文章编号:1000-7601(2022)04-0177-08

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.04.20

不同耕作措施下温度升高对旱作春小麦 农田土壤 N,O 排放的影响

刘兴宇1,李 广1,袁建钰2,徐万恒1,赵 萍2

(1.甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探究不同耕作措施下温度升高对旱作春小麦农田土壤 N₂O 排放的影响效应,基于 APSIM 模型,结合 甘肃省定西旱作春小麦试验区定点连续监测的 N₂O 排放通量等数据,检验该模型模拟不同耕作措施下 N₂O 排放的 适宜性,并对不同耕作措施下日最高、最低温在 0~2℃范围内耦合变化时旱作春小麦农田土壤 N₂O 排放进行模拟。 结果表明:APSIM 模型对不同处理下 N₂O 排放的模拟结果与实测结果较为一致,归一化均方根差(NRMSE)最大值 为 0.17,决定系数(R²)最小值为 0.80,相关性均达到显著水平(P<0.05),说明该模型可以用来模拟不同耕作措施下 旱作麦田 N₂O 排放;在试验设计范围内,日最高温不变、日最低温升高会增加 N₂O 排放,增排效果表现为传统耕作 (T)>免耕(NT)>传统耕作+秸秆覆盖(TS)>免耕+秸秆覆盖(NTS),日最低温每升高 0.5℃,最大增排幅度为 2.41%; 日最低温不变、日最高温升高会减少 N₂O 排放,减排效果表现为 T>TS>NT>NTS,日最高温每升高 0.5℃,最大减排幅 度为 1.68%。日最低温升高带来的增排效应大于日最高温升高带来的减排效应。

关键字: APSIM 模型; 春小麦; N2O; 温度升高; 耕作措施

中图分类号:S153;S512 文献标志码:A

Effects of temperature rise under different tillage measures on N_2O emission in dryland spring wheat farmland soil

LIU Xingyu¹, LI Guang¹, YUAN Jianyu², XU Wanheng¹, ZHAO Ping²

(1. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
 2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To explore the effects of temperature increase on N₂O emissions in dryland spring wheat farmland soil under different tillage measures, the APSIM model, combining with datas from fixed-point and continuous monitoring of N2O emission fluxes from the dryland spring wheat test area in Dingxi, Gansu Province was adopted in the study. The model was tested to simulate different farming practices. The suitability of N2O emission under the measures, and the simulation of N₂O emission from dryland spring wheat farmland soil when the daily maximum and minimum temperature under different cultivation measures were coupled in the range of $0 \sim 2^{\circ}$. The results showed that the APSIM model's simulation results of N2O emissions under different treatments were more consistent with the measured results. The minimum determination coefficient R^2 was 0.80, and the maximum normalized root mean square error (NRMSE) was 0.17, indicating that the model could be used to simulate different farming. Under the measures, N₂O emissions from dry farming wheat fields; within the scope of the experimental design, the daily maximum temperature remained unchanged, and the daily minimum temperature rises increased N₂O emissions. The effect of increased discharge is traditional tillage (T) > non-tillage (NT) > traditional tillage + straw mulch (TS)> non-tillage+straw mulch (NTS), and the maximum increase of discharge rate was 2.41% for every 0.5°C increase in the daily minimum temperature. The daily minimum temperature remained unchanged, and the daily maximum temperature rises reduced N₂O emissions. The emission reduction effect was as follows: T>TS>NT>NTS. For every 0.5°C increase in the daily maximum temperature, the maximum emission reduction rate was 1.68%. The

收稿日期:2021-09-22 修回日期:2022-02-11

基金项目:甘肃省重点人才项目(LRYCZ-2020-1);甘肃省重点研究发展计划(20YF8NA135);甘肃省财政专项(GSCZZ 20160909)

作者简介:刘兴宇(1996-),男,甘肃临泽人,硕士研究生,研究方向为农业信息化。E-mail:1819233310@qq.com

通信作者:李广(1971-),男,内蒙化德人,教授,主要从事农业生态方面的研究。E-mail:lig@gsau.edu.cn

increase in emissions caused by the increase in the daily minimum temperature was greater than the emission reduction effect caused by the increase in the daily maximum temperature.

Keywords: APSIM model; spring wheat; N₂O; temperature rise; tillage measures

联合国政府间气候变化专门委员会 IPCC 指 出,目前全球平均表面温度 GMST 上升速度高于工 业化前的水平,并在未来依旧会持续升高[1]。氧化 亚氮(N,O)是造成全球变暖的主要温室气体,其增 温效应是 CO, 的 298 倍, 在大气中滞留时间长, 且会 导致臭氧层损耗,自1750年以来,大气中N,O浓度 增加了 20%^[2],其中农业活动是导致 N₂O 浓度增加 的主要原因之一[3]。甘肃省定西市位于黄土丘陵 区域,属于半干旱大陆性气候,春小麦是该地区主 要粮食作物,其生产对气候变化异常敏感。近年 来,有研究表明^[4-5]耕作措施不仅会改变农田土壤 理化性质,还会影响农田温室气体排放。因此,了 解气候变化对定西地区不同耕作措施下旱作春小 麦农田土壤 N₂O 排放的影响,对未来气候变化条件 下该地区春小麦生产中选择合理的应对措施具有 一定意义。

作物-土壤模拟模型可以跨越时间、季节、土壤 类型和气候带,将土壤和作物在田间的测度用模型 加以扩展描述,是研究农业生态系统碳、氮循环的 重要方法。APSIM (Agricultural Production Systems sIMulator)模型作为国际广泛验证和推广的农业生 产系统模型之一,已经被许多学者用来定量评估不 同农作管理措施下作物生产和相应的环境足迹。Li 等^[6]检验了 APSIM 模型对华北平原农田在不同时 间尺度上模拟农田 N₂O 排放的能力,研究发现对消 化系数(k₂)进行校正后,模型能够较好地模拟不同 时间尺度和不同施肥处理下小麦-玉米系统的土壤 N₂O 排放,但是对于一些较高的峰值排放模拟效果 欠佳。王良等^[7]运用 APSIM 模型进行不同氮肥管 理情景模拟,发现模型可以系统分析施氮量对作物 生产和 N,O 排放等氮损失。李建政等^[8]在华北地 区冬小麦-夏玉米轮作系统中发现 APSIM 对 N,O 排放模拟的多数峰值出现在氮肥的施用、灌溉或降 雨,与实测峰值不符合,但对于每季的 N₂O 排放总 量,该模型模拟效果较好。马晨光等^[9]在探究不同 水氮处理对农田温室气体通量影响时,发现 APSIM 模型对农田 N₂O 气体通量的模拟效果较好。

纵观 APSIM 模型关于温室气体的研究,大多集中在水氮处理、时间尺度、管理措施、作物轮作系统对温室气体的影响等。对于温度升高对不同耕作措施下旱作农田 N₂O 排放的研究较少。基于此,在

本研究通过校准 APSIM 在模拟土壤水分、作物产量 以及 N₂O 排放性能,利用校准后的 APSIM 模型,针 对未来可能出现的温度变化情形,对定西市安定区 不同耕作措施旱地旱作麦田 N₂O 排放进行模拟。 为保障作物产量,实现农业温室气体减排提供理论 支撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于甘肃省定西市安定区安家坡村旱 农综合试验站,该地区属于典型黄土丘陵沟壑区, 土壤为黄绵土,土质绵软,养分含量低,抗侵蚀能力 弱。土壤容重 1.26 g · cm⁻³,土壤全氮 0.96 g · kg⁻¹、有机质含量 12.01 g · kg⁻¹;平均海拔 2 000 m,无霜期约占全年 1/3,年均降水量为 385 mm,年 均蒸发量 1 537 mm,年日照时数 2 476.6 h,年平均 气温 6.4℃,≥10℃的积温 2 239.1℃,为典型的半干 旱雨养农业区^[10]。

1.2 田间试验设计

试验于 2020—2021 年在甘肃省定西市安定区 安家坡村进行,供试作物为春小麦甘春 32 号,3 月 中下旬播种,8 月份进行收获。设置 4 种耕作措施: 传统耕作、传统耕作+秸秆覆盖、免耕、免耕+秸秆覆 盖(表1)。每个处理设计 3 个重复小区,小区面积 均为 24 m²(4 m×6 m),每个小区内随机设置 1 个 0.5 m×0.5 m 的固定采样区,用来定期采集农田 N₂O 气体。播种前每小区一次性施加折合纯氮 105 kg・ hm⁻²(尿素+二铵),过磷酸钙 150 kg・hm⁻²。作物 生长期间除了除草外无其他作业,无任何灌溉措施。

1.3 气体采集方法

采用静态暗箱-气相色谱法对农田土壤 N₂O 排 放通量进行原位监测。采样箱由箱体和底座构成, 箱体规格为 50 cm×50 cm×50 cm,使用 6 mm 厚不透 光聚苯乙烯保温材料,并在外围覆盖泡沫防止取样 时箱内温度变化,箱内装有小风扇和温度传感器。 耕种前将底座埋入小区,最大限度降低对作物和土 壤内部的干扰。

田间监测在作物生长季(3—8月,每月5、15日和25日)的9:00—11:00进行取样,静态箱封闭后0、9、18、27、36 min使用带三通阀密封良好的塑料医用注射器,抽取箱内气体并注入 E-Switch 铝箔复

表1 耕作措施描述

Table 1 Description of tillage systems

代码 Code	处理 Treatment	耕作方法 Tillage method
Т	传统耕作 Traditional tillage	前茬常规收获后三耕两耱。三耕:8月前茬收获后,8月底以及9月三次耕作,耕深依次为20、10 cm 和 5 cm;两耱:9月份第三次耕作后及 10月份试验田土壤冻结前各耱一次。 Three ploughing and two saplings after the conventional harvest in the first crop. Three plowing: after the first crop harvest in August, three plowing at the end of August and mid-september, the depth of tillage is 20, 10 cm and 5 cm in sequence; two plowing: after the third plowing in Sep- tember, and one plowing before the experimental field soil freezes in October.
NT	免耕 Non-tillage	不耕作,播种时用免耕播种机一次性完成播种和施肥。 Without tillage, use a no-tillage planter to complete sowing and fertilizing at one time.
TS	传统耕作+秸秆覆盖 Traditional tillage+ straw mulch	耕作方式同传统耕作,收获后将春小麦秸秆切碎均匀覆盖于试验小区。 The farming method is the same as the traditional farming. After harvest, the spring wheat stalks are chopped and evenly covered in the experimental plot.
NTS	免耕+秸秆覆盖 Non-tillage+straw mulch	全年免耕,秸秆覆盖同传统耕作+秸秆覆盖。 Non-tillage throughout the year, straw mulching is the same as traditional farming + straw mulc- hing.

合膜气体采样袋保存。3 d 内使用气相色谱仪(仪 盟 A90,常州磐诺仪器有限公司)测定 N₂O 浓度,并 利用公式(1)计算排放通量,利用内插法计算相邻 两次检测间通量,后将每天的交换通量累加得到生 育期气体交换总量^[11]。

$$F = \frac{dc}{dt} \times \frac{M}{V} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T}{T_0}H$$
(1)

式中,F为气体通量($mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$),dc/dt为采样时 箱内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率,M为被测气体摩尔质量($g \cdot mol^{-1}$),V为标准状态下的 气体摩尔体积($mL \cdot mol^{-1}$), P_0 和 T_0 为理想气体标 准状态下的空气压力和气温,P和T为采样时箱内 的实际气压和气温,H为采样箱内高度^[12]。

1.4 数据来源及处理

研究所需的气象数据由试验点气象站自动测定,土壤数据和 N₂O 排放量来源于试验实测数据, 作物管理数据则根据试验地实际管理方式设置。 采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整合,通过 SPSS 24.0 对数据进行处理,用 Origin 2018 进行绘图。

1.5 APSIM 模型

1.5.1 模型概述 APSIM 是一个综合农业生态系统管理模型,用于研究受环境和人为变化影响的农业生态系统生产力和养分循环。APSIM 模拟作物生长和土壤碳氮过程,在日时间尺度上响应气候(温度、降雨量和辐射)、土壤水分有效性和土壤养分状况,该模型通过模拟土壤硝化与反硝化过程来模拟土壤 N₂O 排放^[13],其最大硝化速率遵循米氏动力学,硝化反应计算公式:

$$R_{\text{nit}} = K_{\text{max}} \frac{N}{N + K_{\text{NH}_4^+}} f(W) f(T) f(H)$$
 (2)

式中, R_{mit} 为实际硝化速率, K_{max} 为最大硝化速率,N为土壤铵离子质量浓度, $K_{NH_4^+}$ 为米氏常数,f(W)、f(T)、f(H)分别为土壤水分、温度和 pH 值的限制 因子。硝化反应产生的 N₂O 与实际硝化过程氮的 总量 呈 一 定 比 例,该 值 K_2 在 本 文 中 选 定 为 0.0023^[14],硝化过程产生的 N₂O 公式:

$$N_{\rm nit} = K_2 \times R_{\rm nit} \tag{3}$$

式中, N_{nit}为硝化反应速率, K₂为硝化反应产生的 N₂O 与实际 N 硝化量的比值。

反硝化速率公式:

$$R_{\text{denit}} = K_{\text{denit}} n C_A f(W) f(T)$$
(4)

 $C_A = 0.0031(HUM_c + FOM_c) + 24.5$ (5)

式中, R_{denit} 为实际反硝化速率, K_{denit} 为反硝化常数, n 为土壤硝酸根质量浓度, C_A 为土壤活性有机碳质 量浓度,f(W)、f(T) 分别为土壤水分、温度限制因 子, HUM_c 和 FOM_c 为来自腐殖质和新鲜有机质的 有机碳。反硝化过程产生的 N_2O 通过计算反硝化过 程产生的 N_2 和 N_2O 的比值估算,本文中 N_2 与 N_2O 比值定为 $10^{[14]}$ 。

1.5.2 APSIM 模型参数调试与验证 本研究中模型使用试错法调整参数;用遮雨棚下春小麦生育期观测数据调整作物所需积温、春化指数和光周期系数等参数。验证后的参数调整结果:灌浆到成熟的积温取值580℃,春化系数取值1,光周期系数取值2,最大灌浆速率取值2.3,播种期地表蒸发系数(土壤)取值7.2,发芽期地表蒸发系数(土壤)取值6.2。用 APSIM 模型分别模拟2020—2021 年4种耕作措施下 N₂O 排放量,通过模拟值与实测值验证实现模型参数本地化。用模拟值和实测值间的决定系数(*R*²)和国际上检验模型通用的均方根误差法,归一

化均方根差(NRMSE)来度量模拟数据与实测数据的相对差异度。一般认为,NRMSE 越小,模拟值与 实测值的差异越小。决定系数(R²)反映模拟值与 实测值之间的一致性,其数值越趋近于1表示模拟 效果越好。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施下旱作春小麦农田 N₂O 排放 特征

如图 1 所示,2020—2021 年不同耕作措施下春 小麦农田土壤 N₂O 排放通量均为正值,处于释放 N₂O状态,因此旱地春小麦农田土壤为 N₂O 排放源。 不同耕作措施下农田土壤 N₂O 排放通量在相同时 间段内整体变化趋势基本一致,且都表现为随时间 变化的双峰型曲线,主要的排放峰为每年 5—6 月, 即春小麦生长季中期。由此可知,春小麦农田土壤 N₂O 排放通量与作物生长有关,随着春小麦生长各 处理 N₂O 排放通量有明显变化特征,且生长旺盛期 N₂O 排放通量高于生长季初期和末期。如图 2 所 示,不同耕作措施下春小麦农田土壤 N₂O 累积排放 量存在显著差异,表现为 T>NT>TS>NTS。

2.2 APSIM 模型验证及模拟误差分析

由表2可知,不同耕作措施(T、TS、NT、NTS)实 测值与模拟值的归一化均方根差(NRMSE)最大值 为0.17,决定系数(R²)最小值为0.80,相关性均达 到显著水平(P<0.05)。所以 APSIM 模型可以较好 地模拟陇中地区旱作春小麦不同耕作措施下农田 N,O气体排放。由图 3 可知,不同耕作措施下旱作 麦田在生长季排放的 N₂O 模拟值与实测值保持一 致的规律均为 T>NT>TS>NTS;但模拟值均低于实 测值。APSIM 模型虽然被国内外大量学者验证有 效性,尤其在干旱地区模拟的温室气体排放适用性 较高,但该模型对 N,O 的产生及排放过程是基于假 设,这些复杂繁琐的过程在模型中被简化为硝化反 应与反硝化反应产生的 N₂O 之和,且无法较精确地 模拟部分单个时间节点的 N2O 排放通量,这可能导 致模拟结果存在一定误差。此外 N₂O 的实测过程 中也存在不可避免的人为误差。



图 1 不同耕作措施下旱作春小麦农田 N₂O 排放通量









图 3 不同耕作措施下旱作麦田 N2O 累积排放量实测值与模拟值

Measured and simulated N₂O emissions from dryland wheat fields under different tillage measures Fig.3

表 2 N₂O 排放量实测值与模拟值拟合结果

Table 2 Fitting results of measured and simulated N₂O emissions

项目				
Item	Т	NT	TS	NTS
R^2	0.92	0.88	0.80	0.92
NRMSE	0.09	0.12	0.17	0.10

2.3 情景设计下结果分析

不同耕作措施下温度升高对旱作麦田土壤 2.3.1按照模拟试验设计,基于验证后 N,O 排放的影响 的 APSIM 模型,改变输入模块中逐日最高、最低温 度的参数值,并以0.5℃为一个温度梯度,通过计算 机模拟 2018—2021 年传统耕作(T)、传统耕作+秸 秆还田(TS)、免耕(NT)和免耕+覆盖(NTS)4种耕 作措施下温度升高对旱作麦田土壤 N,O 排放进行 耦合模拟实验。由表 3~6 可见:当日最高温不变, 日最低温每上升 0.5℃, 日最低温对 N₂O 排放表现 为正效应,呈增排趋势。当日最低温不变,日最高 温上升时,日最高温对 N₂O 排放表现为负效应,呈 减排趋势。

传统耕作下温度升高旱作麦田土壤 表 3

N₂O 排放的动态模拟/(kg・hm⁻²)

Dynamic simulation of soil N2O emission in dryland wheat Table 3 field with increasing temperature under conventional tillage

日最低温度升高 Daily minimum	日最高温度升高 Daily maximum temperature rises/℃				
temperature rises∕℃	0	0.5	1.0	1.5	2.0
0	2.481	2.474	2.47	2.466	2.46
0.5	2.488	2.482	2.474	2.47	2.466
1.0	2.496	2.488	2.484	2.478	2.474
1.5	2.504	2.494	2.49	2.486	2.478
2.0	2.514	2.504	2.5	2.496	2.49

免耕下温度升高旱作麦田土壤 N₂O 表 4

排放的动态模拟/(kg・hm⁻²)

Table 4 Dynamic simulation of soil N₂O emission in dryland wheat field with increasing temperature under no-tillage

日最低温度升高 Daily minimum	日最高温度升高 Daily maximum temperature rises/℃				
temperature rises∕℃	0	0.5	1.0	1.5	2.0
0	2.322	2.318	2.312	2.310	2.305
0.5	2.328	2.324	2.318	2.316	2.309
1.0	2.335	2.331	2.325	2.322	2.318
1.5	2.343	2.338	2.335	2.333	2.328
2.0	2.348	2.345	2.341	2.337	2.331

传统耕作+覆盖下温度升高旱作麦田 表 5 土壤 N₂O 排放的动态模拟/(kg・hm⁻²)

Dynamic simulation of soil N2O emission in dryland wheat Table 5 field with increasing temperature under traditional tillage + mulch

日最低温度升高 Daily minimum	Dai	日最高温度升高 Daily maximum temperature rises/℃				
	Daily maximum temperature fises/ C					
temperature rises∕℃	0	0.5	1.0	1.5	2.0	
0	2.048	2.044	2.041	2.039	2.032	
0.5	2.053	2.049	2.044	2.042	2.035	
1.0	2.058	2.055	2.051	2.046	2.041	
1.5	2.065	2.062	2.058	2.053	2.048	
2.0	2.074	2.069	2.065	2.062	2.056	

表 6 免耕+覆盖措施下温度升高旱作麦田 土壤 N₂O 排放的动态模拟/(kg・hm⁻²)

Table 6 Dynamic simulation of of soil N2O emission in

dryland wheat field with increasing temperature

under non-tillage + mulching measures

日最低温度升高 Daily minimum	日最高温度升高 Daily maximum temperature rises/℃					
temperature rises∕℃	0	0.5	1.0	1.5	2.0	
0	1.818	1.814	1.811	1.810	1.806	
0.5	1.821	1.816	1.814	1.811	1.810	
1.0	1.824	1.822	1.819	1.814	1.813	
1.5	1.834	1.829	1.824	1.821	1.818	
2.0	1.842	1.835	1.832	1.827	1.822	

2.3.2 不同耕作措施下温度升高对旱作麦田土壤 N₂O 排放的协同效应分析 通过对不同耕作措施下 旱作麦田土壤 N₂O 排放量进行双因素方差分析,得 到 T 处理下日最高、最低温度两因素的 F 值为 366.781、712.1(P<0.01),NT 处理下日最高、最低温 度两因素的 F 值为 264.12、658.24(P<0.01),TS 处 理下日最高、最低温度两因素的 F 值为 324.56、 702.36(P<0.01),NTS 处理下日最高、最低温度两因 素的 F 值为 90.34,163.24(P<0.01),4 种不同耕作 措施下日最高、最低温度的 F 值和 P 值均达到显著 性差异,表明日最高、最低温两因子对旱作麦田土 壤 N₂O 排放均有显著影响。

以旱作麦田土壤 N₂O 排放量为因变量(Y),日 最高温(X₁)和日最低温(X₂)为自变量,用 SPSS 软 件进行多项式回归分析。建立不同耕作措施下日 最高、最低温升高对旱作麦田土壤 N₂O 排放量影响 的回归方程。

> $Y_{\rm T} = 2.480 - 0.011X_1 + 0.015X_2$ $Y_{\rm NT} = 2.321 - 0.009X_1 + 0.014X_2$ $Y_{\rm TS} = 2.048 - 0.008X_1 + 0.012X_2$ $Y_{\rm NTS} = 1.817 - 0.007X_1 + 0.01X_2$

R 越接近 1,表明方程越显著。公式中, T、NT、

TS、NTS 耕作措施下相关系数(R)分别为0.958、 0.942、0.961、0.956。表明不同耕作措施的回归方程 达到了显著水平,能充分反映出旱作麦田土壤 N₂O 排放与逐日最高温、最低温之间的关系。结果分析显 示:不同耕作措施下逐日最高温度(X₁)的偏回归系 数分别为-0.011、-0.009、-0.008 和-0.007,表现为负 效应;不同耕作措施下逐日最低温度(X₂)的偏回归系 数分别为 0.015、0.014、0.012 和 0.01,表现为正效应。

以日最高温度(X_1)、日最低温度(X_2)为自变 量,旱作麦田土壤 N_2 O 排放量(Y)为因变量,运用 SPSS 进行通径分析(图 4)。4种耕作措施下 $X_1 \rightarrow$ Y 通径系数分别为-0.560、-0.515、-0.524、-0.386, $<math>X_1X_2 \rightarrow Y$ 的通径系数分别为-0.128、0.028、-0.052、 -0.261,表明日最高温升高对排放量呈减排效应。 日最低温不变时,日最高温每增加 0.5℃,排放量平 均减排幅度分别为 1.68%、1.52%、1.28%、1.14%。 $X_2 \rightarrow Y$ 的通径系数分别为 0.830、0.840、0.852、 0.974,表明日最低温升高对排放量呈增排效应,日 最低温每增加 0.5℃,排放量平均增排幅度分别为 2.41%、2.36%、2.24%、1.92%。总体来看 4 种耕作 措施下日最高、最低温存在负交互作用,且日最低 温升高带来的增排效应占主导地位。



图 4 不同耕作措施下日最高、最低温对旱作麦田土壤 N₂O 排放量通径分析

Fig.4 A general analysis of the daily maximum and minimum temperature under different tillage measures on the N_2O emission from the dry wheat field soil

3 讨 论

本研究发现,参数本地化后的 APSIM 模型对 4 种耕作措施下旱作麦田土壤 N₂O 排放的模拟结果 与实测值较为一致,归一化均方根差(NRMSE)最大

值为 0.17, 决定系数(*R*²) 最小值为 0.80, 相关性均 达到显著水平(*P*<0.05)。APSIM 模型可以较好地 捕捉不同耕作措施下旱作麦田在生长季排放的 N₂O, 与实测值保持相似的规律均为 T>NT>TS> NTS。主要原因为不同耕作措施下土壤理化性质和 氮组分含量存在差异,免耕和秸秆覆盖显著增加了 表层土壤容重、有机碳及土壤含水量^[15]。一定程度 上增加了微生物活动,有利于春小麦吸收养分,减 少土壤硝、铵态氮的残留,从而降低了土壤 N₂O 排 放。但 APSIM 模型模拟值显著低于实测值,且对于 部分单个时间节点 N₂O 排放通量和排放峰值存在 一定误差。

黄土丘陵地区主要气候变化特征表现为温度 升高、降水时节分配不均。土壤 N,O 排放的主要来 源是土壤微生物的硝化与反硝化作用,而温度升高 不仅影响硝化反硝化微生物活性,还影响着 N,O 在 土壤中的运输与扩散,是影响土壤 N,O 形成的关键 因素^[16]。因此,在当地常用的4种耕作措施下分别 探讨日最高温、最低温变化对旱作麦田土壤 N₂O 排 放的影响规律,能对当地春小麦生产与减排提供针 对性的指导。在 APSIM 模型验证的基础上,运用模 型对不同耕作措施下日最高、最低温度升高耦合条 件的旱作麦田土壤 N₂O 进行模拟,结果显示:日最 高温度不变时,日最低温度升高会增加 N₂O 排放。 增排效果表现为 T>NT>TS>NTS。日最低温度不变 时,日最高温度升高会减少 N,O 排放,减排效果表 现为 T>TS>NT>NTS。由于日最低温度升高带来的 增排效应大于高温升高带来的减排效应,日最高 温、最低温升高对 N₂O 排放存在正互作作用。从研 究结果分析,T处理下旱作麦田土壤 N,O 排放量对 温度升高比较敏感,不论是日最高温升高带来的减 排效应还是日最低温度升高带来的增排效应都高 于其他处理。主要是由于T处理土壤孔隙较大,加 速了土壤水分的蒸发,温度升高更容易降低土壤含 水量,促使土壤干湿交替变化加快,从而加速了 N₂O 的产生与释放^[17];此外,由于土壤扰动力度大,加 强了土壤透气性,可能将土壤从厌氧状态改变为富 氧状态,虽能加强土壤硝化反应但抑制了反硝化作 用。NTS 耕作措施相较于其他耕作措施增排效应较 小,这主要是由于秸秆只是覆盖于土壤表面,土壤 未经扰动,更利于土壤有机碳的固定,且土壤较为 紧实,土壤容重大,湿度大^[18];另一方面,秸秆覆盖 降低了土壤蒸发,利于保持土壤水分和土壤的厌氧 环境。这与闫翠萍等^[19]的研究基本一致。

本文运用 APSIM 模型模拟旱作麦田土壤 N₂O 排放时未考虑病虫害、田间管理等因素的影响,后 续需要进一步研究。

4 结 论

APSIM 模型可以较准确地模拟定西地区旱作 春小麦不同耕作措施下土壤 N_2O 气体排放,累积排 放量实测值与模拟值的归一化均方根差(*NRMSE*) 最大值为 0.17,决定系数(R^2)最小值为 0.80,相关 性均达到显著水平(P<0.05);4 种耕作措施下,日最 低温升高对 N_2O 排放呈正效应,日最高温不变,日 最低温每升高 0.5℃旱作麦田土壤 N_2O 排放量在 T、 NT、TS 和 NTS 处理下分别平均增排 2.41%、2.36%、 2.24%、1.92%;日最高温升高对 N_2O 排放呈负效应, 日最低温不变,日最高温每升高 0.5℃旱作麦田土壤 N_2O 排放量在 T、NT、TS 和 NTS 处理下分别平均减 排 1.68%、1.52%、1.28%、1.14%。日最低温升高带 来的增排效应大于日最高温升高带来的减排效应。

参考文献:

- [1] 傅莎,邹骥,张晓华,等.IPCC 第五次评估报告历史排放趋势和未来 减缓情景相关核心结论解读分析[J].气候变化研究进展,2014,10 (5):323-330.
 FU S, ZOU J, ZHANG X H, et al. Analysis on the key findings related to historical emission trends and future mitigation scenarios from the working group Ⅲ contribution to the IPCC fifth assessment report[J].Climate Change Research, 2014, 10(5): 323-330.
- [2] MIELENZ H, THORBURN P J, SCHEER C, et al. Opportunities for mitigating nitrous oxide emissions in subtropical cereal and fiber cropping systems: a simulation study[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 218: 11-27.
- [3] 张强,巨晓棠,张福锁.应用修正的 IPCC2006 方法对中国农田 N₂O 排放量重新估算[J].中国生态农业学报,2010,18(1):7-13.
 ZHANG Q, JU X T, ZHANG F S. Re-estimation of direct nitrous oxide emission from agricultural soils of China via revised IPCC2006 guideline method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18 (1): 7-13.
- [4] 许艳艳,武兰芳,李彬彬,等不同耕作措施下土壤 N₂O 排放及其农 学效率[J].中国生态农业学报,2015,23(11):1349-1358.
 XU Y Y, WU L F, LI B B, et al. Soil N₂O emission and its agronomic efficiency under different tillage [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1349-1358.
- [5] 孙成胜,张仁陟,张军,等.丰雨年旱作农业区不同耕作措施麦豆地 N₂O、CH₄的排放[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):196-204. SUN C S, ZHANG R Z, ZHANG J, et al. N₂O and CH₄ emissions of spring wheat -pea rotation fields under different tillage patterns in dryland farming in a wet year[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 196-204.
- [6] LI T T, ZHANG W, WANG J, et al. Parameterizing an agricultural production model for simulating nitrous oxide emissions in a wheatmaize system in the North China Plain[J]. Atmospheric and Oceanic

Science Letters, 2016, 9(6): 403-410.

[7] 王良、黄淮海小麦-玉米周年农田土壤 N₂O 排放动态分析及施氮调 控模拟研究[D].泰安:山东农业大学,2019.

WANG L. Dynamic analysis and nitrogen application simulation on N₂O emission from wheat-maize farmland in Huang-Huai-Hai region [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.

[8] 李建政.农田生态系统温室气体减排技术评价及实证分析[D].北 京:中国农业科学院,2015.

LI J Z. Technology evaluation for greenhouse gas mitigation in cropland ecosystem and case studies[D]. Beijing; Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.

[9] 马晨光,蔡焕杰,卢亚军.基于 APSIM 模型不同水氮处理下 N₂O 的 排放研究[J].灌溉排水学报,2020,39(11):120-129.

MA C G, CAI H J, LU Y J.Modelling the impact of water and nitrogen application on N_2 O emission from farmland using the APSIM model [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(11): 120-129.

- [10] 王钧,李广,闫丽娟,等.旱地春小麦产量对不同生育阶段温度变化的响应模拟[J].中国农业科学,2020,53(5):904-916.
 WANG J, LI G, YAN L J, et al. Simulation of spring wheat yield response to temperature changes of different growth stages in drylands
 [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(5): 904-916.
- [11] 姚瑶,李广,王钧,等.不同耕作措施下旱作春小麦农田二氧化碳排 放模拟及敏感性分析[J].干旱地区农业研究,2021,39(3): 171-178.

YAO Y, LI G, WANG J, et al. Simulation and sensitivity analysis ofcarbon dioxide emissions under different tillage systems in dryland spring wheat fields [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 171-178.

[12] 郑泽梅,于贵瑞,孙晓敏,等.涡度相关法和静态箱/气相色谱法在 生态系统呼吸观测中的比较[J].应用生态学报,2008,19(2): 290-298.

ZHENG Z M, YU G R, SUN X M, et al. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 290-298.

[13] WANG G C, LUO Z K, WANG E L, et al. Reducing greenhouse gas emissions while maintaining yield in the croplands of Huang-Huai-Hai Plain, China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260/261: 80-94.

- [14] MIELENZ H, THORBURN P J, HARRIS R H, et al.Mitigating N₂O emissions from cropping systems after conversion from pasture-a modelling approach[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 82 (Part B): 254-267.
- [15] 赵红香.耕作措施与秸秆还田对农田土壤质量和冬小麦根系生长 与代谢的调控[D].泰安:山东农业大学,2021.
 ZHAO H X. Regulation of tillage practice and residues returning on soil quality and root growth and metabolism of winter wheat[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [16] 孙志强.农田土壤 N₂O 的产生机制及其影响因素研究进展[J].土 壤通报,2010,41(6);1524-1530.
 SUN Z Q. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(6); 1524-1530.
- [17] 田慎重,宁堂原,迟淑筠,等.不同耕作措施的温室气体排放日变化 及最佳观测时间[J].生态学报,2012,32(3):879-888.
 TIAN S Z, NING T Y, CHI S J, et al. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (3): 879-888.
- [18] 万小楠,赵珂悦,吴雄伟,等.秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤
 固碳,氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响[J].环境科学,2022,
 43(1):569-576.

WAN X N, ZHAO K Y, WU X W, et al. Effects of stalk incorporation onsoil carbon sequestration, nitrous oxide emissions, and global warming potential of a winter wheat-summer maize field in Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2022, 43(1): 569-576.

 [19] 闫翠萍,张玉铭,胡春胜,等.不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田 温室气体交换及其综合增温潜势[J].中国生态农业学报,2016,24
 (6):704-715.

YAN C P, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheatmaize rotation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 704-715.