

张世航,岳平,陈玉森,等.反硝化-分解模型在荒漠土壤 CH_4 和 N_2O 通量估计中的应用[J].中国沙漠,2023,43(3):220-229.

反硝化-分解模型在荒漠土壤 CH_4 和 N_2O 通量估计中的应用

张世航^{1a,2},岳平³,陈玉森^{1b,2},郭浩^{1a,2},陆永兴^{1a,2},郭星^{1a,2},
刘朝红^{1a,4},刘学军⁵,周晓兵^{1a},张元明^{1a}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所 a.荒漠与绿洲生态国家重点实验室, b.荒漠-绿洲生态建设工程技术研究中心,新疆 乌鲁木齐 830011; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院 乌拉特荒漠草原研究站/奈曼沙漠化研究站/寒区旱区逆境生理与生态重点实验室,甘肃 兰州 730000; 4.新疆农业大学 资源与环境学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 5.中国农业大学 资源与环境学院,北京 100193)

摘要: 甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)等温室气体通量具有高度时空变化特点,通过野外站点直接测量耗时且费力。为弥补监测方面不足,解析变化环境下反硝化-分解模型(DNDC)模拟值和样地原位观测值之间的对应关系,探讨模型在温室气体预测方面的潜力具有意义。本文选择古尔班通古特沙漠,对氮沉降影响下荒漠土壤 CH_4 和 N_2O 通量进行了模拟估计,并与实测数据进行了对比分析。结果表明:DNDC模型可较好地模拟荒漠土壤 N_2O 通量的变化,模拟值与实测值显著相关($P<0.001$);而模型对荒漠土壤 CH_4 吸收量的变化模拟效果不显著,但模拟的年累计吸收量与真实值较为符合。DNDC模型敏感性试验分析表明,随着年平均气温、土壤有机碳(SOC)含量和施氮量的增加,土壤 N_2O 排放量和 CH_4 的吸收量显著增加;年降水量对土壤 N_2O 和 CH_4 通量变化影响不显著;土壤容重与土壤 N_2O 排放量和 CH_4 吸收量显著负相关;土壤质地对两种温室气体排放的影响显著,其中砂壤土影响最大。多元回归分析表明温度是荒漠土壤 N_2O 和 CH_4 的通量变化最重要影响因素。因此,在全球变化背景下,尽管模型目前运用于荒漠区还存在一些问题,但在将来荒漠区温室气体通量的变化估算方面仍具有很强的应用价值。

关键词: DNDC模型; 古尔班通古特沙漠; 温室气体; N_2O 排放; CH_4 吸收

文章编号: 1000-694X(2023)03-220-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00131

中图分类号: S153.1

文献标识码: A

0 引言

全球变暖已成事实,政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告(AR6)指出,将升温限制在 1.5°C 左右需要全球温室气体(GHGs)排放在2025年前达到峰值^[1]。因此,温室气体浓度增加而导致的全球变暖是世界性的环境问题,温室气体的排放动态与驱动机制也成为全球变化重要的研究内容。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是重要的温室气体,在100年内,它们的全球增温潜势(GWP)分别是 CO_2 的25倍和298倍^[2]。 CH_4 具有较强的化学活性,能参与对流层中许多重要的大气化

学过程,而 N_2O 不仅参与大气中的光化学反应,还会间接破坏平流层中的臭氧层^[3]。因此,在全球变化的大背景下,研究 CH_4 和 N_2O 等温室气体的通量变化及其影响因素具有重要的现实意义。

陆地生态系统是 CH_4 和 N_2O 等温室气体的主要来源和重要的汇^[4-5]。荒漠是陆地生态系统重要的组成部分,约占陆地总面积的18.5%^[6],荒漠生态系统中温室气体的土壤-大气交换可能对大气的组成以及全球气候变化具有重要意义。荒漠土壤作为温室气体的净汇^[7],受降水模式和氮沉降等环境条件的显著影响^[8],研究不同环境条件下温室气体排放特征并进行大时空尺度估算尤为重要。由于 CH_4

收稿日期:2022-08-26; 改回日期:2022-11-01

资助项目:新疆杰出青年科学基金项目(2021D01E03);国家自然科学基金项目(U2003214,41977099)

作者简介:张世航(1997—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事干旱区养分储量估算研究。E-mail: zhangshihang20@mails.ucas.ac.cn

通信作者:周晓兵(E-mail: zhoubx@ms.xjb.ac.cn)

和N₂O等温室气体通量具有高度时空变化特点,通过站点直接测量耗时且费力,采用校准良好的温室气体排放模型来模拟多种不同实验处理条件下温室气体通量情况,可弥补实验观测的不足^[9]。

目前,生物地球化学模型中的反硝化-分解模型(Denitrification-Decomposition, DNDC)是广泛用于温室气体模拟的通用模型^[9-12]。DNDC模型的最初建立是为了模拟美国农业土壤N₂O的排放^[13]。经过不断的发展, DNDC模型的科学结构与时俱进,模块功能得到不断拓展,且在世界许多不同生态系统得到广泛验证与应用^[9,14-17]。继农田后, DNDC已经被用于森林生态系统的土壤碳汇和微量气体排放模拟^[18],以及草原生态系统温室气体和氮储量的模拟^[10,15]。近年来, DNDC模型逐渐被用于模拟高寒生态系统中积雪、土温以及温室气体(N₂O、CO₂)通量动态变化^[17,19]。虽然DNDC模型能模拟多种生态系统温室气体通量,且在国内外许多地区得到了应用与验证^[9-12],但目前其对于荒漠生态系统的适用性却鲜有报道。

本文旨在对DNDC模型在荒漠生态系统中的温室气体(CH₄和N₂O)应用进行验证,为推动DNDC模型在荒漠生态系统的应用和碳氮循环研究提供参考。同时,利用实测的环境数据和CH₄、N₂O的通量变化数据,探究其变化的主要影响因素。研究将对全球变化背景下温室气体的动态预估具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于古尔班通古特沙漠南缘(43°55′—44°26′N, 84°31′—90°00′E, 海拔436.8 m), 该沙漠是中国最大的固定、半固定沙漠, 面积为4.88万km²。沙漠年潜在蒸发量大于2000 mm, 而年降水量普遍不超过150 mm^[20]。古尔班通古特沙漠属于典型的内陆干旱气候, 南缘有较丰富的地下水分布^[21]。该沙漠沙丘表面植被覆盖度15%~50%, 白梭梭(*Haloxylon persicum*)、梭梭(*H. ammodendron*)、蛇麻黄(*Ephedra distachya*)、沙拐枣(*Calligonum leucocladum*)、沙蒿(*Artemisia arenaria*)和白茎绢蒿(*Seriphidium terraealbae*)等沙生植物构成的小乔木、灌木、小半灌木群落广泛分布^[22]。

1.2 试验设计与分析方法

观测数据来自于古尔班通古特沙漠一项模拟氮沉降试验结果。试验于2014年9月至2015年8月进行, 氮添加率(以N计)为0 kg·hm⁻²·a⁻¹(N0)、30 kg·hm⁻²·a⁻¹(N30)和60 kg·hm⁻²·a⁻¹(N60)。每个处理设4个小区, 每个小区10 m×10 m, 有5 m宽的缓冲区; 共12个小样地。氮沉降模拟试验主要在春季短命植物生长季开始, 分8次添加, 即从每年4月初开始, 每周模拟1次, 5月底结束。将NH₄NO₃溶于500 mL水中, 均匀地将其喷入样方中, 对照则喷入等量的水^[23]。

采用静态箱-气相色谱方法测定土壤温室气体的通量。每个样方中设置一个静态箱, 将采样箱体密闭好后, 利用容积50 mL气体采样袋, 分别在0、10、20、30 min时采集气体样品, 通过气相色谱仪进行分析测定。在10月1日至次年5月31日, 采样时间为每天12:00—14:00, 在6月1日至9月30日, 每天10:00—12:00采集^[23]。不同季节采样时间的变化主要考虑了夏季和秋、冬、春季温室气体日通量代表性时段的变化(夏季上午10:00—12:00具有代表性; 而其他季节则是12:00—14:00更具代表性)^[23]。

1.3 土壤理化性质的监测

在试验前测定了土壤有机碳(SOC)、土壤质地和植被组成。

利用环刀-烘干法研究测定了土壤容重。用去离子水按照水土比1:5混匀后, 利用pH计(Seven Easy, Mettler-Toledo, 荷兰)测定土壤pH。

研究区每日最高气温、日最低气温和降水量的数据来自WheatA小麦芽(4.9版)一农业气象大数据(<http://www.wheata.cn/>)。

1.4 DNDC模型

DNDC模型是基于过程的生态系统模型, 包括两个部分。第一部分模拟土壤环境条件(温度、水分、pH、氧化还原电位和物质浓度), 由土壤与气候、植物生长和有机质分解3个子模型组成。第二部分包含硝化、反硝化和发酵3个子模型, 用于模拟土壤环境对微生物活性的影响。通过这6个子模型, DNDC模型可以模拟碳和氮库的变化以及CO₂、CH₄、N₂O通量^[24-25]。有两种模式可以应用此模型, 一是可以使用它在所谓的“点模式”中对小区域进

行建模,二是气体通量模拟以“区域模式”在更大的区域运行。这两种模式的主要区别在于区域模式下的DNDC需要输入较少类型的参数。

为了控制DNDC的不确定性,Li等^[26]提出了最敏感因子(MSF)方法。该方法对每个模拟单元运行两次DNDC模型,取模拟单元中常见的最敏感土壤因子的最大值和最小值。模拟的两个值形成了一个范围,该范围足够宽以包括来自模拟单元的高概率的“真实”值。采用本研究样地实测的参数输入DNDC模型进行模型验证,即把样地观测到的日温度、日降水量、每次施肥量和每次施肥的具体日期等参数输入DNDC模型中,然后将模型的模拟结果与样地实测结果进行比较。敏感性分析是在保持其他影响因子不变的情况下,在一定范围内变动其中一个影响因子的数值输入DNDC模型,模拟输出值的变化规律。在灵敏度检验中采用的基准情景为当地的气候条件和不同施氮水平(表1),设置了不同气候条件、土壤环境状况和管理措施等影响因子,模拟温室气体CH₄和N₂O的排放,从而确定不同因子对CH₄和N₂O的增温潜力的影响^[27]。

表1 驱动因子参数值变化的敏感性测试
Table 1 Sensitivity tests for changes in driving factor parameter values

参数	基准	检验范围
年平均气温/°C	6.6	±(1~3)
年降水量/mm	120	±(10%~30%)
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.4	0.8、1.0、1.2、1.2、1.4、1.6、1.8
土壤有机碳含量/%	1.5	0.5、1.0、1.5、2.0、3.0
土壤pH	8.2	6.2、7.2、8.2、9.2、10.2
土壤质地	砂土	砂土、砂壤土、砂质黏土、粉砂黏土、砂黏土
N施用量/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	0	0、30、60、90

1.5 数据分析

运用Origin 2021绘制折线图 and 条形图;运用DNDC 9.5对土壤N₂O和CH₄通量进行模拟;运用SPSS 22计算模拟结果与观测值的相关性,模拟效果较好,用P值表示;运用R4.1.1中“readx1”和“ggthemes”包^[28],使用多元回归模型评估变量的重要性以及绘制相关图形。

2 结果

2.1 DNDC模型对荒漠土壤N₂O排放的模拟状况

图1显示2014—2015年不同施氮水平下荒漠土壤N₂O的排放情况。N60处理下气体的排放量显著高于其他施肥水平处理下气体排放量,空白对照处理N0排放量最小。每种处理的变化趋势和波动情况大致相同,DNDC模拟数值大部分在样地观测值的误差范围内,12月至次年2月N₂O排放量较低,而6—8月N₂O排放较高。随着施氮量的增加,土壤N₂O的排放也明显增加。DNDC模型较好地模拟了N₂O排放峰值的动态变化,与实测结果一致。

表2显示了不同处理的N₂O年累积排放量用DNDC模型进行验证。在N0、N30和N60处理中,DNDC模拟的N₂O年累积排放量分别为0.13、0.16、0.29 kg·hm⁻²,实地观测结果分别为0.12±0.05、0.13±0.04、0.26±0.06 kg·hm⁻²,模拟值与观测值的相对偏差分别为11.3%、9.7%、15.3%。

2.2 DNDC模型对荒漠土壤CH₄排放的模拟状况

图2显示了2014—2015年不同施氮水平下荒漠土壤CH₄的排放情况。N30和N60处理下气体的吸收量显著高于N0水平处理下气体吸收量。不同处理之间,CH₄吸收量的波动幅度和变化趋势大致相同,其中2—4月CH₄吸收较小,而在8—9月CH₄吸收达到最大。随着施氮量的增加,实测数据中土壤CH₄的吸收先增加后降低,而DNDC模拟CH₄排放一直增加,这与实测数据不一致。

表2显示了不同处理的CH₄年累积排放量用DNDC模型进行验证。在N0、N30和N60处理中DNDC模拟的CH₄年累积排放量分别为-0.74、-0.92、-1.11 kg·hm⁻²,实地观测结果分别为-0.91±0.14、-1.44±0.22、-1.32±0.13 kg·hm⁻²,模拟值与观测值的相对偏差分别为21.4%、37.5%、19.8%。

2.3 DNDC模型敏感性试验分析

对表1中的环境因子及施氮量的不同变化情景进行灵敏度检测(图3)。

随着年均气温、土壤SOC含量和施氮量的增加,土壤N₂O排放量明显增加,而CH₄的吸收量也显著增加。随着年降水的增加,土壤N₂O排放量和CH₄吸收量变化并不明显。

随着土壤容重的增加,土壤N₂O排放量和CH₄

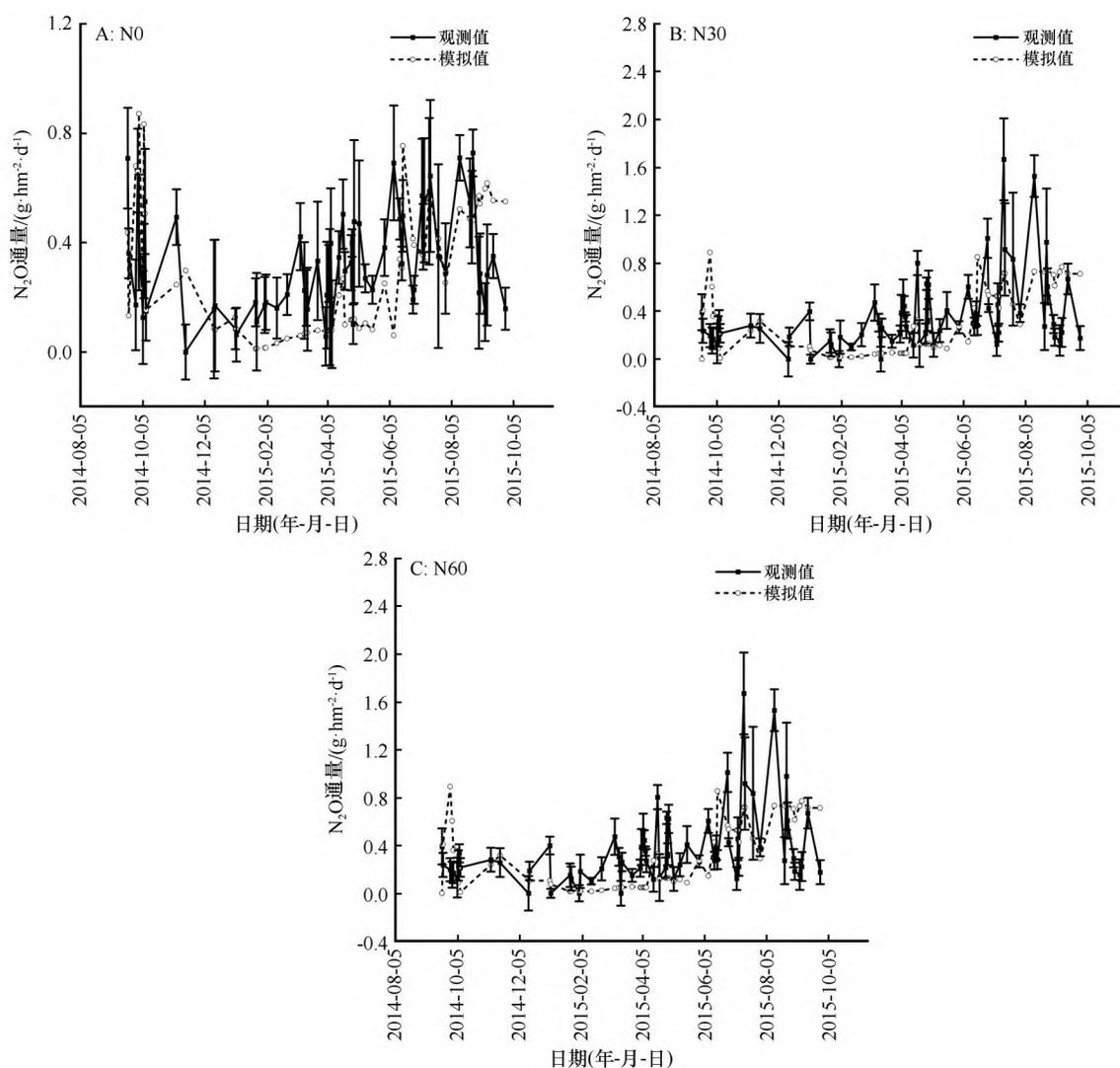


图1 2014—2015年N₂O通量模拟值与实测值对比

Fig. 1 Simulated versus measured N₂O fluxes in 2014–2015

表2 不同施N条件下观测和模拟的CH₄和N₂O年累积排放量

Table 2 Cumulative annual fluxes of N₂O and CH₄ observed and simulated under different N application rates

处理	N ₂ O			CH ₄		
	样地观测值 /(kg·hm ⁻²)	模型模拟值 /(kg·hm ⁻²)	相对偏差 /%	样地观测值 /(kg·hm ⁻²)	模型模拟值 /(kg·hm ⁻²)	相对偏差 /%
N0	0.12±0.05	0.13	11.3	-0.91±0.14	-0.74	21.4
N30	0.13±0.04	0.16	9.7	-1.44±0.22	-0.92	37.5
N60	0.26±0.06	0.29	15.3	-1.32±0.13	-1.11	19.8

吸收量下降。

土壤N₂O排放量随着pH的增加而增加,CH₄的吸收量随着土壤pH的变化并不明显。

不同质地土壤对温室气体排放的影响显著,不论是N₂O的吸收量还是CH₄的排放量,粉砂壤土最小,而砂壤土最大。

2.4 荒漠土壤N₂O和CH₄排放的影响因素

经过多元回归模型比较和平均(图4),模型分别解释了荒漠土壤N₂O和CH₄变化的17%和32%。在N₂O的模型中,日最高气温(负面影响)、日平均气温(正面影响)和日最低气温(正面影响)解释了N₂O的最大变化。大气压强对N₂O变化的影响显著但影

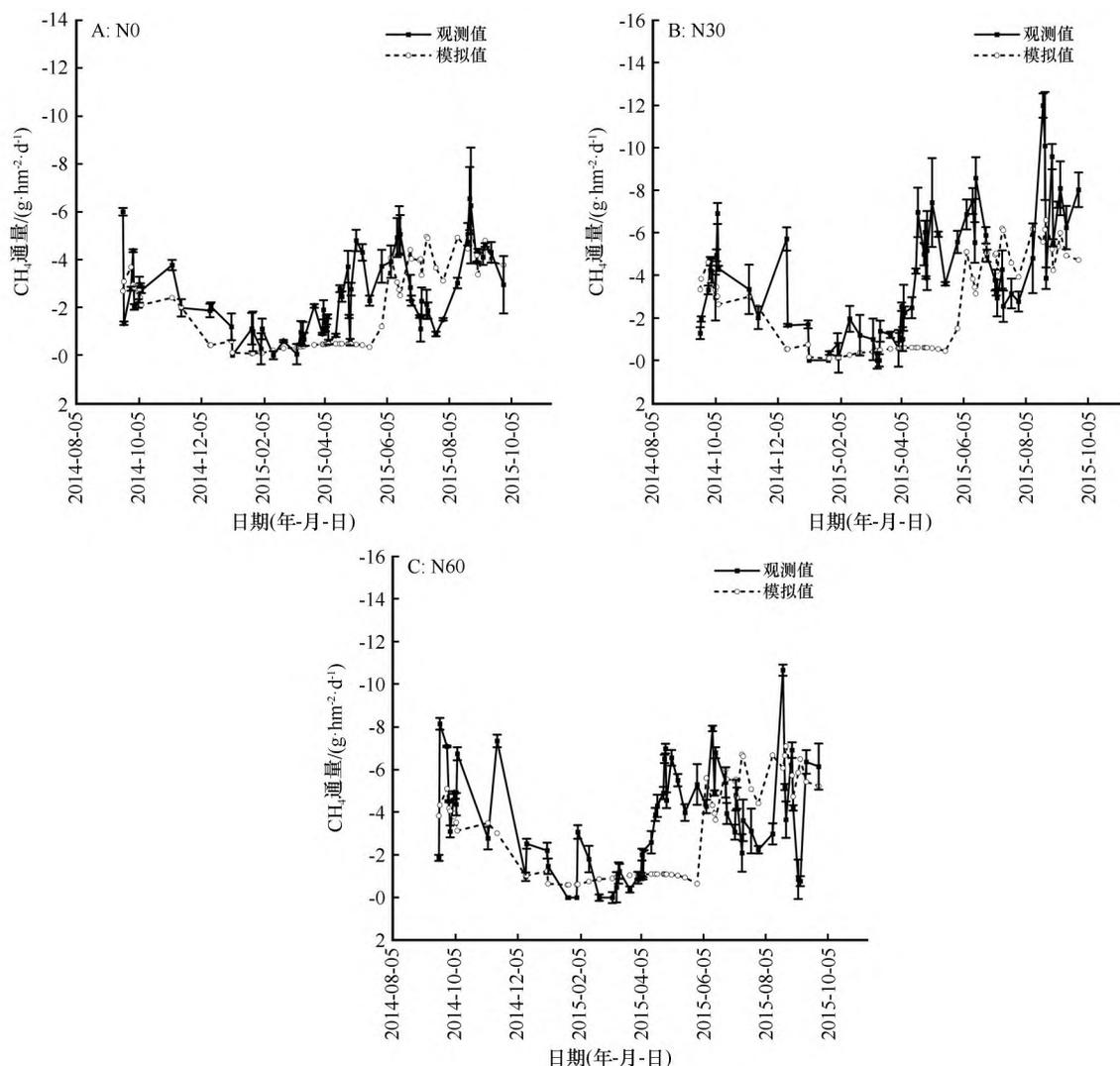


图2 2014—2015年 CH_4 通量模拟值与实测值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured CH_4 fluxes in 2014–2015

响较小,其他变量对 N_2O 的变化影响均不显著。在 CH_4 的模型中,日最高气温(正面影响)、日平均气温(负面影响)和日最低气温(负面影响)解释了 CH_4 的最大变化。其他变量对 CH_4 的变化影响均不显著。

3 讨论

3.1 DNDC模型模拟温带荒漠土壤 N_2O 和 CH_4 通量的适用性

DNDC模型最早用于农田土壤温室气体通量和作物产量的模拟^[29–31],随着DNDC模型的发展,最近被广泛用于模拟森林和草原土壤温室气体和土壤氮储量^[10,16,18],但DNDC模型在温带荒漠生态系统的应用鲜有报道。本研究发现,利用不同施氮条件下温带荒漠土壤 N_2O 和 CH_4 通量数据来验证

DNDC模型的适用性, DNDC较好地模拟了 N_2O 的排放动态。同时,随着施氮量的增加,土壤 N_2O 排放明显增加。大多研究表明,随着氮沉降增加,进入陆地生态系统的氮量也呈增加趋势,导致含氮气体的排放(例如 N_2O)持续升高^[32–33]。施氮显著增加了土壤 N_2O 排放通量,主要是因为氮添加增加了硝化和反硝化过程所需的底物进而增加了 N_2O 产生^[33]。本研究中 N_2O 的排放量随施氮量的增加而增加,可能由于硝化作用引起。荒漠土壤水分含量低,为土壤硝化作用创造了条件。本试验中土壤铵态氮的含量显著低于土壤硝态氮的含量,同样说明硝化作用占主导^[23]。DNDC估算的年累积排放量与样地实际观测结果较为吻合,更进一步说明DNDC在沙漠土壤 N_2O 通量估算中适用性高。

随着施氮量的增加,实测数据中土壤 CH_4 的吸

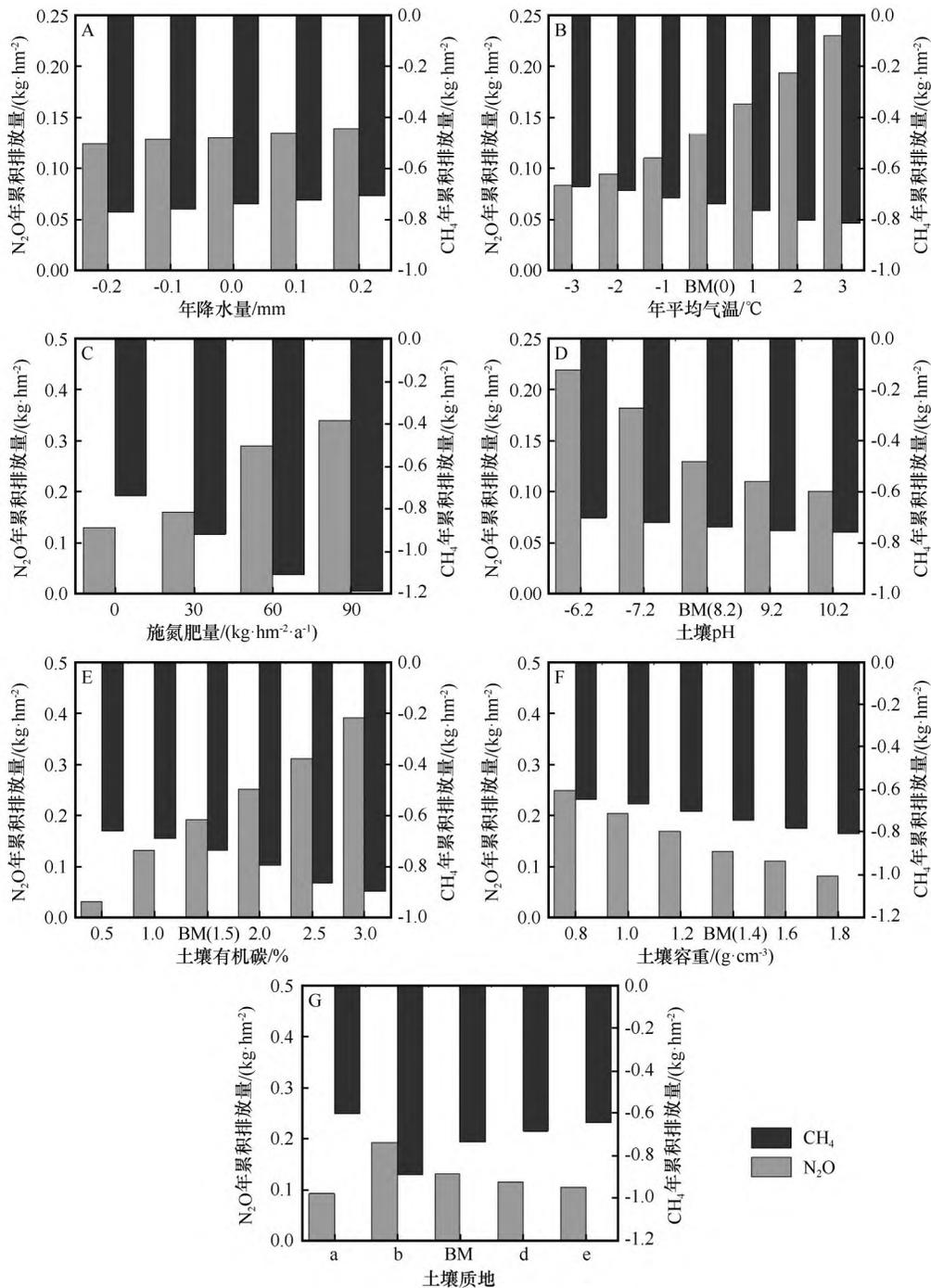
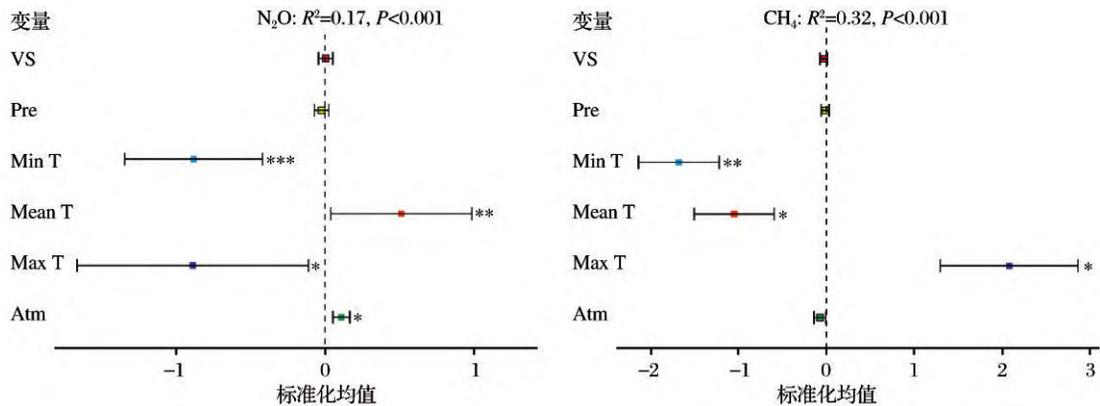


图3 不同环境因子和施氮量对CH₄和N₂O年累积排放量影响的灵敏度检验

Fig.3 Sensitivity test of the effects of different environmental factors and N application rates on the changes in N₂O and CH₄ fluxes

收先增加后降低,而DNDC模拟CH₄吸收一直增加,这与实测数据不一致。CH₄模拟效果不理想,可能是因为DNDC模型模拟过程中,其他的环境因子限制了CH₄吸收量的变化所致。有观测数据表明,施氮倾向于抑制土壤CH₄吸收而促进N₂O排放^[34-35],与本试验中观测数据先增加后减少的结果不一致。荒漠生态系统环境条件变化比较大,昼夜温差、年

均温差、不同季节的降水也具有较大差异^[36]。由于环境条件变化较大,目前DNDC模型在模拟荒漠土壤CH₄通量变化可能还存在一些不足。未来应进一步改进DNDC模型中对荒漠土壤碳源/汇的模拟模块,使模型更加精准并具有更广的适用性,以期为其他地区荒漠生态系统的研究提供重要的理论依据与案例。



VS: 风速; Pre: 日降水量; Min T: 日最低气温; Mean T: 日平均气温; Max T: 日最高气温; Atm: 大气压强

图4 N₂O和CH₄对所有测量变量的选择过程后的多元回归结果

Fig.4 Multiple regression results of N₂O and CH₄ for all measured variables after the selection process

综上所述,目前DNDC模型完全可以运用于温带荒漠土壤N₂O通量的模拟,对于CH₄模拟需要进一步加强参数选择和校正,或者开发新的模块,促进模型模拟的结果更为精确。

3.2 DNDC模型敏感性试验

在环境因子中,N₂O的排放量和CH₄的吸收量随着年平均气温的增加而显著增加。大量研究表明N₂O排放量与温度之间呈显著正相关关系^[37-38],与本研究DNDC模拟结果一致。温度的升高可能增加了土壤硝化和反硝化细菌的数量和活性,从而使土壤硝化作用和反硝化作用增强,N₂O等温室气体排放增加^[39]。温度对CH₄氧化影响很大,因为绝大多数甲烷氧化菌是中温型微生物,因而土壤吸收(氧化)CH₄的能力与温度密切相关,过高或过低的温度条件都会抑制CH₄氧化^[40]。本研究中,DNDC模拟CH₄吸收量随温度的增加而增加趋势不显著,可能是因为本研究中设置的温度增加量还未达到抑制甲烷氧化菌的阈值。本研究进一步提升了输入DNDC的模拟温度,发现当温度继续增加达到35℃时,DNDC模拟的CH₄吸收量开始下降。由此猜测土壤甲烷氧化菌的活动最适温度为35℃左右。大多数产甲烷菌的活动最适温度为35~37℃,在田间条件受到严格控制且温度低于最适温度时,产甲烷菌的活性随土壤温度升高而提高^[41],这与本研究结果一致。本研究中,模拟年降水量的变化对N₂O和CH₄通量变化的影响较小,可能是因为荒漠区降水的天数及降水量较小(大多数日降水量为0),模拟降水百分比的增大或减小,土壤N₂O和CH₄通量没有显著改变,因此模拟降水量的变化对N₂O和CH₄通量的影响

不大。

CH₄的吸收量随土壤SOC含量增加而增加^[42],这与本研究DNDC模拟结果一致。可能是由于较高的SOC使土壤中有更多的可溶性SOC和无机氮,从而增加了甲烷氧化菌的底物和数量^[43],因此土壤吸收更多的CH₄供甲烷氧化菌使用。同样,本研究表明土壤N₂O的排放量随着土壤SOC含量增加而增加。可能是由于:①SOC含量高的土壤反硝化作用强烈,排放出较多的N₂O^[44];②SOC含量高的土壤不仅容易提供碳源,还可能造成局部厌氧环境从而使反硝化反应剧烈释放出较多的N₂O^[45]。

土壤pH是影响N₂O的主要因素^[46-48],土壤N₂O的排放量随pH的增加而显著降低,这与本研究模拟结果一致。首先低pH加速了NH₄OH的质子化从而减缓了氧化分解速率^[49];其次,土壤pH通过影响反硝化酶活性,尤其是N₂O还原酶的活性来调控N₂O的排放^[50];再次,低pH也会降低土壤矿质氮和SOC的可利用性进而影响反硝化作用过程的进行,从而影响土壤N₂O的排放^[51]。然而,pH变化对CH₄吸收影响不明显,相关原因需要进一步研究。

本试验中,不论是土壤中N₂O的排放量还是CH₄的吸收量均随着土壤容重增加而降低。容重是土壤重要的物理性质,可以反映土壤的孔隙状况、松紧程度等^[52]。土壤容重主要通过影响土壤的通透性和水分扩散速率来影响土壤N₂O排放量。土壤容重降低,提高了土壤通气性和氧气含量,减少厌氧细菌的数量,从而抑制反硝化作用,减少N₂O的排放^[53-55]。不同土壤质地N₂O和CH₄的通量明显不同,可能主要因为不同的土壤质地中,土壤容重存在一定差异。

3.3 温度对荒漠土壤N₂O和CH₄的通量变化具有重要意义

通过统计模型,分析荒漠土壤N₂O和CH₄的通量变化的影响因素,同样发现温度是土壤N₂O和CH₄通量变化的最重要因素。日最低气温和日平均气温均与N₂O排放表现为显著正相关,而日最高气温与N₂O排放却表现为显著负相关。15~35℃为硝化作用微生物活动的适宜温度范围,土壤温度<5℃或>40℃均抑制硝化作用发生^[55]。因此,温度过高或过低均会抑制硝化细菌的活性,从而减少N₂O的排放量,这与本研究结果一致。

日最低气温和日平均气温均与N₂O排放表现为显著负相关,而日最高气温与CH₄排放却表现为显著正相关。吴方涛等^[56]研究表明,温度和CH₄通量呈线性正相关,这与本研究结果一致。大多数甲烷氧化菌的活动最适温度为35~37℃,在田间条件受到严格控制且温度低于最适温度时,产甲烷菌的活性随土壤温度升高而提高^[57]。因此,当温度达到日最高气温时,将更有利于大多数甲烷氧化菌的活动,从而增加CH₄的吸收量。

4 结论

本文通过DNDC模型探究了在不同施氮水平下古尔班通古特荒漠荒漠土壤CH₄和N₂O通量变化。研究表明DNDC模型较好地模拟了荒漠土壤N₂O排放量的变化,模拟值与实测值也较为接近;而对荒漠土壤CH₄吸收量的变化模拟效果一般,但模拟的年累计吸收量与真实值较为吻合。DNDC模型敏感性试验分析得出,年平均气温、土壤SOC含量和施氮量的增加促进土壤N₂O排放量和CH₄的吸收量增加,但年降水作用不显著;随着土壤容重的增加,土壤N₂O排放量和CH₄吸收量明显下降;不同质地土壤对温室气体排放的影响显著。通过统计分析发现,温度是土壤N₂O和CH₄通量变化的最重要因素。虽然模型目前运用于荒漠区还存在一些问题,但在将来荒漠区温室气体通量的变化估算方面仍具有很强的应用价值。在全球变暖的大背景下,可以利用DNDC模型进一步探究温度增加的条件下荒漠土壤温室气体排放或吸收的能力。

参考文献:

[1] IPCC. Global Warming of 1.5 °C: Summary for Policymakers.

Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization [R]. Korea, 2018.

- [2] Tian H Q, Chen G S, Lu C Q, et al. Global methane and nitrous oxide emissions from terrestrial ecosystems due to multiple environmental changes [J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(1): 1–20.
- [3] Degelmann D M, Borken W, Kolb S. Methane oxidation kinetics differ in European beech and Norway spruce soils [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(4): 499–506.
- [4] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, et al. Soils, a sink for N₂O? A review [J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1–17.
- [5] Liang M W, Chen J Q, Smith N G, et al. Changes and regulations of net ecosystem CO₂ exchange across temporal scales in the Alxa Desert [J]. *Journal of Arid Environments*, 2019, 164: 78–84.
- [6] 张元明,王雪芹.准噶尔荒漠生物结皮研究[M].北京:科学出版社,2008.
- [7] Zhuang Q M, Chen K, Xu J, et al. Response of global soil consumption of atmospheric methane to changes in atmospheric climate and nitrogen deposition [J]. *Global Biogeochemical & Cycles*, 2013, 27(3): 650–663.
- [8] Huang G, Li Y, Su Y G, et al. Effects of increasing precipitation on soil microbial community composition and soil respiration in a temperate desert, northwestern China [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2015, 83: 52–56.
- [9] Giltrap D L, Li C S, Sagar S. DNDC: a process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3): 292–300.
- [10] Levy P E, Mobbs D C, Jones S K, et al. Simulation of fluxes of greenhouse gases from European grasslands using the DNDC model [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2007, 121(1): 186–192.
- [11] Grosz B, Horvath L, Gyongyosi A Z, et al. Use of WRF result as meteorological input to DNDC model for greenhouse gas flux simulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 122: 230–235.
- [12] Tripathi R, Majhi M, Sahu S G, et al. Modelling the spatial variation of methane and nitrous oxide Emission from rice fields using DNDC model [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2021, 49(12): 2919–2931.
- [13] United States Environmental Protection Agency. Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks, 1990–1994 [M]. Washington DC, USA: Office of Policy, Planning, and Evaluation, United States Environmental Protection Agency, 1995.
- [14] Li H, Wang L G, Li J Z, et al. The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 348: 1–13.
- [15] Li C H, Aber J, Stange F, et al. A process-oriented model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. model development [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, 105(D4): 4369–4384.
- [16] Li R H, Li X B, Li G O, et al. Simulation of soil nitrogen storage of the typical steppe with the DNDC model: a case study in Inner Mongolia, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 155–164.

- [17] Cui G T, Wang J Y. Improving the DNDC biogeochemistry model to simulate soil temperature and emissions of nitrous oxide and carbon dioxide in cold regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 61–70.
- [18] Kiese R, Li C S, Hilbert D W, et al. Regional application of PnET-N-DNDC for estimating the N₂O source strength of tropical rainforests in the wet tropics of Australia[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(1): 128–144.
- [19] 刘放, 吴明辉, 杨梅学, 等. DNDC 模型的研究进展及其在高寒生态系统的应用展望[J]. *冰川冻土*, 2019, 42(4): 1321–1333.
- [20] Qian Y B, Wu Z N, Zhao R F, et al. Vegetation patterns and species environment relationships in the Gurbantunggut Desert of China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2008, 18(4): 400–414.
- [21] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 等. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其稳定沙面的意义[J]. *地理学报*, 2003, 58(4): 598–605.
- [22] 陈志超, 李宁, 刘昌华. 古尔班通古特沙漠草方格沙障对土壤养分的影响[J]. *草业科学*, 2013, 30(5): 699–702.
- [23] 岳平. 温带沙质荒漠温室气体通量对水分、温度和氮沉降升高的响应[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [24] Li C S, Frolking S, Harriss R, et al. Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing [J]. *Climatic Change*, 2005, 72: 321–338.
- [25] Li C S, Salas W, Zhang R, et al. Manure-DNDC: a biogeochemical process model for quantifying greenhouse gas and ammonia emissions from livestock manure systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(2): 163–200.
- [26] Li C S, Mosier A, Wassmann R, et al. Modeling greenhouse gas emissions from rice-based production systems: sensitivity and upscaling [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: 1–9.
- [27] 张啸林, 潘晓健, 熊正琴, 等. 应用 DNDC 模型分析管理措施对稻麦轮作系统 CH₄ 和 N₂O 综合温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 690–696.
- [28] Ding Y, Zang R G. Determinants of aboveground biomass in forests across three climatic zones in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 482: 118805.
- [29] Ma Y C, Schwenke G, Sun L Y, et al. Modeling the impact of crop rotation with legume on nitrous oxide emissions from rain-fed agricultural systems in Australia under alternative future climate scenarios [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 1544–1552.
- [30] Wang J Y, Zhang X L, Liu Y L, et al. Modeling impacts of alternative practices on net global warming potential and greenhouse gas intensity from rice-wheat annual rotation in China [J]. *Plos One*, 2012, 7: 9.
- [31] Yadav D, Wang J Y. Modelling carbon dioxide emissions from agricultural soils in Canada [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 230: 1040–1049.
- [32] Zebarth B J, Senowdon E, Burton D L, et al. Controlled release fertilizer product effects on potato crop response and nitrous oxide emissions under rain-fed production on a medium-textured soil [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(5): 759–769.
- [33] 曹登超, 高霄鹏, 李磊, 等. 氮磷添加对昆仑山北坡高山草地 N₂O 排放的影响[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(2): 165–173.
- [34] Liu L L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: the CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission [J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(10): 1103–1117.
- [35] Rees R, Jones S, Thorman R E, et al. The effect of organic and mineral nitrogen fertilisers on emissions of NO, N₂O and CH₄ from cut grassland [M] // Hatch D J, Chadwick D R, Jarvis S C, et al. *Controlling Nitrogen Flows and Losses*, 2004: 268–276.
- [36] 陶冶, 刘耀斌, 张元明. 准噶尔荒漠区域尺度浅层土壤化学计量特征及其空间分布格局[J]. *草业学报*, 2016, 25(7): 13–23.
- [37] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 1–7.
- [38] 徐冰鑫, 胡宜刚, 张志山, 等. 模拟增温对荒漠生物土壤结皮-土壤系统 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量的影响[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 809–820.
- [39] Pajares S, Bohannan B J M. Ecology of nitrogen fixing, nitrifying, and denitrifying microorganisms in tropical forest soils [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 27: 1045.
- [40] Nesbit S P, Breitenbeck G A. A laboratory study of factors influencing methane uptake by soils [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1992, 41(1): 39–54.
- [41] Parashar D C, Gupata P K, Rai J, et al. Effect of soil temperature on methane emission from paddy field [J]. *Chemosphere*, 1993, 26: 247–250.
- [42] 赵江红, 焦燕, 徐柱, 等. 不同天然草地开垦年限下土壤特性对 CH₄ 吸收的影响[J]. *草地学报*, 2010, 18(2): 148–153.
- [43] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135: 24–33.
- [44] 续勇波, 蔡祖聪. 亚热带土壤氮素反硝化过程中 N₂O 的排放和还原[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(4): 731–737.
- [45] Drury C F, Yang X M, Reynolds W D, et al. Influence of crop rotation and aggregate size on carbon dioxide production and denitrification [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 87–100.
- [46] Stehfest E, Bouwman L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 207–228.
- [47] 韩琳, 王鸽, 王伟, 等. 全球森林土壤 N₂O 排放通量的影响因子[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(2): 446–452.
- [48] He Y H, Zhou X H, Jiang L L, et al. Effects of biochar application on soil greenhouse gas fluxes: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2017, 9(4): 743–755.
- [49] Zhu-Barker X, Cavazos A R, Ostrom N E, et al. The importance of abiotic reactions for nitrous oxide production [J]. *Biogeochemistry*, 2015, 126(3): 251–267.
- [50] Shaaban M, Peng Q, Lin S, et al. Nitrous oxide emission from two acidic soils as affected by dolomite application [J]. *Soil Re-*

- search, 2014, 52(8):841–848.
- [51] Baggs E M, Smales B C, Bateman E J. Changing pH shifts the microbial source as well as the magnitude of N₂O emission from soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(7):793–809.
- [52] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils[J]. *Geoderma*, 2011, 163(2):74–82.
- [53] 程效义, 刘晓琳, 孟军, 等. 生物炭对棕壤NH₃挥发, N₂O排放及氮肥利用效率的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(4):801–807.
- [54] Cavigelli M A, Robertson G P. Role of denitrifier diversity in rates of nitrous oxide consumption in a terrestrial ecosystem[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(3):297–310.
- [55] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. *生态环境*, 2007, 16(6):1781–1788.
- [56] 吴方涛, 曹生奎, 曹广超. 青海湖高寒湿地生态系统生长季CH₄通量[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5):1078–1085.
- [57] Wang Z P, Delaune R D, Masscheleyn P H, et al. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57:382–385.

Simulation of changes in CH₄ and N₂O fluxes in desert soils by the DNDC model

Zhang Shihang^{1a,2}, Yue Ping³, Chen Yusen^{1b,2}, Guo Hao^{1a,2}, Lu Yongxing^{1a,2}, Guo Xing^{1a,2},
Liu Chaohong^{1a,4}, Liu Xuejun⁵, Zhou Xiaobing^{1a}, Zhang Yuanming^{1a}

(1. a. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology / b. Engineering Technology Research Center for Desert-Oasis Ecological Construction, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Urat Desert-Grassland Research Station / Naiman Desertification Research Station / Key Laboratory of Stress Physiology and Ecology, Northwest Institute of Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 5. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Greenhouse gas (GHGs) fluxes such as methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) vary strongly with spatial and temporal changes in terrestrial ecosystems. It is time-consuming and laborious to directly measure GHGs in the field. The application of the DNDC (denitrification-decomposition) model on data of in-situ observations would be beneficial for the determination of GHGs dynamics, which would fill the monitoring gap. Potential of the DNDC model for GHGs prediction was explored in this study. Characteristics in CH₄ and N₂O fluxes were simulated and compared from soils under the effects of different concentrations of nitrogen addition in the Gurbantunggut Desert. The results showed that the DNDC model can simulate the changes in N₂O emissions from desert soils, with the simulated values significantly correlated with the measured values ($P < 0.001$). However, the simulated changes in CH₄ uptake in desert soils were not significant with measured values, although the simulated annual cumulative uptake was not significantly different. The sensitivity test analysis of the DNDC model showed that soil N₂O emissions and CH₄ uptake increased significantly with increasing mean annual temperature, soil organic carbon (SOC) content and nitrogen application. Annual precipitation had no significant effect on changes in soil N₂O and CH₄ fluxes, and soil bulk weight showed significant negative correlation with soil N₂O emissions and CH₄ uptake. Different textured soils had significant effects on the two GHG emissions, with sandy loam soils having the greatest effects. We found that temperature was the most important factor influencing the fluxes of N₂O and CH₄ in desert soils through multiple regression analysis. Under the background of global change, our results suggested that the DNDC model would have a strong application prospect in estimating the changes in greenhouse gas fluxes in desert areas in the future, although there are still some problems in the application of the model to desert areas.

Key words: DNDC model; Gurbantunggut Desert; greenhouse gas; N₂O emissions; CH₄ uptake