已达到盛期，且温度与水分条件都较其它观测日相对较好，因此，草原结实后期的 8 月观测，其原状群落与土壤 CH₄日吸收总量都达到历次观测的最高值。

对于处于果后营养期的两次观测（见图 4），虽然两次观测在原状群落及土壤 CH₄吸收通量日变化形式上存在一定差异，但两次观测的共同点就是正午 11:30~13:30 左右都出现了吸收峰值，吸收谷值都出现在夜间 21:30~2:00 左右。在峰值和谷值的出现时间上，2001 年 9 月 18 日的观测原状群落及土壤 CH₄吸收通量最大值出现在正午 13:30 左右，谷值出现在凌晨 2:00 左右，而 2002 年 9 月 13 日的观测则出现两个吸收峰值，其吸收峰值与次峰值分别出现在正午 11:30 以及凌晨 5:00 左右，谷值出现在夜间 21:30~24:00 之间。另外，从表 2 可以看出，在日平均气温为 8.2℃的 2001 年 9 月 18 日的日变化观测中，气温及表层土壤温度特别是气温与地表温度均与 CH₄通量显著正相关，而对于日平均气温为 12.5℃的 2002 年果后营养期的观测，这种正相关并不显著。对比以往的研究结果，以往许多学者在研究甲烷氧化与温度的相关性时都认为甲烷氧化吸收与温度的相关性较弱，土壤对甲烷的氧化能力与土壤水分条件密切相关，土壤对甲烷的氧化能力更多地是取决于 CH₄的供给能力以及土壤中氧气的扩散能力^[9, 22~24]。但也有的研究（Steinkamp R 等，2001）^[25]发现，在较低的土壤温度下（< 10℃），温度对大气 CH₄氧化的调节作用比土壤水分更强，在 0~10℃范围内，温度与 CH₄氧化速率正相关；Castro M S 等^[26]也研究发现在 5~10℃时，温度是控制

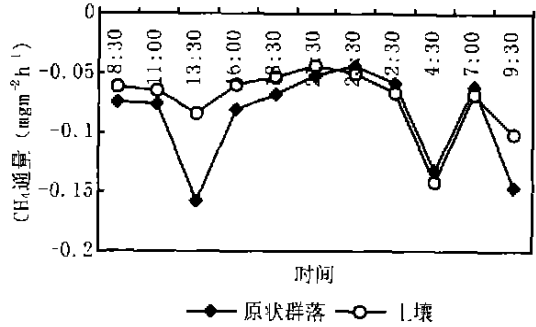


图 3 羊草草原结实后期原状群落与土壤 CH₄ 通量日变化

Fig. 3 The diurnal variation of CH₄ fluxes in the *Leymus Chinense* grassland in post grain filling stage

CH₄氧化的主要因素, 在 10~ 20℃时则温度的重要性明显下降。本论文的研究结果进一步验证了Steinkamp R 与 Castro M S 等的研究结论。

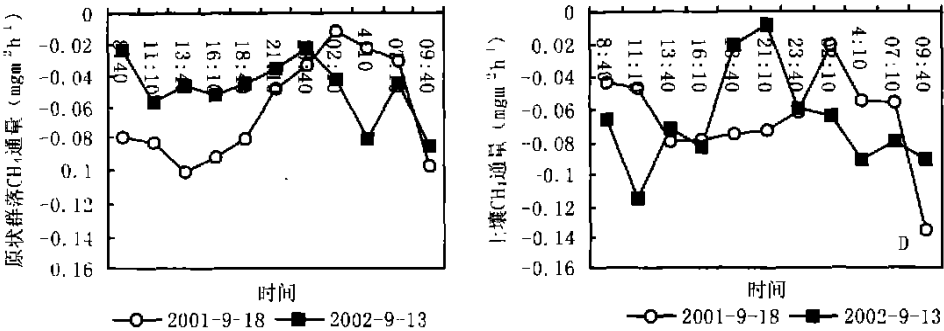


图 4 羊草草原果后营养期原状群落与土壤 CH₄通量日变化

Fig. 4 The diurnal variation of CH₄ flux in the *Leymus Chirense* grassland in post fruiting vegetative stage

表 2 原状群落及土壤 CH₄吸收通量与温度因子的相关关系分析

Tab 2 The correlation between the CH₄ fluxes and temperature factors

通量类型	物候期	观测日期	气温	地表温度	5cm 地温	10cm 地温
原状群落 CH ₄ 吸收通量	拔节孕穗期	2002-06/08/09	0.011	-0.168	0.139	0.335
	开花期	2003-06/28/29	0.254	0.107	-0.210	-0.355
	结实后期	2002-08/14/15	0.305	0.555	0.141	0.072
	果后营养期	2001-09/18/19	0.917**	0.853**	0.897**	0.713*
		2002-09/13/14	0.220	0.229	0.061	-0.065
土壤 CH ₄ 吸收通量	拔节孕穗期	2002-06/08/09	-0.130	-0.320	-0.132	0.128
	开花期	2003-06/28/29	0.191	-0.088	-0.264	-0.368
	结实后期	2002-08/14/15	-0.205	-0.137	-0.320	-0.459
	果后营养期	2001-09/18/19	0.685*	0.646	0.492	0.333
		2002-09/13/14	0.397	0.570	0.343	-0.026

注: * 代表显著性水平为 0.05; ** 代表显著性水平为 0.01

2.2 羊草草原原状群落与土壤 CH₄日吸收量比较及不同物候期间 CH₄通量的差异显著性分析

分析羊草草原原状群落与土壤 CH₄日吸收量的对比关系 (见表 1), 我们可以看出, 除了拔节孕穗期与结实后期原状群落 CH₄日吸收总量略高于土壤 CH₄日吸收总量之外, 其余诸观测日土壤 CH₄日吸收总量均高于同期原状群落 CH₄日吸收总量, 但方差分析也同时表明, 除了 2002 年果后营养期两者的差异达到 0.10 的显著性水平 ($F=3.049$, $p=0.096<0.10$), 2003 年开花期两者差异达到 0.05 的显著性水平外 ($F=4.844$, $p=0.040<0.05$), 其余各物候期两者的差异均不显著。由此可以看出, 在羊草草原中, 植物地上部分的存在只在一定时期内对整个生态系统与大气的 CH₄交换量产生显著影响。

此外, 研究中还对羊草草原不同物候期间 CH₄吸收通量的差异进行了方差分析 (见表 3)。从表 3 我们可以看出, 除了原状群落开花期与结实后期, 开花期与 2001 年果后营养期以及结实后期与 2002 年果后营养期 CH₄日平均通量的差异达到显著 ($p<0.05$) 或极显

著 ($p < 0.01$) 水平外, 其它两两不同物候期原状群落 CH₄通量之间以及土壤 CH₄吸收通量各物候期之间的差异均未达到 0.05 的显著性水平, 分析原因, 可能是干旱弱化了不同物候期之间的差异。由于观测区域属半干旱草原区, 且观测期间尤其是 2001 年与 2002 年连续两年均为旱年, 雨季降水量也远低于常年平均水平, 从而导致各观测日土壤水分含量普遍偏低, 差异较小, 较低的土壤水分含量与水分差异在一定程度上弱化了不同物候期间 CH₄吸收通量的差异。

表 3 羊草草原原状群落与土壤 CH₄通量不同物候期间差异显著性比较

Tab 3 The ANOVA of CH₄ flux of *Leymus Chinense* grassland in different phenologies

原状群落 CH ₄ 通量			土壤 CH ₄ 通量		
比较样本	F 值	Sig. (α)	比较样本	F 值	Sig. (α)
拔节孕穗期与开花期	0.436	0.517	拔节孕穗期与开花期	0.278	0.604
拔节孕穗期与结实后期	3.617	0.072	拔节孕穗期与结实后期	1.629	0.217
拔节孕穗期与果后营养期 A	0.481	0.496	拔节孕穗期与果后营养期 A	0.908	0.352
拔节孕穗期与果后营养期 B	0.002	0.964	拔节孕穗期与果后营养期 B	1.115	0.304
开花期与结实后期	14.100	0.001**	开花期与结实后期	3.738	0.067
开花期与果后营养期 A	4.708	0.042*	开花期与果后营养期 A	1.265	0.274
开花期与果后营养期 B	1.858	0.188	开花期与果后营养期 B	1.724	0.204
结实后期与果后营养期 A	2.444	0.133	结实后期与果后营养期 A	0.314	0.581
结实后期与果后营养期 B	7.915	0.011*	结实后期与果后营养期 B	0.118	0.735
果后营养期 A 与果后营养期 B	1.343	0.260	果后营养期 A 与果后营养期 B	0.038	0.847

注: 拔节孕穗期: 2002-06-08/09; 开花期: 2001-06-25/26; 结实后期: 2002-08-14/15;

果后营养期 A: 2001-09-18/19; 果后营养期 B: 2002-09-13/14

此外, 为探讨主要环境因子对 CH₄日吸收量差异的贡献, 研究中还利用逐步回归 (Stepwise) 方法建立了原状群落和土壤 CH₄日吸收量及其对比关系与 0~20 cm 地下生物量 (X₁)、地上活体生物量 (X₂)、凋落物现存量 (X₃)、气温 (X₄)、地表温度 (X₅)、5cm 地温 (X₆)、10cm 地温 (X₇)、0~10 cm 土壤含水量 (X₈) 日均值间的多元逐步回归方程 (见表 4)。该方法利用 F 检验的概率作为变量 (环境因子) 引入模型或从模型中剔除的判据, 当一个环境变量的 F 检验概率值 ≤ 0.05 时, 该环境变量被引入回归方程, ≥ 0.10 时则被剔除, 以此为标准进行逐步回归, 直至模型外的环境变量都不符合进入模型的判据为止。此外, 在回归过程中还对环境变量间的共线性进行了分析, 从而通过以上步骤逐步剔除掉解释力弱或是冗余的环境变量。逐步回归分析结果表明, 对于各观测日原状群落 CH₄日吸收量差异的影响, 在诸多环境因子中, 只有 0~20 cm 根系生物量被引入回归方程, 其余因子均在逐步回归过程中被剔除, 从回归方程可以看出, 原状群落 CH₄日吸收量与根系生物量的复相关系数达到极显著的相关性水平 ($R^2 = 0.958$, $\alpha < 0.01$), 不同观测日原状群落 CH₄日吸收量的差异有 95% 左右是由根系生物量的差异引起的。而对于土壤 (含根系部分) CH₄日吸收总量也只有 0~20 cm 地下生物量一个因子被引入回归方程, 0~20 cm 地下生物量的变化可以解释不同观测日土壤 CH₄日吸收量变异的 99.0% 左右。不同观测日 CH₄日吸收量的差异之所以与根系生物量的变化密切相关, 分析原因可能是不同生长发育期植物根系分泌 O₂能力的变化对甲烷氧化菌功能发挥的影响所致。我们知道, 土壤对 CH₄

的氧化吸收主要发生在土壤表层^[13,17]，充足的底物 O₂以及 CH₄供给是土壤氧化大气 CH₄的必备条件，O₂在 CH₄氧化过程中起着不可或缺的重要作用，而研究表明，植物根系具有分泌 O₂的功能，因此其变化势必会对内源以及外源 CH₄的氧化吸收产生影响。由于在植物不同生长发育期根系分泌 O₂能力存在一定差异，同时，由根系生物量的不同引起的根系呼吸、好气微生物分解有机质、铵硝化等消耗根际 O₂的大小也存在一定差异^[27]，从而就会在一定程度上间接引起 CH₄氧化量的变化。另外，对于土壤与原状群落 CH₄日吸收总量比值在不同观测日之间的差异，统计分析表明，不同观测日二者比值的差异主要与凋落物现存量密切相关。研究样地由于长期围栏，地表常年覆盖有较厚的凋落物层，较厚凋落物层的存在减缓了大气与土壤的气体交换，减低了大气 CH₄向土壤的传输速率，从而在一定程度上降低了 CH₄在土壤中的氧化消耗速度，而去除凋落物层后的土壤，尤其是在地表凋落物现存量较大的时段，其土壤 CH₄氧化量反而高于原状群落的 CH₄氧化吸收量，进而影响二者的比例关系。

表 4 环境因子变化对不同物候期 CH₄日吸收通量变异的贡献

Tab 4 The contribution of the changes of environmental factors to the variation of CH₄ diurnal consumption

因变量	回归方程	F 值	R ²	Sig.
原状群落 CH ₄ 日吸收总量	$Y = -1.77E-03X_1$	91.412	0.958	0.001
土壤 CH ₄ 日吸收总量	$Y = -1.90E-03X_1$	401.508	0.990	0.000
土壤 CH ₄ 日吸收量/原状群落 CH ₄ 日吸收量	$Y = 6.344E-03X_3$	133.186	0.971	0.000

3 结论

利用羊草草原不同物候期 CH₄通量的野外试验结果，对天然羊草草原原状群落和土壤 CH₄通量的日变化特征、原状群落与土壤 CH₄通量间以及不同物候期间 CH₄通量的差异及环境因子对 CH₄通量的可能影响进行了相应的统计分析，主要得到以下几点结论：

- (1) 在羊草草原植物的不同发育期，CH₄气体的日通量均为负值，草原土壤为大气 CH₄的吸收汇。
- (2) 不同物候期 CH₄通量的日变化形式及通量峰值出现时间存在较大差别，各观测日 CH₄吸收通量存在不同的日变化特征；除果后营养期 CH₄通量与温度条件（气温与土壤表层地温）呈显著或极显著正相关外，其余物候期 CH₄通量与温度条件的相关性不显著。
- (3) 原状群落与土壤 CH₄吸收通量除 2002 年果后营养期以及 2003 年开花期两者差异分别达到 0.10 与 0.05 的显著性水平外，其余时段两者的差异均不显著；而对于 CH₄吸收通量不同物候期间的差异，除了原状群落开花期与结实后期，开花期与 2001 年果后营养期以及结实后期与 2002 年果后营养期日平均通量的差异达到显著（p<0.05）或极显著（p<0.01）水平外，其它原状群落两两不同物候期之间以及土壤 CH₄吸收通量各物候期间的差异均不显著，观测期的干旱气候在一定程度上弱化了不同物候期间 CH₄吸收通量的差异。
- (4) 多元回归分析表明，0~20cm 根系生物量的变化是影响不同物候期原状群落及土壤 CH₄日吸收量差异的主要环境因子；不同物候期土壤与原状群落 CH₄日吸收量比值的差异与不同观测日凋落物现存量的差异密切相关。

参考文献:

- [1] 陶波, 葛全胜, 李克让, 等. 陆地生态系统碳循环研究进展. 地理研究, 2001, **20**(5): 564~ 575.
- [2] 刘纪远, 于贵瑞, 王绍强, 等. 陆地生态系统碳循环及其机理研究的地球信息科学方法初探. 地理研究, 2003, **22**(4): 397~ 405.
- [3] 周涛, 仪垂祥, 史培军, 等. 陆地表层碳循环与温度反馈机制研究. 地理研究, 2002, **21**(1): 45~ 53.
- [4] IPCC. Climate change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Work Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2001.
- [5] Chan A S, Parkin T B. Evaluation of potential inhibitors of methanogenesis and methane oxidation in a landfill cover soil. Soil Biol. Biochem., 2000, **32**(11/12): 1581~ 1590.
- [6] Topp E, Pattey E. Soil as sources and sinks for atmospheric methane. Canadian Journal of Soil Science, 1997, **77**: 167~ 178.
- [7] Whalen S C. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil. Appl. Environ. Microbiol., 1990, **56**: 3405~ 3411.
- [8] Mosier A R, Schime D, Valentine D, *et al.* Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grassland. Nature, 1991, (350): 330~ 332.
- [9] Duenas C, Fernandez M C, Carretero J, *et al.* Methane uptake in soils of southern Spain estimated by two different techniques: static chamber and 222 radon flux and soil air concentration profiles. Atmospheric Environment, 1996, **30**(4): 545~ 552.
- [10] 裴浩, 李云鹏, 敖艳红. 草地枯草被与土壤含水量. 中国草地, 1996, (1): 36~ 38.
- [11] 郭继勋, 孙刚, 姜世成. 松嫩平原羊草草原凋落物层群落学作用的研究. 植物生态学报, 2000, **24**(4): 473~ 476.
- [12] 郭继勋. 枯枝落叶对草原生态环境的影响. 中国草地, 1989, (6): 17~ 20.
- [13] 董云社, 彭公炳, 李俊. 温带森林土壤 CO₂、CH₄、N₂O 时空特征. 地理学报, 1996, **51**(增刊): 120~ 128.
- [14] 陈佐忠. 锡林河流域地形与气候概况. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. 草地生态系统研究第三集. 北京: 科学出版社, 1988. 13~ 22.
- [15] 李博, 雍世勋, 李忠厚. 锡林河流域植被及其利用. 见: 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站编. 草地生态系统研究第三集. 北京: 科学出版社, 1988. 84~ 184.
- [16] 齐玉春, 罗辑, 董云社, 等. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N₂O、CH₄ 排放研究. 中国科学(D 辑), 2002, **32**(11): 934~ 941.
- [17] 徐星凯, 周礼恺. 土壤源 CH₄ 氧化的主要因子与减排措施. 生态农业研究, 1999, **7**(2): 18~ 22.
- [18] 王跃思, 薛敏, 黄耀, 等. 内蒙古天然与放牧草原温室气体排放研究. 应用生态学报, 2003, **14**(3): 372~ 376.
- [19] Striegl R G. Diffusional limits to the consumption of atmospheric methane by soils. Chemosphere, 1993, **26**: 715~ 720.
- [20] Adamsen A P S, King G M. Methane consumption in temperate and subarctic forest soils: rates, vertical zonation and response to water and nitrogen. Appl. Environ. Microbiol., 1993, **59**: 485~ 490.
- [21] Mosier A R, Schime D, Valentine D, *et al.* Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. Nature, 1991, (350): 330~ 332.
- [22] Dorr H, Katruff L, Levin I. Soil texture parameterization of the methane uptake in aerated soils. Chemosphere, 1993, **26**(1-4): 697~ 713.
- [23] Crill P M, Martikainen P J, Nykanen H, *et al.* Temperature and N fertilization effects on methane oxidation in a drained peatland soil. Soil Biology and Biochemistry, 1994, **26**(10): 1331~ 1339.
- [24] Klemetsson A K, Klemetsson L. Methane uptake in Swedish forest soil in relation to limiting and extra N deposition. Biol. Fert. Soils, 1997, **25**: 296~ 301.
- [25] Steinkamp R, Butterbach bahl K, Papen H. Methane oxidation by soil of an N limited and N fertilized Spruce forest in the Black Forest, Germany. Soil Biol. Biochem., 2001, **33**: 145~ 153.
- [26] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, *et al.* Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. Global Biogeochemical Cycles, 1995, **9**: 1~ 10.
- [27] 丁维新, 蔡祖聪. 植物在 CH₄ 产生、氧化和排放中的作用. 应用生态学报, 2003, **14**(8): 1379~ 1384.

The comparison of the CH₄ flux diurnal variation characteristics and diurnal uptake flux in different phenologies in *Leymus Chinense* grassland in Inner Mongolia, China

QI Yur chun, DONG Yur she, GENG Yuarr bo,

YANG Xiao hong, LIU Lir xin, LI Ming feng, LIU Xing ren

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Using the static chamber method, the diurnal variation of CH₄ fluxes of the undisturbed community and soil were studied through the experiment in situ at different phenologies of *Leymus Chinense* grassland in Xilin river basin of Inner Mongolia. According to the results of field experiment, we analyzed the characteristics of diurnal variation of undisturbed community and soil CH₄ flux and the statistic relationship between CH₄ fluxes and environmental factors (e. g. air temperature, surface soil temperature, soil moisture) together with the ecological factors (e. g. aboveground biomass, underground biomass, litter biomass) by correlation analysis and multiple stepwise regression method. The main research results were as follows: The fluxes of undisturbed community and soil CH₄ were all negative and the *Leymus Chinense* grassland was the sink of air CH₄. There was great difference among diurnal variation patterns of CH₄ flux in different phenologies and the effect of temperature condition on diurnal variation of CH₄ flux wasn't remarkable except the post fruiting vegetative stage. The difference between undisturbed community CH₄ fluxes and corresponding soil CH₄ fluxes wasn't significant except in post fruit vegetative stage of 2002 and in flowering stage. And for the difference of undisturbed community CH₄ flux among different phenologies, the difference between flowering stage and post grain filling stage, flowering stage and post fruiting vegetative stage of 2001, post grain filling stage and post fruiting vegetative stage of 2002 reached the significance of 0.01 or 0.05, but the differences of undisturbed community CH₄ flux between any other two phenologies and the differences of soil CH₄ flux between any two phenologies were all not significant. The results of multiple regression analysis indicated that the changes of underground biomass at 0-20cm depth could account for 95.0% of the variance of the community CH₄ flux and 99.0% of the change of soil CH₄ flux of different phenologies. The change of the ratio of soil CH₄ diurnal uptake flux and the total community diurnal uptake flux was affected markedly by the change of litterfall biomass.

Key words: Inner Mongolia; *Leymus Chinense* grassland; CH₄ flux; diurnal variation; environmental factors