

气候变化下基于 DayCent 的旱地玉米农田温室气体排放通量模拟

闫 琪¹, 张淑鑫¹, 侯文姬¹, 王丽梅^{1,2*}, 张 耀³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 农业农村部西北植物营养与农业环境重点实验室, 杨凌 712100;
3. Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA)

摘 要: 气候变化通过大气 CO₂ 浓度、温度和降雨的改变, 直接或间接影响农田温室气体排放, 研究未来气候情景下农田温室气体排放对实现农业碳减排具有重要意义。为探究气候变化背景下农田温室气体排放特征, 该研究在长期田间定位试验基础上, 利用当前大气 CO₂ 浓度与 CO₂ 浓度升高条件下旱作玉米农田温室气体排放通量的田间观测数据, 采用“试错法”对 DayCent 模型进行校验, 并利用校验后的模型, 根据第六次国际耦合模式比较计划 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6, CMIP6) 气候情景数据, 预测未来 SSP126 (低排放水平) 与 SSP245 (中等排放水平) 气候情景下旱地玉米农田温室气体排放通量。结果表明, DayCent 模型对不同大气 CO₂ 浓度下 N₂O、CH₄ 和 CO₂ 排放通量的模拟值与观测值高度一致, 模拟效率 (modeling efficiency, EF) 分别为 0.58~0.87、0.45~0.65 和 0.25~0.62, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 分别为 0.83~1.33 g/(hm²·d)、0.67~0.82 g/(hm²·d) 和 0.58~0.80 g/(m²·d), 决定系数 (coefficient of determination, R²) 分别为 0.80~0.91、0.53~0.80 和 0.53~0.85。SSP126 和 SSP245 气候情景下, 在玉米单作种植模式下旱地农田 N₂O 和 CO₂ 年排放量均呈现上升趋势, 以 2001—2020 年农田温室气体排放通量为基准, 到 2060 年 N₂O 年排放量分别增加 22.8% 和 24.9%, CO₂ 年排放量分别增加 6.7% 和 8.0%; 旱地农田 CH₄ 年吸收量呈下降趋势, 两个气候情景下分别减少 13.6% 和 13.4%。未来气候情景下旱地农田仍是温室气体排放源, 优化氮肥管理和农田耕作措施对实现温室气体减排具有重要意义, 模拟结果可以为制定农业适应气候变化对策提供基础数据支持。

关键词: 模型; 气候变化; 农田; 玉米; CO₂ 浓度升高; 温室气体排放

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211007

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-11-0128-09

闫琪, 张淑鑫, 侯文姬, 等. 气候变化下基于 DayCent 的旱地玉米农田温室气体排放通量模拟[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 128-136. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211007 <http://www.tcsae.org>
YAN Qi, ZHANG Shuxin, HOU Wenji, et al. Modelling greenhouse gas emissions of maize farmland under climate change using DayCent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 128-136. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202211007 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

以大气 CO₂ 浓度升高、全球变暖为主的气候变化已成为各国共同关注的问题, 联合国政府间气候变化委员会 (International Panel on Climate Change, IPCC) 发布的第六次评估报告显示, 2010—2019 年间, 全球温室气体排放处于历史最高水平, 排放总量占 1850 年以来累计排放量的 42%^[1]。中国是碳排放大国, 到 2020 年大气 CO₂ 浓度已达到 410 μmol/mol, N₂O 和 CH₄ 浓度也分别达到 331 和 1858 nmol/mol^[2]。为应对日益严峻的气候问题, 实现 2060 年碳中和目标, 控制以 CO₂、N₂O 和 CH₄ 为主的农田温室气体 (Greenhouse Gases, GHGs) 排放成为亟待解决的问题。

农田生态系统是重要的温室气体排放源, CO₂、N₂O、CH₄ 排放量分别占到大气中温室气体总量的 5%~20%、80%~90%、15%~30%^[3]。农田土壤作为陆地生态系统碳氮循环过程中最活跃的组成部分, 其温室气体排放会对地区及全球尺度的碳氮循环产生影响, 因此研究旱地农田 CO₂、N₂O、CH₄ 排放在大 CO₂ 浓度升高条件下的响应, 对如何应对未来气候变化挑战尤为重要。目前研究气候变化对作物影响的方法主要集中在田间试验和模型模拟两个方面。此前田间试验研究结果表明, 大气 CO₂ 浓度升高会影响作物叶片气孔特征以及叶面积指数, 提高水分利用效率, 降低气孔导度和蒸腾速率^[4-6], 从而对作物光合与呼吸过程产生影响, 改变作物产量和根系生物量^[4,7], 进而影响根际碳沉积^[8], 同时会使土壤硝化潜势和反硝化潜势有不同程度的增加^[9], 促进土壤 N₂O 和 CO₂ 排放。在氮源充足的土壤中, CO₂ 浓度升高也会通过影响氮素形态刺激 N₂O 排放^[10]; CO₂ 浓度升高会降低土壤 CH₄ 氧化速率, 温度升高与大气 CO₂ 浓度升高的协同作用会降低土壤含水率, 改善土壤通气结构, 使旱地 CH₄ 吸收能力增强^[11]。未来大气 CO₂ 浓度升高伴随着温度和降雨改变, 共同影响着农田温室气体排放规律。

黄土高原是中国重要的玉米种植区, 该区域近几十

收稿日期: 2022-11-07 修订日期: 2023-05-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31470523), 陕西省重点研发计划项目 (2023-ZDLNY-57), 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2017JM3020)

作者简介: 闫琪, 研究方向为土壤-作物系统模型模拟。

Email: 18739995375@163.com

*通信作者: 王丽梅, 博士, 副教授, 研究方向为碳氮生物地球化学循环与模型模拟研究。Email: sdwanglimei@163.com

年间温度显著增加，降水少且分布不均，生态环境脆弱，易受气候变化影响^[12-13]，科学评估旱地农田在未来气候下的综合减排潜力，成为该生态脆弱区亟需解决的问题。利用田间观测数据校正的模型不仅能够捕捉到农田生态系统土壤-作物-大气间复杂的长期动态，而且可以模拟气候和田间管理措施对农田温室气体排放影响。本研究利用改进的开顶式气室（open top chamber, OTC）系统控制大气 CO₂ 浓度，收集旱地玉米农田温室气体观测数据，用于校验 DayCent 模型，并用校验的 DayCent 模型，根据第六次国际耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project phase 6, CMIP6）提供的共享社会经济路径（Shared Socioeconomic Pathways, SSPs）情景，模拟不同未来气候情景（SSP126 和 SSP245）2021—2060 年农田温室气体排放的变化趋势，探讨气候变化背景下农田温室气体减排措施，以期为实现农业碳中和提供科学依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验站点概况

试验站点布设在中国科学院长武农业生态试验站（35°12'N，107°40'E），位于陕西省长武县洪家镇王东村。该地区在黄土高原水土流失区，属暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候区，土壤属黏黑垆土地带，年均降水量为 584 mm，降雨主要集中在 7—10 月，年平均气温 10.17 °C。

田间定位试验开始于 2015 年，通过改进的 OTC 气室模拟大气 CO₂ 浓度^[14]，CO₂ 自动控制系统使 OTC 气室内 CO₂ 浓度保持在 700 μmol/mol。设置两种大气 CO₂ 浓度梯度：自然大气 CO₂ 浓度（400 μmol/mol）和大气 CO₂ 浓度升高（700 μmol/mol）。种植玉米品种为“郑单 958”，种植密度 7 株/m²，供试土壤 0~20 cm 基本理化性质：砂粒含量 20%、黏粒含量 19%、土壤容重 1.22 g/cm³、有机碳 7.25 g/kg、全氮 0.98 g/kg、田间持水量 0.22 cm³/cm³、凋萎系数 0.10 cm³/cm³、pH 值 7.9。每个处理设置 3 组重复。试验施用化肥尿素（含 N 46%）、过磷酸钙（含 P₂O₅ 12%）和硫酸钾（含 K₂O 45%），氮、磷、钾肥施入量分别为 22.5、4 和 8 g/m²，其中磷肥、钾肥和 40% 氮肥作为基肥在播种前均匀施撒，其余氮肥分别在喇叭口期和抽雄期施入。试验期间不进行灌溉。

试验数据 CO₂、N₂O、CH₄ 排放通量观测期为 2019 年 5 月—2020 年 10 月，主要农田管理措施列于表 1。N₂O、CH₄ 排放通量采用静态箱-气相色谱仪法（Agilent 7890A, USA）进行采集测定，CO₂ 排放数据测定使用土壤碳通量自动测量系统（LI-8100A, USA），并同步测定地下 5 cm 的温度和土壤含水率^[15]。采气频率为每 6 d 监测 1 次，氮肥施用后或降雨后从第 2 天开始每 1 或 2 d 采集监测 1 次，直至气体排放通量趋于稳定水平，随后恢复为日常监测的频率；采集时间为测定当天 9:00—11:30。

表 1 2019—2020 年玉米生长季田间管理措施时间
Table 1 Field management practices during maize growth period in 2019-2020

田间管理 Field management	项目 Item	2019 年	2020 年
玉米植株 Maize	种植	05-16	05-15
	收获	10-01	10-02
肥料施用 Fertilizer	基肥	05-16	05-15
	追肥	07-12	07-13
	追肥	08-09	07-30

1.2 DayCent 模型简介

DayCent 模型是以“日”为步长的 Century 模型^[16]，用来模拟土壤-植物-大气生态系统 C、N、P、S 元素动态变化，以及微量气体通量（CO₂、N₂O、NO_x、CH₄、N₂）。DayCent 模型包括土壤水分和土壤温度子模型、植物子模型、土壤有机质（soil organic matter, SOM）子模型和微量气体子模型，以“日”为步长来模拟植株生长，微量气体通量和土壤碳通量，以“半小时”为步长模拟土壤水分动态。DayCent 模型模拟土壤呼吸，包括以“日”为步长的自养呼吸和异养呼吸。SOM 分解和外部养分的添加提供 NO₃⁻、NH₄⁺、P 和 S 含量，可供植物和微生物生长，产生微量气体通量。NH₄⁺ 分布在土壤表层 15 cm 处，而 NO₃⁻ 分布在土壤剖面。硝化子模型模拟 N₂O 和 NO_x 排放，与土壤 NH₄⁺、含水率、温度、pH 值和质地有关。当土壤充水孔隙度（water-filled pore space, WFPS）过低时水分胁迫会限制硝化作用；过高时氧气含量会成为硝化作用的限制因子。反硝化子模型模拟 N₂O、N₂ 和 NO_x 排放，与土壤 NO₃⁻、水分含量、不稳定性碳含量以及土壤质地相关。反硝化过程是在土壤含水率超过 50%~60% 时发生，反硝化速率随着含水率增加呈指数增长，在土壤接近饱和时趋于稳定。CH₄ 吸收受土壤气体扩散率、含水率和温度控制，当土壤体积分含水率过高，CH₄ 氧化速率受气体扩散率限制；当土壤体积分含水率过低时，CH₄ 氧化速率受限于甲烷氧化菌活性^[17-19]。

DayCent 模型考虑了土壤类型、气候和耕作强度等因素，目前已被广泛用于模拟土地管理和气候变化的长期生态效应^[20]。DayCent 模型在国外已被广泛应用于模拟农田土壤温室气体排放通量等方面^[19-22]，预测农田温室气体排放对气候变化（温度、降雨、CO₂）的响应^[9,19-23]。在国内模型多应用于模拟森林、草地生态系统的碳循环动态，农田作物产量、地上部生物量、土壤有机质和全氮等方面^[23-25]，对温室气体排放模拟也有部分应用，CHENG 等^[26] 收集 350 个试验点数据对模型在中国农田的适用性进行评价，结果表明模型可以很好地模拟农田 N₂O 季节排放量。QIAN 等^[27] 使用 Daycent 模型准确预测农田 N₂O 日和年排放通量。

1.3 DayCent 模型模拟方法

DayCent 模型运行需要建立站点、气象以及田间管理措施等文件。1) 土壤数据：经纬度，土壤分层，有机碳含量，土壤容重，田间持水量，凋萎系数，pH 值等。2) 气象数据：1998—2020 年历史气象数据，来源于陕

西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站 (<http://cwa.cern.ac.cn>), 选取日最高温度 ($^{\circ}\text{C}$)、最低温度 ($^{\circ}\text{C}$)、降水量 (cm) 对 DayCent 模型中气象参数进行设定。未来气候情景数据, 使用 CIMP6 中 GFDL-ESM4 模型的 SSP126 和 SSP245 气候情景。其中, SSP126 代表可持续发展道路, 温室气体排放水平最低, 到 2100 年辐射强迫下降至 2.6 W/m^2 ; SSP245 代表世界遵循社会经济和技术发展的中间道路, 温室气体排放为中等水平, 到 2100 年辐射强迫稳定在 4.5 W/m^2 。3) 管理文件: 植被参数 (植被类型、植物生长最适温度、最高温度、木质素含量等); 耕作参数; 施肥参数; 收获参数等。4) 建立土壤碳库初始值: 为获得模拟地区稳定的土壤碳库初始值, 按 3 个时期代表该地区农业种植历史, 一是自然植被阶段模拟, 二是 1900 年开始小麦-玉米轮作模拟, 三是 1998 年玉米单作阶段, 调用以上参数文件运行模型, 使得输出土壤有机碳含量与试验布设前接近。利用模型 CO_2 浓度模拟模块, 设置自然大气 CO_2 浓度 ($400 \mu\text{mol/mol}$) 和 CO_2 浓度升高 ($700 \mu\text{mol/mol}$), 并对模型参数进行敏感性分析, 根据长武试验站 2019—2020 年温室气体 (N_2O 、 CH_4 和 CO_2) 不同 CO_2 浓度处理下的观测数据, 采用“试错法”对 DayCent 模型参数进行校验。最后使用校验的模型参数, 设置大气 CO_2 浓度以每年 0.5% 的增长速率, 模拟未来气候情景下旱地农田温室气体排放的变化趋势。

1.4 DayCent 模型模拟效果评价

本文评价 DayCent 模型模拟土壤温室气体排放通量的准确性采用 3 种指标。计算决定系数 (coefficient of determination, R^2) 对模拟值与观测值做回归相关分析, 均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评价模拟值与观测值的差异, 用模拟效率 (modeling efficiency, EF) 来评价模拟效果。EF 和 R^2 越接近于 1, RMSE 越接近于 0, 模拟的效果越好。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 进行数据整理, 用

Microsoft Office Excel 2010 和 Origin 2018 完成绘图。

2 结果与分析

2.1 DayCent 模型对温室气体排放模拟校验结果

2.1.1 DayCent 模型对 N_2O 排放通量模拟校验结果评价

利用 DayCent 模型对旱地农田 N_2O 排放通量进行模拟, 如图 1 所示。DayCent 模型能较好地模拟不同大气 CO_2 浓度处理下旱地农田 N_2O 排放通量。对模拟值与观测值进行分析, EF 为 0.58~0.87, RMSE 为 0.83~1.33 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, R^2 为 0.80~0.91 (表 2), 模型模拟评价参数效果均在较好范围内。总体而言, DayCent 模型能够捕捉到施肥和降雨后的农田 N_2O 释放峰, 且模型模拟的排放峰值出现时间均与观测值接近, N_2O 排放通量的模拟峰值为 6.09~9.48 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 观测值为 4.21~9.38 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$; 同时各个生育期 N_2O 排放变化规律也基本一致, N_2O 排放通量模拟值为 3.52~5.18 $\text{g}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 模拟值与观测值一致性良好。

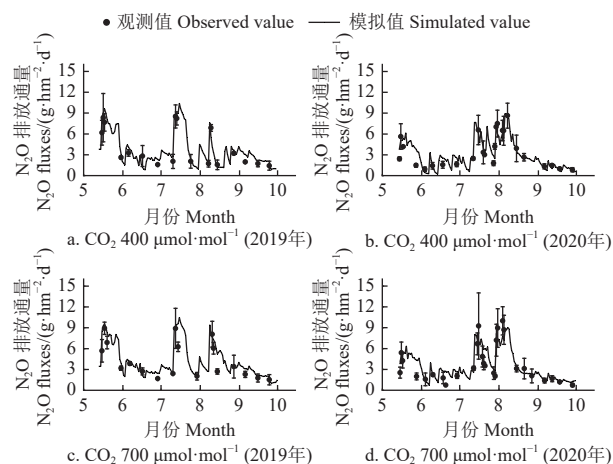


图 1 2019—2020 年玉米农田 N_2O 排放通量模拟值与观测值比较

Fig.1 Comparison between simulated and observed N_2O fluxes from maize farmland in 2019-2020

表 2 各处理下玉米农田温室气体排放通量的模型模拟效果

Table 2 Model performance for greenhouse gas emissions from maize farmland under different treatments

项目 Item	处理 Treatments	EF	RMSE	R^2
N_2O	CO_2 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2019 年)	0.58	1.03	0.91
	CO_2 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2020 年)	0.87	0.83	0.85
	CO_2 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2019 年)	0.72	1.33	0.87
	CO_2 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2020 年)	0.81	1.18	0.80
CH_4	CO_2 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2019 年)	0.65	0.67	0.73
	CO_2 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2020 年)	0.48	0.82	0.80
	CO_2 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2019 年)	0.45	0.69	0.53
	CO_2 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2020 年)	0.49	0.77	0.65
CO_2	CO_2 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2019 年)	0.30	0.70	0.53
	CO_2 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2020 年)	0.58	0.63	0.85
	CO_2 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2019 年)	0.62	0.58	0.69
	CO_2 700 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (2020 年)	0.25	0.80	0.59

注: EF 为模拟效率; RMSE 为均方根误差 (N_2O 、 CH_4 : $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; CO_2 : $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R^2 为决定系数。

Note: EF is modelling efficiency; RMSE is root mean square error (N_2O , CH_4 : $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; CO_2 : $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R^2 is coefficient of determination.

2.1.2 DayCent 模型对 CH₄ 排放通量模拟校验结果评价

旱地农田对 CH₄ 表现为弱汇。DayCent 模型对 2019—2020 年旱地农田 CH₄ 吸收通量的模型结果如图 2 所示, 模拟值与观测值的对比分析显示, EF 为 0.45~0.65, RMSE 为 0.67~0.82 g/(hm²·d), R² 为 0.53~0.80 (表 2), 模型模拟评价参数效果良好, 说明模拟值与实测值一致性较好。不同大气 CO₂ 浓度处理下 CH₄ 吸收通量在整个玉米生育期处于频繁的波动中, CH₄ 氧化通量模拟值为 5.15~5.71 g/(hm²·d), 观测值为 4.95~5.38 g/(hm²·d), 模型能够捕捉到 CH₄ 吸收动态, 并且模拟吸收峰值出现时间与观测时间的较为一致。

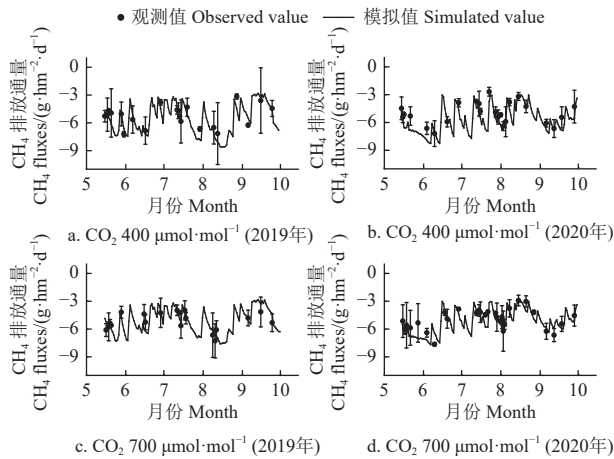


图 2 2019—2020 年玉米农田 CH₄ 排放通量模拟值与观测值比较

Fig.2 Comparison between simulated and observed CH₄ fluxes from maize farmland in 2019-2020

2.1.3 DayCent 模型对 CO₂ 排放通量模拟校验结果评价

利用 DayCent 模型对旱地农田 CO₂ 排放通量进行模拟, 模拟结果如图 3 所示, 模拟值与观测值对比分析显示, EF 为 0.25~0.62, RMSE 为 0.58~0.80 g/(m²·d), R² 为 0.53~0.85 (表 2)。从图 3 可以看出, DayCent 模型能够捕捉到耕作和施肥后的农田 CO₂ 释放峰, 且模拟峰值出现时间均与观测时间较为接近。2019 年和 2020 年

不同大气 CO₂ 浓度处理下土壤 CO₂ 排放通量的模拟峰值出现在玉米幼苗期, 而观测峰值出现在第一次追肥后。自然大气 CO₂ 浓度处理下土壤 CO₂ 排放通量模拟值分别为 3.10 和 2.92 g/(m²·d), 大气 CO₂ 浓度升高处理下分别为 3.35 和 2.95 g/(m²·d), 整体上 DayCent 模型能够很好地模拟出农田 CO₂ 排放动态。

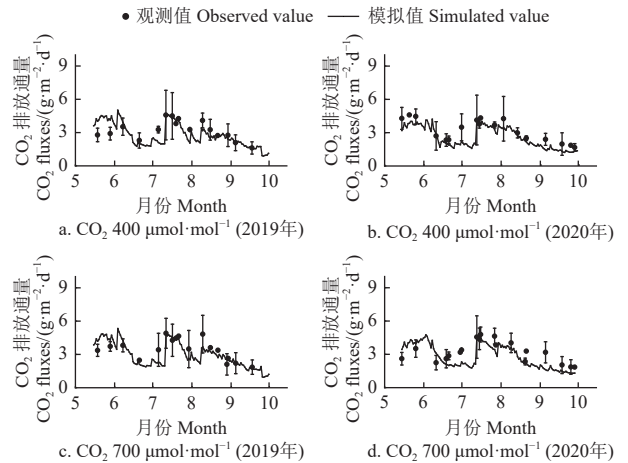


图 3 2019—2020 年玉米农田 CO₂ 排放通量模拟值与观测值比较

Fig.3 Comparison between simulated and observed CO₂ fluxes from maize farmland in 2019-2020

2.2 未来气候情景下旱地农田温室气体排放

基于校验的 DayCent 模型, 以 2001—2020 年旱地农田温室气体通量为基准值, 采用 SSP126 和 SSP245 气候情景构建的气象数据, 对旱地玉米农田当前管理模式下 2021—2060 年玉米农田温室气体排放通量进行模拟。

SSP126 和 SSP245 气候情景下, 温度整体呈现上升趋势 (图 4), 2021—2060 年平均最高气温分别为 16.32 和 15.83 °C, 上升速率分别为 0.11 和 0.21 °C/(10 a); 年平均最低气温分别为 5.29 和 5.60 °C, 上升速率分别为 0.02 和 0.28 °C/(10 a); SSP126 和 SSP245 气候情景下年均降雨量分别为 74.51 和 69.71 cm, 增长率为 0.58 和 0.32 cm/a。

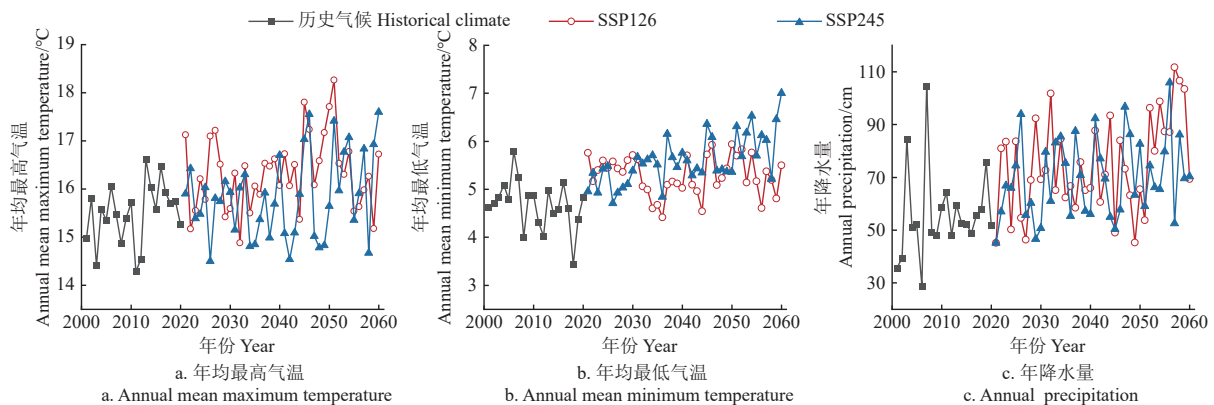


图 4 未来 SSP126 和 SSP245 气候情景下年均最高气温、最低气温和年降水量

Fig.4 Mean annual maximum temperature, minimum temperature and annual precipitation under the future climate scenarios of SSP126 (the low forcing scenario of Coupled Model Intercomparison Project phase 6) and SSP245 (the medium forcing scenario of Coupled Model Intercomparison Project phase 6)

以 2001—2020 年旱地农田温室气体通量为基准值, 2021—2060 年当前管理模式旱地农田温室气体排放变化趋势如图 5 所示, 分为 2021—2040 年和 2041—2060 年两个时段对比分析。2001—2020 年 N_2O 排放量为 $0.47 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, SSP126 气候情景下 2021—2040 年和 2041—2060 年 N_2O 排放量分别为 0.53 和 $0.58 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, SSP245 情景下分别为 0.51 和 $0.58 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 相较于 2001—2020 年 N_2O 年排放量, 两个气候情景下分别增加 22.8% 和 24.9% 。2001—2020 年 CH_4 吸收通量为 $1.76 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, SSP126

情景下 2021—2040 年和 2041—2060 年 CH_4 吸收量分别为 1.60 和 $1.52 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, SSP245 情景下分别为 1.59 和 $1.53 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, CH_4 年吸收量呈下降趋势, 相较于 2001—2020 年分别减少 13.6% 和 13.4% 。2001—2020 年 CO_2 排放通量为 $5\,079.80 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, SSP126 情景下 2021—2040 年和 2041—2060 年 CO_2 排放量分别为 $5\,191.90$ 和 $5\,419.80 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, SSP245 情景下分别为 $5\,190.03$ 和 $5\,488.09 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, CO_2 年排放量呈上升趋势, 相较于 2001—2020 年分别升高 6.7% 和 8.0% 。

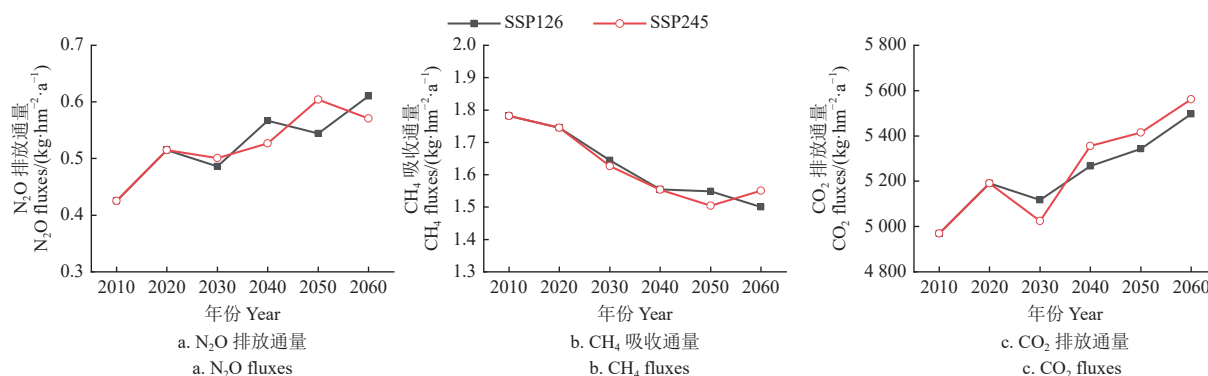


图 5 未来 SSP126 和 SSP245 气候情景下玉米农田温室气体排放通量
Fig.5 Greenhouse gas fluxes from maize farmland under the future climate scenarios of SSP126 and SSP245

3 讨论

3.1 模型模拟温室气体排放通量

利用长期田间定位试验不同大气 CO_2 浓度条件下旱作玉米农田温室气体排放通量的观测数据, 对 DayCent 模型进行校验, 结果表明, DayCent 模型对不同大气 CO_2 浓度下农田土壤 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 排放的模拟值与观测值高度一致 (表 2)。

DayCent 模型能够较精确地模拟农田 N_2O 排放动态变化, 在施氮肥后出现 N_2O 排放峰, 同时能够模拟出强降雨与干旱时 N_2O 排放动态 (图 1)。氮肥和土壤水分含量是影响硝化过程与反硝化过程的重要因素。氮肥添加通过改变土壤碳氮比、磷、钾含量以及微生物活性, 促进土壤 N_2O 排放^[28]。土壤 N_2O 排放量与土壤含水率呈正相关关系, 土壤水分含量过低会抑制土壤微生物活性和丰度, LI 等^[29] 基于 meta 分析发现, 降水量减少和长期干旱使得土壤 N_2O 排放量分别减少 31% 和 25% ; 降雨量增加会产生土壤厌氧环境, 加速反硝化反应进程, 使得 N_2O 排放量增加。在 DayCent 模型中综合考虑了土壤温度、湿度、pH 值、土层 NH_4^+ 和 NO_3^- 空间分布等因素对 N_2O 排放的影响, 可以用于模拟土壤 N_2O 排放动态。

DayCent 模型模拟农田 CH_4 吸收动态与土壤含水率变化高度一致 (图 2), 2019 年 6 月中旬至 7 月初作物生长发育前期, 降雨集中使得土壤体积含水率较高, CH_4 氧化速率受限, CH_4 吸收处于较低水平。旱地土壤 CH_4 吸收主要受土壤水分含量的影响, 降雨会影响土壤 CH_4 吸收和 CH_4 排放相关微生物基因表达^[30], 降雨增加使得土壤处于淹水条件下, 土壤通气性变差, 气体扩散速度

和幅度渐弱, 抑制甲烷氧化菌活性, 导致土壤 CH_4 吸收减少^[31]。在 DayCent 模型中 CH_4 吸收受土壤气体扩散率、含水率和温度控制, 土壤体积含水率为 $0.06 \sim 0.22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时有利于 CH_4 氧化; 当土壤体积含水率过高, CH_4 氧化速率受气体扩散率的限制。因此, DayCent 模型能够很好地模拟土壤 CH_4 吸收动态。

DayCent 模型能够模拟农田耕作和施肥后的 CO_2 释放峰 (图 3)。模型中土壤 CO_2 排放通量由异养呼吸和自养呼吸 (幼根和成熟根系自养呼吸) 组成, 玉米生长前期, 土壤呼吸强度以异养呼吸为主, 这主要受土壤耕作影响^[32-34], 土壤受人为扰动, 可供异养呼吸的底物含量高, 且土壤温度和水分均有利于有机质分解。施肥后作物根系出现生长旺盛期, 根系呼吸出现排放峰值, 两次追肥之后根系自养呼吸的贡献率在 $2\% \sim 15\%$, 整体而言本研究中 CO_2 排放模拟值低于观测值, 这与 BLACK 等^[8] 研究结果一致, 对大豆-玉米轮作农田生态系统土壤呼吸的模拟中发现, 模型能够捕捉到土壤呼吸各组分的不同生育期变化, 但始终低估根系自养呼吸强度。SENAPATI 等^[19] 对玉米农田模拟土壤异养呼吸日平均值为 $1.42 \text{ g}/\text{m}^2$, 低于观测值 $43\% \sim 53\%$, 认为是由于土壤异养呼吸对土壤水分含量不敏感而造成的。影响 CO_2 排放通量的重要因素是氮肥和土壤温度。DayCent 模型考虑了底物含量、土壤质地、温湿度以及管理措施等对土壤 CO_2 排放通量的影响^[19], 整体上能够很好地模拟农田 CO_2 排放动态。

利用 DayCent 模型模拟大气 CO_2 浓度升高对农田温室气体排放的影响结果显示, 大气 CO_2 浓度升高并没有改变各个生育期农田温室气体排放规律。与当前自然大气条件相比, 大气 CO_2 浓度升高处理, 2019 年和 2020

年 N_2O 排放通量分别增加 20.46% 和 22.11%, CO_2 排放通量分别增长 6.64% 和 7.26%, CH_4 吸收通量分别降低 6.29% 和 6.44%, 大气 CO_2 浓度升高会促进土壤 N_2O 和 CO_2 排放, 抑制 CH_4 吸收。模型中大气 CO_2 浓度升高对农田生态系统的影响, 是通过调整生物量、作物蒸腾、碳氮比以及根冠比实现的。一方面, 大气 CO_2 浓度升高会使作物蒸腾轻微下降, 提高土壤水分利用效率^[7,13], 从而降低土壤含水量, 对主导土壤硝化和反硝化作用的好氧和厌氧微生物产生影响^[29], 促进土壤 N_2O 排放; 而旱地土壤 CH_4 吸收主要受土壤水分含量的影响, CO_2 浓度升高会减弱土壤 CH_4 吸收^[35-36]。另一方面, 大气 CO_2 浓度升高使地下部生物量以及根系分泌物增加^[9,37], 提供更多的能量和碳源, 促进土壤硝化和反硝化过程。王从等^[11]依托 FACE (free air carbon dioxide enrichment) 试验平台研究发现模拟 CO_2 浓度升高导致 N_2O 排放显著增加。大气 CO_2 浓度升高对土壤 CO_2 排放的影响因生育期而异, 土壤呼吸与根系生物量显著相关^[15], BLACK 等^[8]利用 FACE 平台模拟 CO_2 浓度升高 200 $\mu\text{mol/mol}$, 土壤自养呼吸和异养呼吸速率分别提高 3% 和 16%。模拟结果表明, DayCent 模型能够很好地模拟大气 CO_2 浓度升高下土壤温室气体排放的动态变化, 模型可以用于未来气候情景下农田温室气体排放的模拟研究。

3.2 模型预测未来气候情景下的农田温室气体排放

未来 SSP126 和 SSP245 气候情景下, 温度和降雨均呈现增长趋势 (图 4), 利用校验的 DayCent 模型预测未来气候情景下当前管理模式农田温室气体排放结果显示 (图 5), 旱地农田是重要的温室气体排放源, SSP126 和 SSP245 情景下农田 N_2O 和 CO_2 排放通量均呈上升趋势, 相较于 2001—2020 年, N_2O 排放量分别增加 22.8% 和 24.9%, CO_2 排放量分别增加 6.7% 和 8.0%; CH_4 表现为旱地农田的弱汇, CH_4 吸收通量呈下降趋势, 两个气候情景下分别减少 13.6% 和 13.4%。在大气 CO_2 、温度和降雨共同作用下, 通过改变微生物活性和土壤理化性质直接和间接地影响温室气体排放。研究表明, 大气 CO_2 升高、温度升高以及降雨增加, 均会促进土壤 N_2O 排放^[11,29], QIN 等^[22]用校准的 DayCent 模型预测气候变化、施氮量对高纬度春小麦对 N_2O 排放的影响, 模拟结果显示施氮量为 50 kg/hm^2 时 N_2O 排放增加 35%, 施氮量提高到 125 kg/hm^2 , N_2O 排放增加 56%。本研究中未来气候情景下影响旱地土壤 CH_4 吸收最主要的因素是土壤水分, 降雨增加使得土壤气体扩散速度和幅度渐弱, 抑制甲烷氧化菌活性, 使得土壤 CH_4 吸收量减少^[35], 而土壤温度主要通过影响 CH_4 扩散速率和酶的活性促进 CH_4 吸收^[31]。 CH_4 和 CO_2 是指示碳循环的重要因子, 土壤异养呼吸是土壤碳流失的重要途径, 受土壤温度和水分控制, 研究表明, 土壤温度升高促使土壤有机质分解, 促进根系呼吸, 提高微生物活性, 进而促进土壤 CO_2 排放^[11,36], 在黄土高原地区, 土壤含水率是温室气体排放的主要限制因素, 大气 CO_2 浓度升高可以提高植物水分利用效率, 改善土壤水分胁迫^[6,7]。LAI 等^[21]模拟

温度升高以及降雨量改变对柳枝稷土壤 CO_2 排放通量的研究显示, 降雨和温度升高会导致 CO_2 排放通量增加, 未来气候下 CO_2 排放通量呈现上升趋势, 表现为多项式曲线模式。

综上, 未来 SSP126 和 SSP245 情景下, 大气 CO_2 浓度、温度和降雨多种因子的综合作用下, 当前玉米农田管理模式, 土壤 CH_4 吸收通量减少, N_2O 和 CO_2 排放通量增加。研究表明, 氮肥和耕作措施是影响农田温室气体排放的重要因素。气候变暖与氮肥交互作用使得农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放量显著增加, 土壤呼吸的温度敏感性 Q_{10} 降低^[15,37]。 CO_2 排放受土壤耕作方式影响, 深耕 (深翻和深松)、秸秆还田会显著增加土壤 CO_2 排放通量^[33,38]。郭乙霏等^[28]研究表明, 与深耕相比, 旋耕更利于土壤 N_2O 和 CO_2 减排。因此气候变化背景下, 优化施氮量和耕作措施等田间管理, 将有助于实现农田温室气体减排。

4 结 论

1) 本研究利用黄土高原旱作玉米的田间观测数据对 DayCent 模型进行校验, 结果表明不同 CO_2 浓度处理下 N_2O 、 CH_4 和 CO_2 排放通量模拟值与观测值一致性程度高, 说明 DayCent 模型可以模拟旱地农田温室气体排放动态变化, 应用模型评估未来气候旱地农田温室气体排放具有一定的可靠性。

2) 利用校验的 DayCent 模型预测 SSP126 和 SSP245 气候情景下, 玉米单作种植模式旱地农田温室气体变化规律, 结果显示, 2021—2060 年间 N_2O 和 CO_2 年排放通量呈上升趋势, CH_4 年吸收量呈下降趋势, 未来气候情景下旱地农田仍是温室气体的排放源。

黄土高原是人类-环境耦合旱地系统对人类活动最敏感的地区之一, 优化施氮与农田耕作等田间管理是提高农业温室气体减排潜力的重要措施, 对实现温室气体减排具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] Watch W. WMO greenhouse gas bulletin: The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2019[N]. World Meteorological Organization, 2020-11-23(16).
- [3] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] 孟凡超, 张佳华, 姚凤梅. CO_2 浓度升高和降水增加协同作用对玉米产量及生长发育的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1064-1073.

- MENG Fangchao, ZHANG Jiahua, YAO Fengmei. Interactive effects of elevated CO₂ concentration and increasing precipitation on yield and growing development in maize[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(10): 1064-1073. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘亮, 张运鑫, 郝立华, 等. 大气 CO₂ 浓度倍增和高温对玉米气孔特征及气体交换参数的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 73-80.
LIU Liang, ZHANG Yunxin, HAO Lihua, et al. Effects of double atmospheric CO₂ concentration and high temperature on the stomatal traits and leaf gas exchange of maize plants[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(22): 73-80. (in Chinese with English abstract)
- [6] 范金杰, 俞杨浏, 左强, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对小麦蒸腾耗水与根系吸水的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 92-98.
FAN Jinjie, YU Yangliu, ZUO Qiang, et al. Effect of double CO₂ concentration on transpiration and root-uptake of wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(3): 92-98. (in Chinese with English abstract)
- [7] LONG S P, AINSWORTH E A, LEAKEY A D B, et al. Food for thought: Lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations[J]. *Science*, 2006, 312(5782): 1918-1921.
- [8] BLACK C K, DAVIS S C, HUDIBURG T W, et al. Elevated CO₂ and temperature increase soil C losses from a soybean-maize ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(1): 435-445.
- [9] 刘远, 王光利, 李恋卿, 等. 土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应[J]. 环境科学, 2017, 38(3): 1245-1252.
LIU Yuan, WANG Guangli, LI Lianqing, et al. Response of nitrifier and denitrifier community and activity to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3): 1245-1252. (in Chinese with English abstract)
- [10] BAGGS E M, RICHTER M, CADISCH G, et al. Denitrification in grass swards is increased under elevated atmospheric CO₂[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 35(5): 729-732.
- [11] 王从, 李舒清, 刘树伟, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对稻麦轮作生态系统 N₂O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(13): 2535-2550.
WANG Cong, LI Shuqing, LIU Shuwei, et al. Response of N₂O emissions to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature in rice-wheat rotation agroecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2535-2550. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邹宇峰, 山立. 有限水资源条件下西北旱区农业发展途径[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 257-263.
ZOU Yufeng, SHAN Li. The Dryland agricultural development with limited water resources in Northwest China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(2): 257-263. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张良侠, 樊江文, 张海燕, 等. 黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析[J]. 环境科学, 2022, 43(9): 4902-4910.
ZHANG Liangxia, FAN Jiangwen, ZHANG Haiyan, et al. Spatial-temporal variations and driving forces of the ecological vulnerability in the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4902-4910. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭艳亮, 王晓琳, 张晓媛, 等. 田间条件下模拟 CO₂ 浓度升高开顶式气室的改进及其效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1034-1043.
GUO Yanliang, WANG Xiaolin, ZHANG Xiaoyuan, et al. Improvement and performance of open-top chambers used for simulating elevated CO₂ under field conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1034-1043. (in Chinese with English abstract)
- [15] 徐洲, 冯倩, 王玉, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对春玉米土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7331-7338.
XU Zhou, FENG Qian, WANG Yu, et al. Effect of elevated CO₂ on soil respiration of spring maize[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7331-7338. (in Chinese with English abstract)
- [16] PARTON W, PARTON W J, SCHIMEL D S, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1173-1179.
- [17] DE GRUYSE S, WOLF A, KAFFKA S R, et al. Simulating greenhouse gas budgets of four California cropping systems under conventional and alternative management[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(7): 1805-1819.
- [18] QUEMADA M, LASSALETTA L, LEIP A, et al. Integrated management for sustainable cropping systems: Looking beyond the greenhouse balance at the field scale[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4): 2584-2598.
- [19] SENAPATI N, CHABBI A, SMITH P. Modelling daily to seasonal carbon fluxes and annual net ecosystem carbon balance of cereal grain-cropland using DailyDayCent: A model data comparison[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 159-177.
- [20] WANG L, QIAN Y, BRUMMER J E, et al. Simulated biomass, environmental impacts and best management practices for long-term switchgrass systems in a semi-arid region[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2015, 75: 254-266.
- [21] LAI L, KUMAR S, CHINTALA R, et al. Modeling the

- impacts of temperature and precipitation changes on soil CO₂ fluxes from a Switchgrass stand recently converted from cropland[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 43(5): 15-25.
- [22] QIN X B, WANG H, HE Y, et al. Simulated adaptation strategies for spring wheat to climate change in a northern high latitude environment by DAYCENT model[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 95: 45-56.
- [23] 罗文蓉. 气候变化对藏北高寒草甸 CO₂ 净交换影响的模拟与预测 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- LUO Wenrong. Simulation and Prediction of the Impact of Climate Change on Net CO₂ Exchange in Alpine Meadow of Northern Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张璇, 谢立勇, 郭李萍, 等. Daycent 模型模拟不同农作管理措施下华北地区土壤有机碳的变化[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 539-548.
- ZHANG Xuan, XIE Liyong, GUO Liping, et al. Modelling the changes of soil organic carbon under different management practices using Daycent model in North China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 539-548. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李悦. 不同农作管理措施对东北地区农田土壤有机碳未来变化的模拟研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015.
- LI Yue. Soil Organic Carbon Simulation under Different Management Practices in Upland Soils of Northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [26] CHENG K, OGLE S M, PARTON W J, et al. Simulating greenhouse gas mitigation potentials for Chinese Croplands using the DAYCENT ecosystem model[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(3): 948-962.
- [27] QIAN Y, CHENG K, OGLE S, et al. Evaluation of four modelling approaches to estimate nitrous oxide emissions in China's cropland[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1279-1289.
- [28] 郭乙霏, 张利平, 王纲胜, 等. 耕作方式与水肥组合对小麦-玉米田温室气体排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 95-104.
- GUO Yifei, ZHANG Liping, WANG Gangsheng, et al. Effects of the tillage and combination of water and fertilizer on the greenhouse gas emissions of wheat-maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(13): 95-104. (in Chinese with English abstract)
- [29] LI L, ZHENG Z, WANG W, et al. Terrestrial N₂O emissions and related functional genes under climate change: A global meta - analysis[J]. *Global Change Biology*, 2019, 26(2): 931-943.
- [30] SAVVICHEV A S, Rusanov I I, Kadnikov V V, et al. Microbial community composition and rates of the methane cycle microbial processes in the upper sediments of the Yamal sector of the Southwestern Kara Sea[J]. *Microbiology*, 2018, 87(2): 238-248.
- [31] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 5246-5256.
- LUO Xiaoqi, ZHANG Afeng, CHEN Haixin, et al. Effects of plastic film mulching patterns and irrigation on yield of summer maize and greenhouse gas emissions intensity of field[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5246-5256. (in Chinese with English abstract)
- [32] LEVIS S, HARTMAN M D, BONAN G B. The Community Land Model underestimates land-use CO₂ emissions by neglecting soil disturbance from cultivation[J]. *Geoscientific Model Development*, 2014, 7(2): 613-620.
- [33] NAN W, YUE S, HUANG H, LI Shiqing, et al. Effects of plastic film mulching on soil greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) concentration within soil profiles in maize fields on the Loess plateau, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 15(2): 451-464.
- [34] 张俊丽, SIKANDER Khan Tanveer, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 192-199.
- ZHANG Junli, SIKANDER Khan Tanveer, WEN Xiaoxia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(18): 192-199. (in Chinese with English abstract)
- [35] DIJKSTRA F A, MORGAN J A, FOLLETT R F, et al. Climate change reduces the net sink of CH₄ and N₂O in a semiarid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(6): 1816-1826.
- [36] PACHOLSKI A, MANDERSCHIED R, WEIGEL H J. Effects of free air CO₂ enrichment on root growth of barley, sugar beet and wheat grown in a rotation under different nitrogen supply[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 63: 36-46.
- [37] WANG X, HU H B, ZHENG X, et al. Will climate warming of terrestrial ecosystem contribute to increase soil greenhouse gas fluxes in plot experiment? A global meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154114.
- [38] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(19): 155-165.
- ZHAO Yali, XUE Zhiwei, GUO Haibin, et al. Effects of tillage and crop residue management on soil respiration and its mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(19): 155-165. (in Chinese with English abstract)

Modelling greenhouse gas emissions of maize farmland under climate change using DayCent

YAN Qi¹, ZHANG Shuxin¹, HOU Wenji¹, WANG Limei^{1,2*}, ZHANG Yao³

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling 712100, China; 3. Natural Resource Ecology Laboratory, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA)

Abstract: Atmospheric CO₂ concentration, temperature, and precipitation are the main driving forces of global climate, particularly for the greenhouse gas (GHGs) emissions in the cropland. The response of GHGs emissions to climate change can be of great significance for the carbon emission reduction from farmland. This study aims to evaluate the effect of elevated atmospheric CO₂ concentration on the GHGs emissions from maize farmland. DayCent model was employed to simulate the long-term GHGs emissions. A series of field experiments were also carried out at Changwu National Field Scientific Observation and Research Station of Farmland Ecosystem on the Loess Plateau. The improved open-top chamber systems (OTCs) were then combined to monitor and control the automatic CO₂ concentration. A systematic simulation was performed on the concentration of elevated CO₂ (700 μmol/mol), and the fluxes of N₂O, CH₄, and CO₂ from the maize farmland under natural atmospheric CO₂ concentrations (400 μmol/mol). DayCent model was parameterized using the weather and soil data from the Changwu National Field Scientific Observation and Research Station of Farmland Ecosystem. The DayCent model was calibrated and verified with the “Trial and Error”, according to the two-year observed data on N₂O, CH₄, and CO₂ fluxes. The calibrated model was utilized to explore the GHGs emissions from the maize farmland under low and medium forcing scenarios (Shared Socioeconomic Pathways, SSP126 and SSP245) of Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) from 2021 to 2060. The results showed that the simulated fluxes of N₂O, CH₄, and CO₂ with the DayCent model were highly consistent with the observed values under different CO₂ concentrations. Specifically, the model efficiencies (EF) were 0.58-0.87, 0.45-0.65, and 0.25-0.62, respectively, while the root mean square error (RMSE) were 0.83-1.33 g/(hm²·d), 0.67-0.82 g/(hm²·d), and 0.58-0.80 g/(m²·d), respectively, and the coefficients of determination were 0.80-0.91, 0.53-0.80, and 0.53-0.85, respectively. Therefore, the DayCent model can be expected to capture the peaks of N₂O and CO₂ emissions from the farmland after fertilization and precipitation. A better simulation was achieved in the N₂O, CH₄, and CO₂ emissions from the maize cropping systems under different atmospheric CO₂ concentrations. The simulation showed that the elevated CO₂ promoted the GHGs emissions from the farmland. But there was no change in the GHGs emission dynamics during the maize growth period. An increasing trend was found in the air temperature, precipitation, and atmospheric CO₂ concentration under the future climate scenarios of SSP126 and SSP245. Furthermore, there was an increase in the average annual emission rates of greenhouse gas from 2021 to 2060, compared with the period of 2001-2020. The mean annual rates of N₂O and CO₂ emission also increased by 22.8% and 24.9%, while 6.7% and 8.0%, respectively, whereas, the uptake of CH₄ in the maize farmland decreased by 13.6% and 13.4%. A comprehensive analysis demonstrated that the maize farmland can be acted as a source of GHGs emissions under the future climate scenarios of SSP126 and SSP245 in the Loess Plateau. It is a high demand to optimize nitrogen fertilizer management and farmland tillage practices for greenhouse gas emission reduction under future climate change. The finding can provide the basic data support to develop agricultural countermeasures under climate change.

Keywords: model; climate change; farmland; maize; elevated CO₂; greenhouse gases