

基于 EFAST 方法的 APSIM 模型 N₂O 排放的全局敏感性分析

徐子翔¹,董莉霞¹,李广²,燕振刚¹,
王钧¹,聂志刚¹,逯玉兰¹

(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:为定量讨论 APSIM 模型中各类参数对旱作麦田 N₂O 气体排放的影响,于 2019—2021 年以‘定西 35 号’春小麦为研究对象,采用扩展傅里叶幅度检验法,对影响春小麦模型输出的各类参数敏感性进行分析,重点探讨模型输入对作物品种参数、气象参数、土壤参数及管理参数变化对模型输出的影响。结果表明:对春小麦排放 N₂O 气体指数影响最敏感的作物品种参数为出苗到拔节期积温,其次是初花期积温、灌浆期积温、春化敏感性指数、潜在灌浆速率、光周期作物敏感指数;气象参数对排放 N₂O 气体指数影响最敏感的是日最高温度,其次是降雨量、日最低温度;土壤参数对排放 N₂O 气体指数影响最敏感的是田间持水量,其次是土壤容重、小麦萎蔫系数、小麦吸水系数;管理参数对排放 N₂O 气体指数影响最敏感的是施氮量。运用扩展傅里叶幅度检验法可快速筛选出模型敏感参数,简化参数率定过程。

关键词:春小麦;EFAST 方法;APSIM 模型;N₂O 排放;敏感性分析

中图分类号:S512.1;S311 **文献标志码:**A

Global sensitivity analysis of N₂O emission of APSIM model based on EFAST method

XU Zixiang¹, DONG Lixia¹, LI Guang², YAN Zhengang¹,
WANG Jun¹, NIE Zhigang¹, LU Yulan¹

(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 quantitatively discuss the impact of various parameters in the APSIM model on N₂O gas emissions from dryland wheat fields, the spring wheat variety ‘Dingxi 35’ from 2019 to 2021 was selected as the research object. The Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test method was used to analyze the sensitivity of various parameters affecting the model output of spring wheat, focusing on the influence of model inputs on crop variety parameters, meteorological parameters, soil parameters, and management parameters on the model output. The results indicated that the most sensitive crop variety parameter affecting the N₂O gas emission index of spring wheat was the accumulated temperature from emergence to jointing stage, followed by the accumulated temperature at the initial flowering stage, the accumulated temperature at the filling stage, vernalization sensitivity index, potential filling rate, and photoperiod sensitivity index. Among meteorological parameters, the most sensitive to the N₂O gas emission index is the daily maximum temperature, followed by rainfall and daily minimum temperature. For soil parameters, the most sensitive to the N₂O gas emission index was the field capacity, followed by soil bulk density, wheat wilting coefficient, and wheat water absorption coefficient. Among management parameters, the most sensitive to the N₂O gas emission index was the amount of fertilizer applied. The EFAST method can quickly screen sensitive pa-

parameters of the model and simplify the parameter calibration process.

Keywords: spring wheat; EFAST method; APSIM model; N₂O emission; sensitive analysis

N₂O 是温室气体之一,具有吸收和重新辐射地球表面热量的能力,会导致地球表面温度上升,加剧全球变暖和气候变化。自 1750 年以来,大气中的 N₂O 浓度增加了 20%,其在 100 年期间的全球变暖潜能值约为 CO₂ 的 300 倍^[1]。全球温室气体排放量持续上升,累计排放量正逐步逼近 1.5℃ 目标排放预算^[2]。全球 N₂O 预算表明,排放的 N₂O 中约有 45% 是人为产生的,其中 60% 来自农业^[3]。甘肃省全年干旱少雨,年降雨量具有明显的地区分带特征,表现为从高海拔到低海拔、从高纬度向低纬度递增。旱作农业是我国主要的农业系统之一,据估算旱地农田 N₂O 排放约占全国农业排放 78%^[4]。因此,分析旱作麦田 N₂O 气体排放的全局敏感性对指导农业生产具有重要意义。

APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) 模型是一种用于模拟农业生产系统的作物模型,由澳大利亚联邦科学与工业研究组织开发。近年来,许多学者将作物模拟模型和敏感性分析方法结合起来评估各个参数对输出结果的影响。张燕等^[5]使用 APSIM 模型分析春小麦产量和生物量的敏感性,在不同参数取值范围下得出与积温相关的参数对作物的产量和生物量影响较大。全局敏感性分析对评估输入参数变化对模型输出的影响至关重要^[6]。目前常用的敏感性分析方法包括 Morris (Morris Elementary Effects Method)、Sobol (Sobol Sensitivity Analysis)、FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) 以及 EFAST (Extended Fourier Amplitude Sensitivity Test)。Morris 法适用于在样本空间评估每个参数微小变化对输出结果的影响;Sobol 法擅长评估单个输入参数及其组合对输出的贡献;FAST 法利用快速傅里叶变换来评估输入参数对输出的影响;EFAST 法则利用傅里叶级数展开来检验输入与输出变量之间的关系^[7]。金梦潇等^[8]通过对比多种方法得出在进行复杂实验时首选 EFAST 法。考虑到 APSIM 模型的复杂性和输入参数的数量较多,选择 EFAST 方法可提供全面且高效的敏感性分析结果,有助于深入理解 APSIM 模型的行为和性能特征。目前 EFAST 方法对作物模型参数的全局敏感性分析主要集中在 APSIM 模型、DNDC (DeNitrification-DeComposition model) 等模型。成思潮等^[9]使用 DNDC 模型模拟不同施肥水平下旱作麦田 N₂O 排

放及敏感性分析,通过分析模型土壤参数得出 pH 是影响 N₂O 排放最主要的敏感参数。刘兴宇等^[10]和马晨光等^[11]在不同耕作措施和不同水氮处理下探讨小麦农田 N₂O 排放特征,表明不同管理措施会对 N₂O 排放产生一定的影响,其中 APSIM 模型对于 N₂O 年季排放模拟效果较好。

纵观作物模拟模型对 N₂O 温室气体的研究,较多学者已经可以使用模型方法模拟出 N₂O 的排放。目前大部分研究局限于使用作物模型模拟 N₂O 排放,或是进行 N₂O 排放的局部敏感性分析,对 N₂O 气体排放的全局敏感性分析较少。基于此,以甘肃省定西市安定区安家坡实验点为研究区,以 APSIM-Wheat 模型为研究对象,采用 EFAST 全局敏感性分析法,探讨 APSIM 模型 N₂O 排放对作物品种参数、土壤参数、气象参数和田间管理参数的全局敏感性分析,旨在为 APSIM 模型参数本地化及 N₂O 气体减排提供依据。

1 材料与方法

1.1 APSIM-Wheat 模型及参数

APSIM 是一种广泛应用于农业领域的作物模拟模型,该模型中不同模块负责模拟土壤水分、养分和温度等土壤特征,以及作物生长、发育、蒸腾作用和产量等作物特征。在每天的时间步长上相互作用,并由气候数据和作物管理活动驱动。本研究以 APSIM-Wheat 为春小麦生长模拟框架,在作物品种数据、土壤数据、气象数据、管理数据驱动下,实现小麦生长过程中 N₂O 气体排放的动态模拟。

检验模型参数的敏感性需要采取一种合适的敏感性分析方法外加合理的样本空间^[12]。本研究采用 EFAST 方法对 APSIM 的敏感性分析,选取作物品种参数、土壤参数、气象参数、田间管理参数四类。作物品种参数代码、含义及取值范围如表 1 所示,其中作物品种参数结合相关文献及地区小麦品种设定^[13-14]。土壤参数代码、含义及取值范围如表 2 所示,土壤参数取实测值的最大值和最小值为上下限。气象数据和田间管理参数代码、含义及取值范围如表 3 所示。气象参数根据前人研究上下限范围,结合当地实测数据选择上下浮动 10%^[15]。田间管理参数以实测值为准并结合相关文献设定其上下限范围^[13]。

表 1 APSIM-Wheat 模型作物品种参数选择及范围

Table 1 Selection and range of crop varieties for APSIM-Wheat model

参数 Parameter	下限 Lower limit	上限 Upper limit
春化敏感性指数 Vernalization sensitivity index	1	5
光周期作物敏感指数 Photoperiod crop sensitivity index	1	5
潜在灌浆速率 Potential grouting rate /(g · grain ⁻¹ · d ⁻¹)	0.002	0.004
开花期到灌浆期谷物潜在增长率 Potential growth rate from anthesis to filling stage/(g · grain ⁻¹ · d ⁻¹)	0.0005	0.002
出苗期到拔节期积温 Accumulated temperature from seedling stage to jointing stage/(°C · d ⁻¹)	200	600
初花期积温 Accumulated temperature at early flowering stage/(°C · d ⁻¹)	200	650
开花期积温 Accumulated temperature during flowering stage/(°C · d ⁻¹)	80	180
灌浆期积温 Accumulated temperature during filling stage/(°C · d ⁻¹)	470	750
灌浆期到成熟期积温 Accumulated temperature from filling stage to maturity stage/(°C · d ⁻¹)	500	800

表 2 APSIM 模型土壤参数选择及范围

Table 2 Selection and range of soil parameters of APSIM model

参数 Parameter	下限 Lower limit	上限 Upper limit
萎蔫系数 Wilting coefficient/(mm · mm ⁻¹)	0.083	0.139
土壤容重 Soil bulk density/(g · cm ⁻³)	1.03	1.38
风干含水量 Air dry moisture content/(mm · mm ⁻¹)	0.012	0.117
田间持水量 Field water capacity/(mm · mm ⁻¹)	0.239	0.293
饱和持水量 Water saturation capacity/(mm · mm ⁻¹)	0.430	0.568
小麦萎蔫系数 Wilting coefficient of wheat	0.083	0.235
小麦吸水系数 Water uptake coefficient of wheat	0.027	0.107
地表反照率 Surface albedo	0.093	0.107
土壤有机碳 Soil organic carbon	0.186	1.02
土壤酸碱度 Soil pH	7.73	8.98
裸土径流曲线数 Number of bare soil runoff curves	69.75	80.25
土壤铵根离子 Ammonium ion concentration/(kg · hm ⁻²)	3.813	6.73
土壤硝酸根离子 Nitrate concentration/(kg · hm ⁻²)	14.32	24.61

表 3 APSIM 模型气象及田间管理参数选择及范围

Table 3 Selection and range of meteorological and field management parameters of APSIM model

参数 Parameter	下限 Lower limit	上限 Upper limit
日最高温度 Daily maximum temperature/°C	-10%	10%
日最低温度 Daily minimum temperature/°C	-10%	10%
降雨量 Rainfall/mm	-10%	10%
太阳辐射 Solar radiation/(MJ · m ⁻²)	-10%	10%
施氮量 Amount of nitrogen application/(kg · hm ⁻²)	105	150
种植密度 Planting density/(Plants · m ⁻²)	168	205
播种间距 Seed spacing/(Plants · m ⁻²)	225	275
播种深度 Depth of sowing/mm	30	40

1.2 站点状况及数据来源

本研究所需的试验数据来源于甘肃省定西市安定区安家坡 (35°35'N, 104°98'E, 海拔 2 000 m)。定西气候年均气温 5.7~7.7°C, 无霜期 122~160 d, 年均降雨量 350~600 mm, 主要集中在 7—9 三个月, 且多以暴雨的形式出现, 而蒸发量高达 1 400 mm 以上。

试验于 2019—2021 年的春小麦生长季进行, 小麦品种为‘定西 35 号’。试验地 1 m 土层田间质量持水率为 26.9%~27.4%, 凋萎含水率为 9%~11%, 土壤容重为 1.2 g · cm⁻³。气象数据从当地气象局获取, 模型土壤模块中的土壤参数来源于实测数据。

1.3 EFAST 方法

设有模型 $y=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 通过傅里叶转换为 $y=f(s)$, 转换函数为:

$$x_i = 0.5 + \frac{\arcsin(\sin(w_i s + \varphi_i))}{\pi} \quad (1)$$

$$y = f(s) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} (A_p \cos(ps) + B_p \sin(ps)) \quad (2)$$

$$A_p = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(px) dx \quad (3)$$

$$B_p = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(px) dx \quad (4)$$

式中, w_i 为 x_i 的震荡周期, 取 $i=1, 2, 3, \dots, m$; φ_i 为 x_i 的随机起始阶; s 为数值参数; p 为傅里叶调整变量。

模型差异性 V_i 为:

$$V_i = \sum_{p \in Z} \Lambda_p w_i = 2 \sum_{p=1}^{\infty} \Lambda_p w_i \quad (5)$$

$$\Lambda_p = A_p^2 + B_p^2 \quad (6)$$

$$p \in Z = \{-\infty, \dots, -1, 1, \dots, +\infty\}$$

$$V = \sum_{p \in z} \Lambda_p = 2 \sum_{p=1}^{\infty} \Lambda_p \quad (7)$$

$$A_p \approx \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} f(s_k) \cos(ps_k) \quad (8)$$

$$B_p \approx \frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} f(s_k) \sin(ps_k) \quad (9)$$

采集总数为:

$$V = \sum_{1 \leq i \leq m} V_i + \sum_{1 \leq i \leq m} V_{ij} + \dots + V_{12 \dots m} \quad (10)$$

式中, s_k 为第 k 个值; V_i 为 x_i 的方差; V_{ij} 为 x_i 通过 x_j 的方差; $V_{1,2,\dots,m}$ 为 x_i 与 m 个参数的方差。

一阶敏感指数为:

$$S_i = \frac{V_i}{V} \quad (11)$$

全阶敏感指数为:

$$S_{Ti} = \frac{V - V_{-i}}{V} \quad (12)$$

1.4 模型参数敏感性分析方案

本研究采用基于 EFAST 方法对 APSIM 模型进行全局敏感性分析。使用 R 语言进行批量处理,使用 Rstudio 自带的 apsimx、tidyverse、xml2 等包处理 APSIM 的作物品种参数、土壤参数、气象参数和田间管理参数之间的交互作用。使用 SimLab2.2 进行模型的敏感性分析。具体方案如下:

(1) 作物品种参数敏感性分析。结合地区小麦品种实测值并参考相关文献为敏感性分析设置合理的上下限。

(2) 土壤参数敏感性分析。以试验区土壤相关参数实测值的最大值和最小值作为基准设置敏感性分析的上下限。

(3) 气象参数敏感性分析。在试验区气象数据的实测值基础上,参考相关文献上下浮动 10% 作为敏感性分析取值范围。

(4) 管理参数的敏感性分析。结合试验区作物种植特点,取试验区测量管理参数的平均值作为输入,以实测值的最大值和最小值作为模型敏感性分析的上下限。

在对模型的全局敏感性分析时,作物品种参数、土壤参数、气象参数和管理参数的随机取样均符合正态分布。本研究采用的 EFAST 方法共采样 2494 组,模型共运行 74820 次。本研究采用敏感性指数(S_i)来定量分析各个参数对小麦 N₂O 气体排放的全局敏感性分析。在对 APSIM 模型进行 EFAST 方法的全局敏感性分析时,根据前人在 EFAST 方法中界定的一阶敏感性(S_i)超过 0.05 和

全阶敏感性(S_{Ti})高于 0.1 作为判断是否敏感^[16]。

2 结果与分析

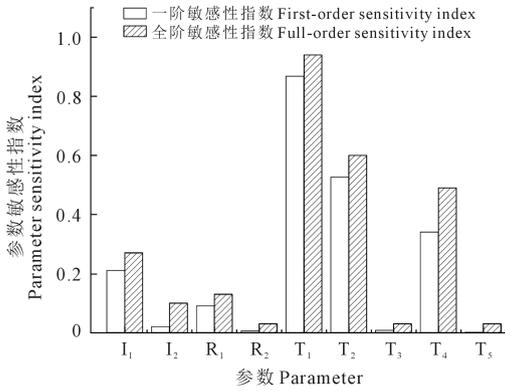
2.1 品种参数敏感性分析

春小麦 9 个作物品种参数对 N₂O 气体排放一阶和全阶敏感性分析如图 1 所示。出苗到拔节期积温是影响小麦 N₂O 气体排放最为敏感的参数。出苗到拔节期积温的一阶敏感性指数为 0.868,全阶敏感性指数为 0.943,即出苗到拔节期积温可解释 N₂O 气体排放变化方差的 94.3%。平均全阶敏感性指数大于 0.10 的因子有出苗到拔节期积温、初花期积温、灌浆期积温、春化敏感指数、潜在灌浆速率、光周期作物敏感指数,其平均全阶敏感性指数分别为 0.943、0.600、0.491、0.275、0.135、0.105,其他因子影响较小;一阶敏感性指数分别为 0.868、0.526、0.343、0.210、0.093、0.020。光周期作物敏感指数的一阶敏感性指数小于 0.05,其一阶敏感性指数仅为 0.020,说明光周期作物敏感指数主要通过其他参数的交互作用影响 N₂O 气体排放。

据图 1 全阶敏感性指数结果来看,春小麦 9 个作物品种参数中有 6 个参数对 N₂O 气体排放影响较大,其影响大小表现为出苗到拔节期积温 > 初花期积温 > 灌浆期积温 > 春化敏感性指数 > 潜在灌浆速率 > 光周期作物敏感指数。影响小麦农田 N₂O 排放的参数多与积温有关。积温主要影响植株氮素代谢和微生物活动,较高的积温有利于小麦的生长和氮素代谢,从而促进硝化和反硝化作用,增加 N₂O 排放。春化敏感性指数反映了小麦品种对低温春化作用的敏感程度,不同春化敏感性的小麦品种在生长周期和氮素代谢上可能存在差异。潜在灌浆速率是衡量小麦籽粒灌浆速度的重要指标,虽然它直接关联的是小麦的产量和品质,但较快的灌浆速率可能意味着更旺盛的生理活动和氮素代谢。光周期作物敏感指数反映了小麦品种对日照长度变化的敏感程度,虽然这一参数主要影响小麦的开花和结实,但会通过调节植株的生长速率和氮素需求来间接影响 N₂O 排放。

2.2 土壤参数敏感性分析

土壤参数对 N₂O 气体排放的敏感性分析如图 2 所示,田间持水量是影响小麦 N₂O 气体排放最为敏感的参数,田间持水量的一阶敏感性指数为 0.303,全阶敏感性指数为 0.389,即田间持水量可解释 N₂O 气体排放变化方差的 38.3%。平均全阶敏感性指数大于 0.10 的因子有田间持水量、土壤容重、小麦萎蔫系数、小麦吸水系数,其平均全阶敏感性指数分别



注: I₁: 春化敏感性指数; I₂: 光周期作物敏感指数; R₁: 潜在灌浆速率; R₂: 开花期到灌浆期谷物潜在增长率; T₁: 出苗期到拔节期积温; T₂: 初花期积温; T₃: 开花期积温; T₄: 灌浆期积温; T₅: 灌浆期到成熟期积温。

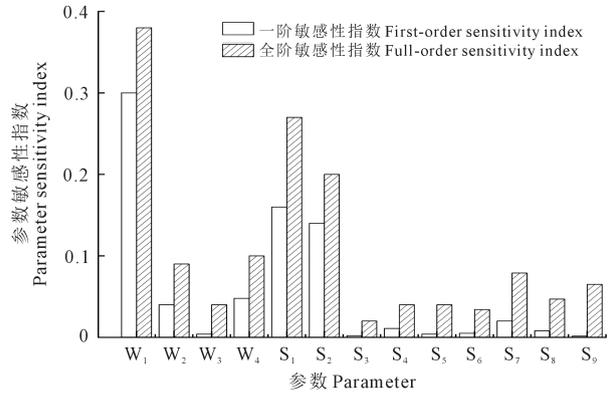
Note: I₁: Vernalization sensitivity index; I₂: Photoperiod crop sensitivity index; R₁: Potential grouting rate; R₂: Potential growth rate from anthesis to filling stage; T₁: Accumulated temperature from seedling stage to jointing stage; T₂: Accumulated temperature at early flowering stage; T₃: Accumulated temperature during flowering stage; T₄: Accumulated temperature during filling stage; T₅: Accumulated temperature from filling stage to maturity stage.

图 1 春小麦作物品种参数一阶敏感性指数和全阶敏感性指数分析结果

Fig.1 Analysis results of first-order sensitivity index and full-order sensitivity index of spring wheat crop variety parameters

为 0.389、0.275、0.207、0.100, 其他因子影响较小; 一阶敏感性指数分别为 0.303、0.162、0.140、0.048。小麦吸水系数的一阶敏感性指数小于 0.05, 其一阶敏感性指数仅为 0.048, 说明小麦吸水系数主要通过其他参数的交互作用影响 N₂O 气体排放。

根据图 2 全阶敏感性指数分析结果来看, 春小麦 13 个土壤参数中有 4 个参数对 N₂O 气体排放影响较大, 其影响大小表现为田间持水量 > 土壤容重 > 小麦萎蔫系数 > 小麦吸水系数。田间持水量反映了土壤保持水分的能力, 促进土壤微生物的硝化和反硝化作用, 从而增加 N₂O 的排放。土壤容重反映了土壤的紧实程度, 影响土壤的通气性和水分运动, 从而影响硝化和反硝化作用速率。小麦萎蔫系数反映了小麦植株在水分胁迫下的生理反应。当土壤水分不足时, 小麦植株可通过减少蒸腾作用来保存水分, 这会影响土壤的微生物活动。因此, 小麦萎蔫系数与 N₂O 排放之间存在一定的相关性。小麦吸水系数反映了小麦根系从土壤中吸收水分的能力。吸水系数的变化可能会影响土壤水分的分布和微生物的活动区域。尽管其对 N₂O 排放的影响相对较小, 但仍然是一个重要的考虑因素。



注: W₁: 田间持水量; W₂: 饱和持水量; W₃: 风干含水量; W₄: 小麦吸水系数; S₁: 土壤容重; S₂: 小麦萎蔫系数; S₃: 萎蔫系数; S₄: 土壤酸碱度; S₅: 土壤有机碳; S₆: 地表反照率; S₇: 裸土径流曲线数; S₈: 土壤硝酸根离子; S₉: 土壤铵根离子。

Note: W₁: Field water capacity; W₂: Water saturation capacity; W₃: Air dry moisture content; W₄: Water uptake coefficient of wheat; S₁: Soil bulk density; S₂: Wilting coefficient of wheat; S₃: Wilting coefficient; S₄: Soil pH; S₅: Soil organic carbon; S₆: Surface albedo; S₇: Number of bare soil runoff curves; S₈: Nitrate concentration; S₉: Ammonium ion concentration.

图 2 土壤参数一阶敏感性指数和全阶敏感性指数分析结果

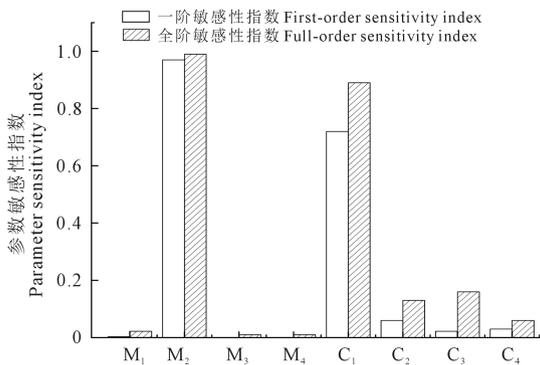
Fig.2 Analysis results of first-order sensitivity index and full-order sensitivity index of soil parameters

2.3 气象参数和管理参数敏感性分析

气象参数和管理参数对 N₂O 气体排放的敏感性分析如图 3 所示, 其中日最高温度是影响小麦 N₂O 气体排放最为敏感的参数。日最高温度的一阶敏感性指数为 0.726, 全阶敏感性指数为 0.894, 即日最高温度可解释 N₂O 气体排放变化方差的 89.4%。平均全阶敏感性指数大于 0.10 的因子有日最高温度、日最低温度、降雨量, 其全阶敏感性指数分别为 0.894、0.138、0.163; 其一阶敏感性指数分别为 0.726、0.060、0.022。降雨量的一阶敏感性指数小于 0.05, 表明降雨量是通过其他参数的协同效应影响 N₂O 气体排放。

管理参数对 N₂O 气体排放的敏感性分析中, 施肥量是影响小麦 N₂O 气体排放最为敏感的参数。施肥量的一阶敏感性指数为 0.970, 全局敏感性指数为 0.990, 即施肥量可解释 N₂O 气体排放变化方差的 99%, 其他因子影响较小。

根据图 3 全阶敏感性指数分析结果来看, 春小麦的气象参数和管理参数中, 有 4 个参数对 N₂O 气体排放影响较大, 其影响大小表现为施氮量 > 日最高温度 > 降雨量 > 日最低温度。施氮量对小麦农田



注: M₁: 种植密度; M₂: 施氮量; M₃: 播种间距; M₄: 播种深度; C₁: 日最高温度; C₂: 日最低温度; C₃: 降雨量; C₄: 太阳辐射。

Note: M₁: Planting density; M₂: Amount of nitrogen application; M₃: Seed spacing; M₄: Depth of sowing; C₁: Daily maximum temperature; C₂: Daily minimum temperature; C₃: Rainfall; C₄: Solar radiation.

图 3 气象参数和管理参数一阶敏感性指数和全阶敏感性指数分析结果

Fig.3 Analysis results of first-order sensitivity index and full-order sensitivity index of meteorological and management parameters

N₂O 气体排放影响最大。具体来说,施氮量的增加会提高土壤中硝化和反硝化作用的底物浓度,同时施氮会促进土壤中铵态氮向硝态氮的转化,从而促进 N₂O 的产生和排放。日最高温度的变化会加速土壤中的微生物活动,特别是硝化和反硝化过程均会产生 N₂O。降雨量也是影响 N₂O 排放的重要因素,雨水可以为土壤微生物提供必要的水分条件,促进微生物活动,从而影响 N₂O 的排放;同时,降雨还可以影响土壤的通气状况,进而影响 N₂O 的排放。日最低温度对 N₂O 排放的影响相对较小,但仍然是一个重要的考虑因素。

3 讨论

从作物品种参数全局敏感性分析来看,出苗到拔期节积温、初花期积温、灌浆期积温是影响 N₂O 排放敏感的参数。我们发现小麦 N₂O 气体的敏感参数与前人对小麦产量敏感参数结果相似。孙海军等^[17]也证实了小麦产量与土壤 N₂O 排放存在一定联系。小麦生长发育和土壤氮素转化等过程相互关联。植物排放 N₂O 不是单一的过程,而是包括氮同化等在内的一系列复杂过程的综合结果^[18]。小麦 N₂O 气体排放多与作物品种积温、春化和光周期等参数相关。APSIM 模型中硝化和反硝化反应以积温等相关的参数进行计算,积温通过影响作物的生长发育进而影响 N₂O 的排放,同时与 APSIM 模

型是基于积温设计所得结论相符^[19]。

从土壤参数全局敏感性分析来看,对小麦 N₂O 气体排放最敏感的参数是与土壤水分因子相关的参数,主要包括田间持水量、土壤容重、小麦萎蔫系数、小麦吸水系数。徐文彬等^[20]也得出 N₂O 排放与土壤水分因子相关,其中田间持水量和土壤容重是影响 N₂O 气体排放敏感性较大的参数。根据 APSIM 模拟 N₂O 排放机理,水分限制因子对 N₂O 排放具有较大影响,水分限制因子通过限制土壤与植物的蒸腾作用而影响植物根系硝化与反硝化反应产生的 N₂O 气体^[21]。APSIM 模拟 N₂O 与土壤铵根离子、硝酸根离子浓度相关,土壤容重越大其含有的铵根离子和硝酸根离子浓度也越高,从而增加了 N₂O 气体排放量。APSIM 计算 N₂O 气体涉及铵根离子浓度、硝酸根离子浓度、有机碳含量,但是本研究中这三类参数却均不敏感。考虑到 APSIM 模型只能设置初始值进行敏感性分析,并不能随生长周期实时设置土壤铵根离子和硝酸根离子浓度、有机碳含量其变化浓度,所以在模拟部分土壤参数时存在局限性。本研究发现土壤 pH 值对 N₂O 气体的排放不敏感,Highton 等^[3]也证实了 N₂O 排放潜力与 pH 值无关,然而成思潮等^[9]使用 DNDC 模型模拟 N₂O 排放得出 pH 是影响其最敏感的参数。这可能由于模型间的差异所致,APSIM 主要是通过硝化和反硝化反应公式计算 N₂O 排放,而 DNDC 模型则更考虑 pH 值对 N₂O 排放的影响。吴立峰等^[22]对作物的敏感性进行分析时发现各个模型侧重点不同,不同的模型处理试验数据会产生不同的输出结果。

从气象参数的全局敏感性分析来看,日最高温度是影响 N₂O 气体排放最敏感的参数,这与 Li 等^[23]结论一致。同时 APSIM 模拟 N₂O 气体排放机理受温度因子的限制,Wang 等^[24]也证实了增温会显著增加小麦排放 N₂O 的累积量。本研究中降雨对 N₂O 排放敏感性相对影响较弱,土壤水分为 APSIM 模拟 N₂O 排放的限制因子,甘肃省地处内陆,年降雨量具有明显的地区分带特征,降雨频率和强度对土壤水分含量具有重要影响,所以导致降雨的敏感性低于日最高温度。太阳辐射对 N₂O 气体排放的影响不敏感,这与马莉等^[25]研究结果不一致。APSIM 模型计算 N₂O 排放量主要是通过硝化与反硝化公式计算,并没有考虑太阳辐射的影响,在后续研究中可以考虑优化 APSIM 模型 N₂O 排放通量公式来解决。

从田间管理参数全局敏感性分析来看,施氮量是影响小麦 N_2O 气体排放最敏感的参数,Wang 等^[26]同时也证实了施氮量对 N_2O 气体排放具有显著影响。本研究在已有研究基础上增加了种植密度、播种间距和播种深度对 N_2O 排放的影响,结果显示均不敏感。这也表明了 APSIM 模型中对 N_2O 排放的模拟实际是对氮素的分配和转化过程的模拟。

本文基于 EFAST 法对 APSIM 模型模拟西北地区旱作春小麦 N_2O 排放的全局敏感性进行研究,为参数本地化提供了一定的技术支持。在具体的农田管理实践中,应采取系统管理的方式,综合考虑各个田间管理参数的影响,以协调各要素之间的作用,达到控制 N_2O 排放、科学增产减排的目标。

4 结 论

出苗到拔节期积温、初花期积温、灌浆期积温、春化敏感系数、潜在灌浆速率及光周期敏感是影响春小麦 N_2O 排放敏感的作物品种参数。可将原来需要测量的 9 个参数降低至 6 个,降低了参数优化的难度。田间持水量、土壤容重、小麦萎蔫系数、小麦吸水系数是影响春小麦 N_2O 排放敏感的土壤参数;在使用 APSIM 模型模拟春小麦 N_2O 排放潜力需在实际测量土壤中降低这 4 个参数的误差。施氮量和日最高温度是影响土壤 N_2O 排放最敏感的田间管理和气象参数,降雨量和日最低温度是影响春小麦 N_2O 排放潜力较为敏感的气象参数,土壤参数可由之前需要测量的 13 个参数降低至 4 个,气象参数由之前需要测量的 4 个参数降低至 3 个。

参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 谭显春, 戴瀚程, 顾佰和, 等. IPCC AR6 报告历史排放趋势和驱动因素核心结论解读[J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(5): 538-545.
TAN X C, DAI H C, GU B H, et al. Analysis on the key findings related to emission trends and drivers from the IPCC AR6 report[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(5): 538-545.
- [3] HIGHTON M P, BAKKEN L R, DÖRSCH P, et al. Soil N_2O emission potential falls along a denitrification phenotype gradient linked to differences in microbiome, rainfall and carbon availability [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 150: 108004.
- [4] 张凡, 王政, 李旭祥, 等. 西北旱区农田土壤 N_2O 排放空间变化特

征及影响因素探讨[J]. *地球环境学报*, 2016, 7(3): 301-307.

- ZHANG F, WANG Z, LI X X, et al. Spatial variation and influence factors of cropland N_2O emission in the Northwest arid area [J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(3): 301-307.
- [5] 张燕, 董莉霞, 李广, 等. 西北春麦区 APSIM-Wheat 模型作物参数全局敏感性分析与比较[J]. *麦类作物学报*, 2024, 44(9): 1195-1205.
ZHANG Y, DONG L X, LI G, et al. Global sensitivity analysis and comparison of crop parameters of APSIM-wheat in northwest spring wheat region[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(9): 1195-1205.
- [6] 秦格霞, 吴静, 李纯斌, 等. 不同草地类型 WOFOST 模型参数敏感性分析[J]. *草业学报*, 2022, 31(5): 13-25.
QIN G X, WU J, LI C B, et al. Sensitivity analysis of WOFOST model crop parameters in different grassland types [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(5): 13-25.
- [7] 高浚, 周保平, 王昱, 等. 不同参数取值范围下 CROPGRO-cotton 模型全局敏感性和不确定性分析[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(9): 195-202.
GAO J, ZHOU B P, WANG Y, et al. Global sensitivity and uncertainty analysis of CROPGRO-cotton model under different parameter value ranges [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(9): 195-202.
- [8] 金梦潇, 田勇, LANCIA M, 等. 基于 Morris, Sobol 和 EFAST 的 LID 设施模型参数全局敏感性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2022, (6): 104-110.
JIN M X, TIAN Y, LANCIA M, et al. Global sensitivity analysis of LID facility model parameters based on Morris, Sobol and EFAST [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022, (6): 104-110.
- [9] 成思潮, 李广, 姚瑶, 等. DNDC 模型模拟不同施肥水平下旱作麦田土壤 N_2O 排放及敏感性分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(4): 44-54.
CHENG S C, LI G, YAO Y, et al. Simulation and sensitivity analysis of N_2O emission in dryland wheat fields at different fertilization levels using the DNDC model [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(4): 44-54.
- [10] 刘兴宇, 李广, 袁建钰, 等. 不同耕作措施下温度升高对旱作春小麦农田土壤 N_2O 排放的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(4): 177-184.
LIU X Y, LI G, YUAN J Y, et al. Effects of temperature rise under different tillage measures on N_2O emission in dryland spring wheat farmland soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 177-184.
- [11] 马晨光, 蔡焕杰, 卢亚军. 基于 APSIM 模型不同水氮处理下 N_2O 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_2O emission from farmland using the APSIM model [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 120-129.
- [12] 魏学厚, 聂志刚. 基于 APSIM 模型的旱地小麦叶面积指数相关参数敏感性分析及优化[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2024, 32(1): 119-129.

- WEI X H, NIE Z G. Sensitivity analysis and optimization of leaf area index related parameters of dryland wheat based on APSIM model[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2024, 32(1): 119-129.
- [13] 邓晓全, 董莉霞, 李广, 等. 西北春麦区 Apsim-Wheat 模型参数全局敏感性分析[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(6): 746-754.
- DENG X L, DONG L X, LI G, et al. Global sensitivity analysis of Apsim-Wheat model parameters in northwest spring wheat region[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(6): 746-754.
- [14] 崔金涛, 丁继辉, NEBI Y, 等. 基于 EFAST 的 CERES Wheat 模型土壤参数敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 276-283.
- CUI J T, DING J H, NEBI Y, et al. Sensitivity analysis of soil input parameters of CERES-Wheat model based on EFAST method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 276-283.
- [15] 崔金涛, 邵光成, 林洁, 等. 基于 EFAST 的 CROPGRO-Tomato 模型参数全局敏感性分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 237-244.
- CUI J T, SHAO G C, LIN J, et al. Global sensitivity analysis of CROPGRO-Tomato model parameters based on EFAST method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 237-244.
- [16] DEJONGE K C, ASCOUGH J C, AHMADI M, et al. Global sensitivity and uncertainty analysis of a dynamic agroecosystem model under different irrigation treatments[J]. Ecological Modelling, 2012, 231: 113-125.
- [17] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂影响小麦产量、N₂O 与 NH₃ 排放的研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 876-881.
- SUN H J, MIN J, SHI W M, et al. Effects of nitrification inhibitor application on wheat grain yield, N₂O emission and NH₃ volatilization[J]. Soils, 2017, 49(5): 876-881.
- [18] 胡慧娟, 袁丹, 曾佳瑞, 等. 植物排放 N₂O 研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(2): 345-354.
- HU H X, YUAN D, ZENG J R, et al. Advances in plant nitrous oxide N₂O emissions[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2021, 29(2): 345-354.
- [19] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 148-157.
- HE L, ZHAO G, JIN N, et al. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 148-157.
- [20] 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): 1-8.
- XU W B, LIU W B, LIU G S. Effect of temperature on N₂O emissions from subtropical upland soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 1-8.
- [21] 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 C, LI S Q, LIU S W, 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.
- [22] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 不同灌水水平下 CROPGRO 棉花模型敏感性和不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 55-64.
- WU L F, ZHANG F C, FAN J L, et al. Sensitivity and uncertainty analysis for CROPGRO-cotton model at different irrigation levels[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(15): 55-64.
- [23] LI J Z, WANG L G, LUO Z K, et al. Reducing N₂O emissions while maintaining yield in a wheat-maize rotation system modelled by APSIM[J]. Agricultural Systems, 2021, 194: 103277.
- [24] WANG Y Y, HU Z H, SHANG D Y, et al. Effects of warming and elevated O₃ concentrations on N₂O emission and soil nitrification and denitrification rates in a wheat-soybean rotation cropland[J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113556.
- [25] 马莉, 娄运生, 王勇, 等. 模拟太阳辐射减弱对不同播期冬小麦田 N₂O 排放影响及光谱估算[J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(6): 1390-1401.
- MA L, LOU Y S, WANG Y, et al. Effects of sowing dates on N₂O emissions from winter wheat fields under different shading conditions[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(6): 1390-1401.
- [26] WANG L, HE D, WANG E L, et al. Nitrogen management to reduce GHG emissions while maintaining high crop productivity in temperate summer rainfall climate[J]. Field Crops Research, 2023, 290: 108761.