#### DOI: 10.5846/stxb201505080952

岳泓宇,贾志斌,梅宝玲,田淑新.内蒙古草原温室气体交换通量.生态学报,2016,36(24): - . Yue H Y, Jia Z B, Mei B L, Tian S X.Flux of Greenhouse Gases from Grassland in Inner Mongolia.Acta Ecologica Sinica,2016,36(24): - .

# 内蒙古草原温室气体交换通量

# 岳泓宇,贾志斌,梅宝玲\*,田淑新

内蒙古大学环境与资源学院,呼和浩特 010021

**摘要**:草地生态系统是地球上十分重要的陆生生态系统,内蒙古草原在我国草地生态系统中占有重要地位,其在全球温室气体 收支平衡中扮演重要角色。本文统计分析内蒙古地区 34 个观测地点的多年(1995—2012)温室气体观测数据,得到内蒙古三种 主要草原类型(草甸草原、典型草原、荒漠草原)主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的年度或生长季平均通量并据此判断其温室气体源汇类型,并选择内蒙古草原中分布最广泛的典型草原的温室气体交换通量与环境因子进行相关性分析。结果显示,典型草 原、荒漠草原表现为 CO<sub>2</sub>交换源汇动态变化的过程(生长季交换通量分别为(-4.26±15.57) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、(-42.5±5.42) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>表现为汇,年度交换通量分别为(20.64±11.54) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、(18.04±2.48) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>表现为源),草甸草原 CO<sub>2</sub>年度交换通量为(-10.31±1.15) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>表现为汇;草甸草原、典型草原、荒漠草原 CH<sub>4</sub>年度交换通量分别为(-30.48±9.57) µgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、(-41.25±3.61) µgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、(-85.00±51.03) µgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,均表现为 CH<sub>4</sub>的汇、N<sub>2</sub>O 年度交换通量分别为(28.40±7.27) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、(3.18±0.91) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>、(2.51±0.67) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,均表现为 N<sub>2</sub>O 的源。在典型草原温室气体交换通量与环境因子的相关性分析中发现,CH<sub>4</sub>平均吸收通量与降水量(P<0.05)、土壤湿度(P<0.05)、土壤温度(P<0.01)有极显著线性负相关关系,与气温(P<0.01)有极显著线性正相关关系, S</p>

关键词:温室气体;通量;环境因子;内蒙古;草原

# Flux of Greenhouse Gases from Grassland in Inner Mongolia

YUE Hongyu, JIA Zhibin, MEI Baoling\*, Tian Shuxin

College of Environment & Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

Abstract: Inner Mongolia comprises 22% of the grassland ecosystems in China and plays an important role in the global budget of the greenhouse gas (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O). In this study, we compiled the data of greenhouse gas fluxes and related environmental factors from 34 sites in Inner Mongolia collected between 1995 and 2012. The annual flux of greenhouse gases or flux over growing season differed greatly between meadow steppe, typical steppe, and desert steppe. Typical steppe and desert steppe emitted CO<sub>2</sub> at rates of (20.64 ± 11.54) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> and (18.04 ± 2.48) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectively, whereas meadow steppe absorbed CO<sub>2</sub> at a rate of (10.31 ± 1.15) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Meadow steppe, typical steppe, and desert steppe absorbed CH<sub>4</sub> at rates of (30.48 ± 9.57) µgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, (41.25 ± 3.61) µgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, and (85.00 ± 51.03) µgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectively. They emitted N<sub>2</sub>O at rates of (28.40 ± 7.27) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, (3.18 ± 0.91) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, and (2.51 ± 0.67) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, respectively. Correlation analysis of the fluxes and environmental factors from typical steppe showed a positive correlation between the averaged CH<sub>4</sub> absorption flux and precipitation (P < 0.05), soil moisture (P < 0.01), and leaf area index (P < 0.01) and positively correlated to air temperature (P < 0.01). Meanwhile, N<sub>2</sub> O flux was positively correlated to precipitation (P < 0.01).

收稿日期:2015-05-08; 网络出版日期:2015-00-00

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费(201103039);内蒙古自治区自然科学基金项目(2014MS0307)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail:ndblmei@imu.edu.cn

# Key Words: Greenhouse Gases; Flux; Environmental Factors; Inner Mongolia; Grassland

大气中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 是三种最主要的温室气体,自 1750 年到 2011 年,大气中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 浓度分 别由 278ppm 增加到 390.5ppm、722ppb 增加到 1803ppb、271ppb 到 324.2ppb,各增加了 40%、150%、20%;与冰 芯中的 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 气体成份相比,这些温室气体浓度已经超过过去 80 万年的最高浓度,而且其浓度增加 的平均速率在过去 2 万年是未曾有过的<sup>[1]</sup>。草地生态系统是陆地上最大的生态系统,对改善陆地生态环境具 有十分重要的现实意义,其对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 这三种最主要温室气体的源汇效应在大气圈的温室气体收支平 衡中起到了关键作用<sup>[2]</sup>。内蒙古草原属于我国分布较广的温带草原(从东到西随着水分梯度的变化依次为 草甸草原、典型草原和荒漠草原),在气候-植被分类系统中占据着核心地位<sup>[3]</sup>,研究内蒙古草原生态系统的温 室气体排放现状、机制及其影响因素对控制草原温室气体排放、减缓全球温室效应有着重要的意义。

虽然我国在草原温室气体研究方面起步较晚,但经过多年长期的定位观测实验研究,也已积累了一定的 研究成果,具备了综合分析的数据基础。本文汇总分析了 22 篇(包括 34 个观测地点)有关内蒙古草原温室 气体观测的文献数据,开展以下内容的研究:(1)通过对内蒙古草原三种主要草地类型(草甸草原、典型草原、 荒漠草原)主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的年度或生长季平均通量的汇总分析来判断其源汇类型;(2)分析 内蒙古草原上分布最广泛的典型草原温室气体交换通量与水热因子的相关关系。研究结果有助于我们从宏 观角度更好地了解草原生态系统温室气体的研究现状,从而发现目前研究的不足并剖析其中的薄弱环节,进 而对未来草原生态系统温室气体排放的重点研究方向做出有益的探讨。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

内蒙古自治区 80%以上处于多风少雨的干旱、半干旱地区,土壤类型多为淡栗钙土和栗钙土,土地贫脊, 土层浅薄,质地疏松<sup>[4]</sup>。同时全区由于地理位置和地形的影响,形成以温带大陆性季风气候为主的复杂多样 的气候。春季气温骤升,多大风天气;夏季短促温热,降水集中;秋季气温剧降,秋霜冻往往过早来临;冬季漫 长严寒,多寒潮天气。全年降水量在 100—500 毫米之间,无霜期在 80—150 天之间,年日照量普遍在 2700 小时以上<sup>[5]</sup>。

内蒙古草原是我国 5 大草原之首,欧亚大陆草原的重要组成部分,总面积为 8666.7 万公顷,占全国草原 面积 3.92 亿公顷的 22.1%<sup>[4]</sup>。本文主要集中讨论内蒙古典型草原、草甸草原、荒漠草原这三种草原类型,其 中典型草原类分布范围最广、面积最大,占全区草原总面积的 35.1%,是构成内蒙古草原的主体。处于过渡地 带的草甸草原类、荒漠草原类分布都比较狭窄,分别占全区草原总面积的 10.9%、10.6%<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 数据收集

本文按照如下标准选择文献数据:(1)观测实验在内蒙古境内的草原上(包括草甸草原、典型草原及荒漠 草原)进行;(2)观测了1到3种以上主要温室气体的交换通量;(3)测定了观测期间的水热因子(降水量、土 壤湿度、土壤温度、气温等)(4)尽最大可能搜集所有相关研究数据。按照以上标准本文共选取了22篇文献, 包括了1995—2012年期间34个观测点的温室气体交换通量及环境因子的数据。观测点位置分布如图1所 示,具体数据见表1。

#### 2 结果与分析

#### 2.1 温室气体交换通量

#### 2.1.1 CH<sub>4</sub>交换通量

内蒙古草甸草原 CH<sub>4</sub>年度平均吸收通量为(30.48±9.57) μgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[28]</sup>,其生长季平均吸收通量为(65.33±7.29) μgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[23]</sup>;典型草原 CH<sub>4</sub>年度平均吸收通量为(41.25±3.61) μgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,生长季平均吸收

通量为(62.57±18.46) $\mu$ gC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>(依据表 2 数据计算, 共 8 篇文献,未计算与整体趋势过分偏离的个别数据 点,即若是某一观测数据与其相同或相近观测点的数据 存在量级间的差异,我们认为此观测数据存在较大的误 差而不选用该观测数据,下文中简称质控);荒漠草原 CH<sub>4</sub>年度平均吸收通量为(85.00±51.03) $\mu$ gC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[24]</sup>,其生长季平均吸收通量为(109.12±41.46) $\mu$ gC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[23,26]</sup>。

由我们得到的数据可知,内蒙古草原的草甸草原、 典型草原、荒漠草原均表现为 CH<sub>4</sub>的汇。

2.1.2 CO<sub>2</sub>交换通量(NEE)

NEE 是净生态系统碳交换量,所以本文用 NEE 来 表示 CO,交换通量。

内蒙古草甸草原年平均 NEE 为(-10.31±1.15) mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[27]</sup>;典型草原年平均 NEE 为(20.64±11.54)

N 33-34 29 1-23、25 31 27 25、28、30 24 双测点 0 1000 2000km

图 1 观测点分布图 Fig.1 Distribution of observation points

数字代表观测点序号,具体见表1第1列上角标

mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,其生长季的平均值为(-4.26±15.57)mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>(依据表 3 数据计算,共 5 篇文献);荒漠草原年 平均 NEE 为(18.04±2.48)mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[24]</sup>,而其生长季的平均 NEE 为(-42.5±5.42)mgC m<sup>-2</sup> h<sup>-1[25]</sup>。

Table 1         Greenhouse gas data and references in Inner Mongolia from 1995 to 2012					
草地类型 Steppe type	观测时间(年月) Period	观测地点 Location	观测气体 Gas type	观测方法 Method	参考文献 Source
a 羊草 <sup>1</sup> a Leymus chinensis <sup>1</sup>	1995-05-10 1998-05-1999-05 2001-01-12 2002-01-12 2003-01-12	锡林河流域	$\mathrm{CH}_4\mathrm{N}_2\mathrm{O}$	А	[7]
a 羊草² a Leymus chinensis²	2001-06—2003-06	锡林河流域	$N_2O$	Α	[8]
a 冷蒿-小禾草 <sup>3</sup> a Frigida-short buchgrasses <sup>3</sup>	2003-08—10	锡林河流域	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub>	А	[9]
a 冰草 <sup>4</sup> aAgropyron cristatum (L, ) Gaertn. <sup>4</sup>	2003-01-2006-11	锡林河流域	$CO_2$	В	[10]
a 羊草 <sup>5</sup> a Leymus chinensis <sup>5</sup>	2004-05—09 2005-05—09	锡林河流域	N <sub>2</sub> O	А	[11]
a 大针茅 <sup>6</sup> a Stipa krylovii <sup>6</sup>	2004-01—2006-12	锡林浩特东北	CO <sub>2</sub>	В	[12]
a 羊草 <sup>7</sup> a Leymus chinensis <sup>7</sup>	2004-06-09 2005-05-09 2006-03-06	锡林河流域	$\mathrm{CH}_4$	А	[13]
a 羊草 a Leymus chinensis <sup>8</sup>	2004-01-2005-12	锡林河流域	$CO_2$	В	[14]
a 羊草 a Leymus chinensis <sup>9</sup>	2005-01-2006-12	锡林河流域	$N_2O$	А	[15]
a 羊草 a Leymus chinensis <sup>10</sup>	2006-05-2007-09	锡林河流域	$CO_2$	В	[16]
aa Leymus chinensis <sup>11-19</sup>	2007-07-08	锡林河流域上游	$\mathrm{CO}_2 \ \mathrm{N}_2\mathrm{O} \ \mathrm{CH}_4$	Α	[17]
a 羊草 a Leymus chinensis <sup>20</sup>	2007-08-2008-08	锡林河流域	$\rm CH_4N_2O$	Α	[18]
a 羊草 a Leymus chinensis $^{21}$	2008-07-09	白音锡勒牧场	$CH_4$	Α	[19]
a 羊草 a Leymus chinensis $^{22}$	2007-10-2008-10	锡林河流域	$\rm CO_2~N_2O~CH_4$	Α	[20]
a 羊草 a Leymus chinensis <sup>23</sup>	2007-08-2008-08	锡林河流域	$N_2O$	А	[21]

表 1 内蒙古草原 1995—2012 年温室气体观测数据及参考文献

4	生	生态学报			
续表					
草地类型 Steppe type	观测时间(年月) Period	观测地点 Location	观测气体 Gas type	观测方法 Method	参考文献 Source
a <sup>24</sup>	2009-05—09 2010-05—09	多伦县	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub>	С	[22]
$a_{b_{x}}c^{25-27}$	2010-05-09	四子王旗/锡林郭勒	$\mathrm{CH}_4$	D	[23]
b <sup>28</sup>	2006-06-2007-11	锡林郭勒盟	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub>	А	[24]
b <sup>29</sup>	2008-05-10	苏尼特左旗北部	$CO_2$	В	[25]
b <sup>30</sup>	2010-08—10	四子王旗	$CH_4CO_2$	Α	[26]
$c^{31}$	2011-01-2012-12	科尔沁左翼后旗	$CO_2$	В	[27]
c <sup>32-34</sup>	2011-08-2012.12	呼盟谢尔塔拉牧场	CO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub>	А	[28]

A:典型草原 Typical steppe; b:荒漠草原 Desert steppe; c:草甸草原 Meadow steppe; A:静态暗箱-气相色谱法 Static opaque chamber-Gas chromatogram method; B: 涡度相关法 Eddy covariance measurement; C: 静态暗箱/明箱-气相色谱法 Static opaque/transparent chamber-Gas chromatogram method;D:静态暗箱-波长扫描光腔衰荡光谱技术 Static opaque chamber-Cavity ring-down spectroscopy method

由我们得到的数据可知,内蒙古草甸草原表现为碳汇,而典型草原与荒漠草原虽在生长季表现为碳汇,但 年度却表现为碳源。

## 2.1.3 N<sub>2</sub>0 交换通量

内蒙古草甸草原 N,O 年度平均排放通量为(28.40±7.27) µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1[28]</sup>。典型草原 N,O 年度平均排放 通量为(3.18±0.91)µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>,其生长季平均排放通量为(7.60±9.24)µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>(通过对表4数据计算、质 控所得,共12篇文献);荒漠草原 N<sub>2</sub>O 年度平均排放通量为(2.51±0.67)µgN m<sup>-2</sup> h<sup>-1[24]</sup>。内蒙古草甸草原、典 型草原与荒漠草原均表现为 N<sub>2</sub>O 的源,草甸草原排放量远大于典型草原和荒漠草原。

2.2 典型草原温室气体交换通量与环境因子关系

## 2.2.1 CH<sub>4</sub>交换通量与环境因子关系

通过本文数据收集部分阐述的选择标准,从表1所列文献中整理出的典型草原观测期间 CH4吸收通量、 降水量、土壤湿度、土壤温度如表2所示。通过对表2数据计算、质控,所得观测期间CH4吸收通量与降水量、 土壤湿度、土壤温度进行的相关性分析结果见图 2。

Table 2 Average CH <sub>4</sub> absorption fluxes, precipitation (PPT), soil moisture (SM), soil temperature (ST) of typical steppe						
观测时间 Period	CH <sub>4</sub> 平均吸收通量 Average CH <sub>4</sub> absorption fluxes/ (µgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	降水量 PPT/mm	土壤湿度 SM/(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> %)	土壤温度 ST/℃	文献来源 Source	
1995-05-10	93.13	125a	—	—	[7]	
1998-05-1999-05	44.98	550a	—	—	[7]	
2001-01-12	-48.97	270a	—	_	[7]	
2002-01-12	-29.11	250a	—	_	[7]	
2003-01-12	-38.81	371a	—	—	[7]	
2003-08-10	61.0	185a	16.5a	15.1a	[9]	
2004-06-09	50.0	325	16.7a	14.0a	[13]	
2005-05-09	67.0	166	15.8a	17.0a	[13]	
2006-03-06	50.0	190a	15.0a	4.0a	[13]	
2007-07-08	33.8	—	13.9	19.6	[17]	
2007-08-2008-08	38.7	356	13.5	—	[18]	
2007-10-2008-10	43.8	177.8b	14.0	12.5a	[20]	
2008-07-09	63.3	203a	17.2a	—	[19]	
2009-05-09	60.7	164	8.2	16.9	[22]	
2010-05-09	78.7	283	12.5	16.5	[22]	
2010-05-10	98.6	256a	13.7	18.5a	[23]	

表 2 典型草原 CH<sub>4</sub>吸收通量、降水量、土壤湿度、土壤温度

PPT:降水量 precipitation; SM:土壤湿度 soil moisture; ST:土壤温度 soil temperature; a:数据来源于文献中图表; b:数据来源于<sup>[29]</sup>; "-":表示 数据未在文献中给出



图 2 典型草原 CH<sub>4</sub>平均吸收通量与降水量、土壤湿度、土壤温度的相关关系

Fig.2 The correlation between  $CH_4$  absorption fluxes and precipitation (PPT), soil moisture (SM), soil temperature (ST) in typical steppe

由图 2 可知,就典型草原来看,CH<sub>4</sub>平均吸收通量与降水量有显著的线性正相关关系(N=8,R<sup>2</sup>=0.53,P< 0.05),与土壤湿度也有显著的线性正相关关系(N=8,R<sup>2</sup>=0.67,P<0.05),同时,其与土壤温度有极显著的线性正相关关系(N=7,R<sup>2</sup>=0.77,P<0.01)。

2.2.2 CO<sub>2</sub>交换通量(NEE)与环境因子关系

典型草原观测期间 CO<sub>2</sub>交换通量、降水量、土壤湿度、气温、叶面积指数见表 3。通过处理表 3 数据(对表 3 数据进行计算及质控),对观测期间 CO<sub>2</sub>交换通量、降水量、土壤湿度、气温、叶面积指数进行的相关性分析 结果见图 3。

Table 3	NEE, precipitation (PPT), soil moist	ure(SM), air	r temperature (AT)	and leaf area	a index(LAI) of typi	cal steppe
观测时间 Period	净生态系统碳交换量 NEE/(mgC m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	降水量 PPT/mm	土壤湿度 SM/(m <sup>3</sup> /m <sup>-3</sup> %)	气温 AT/℃	叶面积指数 LAI/(m <sup>2</sup> /m <sup>-2</sup> )	文献来源 Source
2003-05-09	-20.42	354.0	_	14.6b	0.88b	[10]
2004-05-09	-31.04	344.0	—	14.7b	0.90b	[10]
2005-05-09	8.16	126.0	12.0	15.5b	0.45b	[10]
2006-05-09	9.53	215.0	10.0	15.4b	0.47b	[10]
2004-05-09	1.77	270.0	14.9a	15.2a	0.363a	[12]
2005-05-09	5.41	149.0	14.6a	16.0a	0.568a	[12]
2006-05-09	-3.21	215.0	16.2a	15.2a	0.595a	[12]
2004-01-12	12.20	364.4	11.8	14.7	_	[14]
2005-01-12	15.97	153.3	8.1	15.5	0.45	[14]
2006-05-09	31.25	_	13.4a	_	_	[16]
2007-05-09	9.13	180.0a	14.5a	_	_	[16]
2007-10-2008-1	0 34.62	177.8c	14.0	—	—	[20]

表 3 典型草原 NEE、降水量、土壤湿度、气温及叶面积指数

PPT: precipitation; SM: soil moisture; AT: air temperature; LAI; Leaf Area Index; a:数据来源于文献中图表; b:数据来源<sup>[30]</sup>; c:数据来源 于<sup>[29]</sup>; 使用静态暗箱法测定的 CO<sub>2</sub>为生态系统呼吸,并非 NEE,故此类数据并未统计入该表; "-":表示数据未在文献中给出

由图 3 可知,典型草原 NEE 与降水量呈极显著的线性负相关关系( $N=10, R^2=0.64, P<0.01$ )。典型草原 NEE 与土壤湿度存在显著的线性负相关关系( $N=8, R^2=0.74, P<0.01$ )。同时,NEE 与气温有极显著的线性 正相关关系( $N=8, R^2=0.70, P<0.01$ )。NEE 与叶面积指数有极显著的线性负相关关系( $N=8, R^2=0.83, P<0.01$ )。

2.2.3 N<sub>2</sub>O 交换通量与环境因子关系

依照本文数据收集部分阐述的选择标准,从表1所列文献中整理出的典型草原观测期间 N<sub>2</sub>O 排放通量、降水量、土壤湿度、气温如表4所示。通过处理表4数据(对表4数据进行计算及质控),对观测期间 N<sub>2</sub>O 排



图 3 典型草原 NEE 与降水量、土壤湿度、气温和叶面积指数的关系

Fig.3 The correlation between NEE and precipitation (PPT), soil moisture (SM), air temperature (AT) and leaf area index (LAI) in typical steppe

放通量、降水量、土壤湿度、气温进行的相关性分析结果见图 4。

 Table 4 Average N2O emission fluxes, precipitation(PPT), soil moisture(SM), air temperature(AT) of typical steppe

 N2O平均排放通量
 降水量
 土壤湿度
 气温
 来源

表 4 典型草原观测期间 N<sub>2</sub>O 排放通量、降水量、土壤湿度及气温

观测时间 Period	N <sub>2</sub> O 平均排放通量 Average N <sub>2</sub> O emission fluxes/(ug N m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	降水量 PPT/mm	土壤湿度 SM/(m <sup>3</sup> /m <sup>-3</sup> %)	气温 AT/℃	来源文献 Source
1995-05-10	20.60	125a	_	13.6f	[7]
1998-05—1999-05	4.45	550a	_	3.4f	[7]
2001-01-12	29.11	270a	_	3.9f	[7]
2002-01-12	10.96	250a	_	3.7f	[7]
2003-01-12	10.39	371a	_	-1.4f	[7]
2001-06-2002-06	4.71	286c	12.6d	6.5f	[8]
2002-06-2003-06	3.91	259c	—	3.3f	[8]
2004-06-09	0.65	265	11.2a	17.7	[11]
2005-06-09	0.39	119	9.5a	19.3	[11]
2005-01-12	2.74	165a	12.3a	1.7a	[15]
2006-01-12	3.43	230a	13.3a	2.6a	[15]
2007-07-8	2.30	—	13.9	—	[17]
2007-08-2008-08	2.51	354	13.5	2.1	[18]
2007-08-2008-08	2.92	_	13.5	2.2	[21]

续表					
观测时间	N <sub>2</sub> O平均排放通量	降水量	土壤湿度	气温	来源文献
Period	Average $\rm N_2O$ emission fluxes/( $\mu g \ N \ m^{-2} \ h^{-1}$ )	PPT/mm	$SM/(m^3/m^{-3}\%)$	AT∕°C	Source
2007-10-2008-10	2.05	177.8e	14.0	3.6f	[20]
2009-05-09	14.16	164	8.2	16.9	[22]
2010-05-09	2.18	283	12.5	16.5	[22]

AT: 气温 air temperature; a: 数据来源于文献中图表 Data from figures in the reference; b: 数据来源于<sup>[7]</sup> Data from<sup>[7]</sup>; c: 数据来源于<sup>[31]</sup> Data from<sup>[31]</sup>;d:数据来源于<sup>[32]</sup>;e:数据来源于<sup>[29]</sup> Data from<sup>[29]</sup>;f:数据来源于中国农业基本气象资料月值数据集锡林浩特站点气象资料 Data from Xilinhot site of Chinese Agricultural basic meteorological monthly value datasets; "-";表示数据未在文献中给出 Indicate data not given in the reference

由图 4, N<sub>2</sub>O 平均排放通量与降水量之间有显著的线性正相关关系(N=7, R<sup>2</sup>=0.58, P<0.05), N<sub>2</sub>O 排放 通量与土壤湿度呈显著的线性正相关关系(N=9,R<sup>2</sup>=0.62,P<0.05),N<sub>2</sub>O排放通量与气温呈极显著线性正相 关关系(N=6,R<sup>2</sup>=0.85,P<0.01)。



图 4 典型草原 N<sub>2</sub>O 平均通量与降水量、土壤湿度、气温的相关关系

Fig.4 The correlation between Average N2 O emission fluxes and precipitation (PPT), soil moisture (SM), air temperature (AT) in typical steppe

# 3 讨论

24 期

3.1 温室气体交换通量状况

3.1.1 CH<sub>4</sub>交换通量

由现有文献数据得知草甸草原、典型草原、荒漠草原均表现为 CH<sub>4</sub> 的汇。有研究认为多数的观测实验是 在生长季进行,忽略了冬季及冬春交替期 CH<sub>4</sub>交换通量的测定<sup>[33]</sup>,而一项在美国北部矮禾草草原的研究发现 冬季 CH<sub>4</sub>吸收通量占全年的 15%—30%<sup>[34]</sup>,所以, Wang 等认为目前对 CH<sub>4</sub>年度交换通量的估算具有极大的 不确定性[35],还需在今后的观测实验中加以完善。

# 3.1.2 CO2交换通量

由现有文献资料计算得知草甸草原表现为碳汇,而典型草原与荒漠草原虽在生长季表现为 CO2汇,但全 年却表现为 CO,源。有研究表明在温带草原区我国典型草原的碳固定量水平最低,并认为这种现象主要是由 降水量的时空变异决定的<sup>[36]</sup>。Hao等也认为降水规律的改变是影响 CO,净排放的重要因素,甚至会导致生 态系统在碳源与碳汇功能上的相互转换[37]。因而内蒙古典型草原与荒漠草原是碳源还是汇并不确定,可能 是一个碳交换源汇动态变化的过程。。

Piao 等通过三种不同模型对内蒙古地区碳平衡进行分析得出其年均碳沉降量分别为 11.4Tg、-3.6Tg 及 17.2Tg,表明内蒙古地区并非明显的碳汇<sup>[38]</sup>。由此可见,模型不同,内蒙古年均碳沉降量的结果也不同,甚至 是源汇状况的差异。

3.1.3 N<sub>2</sub>0 交换通量

内蒙古草甸草原、典型草原与荒漠草原均表现为 N<sub>2</sub>O 的源。对于 N<sub>2</sub>O 排放,研究者们普遍认为在 N<sub>2</sub>O 年度总量的估算中,冻融期间 N<sub>2</sub>O 的排放量占有十分重要的地位<sup>[33,35,3940]</sup>。在内蒙古地区,3 月份左右会出现冻融交替现象,引起 N<sub>2</sub>O 的爆发式排放<sup>[41]</sup>,因此在 N<sub>2</sub>O 年度排放通量的估算中,若是忽略了冻融期 N<sub>2</sub>O 通量的测定,将会造成巨大的估算误差。

3.1.4 误差分析

(1) 空间变异性

本文对已发表文献中内蒙古草原三种主要草地类型(草甸草原、典型草原、荒漠草原)主要温室气体 (CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的全年或生长季平均通量进行了汇总分析,但由于数据来源的限制,三种草地类型的样点数 据过少(草甸草原与荒漠草原温室气体排放的研究并不多见)或是过于集中(典型草原温室气体排放的研究 大多集中于锡林河流域),故文中温室气体平均交换通量的估算因为样本的空间变异性必然存在较大的误 差,对不同草原类型温室气体交换通量的代表性比较差。

(2) 时间变异性

目前的研究中箱法均采用了目前较为常见的手动不连续观测法(间隔一般为一周或是十天),然后采用 时间插值法估算季节及全年的温室气体通量值,这种方法若能恰当掌握采样时段能使测量值接近全天的平均 值,同时通过合适的采样频率能抓住排放曲线的峰与谷,这样能够更加精确的估算季度或是年度温室气体通 量值<sup>[42]</sup>。但是本文中实验数据的搜集从 1995—2012,跨度达 18 年,时间差异是客观存在的,而且三种气体通 量年际间的差异则主要是与各年份降雨及温度等环境因子相关,变化幅度较大。

(3) 观测方法误差

已有的研究中 CO2通量的测定一般使用涡动相关法,涡动相关法为自动观测系统,误差相对较小。

CH<sub>4</sub>及 N<sub>2</sub>O 通量的测定则使用的静态箱—气相色谱法,箱法为人工手动操作,必然会产生一定误差,但王 迎红等通过静态箱—气相色谱法观测系统对陆地生态系统进行观测时,发现碳排放的最大误差(仪器误差、标气误差以及采样箱体积误差之和)小于 10%,远小于重复间的空间变异性<sup>[42]</sup>。

3.2 典型草原温室气体交换通量与环境因子关系

**3.2.1** 环境因子对 CH<sub>4</sub>交换通量的影响

本文统计分析现有典型草原观测数据得出 CH<sub>4</sub>平均吸收通量与降水量有显著的线性正相关关系(*N*=8, *R*<sup>2</sup>=0.53,*P*<0.05)(见图 2)。Blankinship 等人在美国亚利桑那州进行了相关的研究,对四种不同干湿状态的 生态系统(荒漠草原、矮松-杜松林地、黄松林地、针叶混交林)持续四年的研究发现,在湿润的生态系统中 CH<sub>4</sub>吸收通量与降雨量有较强的相关性,而在干冷的生态系统中 CH<sub>4</sub>的吸收量则与温度有着较强的相关性。 他们认为这种现象的出现可能与不同生态系统中甲烷氧化菌群落对不同环境因子(降雨量、温度)的改变的 适应能力不同而导致的<sup>[43]</sup>。

CH<sub>4</sub>平均吸收通量与土壤温度有极显著的线性正相关关系(*N*=7,*R*<sup>2</sup>=0.77,*P*<0.01)(见图 2)。然而有研究认为虽然土壤温度主要通过改变甲烷氧化菌活性来影响 CH<sub>4</sub>平均吸收通量,但是温度对甲烷氧化菌的影响存在一个临界值,土壤氧化甲烷速率在临界温度处可以达到最大值,在超过临界温度后,温度与甲烷氧化速率并无显著相关性<sup>[4445]</sup>。但同时也有许多研究认为 CH<sub>4</sub>平均吸收通量与土壤温度呈正相关关系<sup>[4647]</sup>。所以,综上所述,自然条件下温度对大气甲烷氧化菌生理生态过程的影响机制仍需进一步的研究与探索<sup>[48]</sup>。

本文目前获得的文献数据统计得出 CH<sub>4</sub>平均吸收通量与土壤湿度也有着显著的线性正相关关系(*N*=8, *R*<sup>2</sup>=0.67,*P*<0.05)(见图 2)。然而有研究表明 CH<sub>4</sub>的吸收通量对土壤湿度的变化十分敏感,并非是简单的线 性关系,而是驼峰形关系,并且存在一个最适宜 CH<sub>4</sub>吸收的土壤湿度,Dijkstra 等认为这个最佳湿度应该在 24%左右<sup>[49]</sup>。同样,在科罗拉多矮禾草草原上,Mosier 通过实验发现对于细质地的土壤,在土壤湿度为 20% 时,CH<sub>4</sub>吸收达到峰值<sup>[50]</sup>。同时,研究认为当土壤湿度高于最佳的土壤湿度,限制 CH<sub>4</sub>吸收速率的是 CH<sub>4</sub>的扩

9

散速率,若土壤湿度过低,限制 CH<sub>4</sub>吸收速率的就是因湿度过低而活性降低的甲烷氧化菌群落<sup>[51]</sup>。本文整理的内蒙古草原的数据结果中,土壤湿度均在 20%之下,并未达到研究者们认为的 CH<sub>4</sub>吸收的最佳湿度,所以与 土壤湿度相关的甲烷氧化菌群落的活性在土壤 CH<sub>4</sub>吸收中起到重要作用<sup>[49]</sup>,湿度越高,甲烷氧化菌群落活性 越强,土壤 CH<sub>4</sub>吸收量越大,即 CH<sub>4</sub>平均吸收通量与湿度呈正相关关系。

3.2.2 环境因子对 CO,交换通量(NEE)的影响

典型草原 NEE 与降水量有着极显著的线性负相关关系(*N*=10,*R*<sup>2</sup>=0.64,*P*<0.01)(见图 3)。李明峰等 通过一项在草甸、羊草、大针茅等群落样地所进行的研究和本文的结果类似,认为大气降水是影响 CO<sub>2</sub>排放通 量变化的重要环境因子<sup>[32]</sup>。而且降雨频率的变化将会改变土壤湿度,进而影响生态系统碳平衡<sup>[52-53]</sup>,在土壤 湿度较低时,降雨的影响更为显著<sup>[54]</sup>。

本文统计文献数据发现典型草原 NEE 与土壤湿度有着显著的线性负相关关系(*N*=8,*R*<sup>2</sup>=0.74,*P*<0.01) (见图 3)。在中国北部及蒙古的大量的研究表明,过低的湿度是限制温带草原吸收 CO<sub>2</sub>的主要因素<sup>[12,55-56]</sup>。 Hunt 等在干旱及半干旱草原的研究也发现 NEE 受土壤湿度改变的影响十分明显<sup>[57]</sup>。

典型草原 NEE 与气温有极显著的线性正相关关系(*N*=8,*R*<sup>2</sup>=0.70,*P*<0.01)(见图 3)。这一结果与 Cheng 等在内蒙古南部和宁夏所进行的研究的结果是一致的<sup>[58]</sup>。究其原因,温度的升高会导致根部呼吸作 用以及土壤有机质微生物矿化作用的增加,从而导致土壤 CO<sub>2</sub>排放的增加<sup>[59]</sup>。所以,全球变暖将会导致土壤 CO<sub>2</sub>排放的增加,同时也会加速土壤有机质的分解<sup>[58]</sup>。

另一项与 CO<sub>2</sub>交换通量呈极显著线性负相关关系(*N*=8,*R*<sup>2</sup>=0.83,*P*<0.01)的环境因子为叶面积指数 (Leaf Area Index:LAI,见图 3)。在生长季,LAI 与降雨一样是影响温带草原 NEE 的主要因子<sup>[56]</sup>。而且,LAI 并非单独的影响因子,一般其与土壤湿度都有较好的正相关性<sup>[60]</sup>。因而,降雨与土壤湿度不仅会直接影响 NEE,还将通过影响 LAI 而进一步对 NEE 造成影响<sup>[14]</sup>。

3.2.3 环境因子对 N<sub>2</sub>O 交换通量的影响

由图 4,N<sub>2</sub>O 平均排放通量与降水量之间有显著的线性正相关关系(*N*=7,*R*<sup>2</sup>=0.58,*P*<0.05)。Trost 通过 对世界范围内不同地区所进行的 22 个研究项目调查后认为,降雨或是灌溉会增加 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[61]</sup>,这主要是 由于降雨或灌溉影响了植物或是微生物的生物活性,进而改变了土壤中 N 素的动态变化,最终影响 N<sub>2</sub>O 的 排放<sup>[62]</sup>。

同时,本文所搜集的文献数据中,土壤湿度显示出与降雨类似的影响 N<sub>2</sub>O 排放通量的规律,即呈极显著的线性正相关关系(*N*=9,*R*<sup>2</sup>=0.62,*P*<0.01)(见图 4),这个结果与 Peng 等的土壤湿度越低 N<sub>2</sub>O 的排放量就 越低的结论相符<sup>[63]</sup>,这主要是因为较低的土壤湿度会限制土壤中微生物的代谢活动及代谢底物(如铵盐及硝酸盐)的扩散,进而会减弱土壤 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[64]</sup>。也有研究表明,由降雨或是灌溉而引发的土壤含水量的突然 增加,会导致 N<sub>2</sub>O 的一个高的排放峰,这主要是因为在湿润土壤条件下,占 N<sub>2</sub>O 排放主导地位的反硝化作用 被增强<sup>[65]</sup>。

典型草原 N<sub>2</sub>O 排放通量与气温呈极显著线性正相关关系(N=6,R<sup>2</sup>=0.85,P<0.01),这与当前多数研究的结果相符<sup>[66-68]</sup>。目前的研究认为,在半干旱气候区,尤其是土壤干旱的情况下,温度与土壤 N<sub>2</sub>O 的排放有着正相关的关系<sup>[15,64]</sup>。Castaldi 等人进行了一项温度对耕地土壤及森林土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响的研究,他们认为温度的升高会导致土壤呼吸作用增强,氧气消耗增大,促进了反硝化作用,进而增加了 N<sub>2</sub>O 的排放,这就导致以反硝化作用为 N<sub>2</sub>O 主要来源的耕地土壤受温度的影响更为明显<sup>[69]</sup>。但是李明峰等在锡林河流域进行的一项研究表明,在极端干旱条件下,草地生态系统对 N<sub>2</sub>O 表现出吸收特性,李明峰认为这种情况发生可能是因为极端干旱使得草原土壤 N<sub>2</sub>O 的排放趋于停滞,且干燥而粘粒较多的黑钙土对 N<sub>2</sub>O 具有物理吸附作用<sup>[70]</sup>。

#### 4 结语及展望

大气中温室气体浓度的增加是导致全球气候变暖的主要因素,它将在很大程度上影响区域乃至全球未来 的气候变化趋势,草地生态系统作为排放与吸收温室气体最重要的陆生生态系统,在未来全球变化中起着至 关重要的作用,因而对草地生态系统温室气体排放的研究与探索将一直成为全球变化领域研究的核心内容。

本文对内蒙古草原温室气体排放进行了数据的汇总分析,认为内蒙古草原中三种主要草地类型(草甸草 原、典型草原、荒漠草原)均表现为 CH<sub>4</sub>的汇及 N<sub>2</sub>O 的源,虽然草甸草原表现为 CO<sub>2</sub>的汇,但典型草原及荒漠 草原则表现为 CO<sub>2</sub>交换源汇动态变化的过程(生长季为汇,年度为源)。但由于现有观测数据的局限,本文对 温室气体排放的时空变异性<sup>[15,58-59]</sup>考虑不足,也未涉及人为因素,如放牧、开垦<sup>[71-72]</sup>等的影响,这就会导致温 室气体平均排放量计算结果的偏差,而且很难估算区域总量。同样,由于样本数目过小,在相关性分析时可能 会导致我们对排放机制的认识不全面而得出片面的规律。若要精确估算温室气体的区域排放量且更加全面 的认识其排放规律,就需要建立精确的模型,例如目前应用较为广泛的 DNDC 模型<sup>[73]</sup>,其考虑到了温室气体 排放的各个过程及其相关的影响因子,会使得估算结果有较强的可靠性。

但是,模型的建立也需要大量的数据基础,从本文搜集的数据来看,内蒙古荒漠草原及草甸草原的研究很 少。而典型草原虽说研究较多,但是大多集中在锡林河流域,因而无法反应整个内蒙古典型草原的情况,这就 暴露了目前国内温室气体研究针对大尺度区域研究力度不够的现状,应加大对此的研究投入,这对于指导区 域大尺度以及整个陆地生态系统温室气体排放总量的精确估算具有重要的理论意义和实践价值<sup>[74]</sup>,同时也 为以后野外生态定位站的选址及建立提供了一定的参考。所以我们应同时从不同草地类型、利用方式和尺度 等多方面开展对草地生态系统温室气体排放的野外定位实验研究,积累数据,对温室气体排放机制进行深入 系统的研究,并以此为基础建立起可描述排放机制的数学模型,将野外实验与数学模型有机结合起来,只有这 样才能使我们能够更加准确的了解温室气体整体的排放状况及机制,进而提出相应的控制对策。

#### 参考文献(References):

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 刘起. 内蒙古草地资源与生态环境. 内蒙古环境保护, 1998, (2): 16-18.
- [3] 张新时. 草地的生态经济功能及其范式. 科技导报, 2000, (8): 3-7.
- [4] 段淳清. 内蒙古草地资源现状及其可持续利用对策. 内蒙古草业, 2006, 18(3): 21-25.
- [5] 杨制国. 内蒙古自治区温室气体排放清单及核算研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [6] 张宏斌. 基于多源遥感数据的草原植被状况变化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [7] 杜睿, 吕达仁, 王庚辰. 天然温带典型草原 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>通量的时间变化特征. 自然科学进展, 2005, 15(3): 313-320.
- [8] 董云社,齐玉春, Domroes M, 耿元波,杨小红,刘立新,刘杏认.内蒙古温带半干旱羊草草原 N<sub>2</sub>O 通量及其影响因素. 地理研究, 2004, 23(6):776-784.
- [9] Ma X Z, Wang S P, Wang Y F, Jiang G M, Nyren P. Short-term effects of sheep excrement on carbon dioxide, nitrous oxide and methane fluxes in typical grassland of Inner Mongolia. New Zealand Journal of Agricultural Research, 2006, 49(3); 285-297.
- [10] Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, Cui X Y, Zhou X Q, Huang X Z. The sensitivity of temperate steppe CO<sub>2</sub> exchange to the quantity and timing of natural interannual rainfall. Ecological Informatics, 2010, 5(3): 222-228.
- [11] Holst J, Liu C Y, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Zheng X H, Wang Y S, Han S H, Yao Z S, Yue J, Han X G. Microbial N Turnover and N-Oxide (N<sub>2</sub>O/NO/NO<sub>2</sub>) Fluxes in Semi-arid Grassland of Inner Mongolia. Ecosystems, 2007, 10(4): 623-634.
- [12] Wang Y L, Zhou G S, Wang Y H. Environmental effects on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange at half-hour and month scales over *Stipa krylovii* steppe in northern China. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(5): 714-722.
- [13] Liu C Y, Holst J, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Yao Z S, Yue J, Han S H, Han X G, Krümmelbein J, Horn R, Zheng X H. Wintergrazing reduces methane uptake by soils of a typical semi-arid steppe in Inner Mongolia, China. Atmospheric Environment, 2007, 41(28): 5948-5958.

- [14] Fu Y, Zheng Z, Yu G, Hu Z, Sun X, Shi P, Wang Y, Zhao X. Environmental influences on carbon dioxide fluxes over three grassland ecosystems in China. Biogeosciences, 2009, 6(12): 2879-2893.
- [15] Liu X R, Dong Y S, Qi Y C, Li S G. N<sub>2</sub>O fluxes from the native and grazed semi-arid steppes and their driving factors in Inner Mongolia, China. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 86(2): 231-240.
- [16] Kang X M, Hao Y B, Cui X Y, Chen H, Li C S, Rui Y C, Tian J Q, Kardol P, Zhong L, Wang J Z, Wang Y F. Effects of grazing on CO<sub>2</sub> balance in a semiarid steppe; field observations and modeling. Journal of Soils and Sediments, 2013, 13(6): 1012-1023.
- [17] Yao Z S, Wolf B, Chen W W, Butterbach-Bahl K, Brüggemann N, Wiesmeier M, Dannenmann M, Blank B, Zheng X H. Spatial variability of N<sub>2</sub>
   O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes within the Xilin River catchment of Inner Mongolia, China: a soil core study. Plant and Soil, 2009, 331(1): 341-359.
- [18] Luo G J, Kiese R, Wolf B, Butterbach-Bahl K. Effects of soil temperature and moisture on methane uptake and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types. Biogeosciences, 2013, 10(5): 3205-3219.
- [19] Geng Y B, Luo G Q, Yuan G F. CH<sub>4</sub> uptake flux of Leymus chinensis steppe during rapid growth season in Inner Mongolia, China. Science China Earth Sciences, 2010, 53(7): 977-983.
- [20] Wolf B, Chen W W, Brüggemann N, Zheng X H, Pumpanen J, Butterbach-Bahl K. Applicability of the soil gradient method for estimating soilatmosphere CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O fluxes for steppe soils in Inner Mongolia. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(3): 359-372.
- [21] Wolf B, Kiese R, Chen W W, Grote R, Zheng X H, Butterbach-Bahl K. Modeling N<sub>2</sub>O emissions from steppe in Inner Mongolia, China, with consideration of spring thaw and grazing intensity. Plant and Soil, 2011, 350(1/2): 297-310.
- [22] Zhang L H, Huo Y W, Guo D F, Wang Q B, Bao Y, Li L H. Effects of Multi-nutrient Additions on GHG Fluxes in a Temperate Grassland of Northern China. Ecosystems, 2014, 17(4): 657-672.
- [23] Tang S M, Wang C J, Wilkes A, Zhou P, Jiang Y Y, Han G D, Zhao M G, Huang D, Schönbach P. Contribution of grazing to soil atmosphere CH<sub>4</sub> exchange during the growing season in a continental steppe. Atmospheric Environment, 2013, 67(2): 170-176.
- [24] Wang Z W, Hao X Y, Shan D, Han G D, Zhao M G, Willms W D, Wang Z, Han X. Influence of increasing temperature and nitrogen input on greenhouse gas emissions from a desert steppe soil in Inner Mongolia. Soil Science and Plant Nutrition, 2011, 57(4): 508-518.
- [25] Yang F L, Zhou G S, Hunt J E, Zhang F. Biophysical regulation of net ecosystem carbon dioxide exchange over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3/4); 318-328.
- [26] Jiang Y Y, Tang S M, Wang C J, Zhou P, Tenuta M, Han G D, Huang D. Contribution of urine and dung patches from grazing sheep to methane and carbon dioxide fluxes in an inner mongolian desert grassland. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 25(2): 207-212.
- [27] Jing Y L, Wang A Z, Guan D X, Wu J B, Yuan F H, Jin C J. Carbon dioxide fluxes over a temperate meadow in eastern Inner Mongolia, China. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11): 4401-4411.
- [28] 李梓铭. 内蒙古呼伦贝尔草甸草原温室气体通量的观测研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
- [29] 包苏雅. 锡林河流域景观格局动态变化研究[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2012.
- [30] Huang X, Hao Y, Wang Y, Wang Y, Cui X, Mo X, Zhou X. Partitioning of evapotranspiration and its relation to carbon dioxide fluxes in Inner Mongolia steppe. Journal of Arid Environments, 2010, 74(12): 1616-1623.
- [31] 齐玉春, 董云社, 杨小红, 耿元波, 刘立新, 李明峰. 放牧对温带典型草原含碳温室气体 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>通量特征的影响. 资源科学, 2005, 27 (2): 103-109.
- [32] 李明峰, 董云社, 耿元波, 齐玉春. 温带草原生态系统 CO2 排放对环境因子变化的响应. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1722-1727.
- [33] Holst J, Liu C Y, Yao Z S, Brüggemann N, Zheng X H, Giese M, Butterbach-Bahl K. Fluxes of nitrous oxide, methane and carbon dioxide during freezing-thawing cycles in an Inner Mongolian steppe. Plant and Soil, 2008, 308(1/2): 105-117.
- [34] Mosier A R, Parton W J, Valentine D W, Ojima D S, Schimel D S, Delgado J A. CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes in the Colorado shortgrass steppe: 1. Impact of landscape and nitrogen addition. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(3): 387-399.
- [35] Wang C J, Tang S M, Wilkes A, Jiang Y Y, Han G D, Huang D. Effect of stocking rate on Soil-atmosphere CH<sub>4</sub> flux during spring freeze-thaw cycles in a northern desert steppe, China. PLos One, 2012, 7(5): e36794.
- [36] 赵娜, 邵新庆, 吕进英, 王堃. 草地生态系统碳汇浅析. 草原与草坪, 2011, 31(6): 75-82.
- [37] Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, Huang X Z, Cui X Y, Zhou X Q, Niu H S. CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O and energy exchange of an Inner Mongolia steppe ecosystem during a dry and wet year. Acta Oecologica, 2008, 33(2): 133-143.
- [38] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458 (7241): 1009-1013.
- [39] Groffman P M, Hardy J P, Driscoll C T, Fahey T J. Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest. Global Change Biology, 2006, 12(9): 1748-1760.
- [40] Wu X, Brüggemann N, Butterbach-Bahl K, Fu B J, Liu G H. Snow cover and soil moisture controls of freeze-thaw-related soil gas fluxes from a

typical semi-arid grassland soil: a laboratory experiment. Biology and Fertility of Soils, 2013, 50(2): 295-306.

- [41] 王连峰,蔡延江,解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2361-2366.
- [42] 王迎红. 陆地生态系统温室气体排放观测方法研究、应用及结果比对分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(大气物理研究所), 2005.
- [43] Blankinship J C, Brown J R, Dijkstra P, Allwright M C, Hungate B A. Response of terrestrial CH<sub>4</sub> uptake to interactive changes in precipitation and temperature along a climatic gradient. Ecosystems, 2010, 13(8): 1157-1170.
- [44] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, Aber J D, Bowden R D. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 1-10.
- [45] Cai Z C, Yan X Y. Kinetic model for methane oxidation by paddy soil as affected by temperature, moisture and N addition. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(5): 715-725.
- [46] Wang Y S, Xue M, Zheng X H, Ji B M, Du R, Wang Y F. Effects of environmental factors on N<sub>2</sub>O emission from and CH<sub>4</sub> uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia. Chemosphere, 2005, 58(2): 205-215.
- [47] Wu X, Yao Z S, Brüggemann N, Shen Z Y, Wolf B, Dannenmann M, Zheng X H, Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(5): 773-787.
- [48] 蔡元锋, 贾仲君. 土壤大气甲烷氧化菌研究进展. 微生物学报, 2014, 54(8): 841-853.
- [49] Dijkstra F A, Morgan J A, von Fischer J C, Follett R F. Elevated CO<sub>2</sub> and warming effects on CH<sub>4</sub> uptake in a semiarid grassland below optimum soil moisture. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(G1): 79-89.
- [50] Mosier A R, Parton W J, Martin R E, Valentine D W, Ojima D S, Schimel D S, Burke I C, Adair E C, Del Grosso S J. Soil-atmosphere exchange of trace gases in the Colorado shortgrass steppe. Ecology of the shortgrass steppe: a long-term perspective/edited by William K Lauenroth and Ingrid C Burke, 2008.
- [51] von Fischer J C, Butters G, Duchateau P C, Thelwell R J, Siller R. In situ measures of methanotroph activity in upland soils: A reaction-diffusion model and field observation of water stress. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2009, 114(G1): 588-591.
- [52] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. Bioscience, 2008, 58(9): 811-821.
- [53] Robertson T R, Bell C W, Zak J C, Tissue D T. Precipitation timing and magnitude differentially affect aboveground annual net primary productivity in three perennial species in a Chihuahuan Desert grassland. New Phytologist, 2009, 181(1): 230-242.
- [54] Peng S S, Piao S L, Shen Z H, Ciais P, Sun Z Z, Chen S P, Bacour C, Peylin P, Chen A P. Precipitation amount, seasonality and frequency regulate carbon cycling of a semi-arid grassland ecosystem in Inner Mongolia, China: A modeling analysis. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 178-179: 46-55.
- [55] Fu Y L, Yu G R, Wang Y F, Li Z Q, Hao Y B. Effect of water stress on ecosystem photosynthesis and respiration of a Leymus chinensis steppe in Inner Mongolia. Science in China Series D: Earth Sciences, 2006, 49(2): 196-206.
- [56] Li S G, Asanuma J, Eugster W, Kotani A, Liu J J, Urano T, Oikawa T, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. Global Change Biology, 2005, 11(11): 1941-1955.
- [57] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, Ross D J, Whitehead D. Long-term carbon exchange in a sparse, seasonally dry tussock grassland. Global Change Biology, 2004, 10(10): 1785-1800.
- [58] Cheng J Z, Lee X Q, Theng B K, Fang B, Yang F, Wang B, Zhang L. Spatial variability of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O Fluxes during midsummer in the steppe of northern China. Polish Journal of Environmental Studies, 2014, 23(2): 319-328.
- [59] Junior N L S, de Sá Mendonça E, Vanir de Souza J, Panosso A Ro, Simas F N B, Schaefer C E G R. Spatial and temporal variability in soil CO<sub>2</sub>-C emissions and relation to soil temperature at King George Island, maritime Antarctica. Polar Science, 2010, 4(3): 479-487.
- [60] Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. Global Change Biology, 2002, 8(7): 599-615.
- [61] Trost B, Prochnow A, Drastig K, Meyer-Aurich A, Ellmer F, Baumecker M. Irrigation, soil organic carbon and N<sub>2</sub>O emissions. A review. Agronomy for Sustainable Development, 2013, 33(4): 733-749.
- [62] Song L, Bao X M, Liu X J, Zhang F S. Impact of nitrogen addition on plant community in a semi-arid temperate steppe in China. Journal of Arid Land, 2012, 4(1): 3-10.
- [63] Peng Q, Qi Y C, Dong Y S, Xiao S S, He Y T. Soil nitrous oxide emissions from a typical semiarid temperate steppe in inner Mongolia: effects of mineral nitrogen fertilizer levels and forms. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 345-357.
- [64] Weitz A M, Linder E, Frolking S, Crill P M, Keller M. N<sub>2</sub>O emissions from humid tropical agricultural soils: effects of soil moisture, texture and nitrogen availability. Soil Biology & Biochemistry, 2001, 33(7/8): 1077-1093.

- [65] Saggar S, Andrew R M, Tate K R, Hedley C B, Rodda N J, Townsend J A. Modelling nitrous oxide emissions from dairy-grazed pastures. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 68(3): 243-255.
- [66] Cantarel A A M, Bloor J M G, Deltroy N, Soussana J F. Effects of climate change drivers on nitrous oxide fluxes in an upland temperate grassland. Ecosystems, 2011, 14(2): 223-233.
- [67] Liu X C, Qi Y C, Dong Y S, Peng Q, He Y T, Sun L J, Jia J Q, Cao C C. Response of soil N<sub>2</sub>O emissions to precipitation pulses under different nitrogen availabilities in a semiarid temperate steppe of Inner Mongolia, China. Journal of Arid Land, 2013, 6(4): 410-422.
- [68] Yao Z S, Wu X, Wolf B, Dannenmann M, Butterbach-Bahl K, Brüggemann N, Chen W W, Zheng X H. Soil-atmosphere exchange potential of NO and N<sub>2</sub>O in different land use types of Inner Mongolia as affected by soil temperature, soil moisture, freeze-thaw, and drying-wetting events. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(D17): 1383-1392.
- [69] Castaldi S. Responses of nitrous oxide, dinitrogen and carbon dioxide production and oxygen consumption to temperature in forest and agricultural light-textured soils determined by model experiment. Biology and Fertility of Soils, 2000, 32(1): 67-72.
- [70] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 耿元波. 极端干旱对温带草地生态系统 CO2、CH4、N2O 通量特征的影响. 资源科学, 2004, 26(3): 89-95.
- [71] Bandyopadhyay K K, Lal R. Effect of land use management on greenhouse gas emissions from water stable aggregates. Geoderma, 2014, 232-234: 363-372.
- [72] Carvalho J L N, Raucci G S, Frazão L A, Cerri C E P, Bernoux M, Cerri C C. Crop-pasture rotation: A strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 183: 167-175.
- [73] 李长生. 生物地球化学的概念与方法—DNDC 模型的发展. 第四纪研究, 2001, 21(2): 89-99.
- [74] 付晓青,李勇. 土壤氧化亚氮排放时空变异性及其方法研究进展. 生态学杂志, 2012, 31(3): 724-730.