

张金玲, 李洁, 赵建宁, 等. 氮素添加对贝加尔针茅草原温室气体通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1640–1648.

ZHANG Jin-ling, LI Jie, ZHAO Jian-ning, et al. Effects of nitrogen addition on greenhouse gas flux in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1640–1648.

氮素添加对贝加尔针茅草原温室气体通量的影响

张金玲^{1,2}, 李洁¹, 赵建宁¹, 刘红梅¹, 王宇³, 杨殿林^{1*}

(1.农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2.沈阳农业大学园艺学院, 沈阳 110866; 3.内蒙古呼伦贝尔市草原监督管理局, 呼伦贝尔 021008)

摘要:为了研究氮沉降对内蒙古贝加尔针茅草原主要温室气体CO₂、CH₄和N₂O通量的影响,试验通过施加NH₄NO₃以模拟氮沉降增加,设置对照(0 kg N·hm⁻², CK)、低氮(30 kg N·hm⁻², N30)、中氮(50 kg N·hm⁻², N50)和高氮(100 kg N·hm⁻², N100)4个氮素添加水平,于牧草生长季(6—10月),采用静态箱-气相色谱法测定了CO₂、CH₄和N₂O的通量。结果表明:贝加尔针茅草原是CO₂和N₂O的源、CH₄的汇,与对照相比,氮素添加处理(N30、N50和N100)在显著增加植物地上生物量的同时,增加了CO₂和N₂O的累计排放量,并降低了CH₄的累计吸收量,处理间全球增温潜势表现为N100>N30>N50>CK,所以N50处理既能显著增加草原植物地上生物量,又能够减缓全球增温潜势的增加。相关分析表明:3种温室气体排放通量与土壤温度、有机碳和NO₃-N含量均显著相关($P<0.05$),CO₂和N₂O排放通量与土壤含水率显著正相关($P<0.05$),CH₄和N₂O排放通量与土壤NH₄⁺-N含量极显著相关($P<0.01$)。

关键词:贝加尔针茅草原; 氮素添加; 温室气体; 全球增温潜势

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)08-1640-09 doi:10.11654/jaes.2017-0030

Effects of nitrogen addition on greenhouse gas flux in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia

ZHANG Jin-ling^{1,2}, LI Jie¹, ZHAO Jian-ning¹, LIU Hong-mei¹, WANG Yu³, YANG Dian-lin^{1*}

(1.Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2.Department of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 3.Hulun Buir Grassland Supervision and Administration Bureau of Inner Mongolia, Hulunbeier 021008, China)

Abstract:There is great significance in exploring the response of temperate meadow steppes to global climate change. The dynamics of greenhouse gas(CO₂, CH₄, and N₂O) fluxes are essential for such; thus, the response of a grassland ecosystem to nitrogen addition in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia was measured. Four nitrogen addition levels of 0 (CK), 30 (N30), 50 (N50), and 100 (N100) kg N·hm⁻² were used to determine the effects of nitrogen addition on greenhouse gas emissions during the growing season (June to October), using the methods of static chamber-box gas chromatography. We found that the *Stipa baicalensis* grassland was a source of CO₂ and N₂O, but a sink for CH₄. Nitrogen addition increased the above-ground biomass of the plants significantly and enhanced the emissions of CO₂ and N₂O, whereas it decreased the uptake of CH₄. The global warming potential of the treatments followed the order of N100>N30>N50>CK. Thus, N50 treatment not only significantly increased the above-ground biomass, but also reduced the increase of global warming potential. The fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O showed significant correlations with soil temperature, organic carbon and NO₃⁻-N content ($P<0.05$). CO₂ and N₂O fluxes also showed significantly positive correlations with soil moisture ($P<0.05$). In addition, CH₄ and N₂O fluxes had significant relationships with soil NH₄⁺-N content ($P<0.01$).

Keywords:*Stipa baicalensis* grassland; nitrogen addition; greenhouse gas; global warming potential

收稿日期:2017-01-06

作者简介:张金玲(1990—),女,辽宁庄河人,硕士研究生,主要研究方向为草地资源与生态。E-mail: zhangjin_taeyang@163.com

*通信作者:杨殿林 E-mail: yangdianlin@caas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31170435)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31170435)

大气氮沉降量持续增加已成为日趋严重的全球问题之一,目前氮沉降状况和发展趋势已经引起了国际社会的高度关注^[1]。我国已成为继欧洲、北美之后的第三大氮沉降区,平均(大气干湿)氮沉降量为12.9 kg·hm⁻²·a⁻¹,有的地区甚至高达63.5 kg·hm⁻²·a⁻¹^[2]。研究表明,我国氮沉降仍以平均每年0.41 kg·hm⁻²的速率增加,预计这种趋势会持续数十年^[3]。氮沉降的增加势必对土壤外源氮素输入产生影响,同时,过量的氮素输入,将会影响陆地生态系统的碳、氮循环以及整个生态系统的结构和功能。草地生态系统作为全球陆地生态系统的重要组成部分,约占地球陆地面积的40%,在全球碳、氮循环和气候变化响应中发挥着重要作用^[4-6]。

自工业革命以来,在人类活动干扰下,大气中主要温室气体浓度急剧增加并导致全球气候变暖的问题已越来越受重视。CO₂、CH₄和N₂O是大气中最重要的温室气体,三者对温室效应的贡献率分别为60%、15%和5%^[7]。草原是主要温室气体的源或汇,其吸收或排放温室气体是近年来的研究热点^[8-10]。内蒙古贝加尔针茅是我国温性草甸草原分布最具代表性的植被类型,是开展温带草原对气候变化响应的理想试验平台。目前,关于温室气体的研究多集中在农田^[11]、森林生态系统^[12]和高寒草原^[13-14],而对内蒙古贝加尔针茅草原温室气体通量的研究较少^[15]。因此,开展长期不同水平氮素添加条件下温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)排放/吸收通量研究,有利于了解内蒙古贝加尔针茅草原温室气体通量的特征及其对氮素添加的响应,为正确评价草原生态系统在全球碳、氮循环中的地位和作用,以及制定科学合理的养分管理制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

研究区域位于内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗伊敏苏木,地处大兴安岭西麓。地理位置为北纬48°27'~48°35',东经119°35'~119°41',海拔760~770 m。地势平坦,是典型的温带草甸草原区,属于半干旱大陆性季风气候,年均气温-1.6℃,年降水量328.7 mm,年蒸发量1 478.8 mm,≥0℃年积温2 567.5℃,无霜期113 d,年均风速4 m·s⁻¹。土壤类型为暗栗钙土。植被类型为贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草(*Leymus chinensis*)草甸草原,共有植物66种,分属21科49属^[16]。

自2010年开始对本试验基地进行围封禁牧,以

进行相应的氮素添加处理,样地的布置采用完全随机区组设计,共设置24个8 m×8 m=64 m²的小区,各小区间有2 m缓冲带,4个处理(不包括大气沉降的氮量)分别为CK(0 kg N·hm⁻²)、N30(30 kg N·hm⁻²)、N50(50 kg N·hm⁻²)、N100(100 kg N·hm⁻²),每个处理6次重复。氮素添加试验从2010年开始,所施氮肥为硝酸铵(NH₄NO₃),每年分两次添加,分别在牧草生长季6月15日、7月15日进行,每次施入全年添加总量的50%。施肥时,将每个小区每次所需要施加的氮肥溶解在8 L水中,均匀喷施到小区内,对照处理喷洒等量的水,同一块小区每年氮素添加量相同。各处理土壤理化性质见表1,试验期间土壤温度和含水率变化见图1。

表1 不同氮素添加水平的土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil under different nitrogen addition treatment

处理 Treatment	有机碳 Organic carbon/g·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹
CK	23.95±1.15b	1.84±0.15c	2.99±0.32c
N30	24.30±0.45b	2.69±0.57b	3.07±0.62c
N50	23.80±0.67b	2.91±0.14b	4.36±0.08b
N100	26.80±0.31a	10.00±0.41a	6.15±0.72a

注:同列不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below.

1.2 样品采集及测定方法

2015年生长季(6—10月)每月中旬进行土壤样品的采集,采用“S”型取样法,每个小区选取10个点,用直径为3 cm的土钻取土,取样深度为40 cm,土层间隔为10 cm,将同一小区同层土壤样品混合均匀,标号封袋。土样采集后,一部分保存于-20℃冰箱,另一部分风干后研磨过筛,用于土壤有机碳、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N等含量的测定。土壤有机碳的测定采用重铬酸钾氧化-分光光度法;土壤NO₃⁻-N的测定采用KCl浸提-双波长(220、275 nm)紫外分光光度法;土壤NH₄⁺-N采用KCl浸提-靛酚兰比色法测定。

温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的采集及测定选用静态箱-气相色谱法,提前一年将20 cm高箱底座埋入待测的试验小区地下,静态暗箱用不锈钢材料制作,体积为50 cm×50 cm×50 cm,在箱外部覆盖一层泡沫保温板,避免取样时太阳照射对箱内温度的影响,箱顶部装有供采集气体用的三通阀和数字式温度计,在箱内侧安装两个直流风扇(搅匀气体)。6、7、8月取样频率为每周一次,9、10月约两周一次,采集气体时将

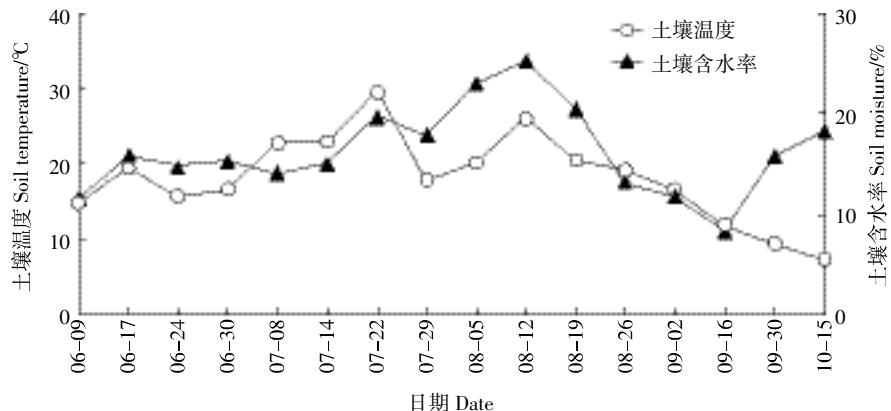


图 1 试验期间贝加尔针茅草原土壤温度和含水率

Figure 1 Soil temperature and moisture in the *Stipa baicalensis* steppe during the test

采样箱嵌入箱底座凹槽中,用水密封,采样设备为医用三通和50 mL注射器,分别抽取盖箱后0、10、20、30 min的气体样品于铝箔气体采样袋中,同时记录箱内温度、土壤5 cm处的温度和含水率,每次采样均在上午9:00—11:00之间完成,并尽快将气袋带回实验室测定分析。利用气相色谱仪(Agilent 7890A)对温室气体含量进行检测,以氢火焰离子化检测器(FID)测定CO₂和CH₄含量,电子捕获检测器(ECD)测定N₂O含量。

野外调查工作于2015年8月中旬进行,在各处理小区内侧预留1 m的缓冲带,布设1 m×1 m观测样方,记录样方内各植物种的生物生态学特性,用收获法齐地面分种剪下后带回实验室,在65 ℃下烘干24 h并称重,测量草原地上生物量。

1.3 分析方法及数据处理

1.3.1 温室气体排放通量

三种温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放通量计算公式如下^[17]:

$$F = \frac{273}{273+T} \cdot \frac{dC}{dt} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \rho \cdot H$$

式中:F为温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹(负值表示气体净吸收,正值表示净排放);T为气样采集过程中的平均温度,℃;dC/dt为单位时间内气样采集过程中采样箱内气体的浓度变化,mL·m⁻³·h⁻¹;P₀为标准大气压,101.325 kPa;P为箱内气压,kPa;ρ为三种温室气体在标准状态下的密度,kg·m⁻³;H为气体采集箱顶部与水面之间的高度,m。

1.3.2 温室气体累积排放量

3种温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的累积排量计算公式^[17]:

$$F' = \sum_{i=1}^n F_i \cdot D_n$$

式中:F'为生长季内温室气体累积排放量,kg·hm⁻²;F_i为试验期间CO₂、CH₄和N₂O的平均排放/吸收通量,mg·m⁻²·h⁻¹;D_n为采样的天数,d。

1.3.3 温室气体增温潜势

草原生态系统的净温室效应用增温潜势来衡量,以CO₂、CH₄、N₂O三种温室气体净交换量的CO₂当量的代数和来计算。由于单位质量CH₄和N₂O在百年时间尺度全球增温潜势分别是CO₂的25倍和298倍,增温潜势可表示为^[18]:

$$\text{GWP} = \text{CO}_2 + \text{CH}_4 \times 25 + \text{N}_2\text{O} \times 298$$

式中:GWP为三种温室气体引发的增温潜势,kg CO₂-eqv·hm⁻²;CO₂、CH₄、N₂O为三种气体累积排放量,kg·hm⁻²。

1.3.4 温室气体排放强度

$$\text{GHGI} = \text{GWP}/Y$$

式中:GHGI为温室气体排放强度(用于估算各处理的综合温室效应^[19]),表示每千克植物地上生物量所产生的CO₂-eqv排放量;Y为贝加尔针茅草原植物地上生物量,kg·hm⁻²。

1.3.5 数据处理

数据处理及相关统计分析利用Excel 2007和SPSS 16.0软件完成。

2 结果与分析

2.1 CO₂排放通量变化特征及其对氮素添加的响应

在整个生长季,贝加尔针茅草原表现为净排放CO₂,是大气中CO₂的源。由图2A看出,各处理CO₂排放通量季节变化趋势基本一致,但排放强度各不相

同。总体来看,6、7、8月CO₂排放通量较9、10月高,且6、7月在添加氮素后都有峰值出现。6—10月,N100处理的最高排放通量为1132.50 mg·m⁻²·h⁻¹,比CK的最高排放通量919.85 mg·m⁻²·h⁻¹增加了23.12%。图2B为4个处理在不同月份CO₂平均排放通量,在6、7、8、9月,N30和N100处理的平均排放通量均显著高于CK和N50处理,而在10月则表现为CK和N30处理的平均排放通量显著高于N50和N100处理。这种月份之间的差异可能是受草原土壤温度和含水量的影响所致。研究期间,CK、N30、N50和N100的CO₂平均排放通量分别为527.75、649.69、544.56、660.71 mg·m⁻²·h⁻¹,氮素添加处理均高于CK,表明添加氮素促进贝加尔针茅草原CO₂排放。

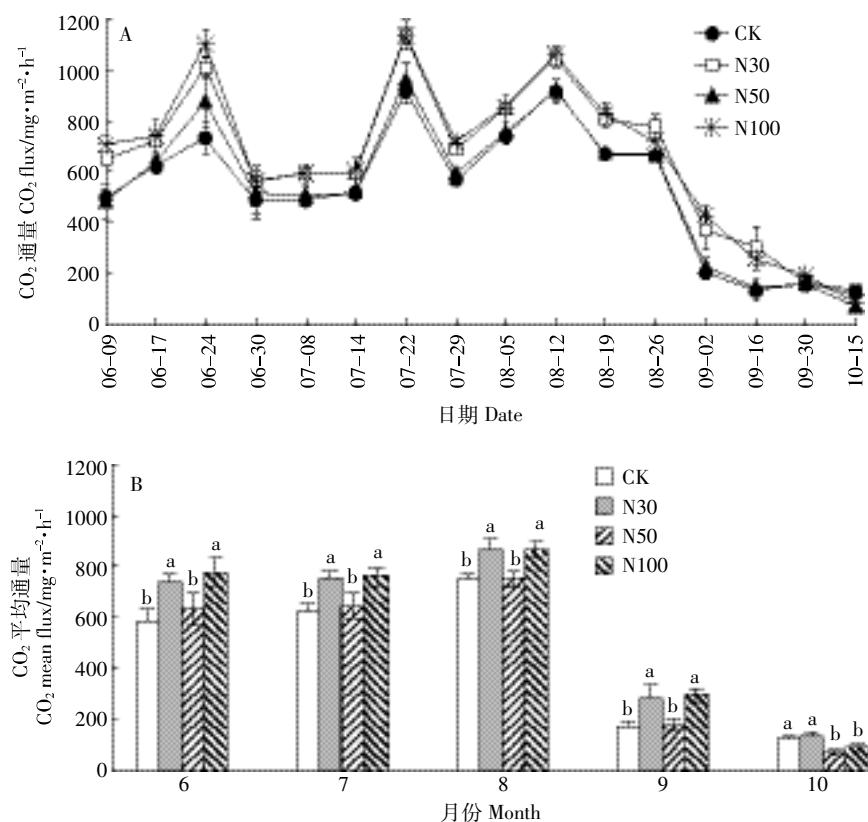
2.2 CH₄吸收通量变化特征及其对氮素添加的响应

贝加尔针茅草原在生长季吸收CH₄,是CH₄的弱汇。从图3A不同氮素添加处理下CH₄通量的季节变化可以看出,氮素添加处理和CK基本保持一致的波动性。图3B为不同处理下CH₄的月平均吸收通量,6—8月氮素添加处理的平均吸收通量均显著低于

CK,CH₄吸收通量在8月达到峰值,N30、N50、N100处理的CH₄吸收通量分别为0.10、0.09、0.07 mg·m⁻²·h⁻¹,显著低于CK的0.13 mg·m⁻²·h⁻¹;9、10月,各处理的CH₄吸收通量均较低。3个氮素添加处理(N30、N50、N100)的CH₄总平均吸收通量均为0.08 mg·m⁻²·h⁻¹,与CK相比均降低27.27%,说明氮素添加抑制贝加尔针茅草原土壤对CH₄的吸收。

2.3 N₂O排放/吸收通量变化特征及其对氮素添加的响应

如图4A所示,各处理N₂O排放通量较低,变化范围在2.78~49.23 μg·m⁻²·h⁻¹之间,贝加尔针茅草原是N₂O的弱源。N₂O排放通量有明显的季节性,表现为先增加后降低的变化趋势,即7、8月的N₂O排放通量高于其余3个月。图4B表示4个处理在生长季内不同月份的N₂O平均排放通量,方差分析结果表明,3个氮素添加处理在各月份的N₂O排放通量均显著高于CK。CK、N30、N50和N100的总平均通量分别为14.60、18.05、16.26、23.05 μg·m⁻²·h⁻¹,N30、N50和N100处理分别比CK增加了23.63%、11.37%和57.88%,表明添加氮素促进贝加尔针茅草原N₂O的排放。

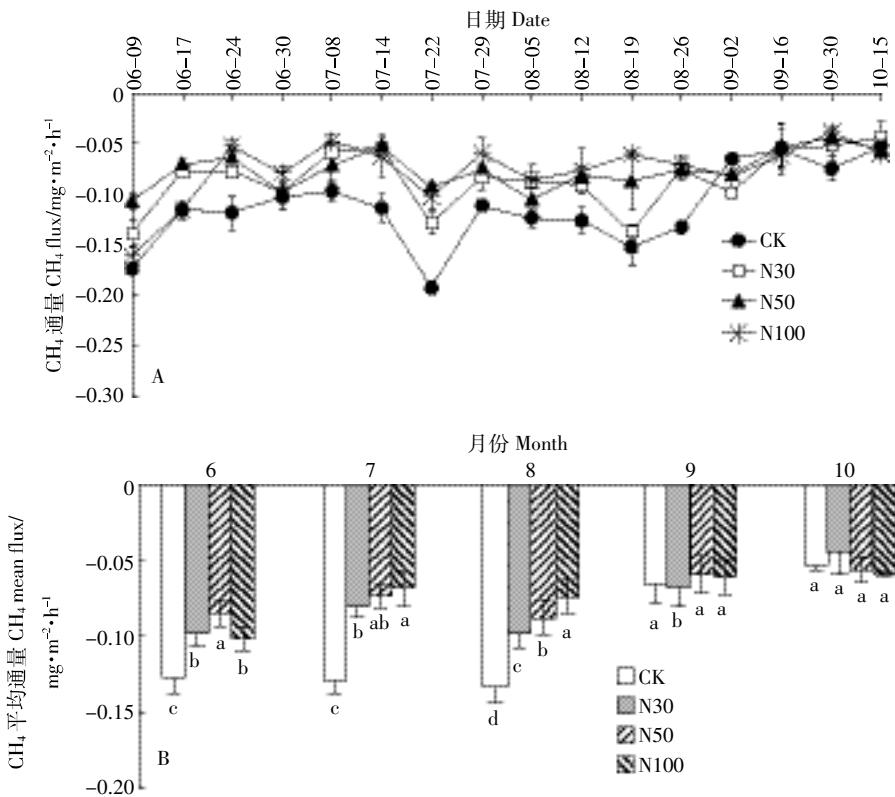
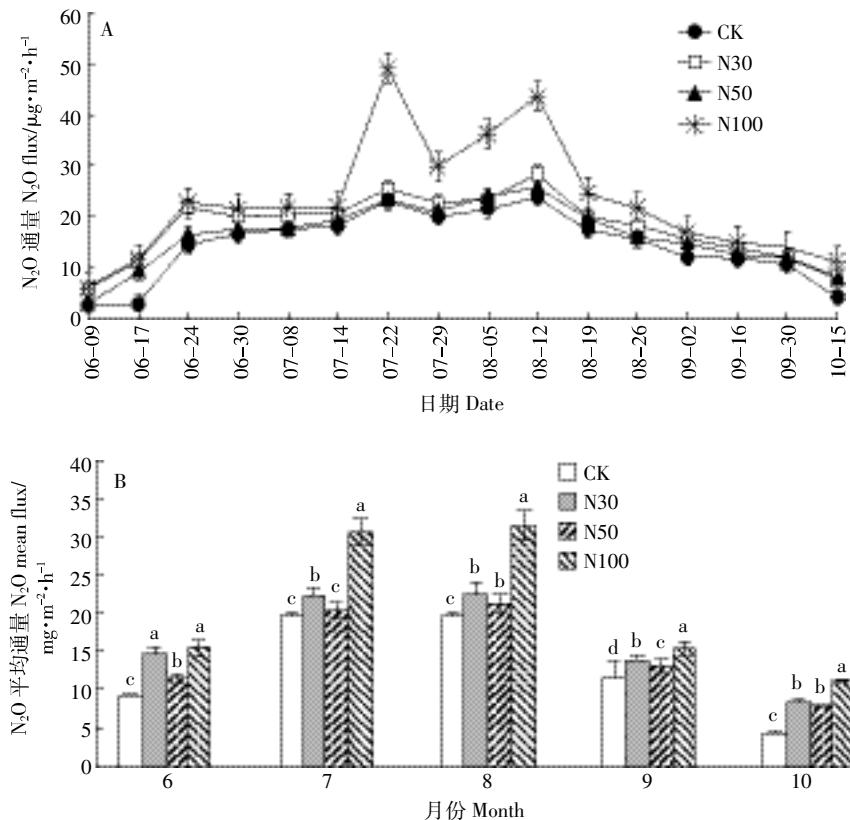


图中不同字母表明处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different letters indicated significant difference among treatments at 0.05 level. The same below

图2 贝加尔针茅草原CO₂排放通量季节动态变化

Figure 2 Seasonal dynamic variations of soil CO₂ fluxes in the *Stipa baicalensis* steppe of Inner Mongolia

图3 贝加尔针茅草原 CH_4 吸收通量季节动态变化Figure 3 Seasonal dynamic variations of soil CH_4 fluxes in the *Stipa baicalensis* steppe of Inner Mongolia图4 贝加尔针茅草原 N_2O 排放通量季节动态变化Figure 4 Seasonal dynamic variations of soil N_2O fluxes in the *Stipa baicalensis* steppe of Inner Mongolia

2.4 贝加尔针茅草原温室气体累计排放/吸收量

氮素添加处理促进CO₂和N₂O的排放,降低CH₄的吸收,显著促进温室气体的排放。研究期间,N50处理的CO₂累计排放量为19 996.14 kg·hm⁻²,仅比CK增加了3.19%,显著低于N30和N100处理的增幅23.11%和25.20%;处理之间CH₄累计吸收量大小表现为CK>N30>N50>N100,N30、N50和N100的CH₄累计吸收量分别为3.10、2.79、2.78 kg·hm⁻²,占对照的75.06%、67.55%和67.31%;N100处理的N₂O累计排放量为0.85 kg·hm⁻²,分别是N30和N50处理的1.29倍和1.31倍,且3个氮素添加处理的N₂O累计排放量均显著高于CK。自然状态下(CK),生长季内贝加尔针茅草原是CO₂和N₂O的源、CH₄的汇(表2),虽然CH₄的累计吸收量远远少于CO₂的累计排放量,但对于减缓温室气体排放仍起到了重要作用。

2.5 贝加尔针茅草原增温潜势及温室气体排放强度

根据表3可知,N30和N50处理的地上生物量分

别达到2 264.57、2 343.90 kg·hm⁻²,与CK相比显著增加,并显著低于N100处理的2 988.17 kg·hm⁻²。N30、N50和N100处理的全球增温潜势均显著高于CK,分别增加了23.37%、3.44%和25.77%。温室气体排放强度和全球增温潜势一样,都是有效评估温室气体对温室效应贡献的重要指标。N50和N100处理的温室气体排放强度分别为8.62、8.19,显著低于CK和N30处理的10.43、10.62。由以上分析可知,N30和N100处理在促进地上生物量增加的同时显著增加了全球增温潜势,而N50处理不仅能够减缓因添加氮素所造成的较高全球增温潜势,同时可有效降低温室气体排放强度。

2.6 环境因子对温室气体通量的影响

由表4相关分析可知,CO₂和N₂O通量与土壤温度、含水率、有机碳和NO₃⁻-N含量均呈显著正相关关系($P<0.05$),CH₄通量与土壤温度显著负相关,与有机碳、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N显著正相关;N₂O通量与土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量均呈极显著正相关,可能是添加氮素导致土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量增加,同时促进土壤微生物硝化和反硝化作用,而这两个过程都会排放N₂O,所以N₂O排放通量随土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量的增加而增加。

3 讨论

影响草地生态系统温室气体通量的因素主要包括环境因素(温度、水分、土壤理化性质)、生物因素(植物、动物、微生物)和管理因素(放牧、开垦、封育

表2 不同氮素添加处理的温室气体累计排放/吸收量

Table 2 Cumulative fluxes of greenhouse gas under different nitrogen addition treatment

处理 Treatment	CO ₂ 累计量 Cumulative amounts of CO ₂ /kg·hm ⁻²	CH ₄ 累计量 Cumulative amounts of CH ₄ /kg·hm ⁻²	N ₂ O 累计量 Cumulative amounts of N ₂ O/kg·hm ⁻²
CK	19 378.92±283.38b	-4.13±0.13c	0.54±0.00d
N30	23 856.52±96.62a	-3.10±0.08b	0.66±0.02b
N50	19 996.14±186.45b	-2.79±0.04a	0.60±0.01c
N100	24 261.45±590.51a	-2.78±0.13a	0.85±0.02a

表3 各处理地上生物量、全球增温潜势及温室气体排放强度

Table 3 Above-ground biomass,GWP and GHGI by each treatment

处理 Treatment	地上生物量 Above-ground biomass/kg·hm ⁻²	全球增温潜势 Global warming potential/kg CO ₂ -eqv·hm ⁻²	温室气体排放强度 Greenhouse gas intensity
CK	1 866.90±95.25c	19 435.36±284.67c	10.43±0.55a
N30	2 264.57±147.08b	23 976.46±96.16a	10.62±0.66a
N50	2 343.90±194.99b	20 104.63±183.37b	8.62±0.71b
N100	2 988.17±153.34a	24 444.06±592.99a	8.19±0.24b

表4 温室气体通量与各影响因子的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between greenhouse gas fluxes and the impact factors

温室气体 Greenhouse gas	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture	有机碳 Organic carbon	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
CO ₂	0.809**	0.545*	0.711**	0.639*	0.370
CH ₄	-0.540*	-0.210	0.577*	0.791**	0.908**
N ₂ O	0.757**	0.653**	0.800**	0.330**	0.783**

注: * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。

Note: * and ** denote $P<0.05$ and $P<0.01$ respectively.

等)^[20]。目前,温带草原部分地区的氮沉降量已超过 $3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[21],相当于本试验中的N30处理,且随着我国农牧业和经济的迅猛发展,氮沉降量将会持续增加,并且影响温室气体的排放。

3.1 氮素添加对 CO_2 通量的影响

植物、动物和土壤微生物的呼吸作用是草原生态系统 CO_2 的主要来源,有研究^[22-23]得出,适量的氮素添加通过增加植物生物量和微生物活性,增强植物和土壤微生物呼吸,进而促进 CO_2 的排放。本试验也发现,添加氮素促进贝加尔针茅草原 CO_2 的排放,且低氮(N30)和高氮(N100)处理显著增加了 CO_2 的排放量,中氮(N50)处理虽有促进作用,但与对照相比差异不显著,N30 和 N50 处理地上生物量无显著差异,由此认为,与 N50 处理相比 N30 处理较高的 CO_2 排放量可能来自于微生物呼吸作用。在梁艳等^[24]的研究结果中,20 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 处理的 CO_2 排放量高于 40 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 处理;Song 等^[25]为期五年的氮素添加试验发现,120 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 处理的 CO_2 排放量高于 60 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 处理。以上两个研究与本试验的结论相似。而马钢等^[26]对高寒灌丛的研究表明,氮素添加会抑制 CO_2 的排放,Bowden 等^[27]和 Fang 等^[28]也得出相同结论。与以往的研究^[29-30]相比,本试验中 CO_2 排放通量较高,产生这种差异的主要原因可能是研究区域、研究时间和草原植被类型不同。罗光强等^[31]研究表明,贝加尔针茅草原生态系统 CO_2 通量显著高于羊草草原。

3.2 氮素添加对 CH_4 通量的影响

大量研究^[32-33]表明,草原生态系统是大气中 CH_4 的汇,但是关于氮素添加对 CH_4 通量影响的研究结论不一。有研究^[34-35]得出,氮素添加会抑制土壤对 CH_4 的吸收,其主要依据是 NH_4^+ 可以替代 CH_4 被甲烷营养微生物利用,二者之间存在竞争关系。本研究中,添加氮素显著降低生长季内 CH_4 的累计吸收量,但对是否因为添加的 NH_4NO_3 增加了土壤中 NH_4^+ 的含量, NH_4^+ 替代 CH_4 被微生物吸收利用,从而抑制了土壤对 CH_4 的吸收,还需要做深入研究来验证。潘占磊等^[36]对短花针茅荒漠草原 CH_4 通量的研究得出,虽然施氮促进对 CH_4 的吸收,但差异并不显著($P>0.05$),与 Wang 等^[37]的研究结果类似;而 Tate 等^[38]和梁艳等^[24]研究发现,氮素添加对 CH_4 通量没有影响;张斐雷等^[39]的研究结果表明,低氮处理促进吸收 CH_4 ,而中、高氮处理抑制吸收 CH_4 ,其原因是受土壤水分的影响。以上研究与本试验结论不一致的原因可能是研究区域、氮素添加种类不同。

3.3 氮素添加对 N_2O 通量的影响

N_2O 是土壤微生物进行硝化和反硝化过程的产物,土壤温湿度及硝铵氮含量都对该过程有影响^[40]。杨涵越等^[41]对内蒙古克氏针茅草原研究发现,氮素添加水平超过 100 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时显著提高 N_2O 的年排放量($P<0.05$),与本研究结论一致。Jiang 等^[42]对高寒草甸的研究也发现添加氮素导致 N_2O 排放增加,主要原因是施氮促进了反硝化过程,进而促进 N_2O 的排放。刘晓雨等^[43]研究结果表明,氮素添加后 N_2O 排放量与土壤 NH_4^+-N 增加量呈显著正相关,本试验中 N_2O 排放量与 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量均呈极显著正相关。方华军等^[44]研究发现高氮促进 N_2O 的排放,而低氮没有影响,是因为高氮影响产 N_2O 菌的活性和群落结构,导致 N_2O 排放量增加。

3.4 氮素添加对贝加尔针茅草原增温潜势及温室气体排放强度的影响

氮素添加对全球增温潜势有影响,处理间大小关系表现为 N100>N30>N50>CK,各处理 CO_2 排放量均占全球增温潜势的 99% 以上。因此,控制草原 CO_2 排放量是降低增温潜势的关键手段。有研究^[45-46]表明,温室气体强度与土壤固碳量、作物产量以及 CH_4 和 N_2O 通量有关。本研究中,N50 和 N100 处理的温室气体排放强度显著低于 CK,各处理温室气体排放强度在 8.19~10.62 之间,高于稻田的温室气体排放强度^[47]。经分析,6—8 月是草原植物旺盛生长期,植物和土壤微生物呼吸作用强烈,所以温室气体排放强度较大。

4 结论

生长季内,内蒙古贝加尔针茅草原排放 CO_2 和 N_2O 、吸收 CH_4 ,三种温室气体通量都有明显的季节变化特点。添加氮素促进 CO_2 和 N_2O 的排放,同时抑制土壤对 CH_4 的吸收,显著增加全球增温潜势。 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种温室气体通量与土壤温度、有机碳和 NO_3^--N 含量有显著相关性, CO_2 和 N_2O 通量与土壤含水率呈显著正相关关系, CH_4 和 N_2O 通量与土壤 NH_4^+-N 含量极显著相关。N50 处理与 CK 相比显著增加草原植物地上生物量,而与 N30 和 N100 处理相比,又能够减缓全球增温潜势的增大。

参考文献:

- [1] Galloway J N, Aber J D, Erisman J W, et al. The nitrogen cascade[J]. *BioScience*, 2003, 53(4):341-356.
- [2] Mo J M, Brown S, Xue J H, et al. Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in

- subtropical China[J]. *Plant and Soil*, 2006, 282(1/2):135–151.
- [3] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459–462.
- [4] Scurlock J, Hall D O. The global carbon sink: A grassland perspective[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2):229–233.
- [5] Huang Y, Sun W J, Zhang W, et al. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review [J]. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7):766–775.
- [6] Feller C, Bernoux M. Historical advances in the study of global terrestrial soil organic carbon sequestration[J]. *Waste Management*, 2008, 28(4):734–740.
- [7] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to the global warming[J]. *Nature*, 1990, 344(6266):529–531.
- [8] Galbally I E, Meyer C P, Wang Y P, et al. Soil-atmosphere exchange of CH₄, CO, N₂O and NO_x and the effects of land-use change in the semi-arid mallee system in Southeastern Australia[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(9):2407–2419.
- [9] Li K H, Gong Y M, Song W, et al. Responses of CH₄, CO₂ and N₂O fluxes to increasing nitrogen deposition in alpine grassland of the Tianshan Mountains[J]. *Chemosphere*, 2012, 88(1):140–143.
- [10] Xu Y Q, Wan S Q, Cheng W X, et al. Impacts of grazing intensity on denitrification and N₂O production in a semi-arid grassland ecosystem [J]. *Biogeochemistry*, 2008, 88(2):103–115.
- [11] 宋敏,齐鹏,蔡立群,等.不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究[J].中国生态农业学报,2016,24(9):1185–1195.
SONG Min, QI Peng, CAI Li-qun, et al. Effect of different biochar application levels on greenhouse gas emissions in the Loess Plateau semi-arid environment in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(9):1185–1195.
- [12] 刘实,王传宽,许飞.4种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量[J].生态学报,2010,30(15):4075–4084.
LIU Shi, WANG Chuan-kuan, XU Fei. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in Northeastern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15):4075–4084.
- [13] 旦增塔庆,旭日,魏学红,等.西藏纳木错高寒草原、高寒草甸和沼泽化草甸主要温室气体通量对比研究[J].草地学报,2014,22(3):493–501.
TENZIN-Tarchen, XU Ri, WEI Xue-hong, et al. Research on key greenhouse gas fluxes across alpine steppe, alpine meadow and swamp meadow in Nam Co, Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3):493–501.
- [14] 郭小伟,杜岩功,林丽,等.青藏高原北缘3种高寒草地的CH₄、CO₂和N₂O通量特征的初步研究[J].草业科学,2016,33(1):27–37.
GUO Xiao-wei, DU Yan-gong, LIN Li, et al. CH₄, CO₂ and N₂O flux among three types of alpine meadow in the north regions of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1):27–37.
- [15] 秦赛赛,翟秋敏,杜睿,等.冻融对内蒙古温带贝加尔针茅草甸草原N₂O通量的影响[J].中国环境科学,2014,34(9):2334–2341.
QIN Sai-sai, ZHAI Qiu-min, DU Rui, et al. Effect of freezing-thawing cycles on N₂O fluxes from temperate *Stipa baicalensis* meadow grassland soils in Inner Mongolia[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9):2334–2341.
- [16] 杨殿林,韩国栋,胡跃高,等.放牧对贝加尔针茅草原群落植物多样性和生产力的影响[J].生态学杂志,2006,25(12):1470–1475.
- YANG Dian-lin, HAN Guo-dong, HU Yue-gao, et al. Effects of grazing intensity on plant diversity and above-ground biomass of *Stipa baicalensis* grassland[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(12):1470–1475.
- [17] 谢义琴,张建峰,姜慧敏,等.不同施肥措施对稻田土壤温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(3):578–584.
XIE Yi-qin, ZHANG Jian-feng, JIANG Hui-min, et al. Effect of different fertilization practices on greenhouse gas emissions from paddy soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(3):578–584.
- [18] IPCC. Climate change the physical science basis. Contribution of working group I to the forth report of the inter governmental panel on climate change[R]. United Kingdom: Cambridge University Press, 2007:1–10.
- [19] 秦晓波,李玉娥,万运帆,等.免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J].农业工程学报,2012,28(6):210–216.
QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under no-tillage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6):210–216.
- [20] 陈先江,王彦荣,侯扶江.草地生态系统温室气体排放机理及影响因素[J].草业科学,2011,28(5):722–728.
CHEN Xian-jiang, WANG Yan-rong, HOU Fu-jiang. Mechanisms and controlling factors of grassland ecosystem greenhouse gas emissions[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(5):722–728.
- [21] 张菊,康荣华,赵斌,等.内蒙古温带草原氮沉降的观测研究[J].环境科学,2013,34(9):3552–3556.
ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHAO Bin, et al. Monitoring nitrogen deposition on temperate grassland in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9):3552–3556.
- [22] 邓昭衡,高居娟,周雨露,等.氮沉降对冻融培养期泥炭土二氧化碳排放的影响[J].土壤通报,2015,46(4):962–966.
DENG Zhao-heng, GAO Ju-juan, ZHOU Yu-lu, et al. Effect of N deposition on CO₂ emission during freezing-thawing incubation period of peat soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4):962–966.
- [23] 宗宁,石培礼,蒋婧,等.短期氮素添加和模拟放牧对青藏高原高寒草甸生态系统呼吸的影响[J].生态学报,2013,33(19):6191–6201.
ZONG Ning, SHI Pei-li, JIANG Jing, et al. Interactive effects of short-term nitrogen enrichment and simulated grazing on ecosystem respiration in a alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(19):6191–6201.
- [24] 梁艳,干珠扎布,曹旭娟,等.模拟氮沉降对藏北高寒草甸温室气体排放的影响[J].生态学报,2017,37(2):1–10.
LIANG Yan, HANSBAGAN Ganjurjav, CAO Xu-juan, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on greenhouse gas emissions from alpine meadow in Northern Tibet[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(2):1–10.
- [25] Song C C, Wang L L, Tian H Q, et al. Effect of continued nitrogen enrichment on greenhouse gas emissions from a wetland ecosystem in the Sanjiang Plain, Northeast China: A 5 year nitrogen addition experiment[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2013, 118(2):741–751.
- [26] 马钢,王平,王冬雪,等.高寒灌丛土壤温室气体释放对添加不同形态氮素的响应[J].草业学报,2015,24(3):20–29.
MA Gang, WANG Ping, WANG Dong-xue, et al. Response of soil greenhouse gas emission to different forms of nitrogen in alpine shrub

- ecosystems[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 2015, 24(3):20–29.
- [27] Bowden R D, Davidson E A, Savage K, et al. Chronic N addition reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196 (1):43–56.
- [28] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Responses of CO₂ efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351(1):177–190.
- [29] 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[J]. 应用生态学报, 2003, 14(3):372–376.
WANG Yue-si, XUE Min, HUANG Yao, et al. Greenhouse gases emission or uptake in Inner Mongolia natural and free-grazing grasslands [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3):372–376.
- [30] 汪文雅, 郭建侠, 王英舜, 等. 锡林浩特草原CO₂通量特征及其影响因素分析[J]. 气象科学, 2015, 35(1):100–107.
WANG Wen-ya, GUO Jian-xia, WANG Ying-shun, et al. Observing characteristics of CO₂ flux and its influencing factors over Xilinhot grassland[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2015, 35 (1): 100–107.
- [31] 罗光强, 耿元波. 羊草草原和贝加尔针茅草原生态系统呼吸的差异分析[J]. 环境科学, 2010, 31(11):2732–2739.
LUO Guang-qiang, GENG Yuan-bo. Analysis of difference between ecosystem respirations of *Leymus chinensis* steppe and *Stipa baicalensis* steppe[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11):2732–2739.
- [32] 魏达旭, 旭日, 王迎红, 等. 青藏高原纳木错高寒草原温室气体通量及与环境因子关系研究[J]. 草地学报, 2011, 19(3):412–419.
WEI Da, XU Ri, WANG Ying-hong, et al. CH₄, N₂O and CO₂ fluxes and correlation with environmental factors of alpine steppe grassland in Nam Co region of Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19 (3):412–419.
- [33] 贺桂香, 李凯辉, 宋伟, 等. 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(3):674–681.
HE Gui-xiang, LI Kai-hui, SONG Wei, et al. The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3):674–681.
- [34] Wendel S, Moore T, Bubier J, et al. Experimental nitrogen, phosphorus, and potassium deposition decreases summer soil temperatures, water contents, and soil CO₂ concentrations in a northern bog[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(3):585–595.
- [35] 李伟, 白娥, 李善龙, 等. 施氮和降水格局改变对土壤CH₄ 和 CO₂ 通量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8):1947–1958.
LI Wei, BAI E, LI Shan-long, et al. Effects of nitrogen addition and precipitation change on soil methane and carbon dioxide fluxes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8):1947–1958.
- [36] 潘占磊, 王忠武, 韩国栋, 等. 短花针茅荒漠草原甲烷通量对增温和施氮的响应[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2):209–216.
PAN Zhan-lei, WANG Zhong-wu, HAN Guo-dong, et al. Responses of methane fluxes on warming and nitrogen addition in *Stipa brevifloraradescens* steppe[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2): 209–216.
- [37] Wang Z W, Hao X Y, Shan D, et al. Influence of increasing temperature and nitrogen input on greenhouse gas emissions from a desert steppe soil in Inner Mongolia[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57 (4):508–518.
- [38] Tate K R, Ross D J, Sonc N A, et al. Postharvest patterns of carbon dioxide production, methane uptake and nitrous oxide production in a *Pinus radiata* D. Don plantation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 228(1):40–50.
- [39] 张裴雷, 方华军, 程淑兰, 等. 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响[J]. 生态学报, 2013, 33(13):4101–4110.
ZHANG Fei-lei, FANG Hua-jun, CHENG Shu-lan, et al. The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in a alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13):4101–4110.
- [40] 王改玲, 陈德立, 李勇. 土壤温度、水分和NH₄⁺-N浓度对土壤硝化反应速度及N₂O排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18 (1):1–6.
WANG Gai-ling, CHEN De-li, LI Yong. Effect of soil temperature, moisture and NH₄⁺-N concentration on nitrification and nitrification-induced N₂O emission[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18 (1):1–6.
- [41] 杨涵越, 张婷, 黄永梅, 等. 模拟氮沉降对内蒙古克氏针茅草原N₂O排放的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5):1900–1907.
YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, et al. Effect of stimulated N deposition on N₂O emission from a *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia, China[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1900–1907.
- [42] Jiang C M, Yu G R, Fang H J, et al. Short-term effect increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44(24):2920–2926.
- [43] 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (9):1783–1790.
LIU Xiao-yu, LI Zhi-peng, PAN Gen-xing, et al. Greenhouse gas emission and C intensity for a long-term fertilization rice paddy in Tai Lake region, China[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(9):1783–1790.
- [44] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 等. 大气氮沉降对森林土壤甲烷吸收和氧化亚氮排放的影响及其微生物学机制[J]. 生态学报, 2014, 34(17): 4799–4806.
FANG Hua-jun, CHENG Shu-lan, YU Gui-rui, et al. Microbial mechanisms responsible for the effects of atmospheric nitrogen deposition on methane uptake and nitrous oxide emission in forest soils: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17):4799–4806.
- [45] Mosier A R, Halvorsen A D, Reule C A, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in Northeastern Colorado[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35 (4):1584–1598.
- [46] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-years field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6):2196–2210.
- [47] Li C S, Salas W, DeAngelo B, et al. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4):1554–1565.