

基于 DNDC 的夏玉米农田控氨稳产氮肥和秸秆措施优化

赵政鑫^{1,2} 王晓云^{1,2} 田雅洁^{1,2} 王锐^{1,2} 彭青^{1,2} 蔡焕杰^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区农业节水研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为明确未来气候条件下关中地区夏玉米农田适宜的施肥-秸秆措施以控氨稳产及应对气候变化, 基于 2019—2020 年大田试验, 进行不同氮肥种类和不同秸秆还田模式对农田土壤氨挥发和作物产量的影响研究。根据田间实测数据对 DNDC 模型进行校正与验证, 利用验证后模型模拟未来气候条件下不同施肥-秸秆措施对夏玉米产量及土壤氨挥发累积量的影响, 综合考虑产量和生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量, 最终提出未来气候条件下关中地区夏玉米农田的优化控氨稳产施肥-秸秆措施。结果表明: 校正后的 DNDC 模型可以很好地模拟不同施肥-秸秆措施条件下夏玉米生长和农田土壤氨挥发累积量。在未来气候条件下, 秸秆还田会显著提高夏玉米产量并降低生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量。在 RCP4.5 排放情景下, 未来 2030—2090 年, 秸秆全量还田配施 180 kg/hm² 稳定性氮肥生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量较低且产量较高; 在 RCP8.5 排放情景下, 未来 2030—2050 年和 2070—2090 年, 秸秆全量还田配施 180 kg/hm² 稳定性氮肥和秸秆全量还田配施 162 kg/hm² 稳定性氮肥生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量较低且产量较高。因此, 在 RCP4.5 排放情景下, 秸秆全量还田配施 180 kg/hm² 稳定性氮肥为关中地区 2030—2090 年较为优化的控氨稳产施肥-秸秆措施; 在 RCP8.5 排放情景下, 秸秆全量还田配施 180 kg/hm² 稳定性氮肥和秸秆全量还田配施 162 kg/hm² 稳定性氮肥分别为关中地区 2030—2050 年和 2070—2090 年较为优化的控氨稳产施肥-秸秆措施。本研究可为关中地区实现农业可持续发展及稳产减排提供参考。

关键词: 夏玉米; 秸秆还田; 土壤氨挥发; DNDC 模型; 气候变化

中图分类号: S146

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)02-0341-10

OSID:



Optimization of Nitrogen Fertilizer and Straw Measures to Control Ammonia and Stabilize Nitrogen Yield in Summer Maize Farmland Based on DNDC Model

ZHAO Zhengxin^{1,2} WANG Xiaoyun^{1,2} TIAN Yajie^{1,2} WANG Rui^{1,2} PENG Qing^{1,2} CAI Huanjie^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the significance of suitable fertilization straw measures for summer maize farmland in Guanzhong region in the future climate conditions to control ammonia and stabilize yield and cope with climate change, based on the two-year field experiment conducted in 2019—2020, the impact of different nitrogen fertilizer types and different straw returning modes on soil ammonia volatilization and crop yield in farmland was studied. The DNDC model was calibrated and validated according to the field measured data, and the validated model was used to simulate the effects of different fertilization - straw measures on summer maize yield and soil ammonia volatilization accumulation under future climatic conditions. Taking into account the yield and the cumulative amount of soil ammonia volatilization of maize per production unit, the optimal ammonia control and stable yield fertilization - straw measures for summer maize farmland in Guanzhong area under future climatic conditions were finally put forward. The results showed that the corrected DNDC model could well simulate summer maize growth and soil ammonia volatilization accumulation under different fertilization - straw measures. Under future climatic

收稿日期: 2022-03-28 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879223)和国家重点研发计划项目(2016YFC0400201)

作者简介: 赵政鑫(1997—), 男, 博士生, 主要从事农业资源高效利用研究, E-mail: 15840121398@nwafu.edu.cn

通信作者: 蔡焕杰(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业资源高效利用研究, E-mail: caihj@nwafu.edu.cn

conditions, straw returning would significantly increase summer maize yield and reduce soil ammonia volatilization accumulation per unit yield of maize. Under the RCP4.5 emission scenario, in the future from 2030 to 2090, the soil ammonia volatilization accumulation amount per unit yield of maize was lower and the yield was higher when the full amount of straw was returned to the field and 180 kg/hm² stable nitrogen fertilizer was applied to the field. Under the RCP8.5 emission scenario, in the future of 2030—2050 and 2070—2090, the full amount of straw was returned to the field with 180 kg/hm² of stable nitrogen fertilizer and the full amount of straw was returned to the field with 162 kg/hm² of stable nitrogen fertilizer production unit, the soil ammonia volatilization accumulation in yield maize was lower and yield was higher. Therefore, under the RCP4.5 emission scenario, the full amount of straw returned to the field and the application of 180 kg/hm² stable nitrogen fertilizer was more optimal fertilization – straw measure for controlling ammonia production and stabilizing production in Guanzhong area from 2030 to 2090. Under the RCP8.5 emission scenario, the combination of 180 kg/hm² stable nitrogen fertilizer and 162 kg/hm² stable nitrogen fertilizer combined with the full amount of straw returning to the field were the optimal fertilization – straw measures for 2030—2050 and 2070—2090 in Guanzhong area, respectively. The results can provide a reference for the realization of sustainable agricultural development and stable yield and emission reduction in Guanzhong area.

Key words: summer maize; straw returning; ammonia volatilization; DNDC model; climate change

0 引言

由于工业的快速发展、燃料的大量使用以及各种人为因素导致全球气候变暖,大气中 CO₂ 浓度升高,这些变化会严重影响农业生态环境和农作物种植结构^[1-2]。近年来,如何应对人为和自然因素引起的气候变化问题是科学研究领域面对的重要课题^[3]。1980 年陕西省化肥施用量为 2.964 × 10⁵ t,到 2020 年陕西省的化肥施用量为 2.117 × 10⁶ t,增长了 6.14 倍,每公顷化肥施用强度远超国际公认化肥施用上限 78%。每年全球施用的化学氮肥和有机氮肥中,由于氨挥发造成的氮肥损失率分别占施氮量的 23% 和 14%^[4],我国是最大的氨排放国家,其中农业生产体系中产生的 NH₃ 是氨排放主要来源^[5]。因此,制定合理的施肥管理措施,保证作物稳产并减少 NH₃、CO₂ 和 N₂O 等气体的排放对发展高效低碳农业和减缓气候变化具有重要意义^[6]。

秸秆还田能够提高土壤固碳能力及土壤肥力,是保护性耕作的核心措施之一^[7]。有研究表明,秸秆还田能够改善土壤耕层结构,对土壤有保水保墒的作用^[8],提高土壤酶活性^[9],进而提高作物产量。有研究利用 DNDC 模型对华北平原冬小麦-夏玉米农田水肥措施进行优化,结果表明 DNDC 模型可以准确模拟作物产量及 N₂O、CO₂、CH₄ 等气体的排放规律,可为农田水肥措施研究提供有效工具^[10-13]。田间施肥管理措施在施氮量和秸秆还田量上有很大的灵活性,田间试验处理的局限性可能错过最优稳产减排方案,且前人研究得到的较为优化的管理措施通常基于当前气候条件,由于在未来气候条件下温度、空气中 CO₂ 浓度等因素会发生变化,所以当前

最优的管理措施在未来气候条件下未必适用。因此,在气候变化的背景下,适合关中地区的控氨稳产措施需进一步研究。

本研究以关中地区夏玉米为研究对象,利用试验数据对 DNDC 模型进行校正与验证,并利用校正后硝化反硝化 (Denitrification – Decomposition, DNDC) 模型与未来不同排放情景下的气象数据结合,通过设置不同施肥-秸秆措施情景,以产量较高且单位产量土壤氨挥发累积量较低为目标,筛选适合未来气候条件的控氨稳产管理措施,为应对气候变化、保证作物稳产和控制农田氨排放以及减少环境污染提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2019 年 6—10 月和 2020 年 6—10 月在西北农林科技大学节水灌溉试验站进行 (108°04′ E, 34°17′ N, 海拔 521 m)。该区属典型的暖温带半湿润季风气候,年均无霜期 210 d,日照时数 2 164 h,年平均气温 12.9℃,多年平均降水量 550 mm。供试土壤类型为壤土, pH 值 7.82, 0 ~ 20 cm 耕层有机质质量比 14.48 g/kg,容重 1.40 g/cm³,速效磷质量比 13.67 mg/kg,土壤全氮质量比 0.95 g/kg,硝态氮质量比 2.5 mg/kg,铵态氮质量比 2.0 mg/kg。

1.2 田间试验

试验采用完全随机组合设计,试验因素为氮肥种类和秸秆还田模式。氮肥种类包括施用稳定性氮肥 (180 kg/hm², F1)、尿素 (180 kg/hm², F2); 秸秆还田模式设置两个水平,包括秸秆不还田 (N) 和秸秆全量还田 (S)。其中, F2 尿素施氮量参考前人研究

中推荐施氮量^[14], F1 稳定性氮肥施氮量与 F2 一致。稳定性氮肥在播种前一次性施入, 尿素在播种前以基肥形式施入总施氮量的 60%, 施肥方式为均匀撒播后进行人工翻耕, 以追肥形式在玉米抽雄期施入余下 40%, 施肥方式为均匀撒播。试验共 4 个处理, 重复 3 次, 共 12 个小区, 小区面积为 12 m²。秸秆还田方式为秸秆粉碎覆盖还田, 还田量为 8 000 kg/hm², 秸秆为小麦秸秆(碳氮比为 72)。试验作物为玉米, 品种为郑单 958, 种植密度为 6 × 10⁴株/hm²。2019 年和 2020 年播种时间分别为 6 月 15 日和 6 月 19 日, 追肥时间分别为 7 月 30 日和 7 月 26 日, 收获时间分别为 10 月 2 日和 9 月 30 日。夏玉米全生育期病虫害防治与田间除草管理与当地农户相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤 NH₃挥发累积量测定

土壤 NH₃挥发累积量采用通气法进行测定^[15], 测定频率为施肥后 7 d 内每天取样 1 次, 之后视测量结果每 3 d 取样 1 次, 后期可延长到 7 d 取样 1 次直至挥发量很低停止取样。取样结束后将收集的海绵立即装入 500 mL 装有 300 mL 浓度为 1 mol/L 氯化钾溶液的塑料瓶内进行震荡提取, 浸提液用 AA3 型流动分析仪(SEAL 公司, 德国)测定溶液中的铵态氮含量。由于试验条件原因, 在 2019 年只测量了追肥后各处理的土壤氨挥发累积量, 在 2020 年测量了夏玉米全生育期的土壤氨挥发累积量。

氨挥发累积量计算公式为

$$CAE = \sum_{i=1}^n \frac{0.01M_i}{0.99A} \tag{1}$$

式中 CAE——氨挥发累积量, kg/hm²
M_i——单个装置平均每次收集的氨量, mg
A——收集装置的横截面积, 取 0.017 7 m²
n——收集次数

其中 0.01 为转换系数, 0.99 为捕获装置回收率。

1.3.2 产量测定

夏玉米成熟期时, 在各处理小区随机选取 10 株玉米穗, 自然风干后, 测定其行粒数和穗行数, 然后进行人工脱粒和称量, 测定其百粒质量, 同时测定含水率, 并折算每公顷产量(含水率 14%)。

1.3.3 地上部生物量测定

在玉米生长各生育期(苗期、拔节期、吐丝期、灌浆期、成熟期)各处理试验小区内随机选取 3 株玉米, 贴地面采集玉米地上部分, 将样品茎、叶、果分部分装袋, 置于干燥箱内 105℃ 杀青 30 min, 之后 75℃ 干燥至质量恒定, 称取干质量。

1.3.4 籽粒氮素含量测定

将干燥后玉米籽粒称量后粉碎, 过 0.5 mm 筛, 用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 用 AA3 型流动分析仪测定玉米籽粒氮素含量。

1.4 DNDC 模型

DNDC 模型是基于生物化学和地球化学反应机制的描述农田生态系统中碳氮循环的计算机模拟表达^[16]。DNDC 由两部分组成, 第 1 部分包含土壤、作物和有机质分解 3 个模块, 通过输入的气候、土壤、作物和人类活动模拟土壤温度、含水率、NO₃⁻-N 含量和 NH₄⁺-N 含量等土壤理化性质的变化; 第 2 部分包含硝化作用、反硝化作用和发酵作用 3 个模块, 模拟微生物活动和计算 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体和 NH₃等气体的排放量^[17]。DNDC 模型运行需要气象数据、土壤参数、作物参数及田间管理措施相关参数。本研究中气象数据通过杨凌气象站获得, 土壤参数及田间管理措施根据实际输入, 其中稳定性氮肥中硝化抑制剂效率为 0.06, 有效时间为 90 d, 脲酶抑制剂效率为 0.25, 有效时间为 90 d, 虽然 DNDC 模型提供不同作物默认的作物参数, 如不同部位生物量占比、最适生长温度、作物需水量等, 但这些默认参数与实际不一定相符, 因此, 本研究利用前人研究结果或 2019 年试验实测值校准模拟产量进而确定作物参数。利用所得作物参数对两年夏玉米季进行模拟, 将模拟值与实测的土壤含水率、温度、作物产量及土壤氨挥发累积量对比进行模型验证, 通过标准均方根误差(nRMSE)和决定系数 R²评价模拟准确度, nRMSE 接近 0 表示实测数据与模拟数据一致性较好, R²接近 1 表示实测数据与模拟数据一致性较好, 校正后作物参数如表 1 所示。

表 1 DNDC 模型输入作物参数
Tab.1 DNDC model input crop parameters

参数	数值
最高生物量/(kg·hm ⁻²)	4 500
生物量比例(籽粒、叶、茎、根)	0.53、0.18、0.18、0.11
生物量碳氮比(籽粒、叶、茎、根)	31、60、60、42
总需氮量/(kg·hm ⁻²)	218.342
生长积温/℃	2 350
需水量/mm	120
最适温度/℃	30
固氮系数	1

采用 CMIP5 模式提供的未来气象数据(<https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>), 包括日最高温、日最低温、日降水量、日平均风速等气象要素。选

择 CMIP5 模式的 RCP4.5 (到 2100 年大气中 CO₂ 质量浓度达到 1.3 mg/L) 和 RCP8.5 (到 2100 年大气中 CO₂ 质量浓度达到 2.7 mg/L) 排放情景。为了减少不同模型对未来气象数据预测的不确定性,本研究选择常用的 33 个 GCM 模式(大气环流模式)的未来气象数据^[18],模拟结果取各 GCM 模式的均值。

1.5 未来气候条件下不同施肥管理情景设置

田间试验数据表明,秸秆还田会显著提高夏玉米产量,施用稳定性氮肥会显著降低土壤氮挥发量,因此,以 SF1 处理为基础,设置不同秸秆还田模式与不同施氮量随机组合,秸秆还田模式设置秸秆全量还田(8 000 kg/hm²)、秸秆半量还田(4 000 kg/hm²)、秸秆不还田(0 kg/hm²)3 种,稳定性氮肥施用量分别减少 30% (126 kg/hm²)、20% (144 kg/hm²)、10% (162 kg/hm²),不变(180 kg/hm²),增加 10% (198 kg/hm²)、20% (216 kg/hm²)、30% (234 kg/hm²),随机组合共 21 种情景(表 2),利用校正后的 DNDC 模型对不同情景的作物产量和土壤氮挥发累积量进行模拟,模拟结果取 33 种大气环流模式的均值,以产量较高和生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量较小为目标,筛选出未来不同时期不同排放情景下的最优稳产减排管理措施。单位产量玉米的土壤氮挥发累积量 I 计算式为

$$I = \frac{CAE}{Y} \tag{2}$$

式中 Y ——作物产量,kg/hm²

表 2 施肥-秸秆措施情景设置

Tab.2 Scenario setting of fertilization – straw measures

kg/hm ²					
秸秆还田量	施氮量	秸秆还田量	施氮量	秸秆还田量	施氮量
8 000 (全量还田)	126	4 000 (半量还田)	126	0 (不还田)	126
	144		144		144
	162		162		162
	180		180		180
	198		198		198
	216		216		216
	234		234		234

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型验证

2.1.1 夏玉米产量

图 1 为 2019 年和 2020 年各处理夏玉米产量的实测值和模拟值。2019 年和 2020 年夏玉米产量各处理实测结果由大到小依次为 SF1、SF2、NF1、NF2, 两年的模拟值各处理结果也表现相同的趋势。两年

产量实测值表明,施用相同种类氮肥时,秸秆还田会提高产量 4.96% ~ 7.52% 和 5.80% ~ 9.41%, 2019 年和 2020 年模拟值表明施用相同种类氮肥时,秸秆还田会提高产量 12.04% ~ 12.96% 和 12.20% ~ 12.40%。两年实测值表明,施用相同种类氮肥时,秸秆还田会提高籽粒氮素含量 3.14% ~ 4.51% 和 20.18% ~ 40.33%, 模拟值表明,施用相同种类氮肥时,秸秆还田会提高籽粒氮素含量 12.03% ~ 12.94% 和 12.03% ~ 12.38%。同时 2019 年和 2020 年的产量模拟值与实测值的 nRMSE 分别为 3.09% 和 4.29%, 籽粒氮素含量模拟值与实测值的 nRMSE 分别为 5.99% 和 14.00%, 表明产量和籽粒氮素含量的实测值与模拟值表现出较好的一致性,且校正后 DNDC 模型能反映出秸秆还田对产量和籽粒氮素含量的提高作用。

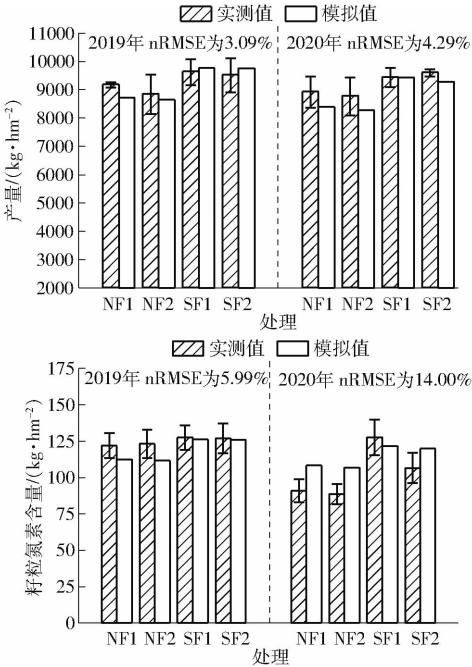


图 1 产量和籽粒氮素含量验证
Fig.1 Yield and grain nitrogen content verification

2.1.2 地上部生物量

图 2 为 2019 年和 2020 年各处理地上部生物量变化的实测值和模拟值拟合结果。2019 年和 2020 年实测值表明,有秸秆还田各处理收获时地上部生物量分别高于无秸秆还田各处理的 0.99% ~ 1.44% 和 3.15% ~ 5.08%, 施用稳定性氮肥各处理收获时地上部生物量分别高于施用尿素各处理 0.18% ~ 0.61% 和 3.15% ~ 5.09%; 两年的模拟值表明:有秸秆还田各处理收获时地上部生物量分别高于无秸秆还田各处理的 6.08% ~ 6.50% 和 6.03% ~ 6.09%, 施用稳定性氮肥各处理收获时地上部生物量分别高于施用尿素各处理 0.03% ~ 0.44% 和 0.68% ~ 0.79%, 2019 年和 2020 年各处

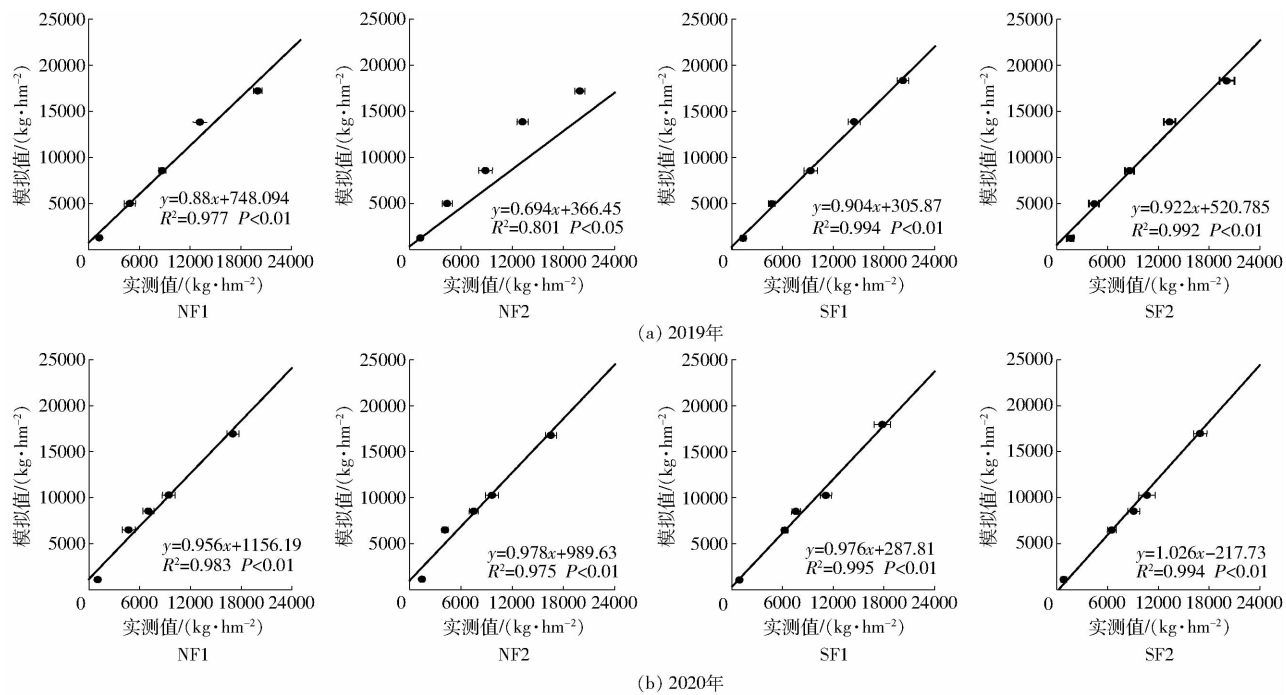


图 2 2019 年和 2020 年地上部生物量验证结果

Fig. 2 Verification of above-ground biomass in 2019 and 2020

理的实测值与模拟值的 R^2 分别为 0.801 ~ 0.994 和 0.983 ~ 0.995, 以上结果说明校正后 DNDC 模型能较好地模拟不同施肥-秸秆措施对夏玉米地上部生物量的影响。

2.1.3 土壤氨挥发累积量

图 3 为 2019 年夏玉米追肥后和 2020 年全生育期的土壤氨挥发累积量实测值和模拟值。实测结果表明, 2019 年追肥后施用稳定性氮肥的 NF1 和 SF1 处理土壤氨挥发累积量显著低于施用尿素的 NF2

和 SF2 处理, 秸秆还田条件下的 SF1 和 SF2 处理土壤氨挥发累积量分别高于秸秆不还田条件下的 NF1 和 NF2 处理 9.82% 和 6.77%; 2020 年全生育期土壤氨挥发累积量 NF1 和 SF1 处理分别低于 NF2 和 SF2 处理 45.68% 和 46.60%, 秸秆还田条件下的 SF1 和 SF2 处理土壤氨挥发累积量分别高于秸秆不还田条件下的 NF1 和 NF2 处理 21.65% 和 22.98%。模型模拟的各处理土壤氨挥发累积量也表现出相似的结果, 2019 年各处理的 nRMSE 为

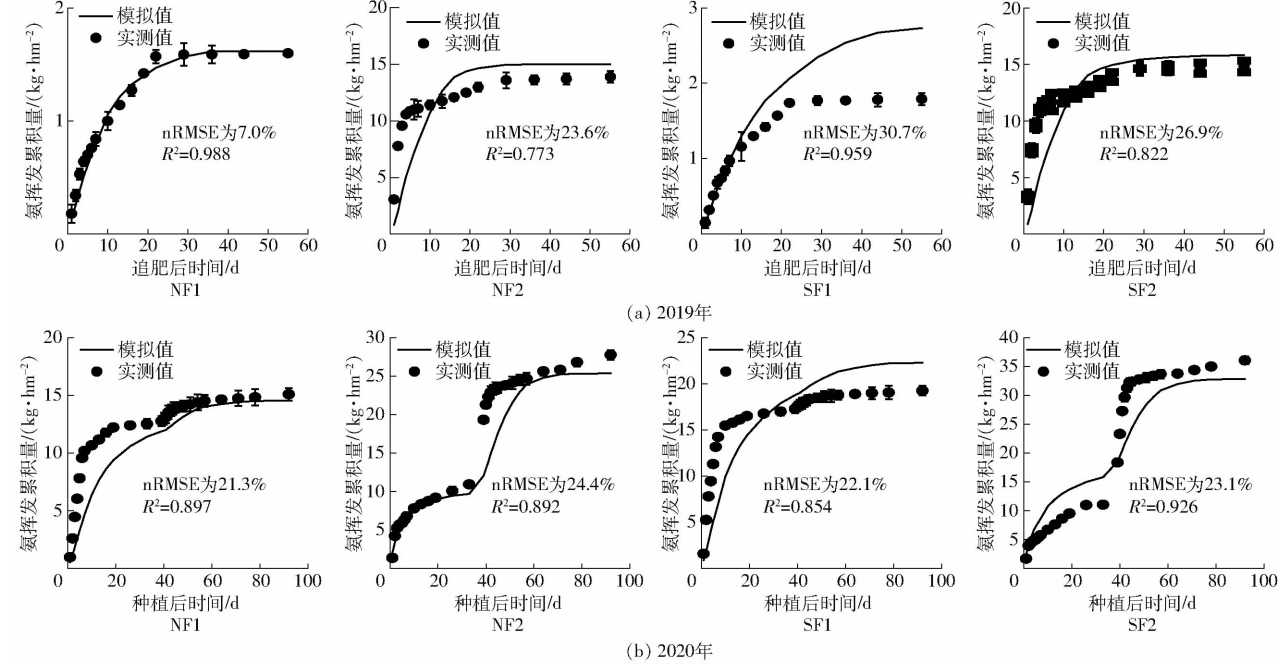


图 3 2019 年和 2020 年壤氨挥发累积量验证结果

Fig. 3 Verification of cumulative amount of soil ammonia volatilization in 2019 and 2020

7.0%~30.7%, R^2 为0.773~0.988,2020年各处理的nRMSE为21.3%~24.4%, R^2 为0.854~0.926,说明校正后DNDC模型能较好地模拟土壤氮挥发累积量的动态变化规律。

2.2 未来气候条件下施肥-秸秆措施优化

2.2.1 未来气候变化

未来气候条件下不同排放情景的年均最高温、最低温和年降水量变化如图4(每个柱状图包含33种大气环流模式,框边界表示25%和75%值,误差棒表示10%和90%值,框中线和十字分别表示中位数和均值,虚线表示当前气候下的均值)所示。当前年均最高温为19.41℃,年最低温为9.34℃,在RCP4.5排放情景下,到2030、2050、2070、2090年年

均最高温较当前分别提高0.83、1.57、2.04、2.23℃,年均最低温较当前分别提高0.33、0.81、1.16、1.31℃,年降水量较当前分别提高26.18、50.22、69.04、84.94 mm;在RCP8.5排放情景下,到2030、2050、2070、2090年年均最高温较当前分别提高1.03、2.1、3.35、4.59℃,年均最低温较当前分别提高0.47、1.24、2.13、3.04℃,年降水量较当前分别提高19.28、46.52、77.28、103.13 mm。在未来不同RCP排放情景下,年均最高温、最低温和年降水量均呈现逐渐上升的趋势,且RCP8.5排放情景上升的幅度更大。不同排放情景年降水量跨度随时间逐渐增大,说明在未来气候条件下极端降水事件出现的概率逐渐增大。

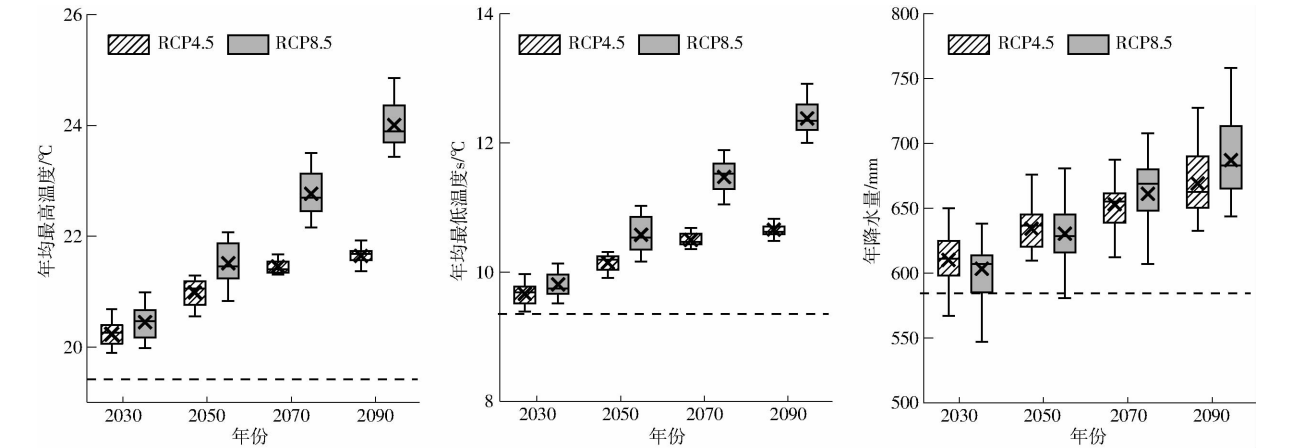


图4 未来气候条件下温度和降水的变化

Fig. 4 Changes in temperature and precipitation under future climate conditions

2.2.2 施肥-秸秆措施优化

模拟结果表明,在相同秸秆还田量条件下,随着施氮量逐渐增大,未来各时期生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量均呈现先降低后升高的趋势,作物产量随施氮量的增大呈现先升高后不变的趋势。如表3所示,在RCP4.5排放情景下,当秸秆全量还田时,稳定性氮肥施用量为180 kg/hm²时在未来各时期的生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低;当秸秆半量还田时,稳定性氮肥施用量为198 kg/hm²时在未来各时期的生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,秸秆半量还田配施198 kg/hm²稳定性氮肥的夏玉米产量较秸秆全量还田配施180 kg/hm²稳定性氮肥在2030、2050、2070、2090年分别低6.29%、0.71%、1.60%、2.26%;当秸秆不还田时,在2030—2050年和2070—2090年分别施用162 kg/hm²和180 kg/hm²稳定性氮肥的生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,但与有秸秆还田的情景相比,生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量明显较高且产量较低。因此,综合考虑产量和

排放情景下,秸秆全量还田配施180 kg/hm²稳定性氮肥为RCP4.5排放情景下关中地区2030—2090年较优的高产高效施肥-秸秆措施。

如表4所示,在RCP8.5排放情景下,当秸秆全量还田时,在2030—2050年稳定性氮肥施用量为180 kg/hm²时生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,作物产量为10 775、10 756 kg/hm²,在2070—2090年稳定性氮肥施用量为162 kg/hm²时生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,作物产量分别为9 661、8 778 kg/hm²;当秸秆半量还田时,在2030—2050年稳定性氮肥施用量为198 kg/hm²时生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,但产量较秸秆全量还田配施180 kg/hm²稳定性氮肥降低3.46%和0.48%,在2070—2090年稳定性氮肥施用量为180 kg/hm²时生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,但产量较秸秆全量还田配施162 kg/hm²稳定性氮肥降低2.45%和1.78%。当秸秆不还田时,在未来2030—2090年施用162 kg/hm²稳定性氮肥的生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量最低,但与有秸秆还田的情景相比,生产单位产量玉米的土壤

表 3 RCP4.5 背景下不同情景作物产量和生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量

Tab.3 Crop yield and soil ammonia volatilization accumulation of maize production unit in different scenarios under RCP4.5

处理		<i>I</i> /(g·kg ⁻¹)							产量/(kg·hm ⁻²)						
		126	144	162	180	198	216	234	126	144	162	180	198	216	234
		kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²
秸秆全量还田	2030 年	2.60	2.40	2.26	2.13	2.15	2.25	2.46	6 688	7 818	8 944	10 972	11 035	11 239	11 239
	2050 年	2.41	2.22	2.08	1.99	2.05	2.21	2.37	7 446	8 590	9 731	10 816	11 299	11 299	11 299
	2070 年	2.37	2.18	2.04	1.96	2.02	2.15	2.29	7 538	8 661	9 780	10 780	11 194	11 194	11 194
	2090 年	2.35	2.19	2.07	2.01	2.11	2.25	2.38	7 695	8 791	9 883	10 824	10 974	10 974	10 974
秸秆半量还田	2030 年	2.37	2.20	2.08	2.00	1.94	1.98	2.18	5 745	6 887	8 024	9 158	10 281	11 117	11 228
	2050 年	2.34	2.15	2.03	1.93	1.87	1.96	2.18	6 160	7 314	8 465	9 614	10 739	11 299	11 299
	2070 年	2.37	2.18	2.04	1.94	1.88	1.95	2.14	6 139	7 274	8 406	9 534	10 608	11 194	11 194
	2090 年	2.38	2.20	2.07	2.01	1.96	2.07	2.27	6 214	7 332	8 429	9 521	10 579	10 953	10 953
秸秆不还田	2030 年	3.18	3.00	3.12	3.45	3.87	4.39	4.90	4 651	5 939	7 026	7 988	8 786	9 456	10 085
	2050 年	3.30	3.21	2.98	3.08	3.21	3.38	3.62	4 625	5 846	7 018	8 077	9 086	10 068	10 859
	2070 年	3.38	3.21	2.97	2.94	3.08	3.27	3.56	4 772	6 145	7 516	8 829	9 917	11 046	11 886
	2090 年	3.35	3.10	3.22	3.18	3.38	3.60	3.91	4 771	5 951	7 077	8 176	9 164	9 980	10 700

表 4 RCP8.5 背景下不同情景作物产量和生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量

Tab.4 Crop yield and soil ammonia volatilization accumulation of maize production unit in different scenarios under RCP8.5

处理		<i>I</i> /(g·kg ⁻¹)							产量/(kg·hm ⁻²)						
		126	144	162	180	198	216	234	126	144	162	180	198	216	234
		kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²	kg/hm ²
秸秆全量还田	2030 年	2.60	2.40	2.25	2.15	2.15	2.28	2.48	6 773	7 925	9 073	10 775	11 027	11 310	11 310
	2050 年	2.47	2.27	2.12	2.03	2.09	2.25	2.40	7 359	8 507	9 653	10 756	11 300	11 310	11 310
	2070 年	2.57	2.42	2.33	2.34	2.46	2.61	2.77	7 584	8 656	9 661	10 350	10 530	11 530	11 530
	2090 年	2.66	2.58	2.56	2.60	2.75	2.90	3.05	7 307	8 080	8 778	9 312	9 312	9 312	9 312
秸秆半量还田	2030 年	2.38	2.19	2.07	1.98	1.93	1.99	2.19	5 802	6 973	8 133	9 289	10 402	11 192	11 310
	2050 年	2.40	2.20	2.06	1.96	1.90	2.00	2.20	6 084	7 251	8 408	9 562	10 705	11 300	11 300
	2070 年	2.54	2.37	2.27	2.23	2.26	2.40	2.62	6 190	7 315	8 406	9 424	10 222	10 530	10 530
	2090 年	2.67	2.47	2.46	2.43	2.53	2.73	2.94	5 981	7 069	7 905	8 622	9 260	9 312	9 312
秸秆不还田	2030 年	3.31	3.09	2.97	2.94	2.97	2.96	3.01	4 474	5 614	6 755	7 748	8 844	9 910	10 951
	2050 年	3.35	3.09	2.93	2.96	3.01	3.10	3.25	4 406	5 582	6 898	8 264	9 491	10 647	11 650
	2070 年	3.43	3.10	2.94	3.00	3.13	3.33	3.50	4 576	6 037	7 512	8 858	10 066	11 167	11 581
	2090 年	3.76	3.43	3.30	3.33	3.53	3.85	5.21	4 193	5 339	6 438	7 465	8 326	9 123	9 899

氮挥发累积量明显较高且产量较低。因此,综合考虑产量和生产单位产量玉米的土壤氮挥发累积量,在未来 RCP8.5 排放情景下,秸秆全量还田配施180 kg/hm²稳定性氮肥和秸秆全量还田配施162 kg/hm²稳定性氮肥分别为关中地区 2030—2050 年和 2070—2090 年较优的高产高效施肥-秸秆措施。

3 讨论

3.1 DNDC 模型模拟评价

有研究表明,DNDC 模型对于不同作物如冬小麦^[19]、马铃薯^[20]、水稻^[21]等产量的模拟性能相当。李仙岳等^[22]利用玉米日吸氮量、产量和干物质积累量对 DNDC 模型进行校正与验证,结果表明,该模型能够很好地模拟玉米生长的动态规律,能够较为

精确地模拟干旱地区不同地膜覆盖和施氮处理条件下玉米产量和氮素利用变化情况,因此 DNDC 模型可用于农田作物生产力的预测和评估。本研究结论与之相似,2019 年和 2020 年产量和籽粒氮素含量模拟值与实测值的 nRMSE 分别为 3.09%、4.29%和 5.99%、14.00%,对于地上部生物量的模拟 2019 年和 2020 年各处理的实测值与模拟值拟合的 *R*²分别为 0.801~0.994 和 0.983~0.995,说明模拟值与实测值较为一致。同时,DNDC 模型可以很好地模拟秸秆还田对产量、籽粒氮素含量和地上部生物量的提高,在两年的模拟中,在施肥种类相同的条件下,实测值与模拟值均体现出有秸秆还田的处理高于无秸秆还田的处理。因此,DNDC 模型可用于模拟夏玉米生长和不同施肥-秸秆措施的优化。在不同施氮量和土壤环境下,作物各器官所占比重及碳

氮比等参数会有一定差异,本研究中不同处理均采用同样的作物参数,这可能是模拟值与实测值存在微弱差异的原因^[23]。

有研究表明,DNDC 模型可以模拟由施肥引起的氨排放峰,对氨挥发损失总量的模拟结果与观测结果相关性达到极显著水平^[24]。本研究结果与之类似,实测值和模拟值均体现了施肥后 7 d 土壤氨挥发累积量上升较快以及施用稳定性氮肥的土壤氨挥发累积量显著低于施用尿素的特点,校正后 DNDC 模型对施用稳定性氮肥的各处理土壤氨挥发累积量模拟值的 nRMSE 和 R^2 分别为 7.0% ~ 30.7% 和 0.854 ~ 0.988,说明校正后 DNDC 模型对于土壤氨挥发累积量的模拟效果较好。部分模拟值比实测值偏高,这可能是由于在试验中施肥不均匀导致测量结果偏低,也有可能在 3 d 或 7 d 取 1 次样时出现降雨天气导致土壤氨挥发量升高^[25],但实际并未检测到。

3.2 气候变化及施肥-秸秆措施优化

3.2.1 未来气候条件下温度和降水的变化

大气环流模式是目前预测未来气候变化的主要工具,其依据为气象系统中的物理和化学性质及相互作用的过程。目前,有许多研究对 CMIP5 气候模式在我国的实用性进行评价,结果表明,大多数气候模式可以较好地模拟气候变化^[26]。本研究得到的温度和降水的变化趋势与前人研究一致^[27],即在将来不同排放情景下年均最高温、最低温和降水量都呈现逐渐上升的趋势,且 RCP8.5 排放情景下温度和降水量升高幅度更大。由于不同 GCM 模式本身的空间分辨率不同或降维统计方法不同^[28],不同 GCM 模式的降水量和部分时期温度预测变化范围很大(图 4)。因此,本研究利用 33 个不同 GCM 模式未来气候数据模拟的产量和土壤氨挥发累积量的均值以减少不同 GCM 模式的初始条件、参数和模型结构的不确定性引起的未来气候预测的不确定性。

3.2.2 未来气候条件下施肥-秸秆措施优化

有研究表明,在未来气候情境下,有机肥配施无机肥较单施无机肥会显著增加小麦、玉米的产

量^[29],本研究结果与之相似,在未来气候条件下,秸秆还田会提高夏玉米产量。这是由于秸秆还田能提高叶绿素含量导致光合速率提高^[30],秸秆还田能有效抑制土壤水分蒸发,为作物生长提供更好的水分条件,在未来降水量增加的条件下,秸秆更易分解^[31],进而会提高土壤孔隙度,秸秆分解后会增加有机碳含量,为作物生长提供充足的养分^[32],同时,秸秆还田会缓解根系衰老,促进玉米根系生长,增大植物对养分和水分吸收面积^[33]。有研究表明,随着施氮量的增加,作物产量会呈现先增加后不变的趋势,土壤氨挥发量会随施氮量的增大而增大^[34],本研究结果与之类似,随施氮量增加单位产量的土壤氨挥发量先降低后升高,产量呈现先增加后不变的趋势。本研究中综合考虑产量和生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量,在未来 RCP8.5 排放情景下,2070—2090 年相比于 2030—2050 年适宜的施氮量较少,这可能是由于在 RCP8.5 排放情景下降水量会显著增加,降水通过下渗作用会将氮肥带入深层土壤,使得土壤对氮素的吸附量增大,氮肥更好的被作物吸收利用,进而提高氮素的利用率^[35],因此施氮量可适当减少。

4 结论

(1)DNDC 模型对关中地区不同施肥管理措施下夏玉米生长及土壤氨挥发的模拟效果较好,可作为优化不同施肥措施的有效工具。

(2)在未来气候条件下,秸秆还田会提高夏玉米产量并降低生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量,是一种适宜的稳产减排管理措施。

(3)综合考虑产量和生产单位产量玉米的土壤氨挥发累积量,秸秆全量还田配施 180 kg/hm²稳定性氮肥为 RCP4.5 排放情景下关中地区 2030—2090 年较为优化的控氮稳产施肥-秸秆措施;秸秆全量还田配施 180 kg/hm²稳定性氮肥和秸秆全量还田配施 162 kg/hm²稳定性氮肥分别为 RCP8.5 排放情景下关中地区 2030—2050 年和 2070—2090 年较为优化的控氮稳产施肥-秸秆措施。

参 考 文 献

[1] 宋敏,王宏新,郭慧捷,等. 农业领域面对气候变化的脆弱性与适应性举措[J]. 肥料与健康, 2021,48(4): 1-9. SONG Min, WANG Hongxin, GUO Huijie, et al. Vulnerability of agriculture to climate change and adaptive measures[J]. Fertilizer & Health, 2021, 48(4): 1-9. (in Chinese)

[2] 王英俊,李荣波,李柄更,等. 气候变化的危害与应对[J]. 科技资讯, 2021, 19(13): 92-95. WANG Yingjun, LI Rongbo, LI Binggeng, et al. The harm of climate change and its countermeasures [J]. Science & Technology Information, 2021, 19(13): 92-95. (in Chinese)

[3] DING D Y, FENG H, ZHAO Y, et al. Impact assessment of climate change and later-maturing cultivars on winter wheat growth and soil water deficit on the Loess Plateau of China[J]. Climatic Change, 2016, 138(1-2): 157-171.

[4] 杨淑莉,朱安宁,张佳宝,等. 不同施氮量和施氮方式下田间氨挥发损失及其影响因素[J]. 干旱区研究,2010,

- 27(3): 415–421.
- YANG Shuli, ZHU Anning, ZHANG Jiabao, et al. Ammonia volatilization loss and its affecting factors under different amounts and ways of N application in field[J]. *Arid Zone Research*, 2010, 27(3): 415–421. (in Chinese)
- [5] ZHANG H L, LAL R, ZHAO X, et al. Chapter one-opportunities and challenges of soil carbon sequestration by conservation agriculture in China[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 1–36.
- [6] 吕贝贝, 张贵云, 张丽萍, 等. 生物炭在农业上的应用进展[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(12): 2118–2121.
- LÜ Beibei, ZHANG Guiyun, ZHANG Liping, et al. Application progress of biochar in agriculture[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(12): 2118–2121. (in Chinese)
- [7] MORAN M, FERREIR J, MARTINS H, et al. Ammonia agriculture emissions; from EMEP to a high resolution inventory[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, 7(5): 786–798.
- [8] 鄂继芳, 杨树青, 娄帅, 等. 井渠轮灌下秸秆还田对土壤含盐量与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 334–345, 367.
- E Jifang, YANG Shuqing, LOU Shuai, et al. Effect of straw returning to field on soil salinity content and maize yield under alternate irrigation of canal-well[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 334–345, 367.
- [9] 张海晶, 王少杰, 罗莎莎, 等. 不同秸秆还田方式对土壤微生物影响的研究进展[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(2): 150–158.
- ZHANG Haijing, WANG Shaojie, LUO Shasha, et al. Research advances in the impact of different straw returning ways on soil microorganisms[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(2): 150–158. (in Chinese)
- [10] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 基于 DNDC 模型的冬小麦-夏玉米农田滴灌施肥优化措施研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(2): 200–212.
- CHEN Jing, WANG Yingchun, LI Hu, et al. Optimization of drip fertilization practice for winter wheat – summer maize farmland using the DNDC model[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(2): 200–212. (in Chinese)
- [11] 薛彦东, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水灌溉冬小麦/夏玉米土壤 N_2O 排放 DNDC 模型分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 73–78.
- XUE Yandong, REN Shumei, YANG Peiling, et al. DNDC model analysis of N_2O fluxes in winter wheat/summer maize system with reclaimed water irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(9): 73–78. (in Chinese)
- [12] 侯会静, SHALAMU Abudu, 陈慧, 等. 水稻控制灌溉下华东稻麦轮作农田 N_2O 排放模拟[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 185–191.
- HOU Huijing, SHALAMU Abudu, CHEN Hui, et al. Simulation of N_2O emission from rice-wheat rotation field under controlled irrigation of rice in Southeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 185–191. (in Chinese)
- [13] 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 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 690–696.
- ZHANG Xiaolin, PAN Xiaojian, XIONG Zhengqin, et al. Effect of farming managements on the global warming poteneials of CH_4 and N_2O from a rice-wheat rotation system based on the analysis of DNDC modeling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 690–696. (in Chinese)
- [14] HU X K, SU F, JU X T, et al. Greenhouse gas emissions from a wheat-maize double cropping system with different nitrogen fertilization regimes[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 176: 198–207.
- [15] 王朝辉, 刘学军, 巨晓棠, 等. 田间土壤氮挥发的原位测定——通气法[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(2): 205–209.
- WANG Chaohui, LIU Xuejun, JU Xiaotang, et al. Field in situ determination of ammonia volatilization from soil: venting method[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 205–209. (in Chinese)
- [16] LI C S, FROLKING S, FROLKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1992, 97(9): 11–16.
- [17] LI C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58(1–3): 259–276.
- [18] CHEN H X, LI L C, LUO X Q, et al. Modeling impacts of mulching and climate change on crop production and N_2O emission in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 268: 86–97.
- [19] 颜学斌, 王俊, 王科锋, 等. 基于 DNDC 模型模拟的冬小麦田土壤有机碳和作物产量对地表覆盖的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 10(1): 42–49.
- YAN Xuebin, WANG Jun, WANG Kefeng, et al. Responses of soil organic carbon and crop yield to surface mulching with straw and plastic film in winter wheat field using DNDC model[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 10(1): 42–49. (in Chinese)
- [20] 张开, 王立为, 高西宁, 等. 基于 DNDC 模型不同降水年型下氮肥管理对马铃薯田 N_2O 减排及增产潜力影响研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8): 1672–1682.
- ZHANG Kai, WANG Liwei, GAO Xining, et al. Effect of nitrogen management on the potential of N_2O emission reduction and yield increase in potato field under different precipitation pstersns based on DNDC model[J]. *Ecology and Environmental*

Sciences, 2021, 30(8): 1672 – 1682. (in Chinese)

[21] 高小叶, 袁世力, 吕爱敏, 等. DNDC 模型评估苜蓿绿肥对水稻产量和温室气体排放的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(12): 14 – 26.
GAO Xiaoye, YUAN Shili, LÜ Aimin, et al. Effects of alfalfa green manure on rice production and greenhouse gas emissions based on a DNDC model simulation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(12): 14 – 26. (in Chinese)

[22] 李仙岳, 冷旭, 张景俊, 等. 北方干旱区降解膜覆盖农田玉米生长和氮素利用模拟及优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 113 – 121.
LI Xianyue, LENG Xu, ZHANG Jingjun, et al. Simulation and optimization of maize growth and nitrogen utilization under degradation film mulching in arid areas of North China[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 113 – 121. (in Chinese)

[23] HAN J, JIA Z K, WU W, et al. Modeling impacts of film mulching on rainfed crop yield in Northern China with DNDC[J]. Field Crops Research, 2014, 155: 202 – 212.

[24] 夏文建, 王淳, 张丽芳, 等. 基于 DNDC 模型的双季稻体系氮挥发损失研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 2035 – 2046.
XIA Wenjian, WANG Chun, ZHANG Lifang, et al. Suitability of DNDC model to simulate ammonia volatilization for double rice cropping system[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(9): 2035 – 2046. (in Chinese)

[25] 朱影, 庄国强, 吴尚华, 等. 农田土壤氮挥发的过程和控制技术研究[J]. 环境保护科学, 2020, 46(6): 88 – 96.
ZHU Ying, ZHUANG Guoqiang, WU Shanghua, et al. Ammonia volatilization process and control technology of farmland soil [J]. Environmental Protection Science, 2020, 46(6): 88 – 96. (in Chinese)

[26] CHEN L, FRAUENFELD O. Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20CMIP5 models[J]. Journal of Climate, 2014, 27: 3920 – 3937.

[27] XU C H, XU Y. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2015, 5(6): 527 – 533.

[28] TANG R S, ZHENG J C, JIN Z Q, et al. Possible correlation between high temperature-induced floret sterility and endogenous levels of IAA, GAs and ABA in rice(*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Growth Regulation, 2008, 54(1): 37 – 43.

[29] LV F L, SONG J S, GILTRAP D, et al. Crop yield and N₂O emission affected by long-term organic manure substitution fertilizer under winter wheat-summer maize cropping system[J]. Science of the Total Environment, 2020, 732: 139312.

[30] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 等. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分, 玉米生长及光合特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(3): 777 – 783.
GAO Fei, JIA Zhikuan, LU Wentao, et al. Effects of different straw returning treatments on soil water, maize growth and photosynthetic characteristics in the semi-arid of Southern Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 777 – 783. (in Chinese)

[31] 张学林, 周亚男, 李晓立, 等. 氮肥对室内和大田条件下作物秸秆分解和养分释放的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(10): 1746 – 1760.
ZHANG Xuelin, ZHOU Ya'nan, LI Xiaoli, et al. Effects of nitrogen fertilizer on crop residue decomposition and nutrient release under lab incubation and field conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(10): 1746 – 1760. (in Chinese)

[32] 李江, 潘艳川, 缴锡云, 等. 加气灌溉对麦秸秆还田后土壤还原性与水稻生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 250 – 259.
LI Jiang, PAN Yanchuan, JIAO Xiyun, et al. Effect of aerated irrigation on rice growth and soil reducibility under wheat straw returning conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 250 – 259. (in Chinese)

[33] 张素瑜, 王和洲, 杨明达, 等. 水分与玉米秸秆还田对小麦根系生长和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(13): 1484 – 1496.
ZHANG Suyu, WANG Hezhou, YANG Mingda, et al. Influence of returning corn stalks to field under different soil moisture contents on root growth and water use efficiency of wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(13): 1484 – 1496. (in Chinese)

[34] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149 – 162.
LU Lili, WU Genyi. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 149 – 162. (in Chinese)

[35] 王东, 于振文, 于文明, 等. 施氮水平对高产麦田土壤硝态氮时空变化及氨挥发的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1593 – 1598.
WANG Dong, YU Zhenwen, YU Wenming, et al. Effects of nitrogen application level on soil nitrate accumulation and ammonia volatilization in high-yielding wheat field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9): 1593 – 1598. (in Chinese)