

# 2050 年农田土壤温室气体排放及碳氮储量变化 SPACSYS 模型预测

王树会<sup>1</sup>, 张旭博<sup>2\*</sup>, 孙楠<sup>1\*</sup>, 李忠芳<sup>3</sup>, 徐明岗<sup>1</sup>

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2 中国科学院地理科学与资源研究所/生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3 贺州学院 食品与生物工程学院, 广西 542899)

**摘要:**【目的】优化华北平原农田土壤的施肥措施, 实现维持农田作物产量、提升土壤肥力的同时减少温室气体排放。【方法】基于长期定位试验观测数据, 选取氮磷钾化肥 (NPK)、有机肥配施化肥 (NPKM) 和单施有机肥 (OM) 三个试验处理来评价和验证过程模型 (SPACSYS) 对不同施肥措施下的作物产量、土壤有机碳 (SOC) 和土壤全氮 (TN) 储量及土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放动态变化的模拟效果, 并预测至 2050 年不同施肥情景和肥料配施情景下作物产量、SOC、TN 储量及土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量。【结果】统计分析结果表明, SPACSYS 模型的小麦和玉米产量模拟值与实测值的相关系数  $R^2$  为 0.63~0.78, RMSE 为 3.78%~4.86%, EF 为 0.59~0.73; 土壤有机碳和全氮储量模拟值与实测值的  $R^2$  为 0.73~0.89, RMSE 为 2.69%~3.79%, EF 为 0.67~0.82; 土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量模拟值与实测值的  $R^2$  为 0.16~0.80, RMSE 为 4.03%~9.99%, EF 为 0.24~0.78, 相关性均达到显著水平, 表明 SPACSYS 模型模拟值的可靠性和准确性较高。利用该模型进行预测, 结果显示到 2050 年, 在当前施氮水平下, 减氮 50% 会显著降低玉米产量约 9%; 减氮 25%, 与单施化肥处理相比, 有机肥配施化肥处理和单施有机肥处理分别显著提高 SOC 年均储量约 31% 和 62%, 提高 TN 年均储量约 18% 和 6%, 而 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 年均排放量均没有显著增加。【结论】SPACSYS 模型可以模拟中国华北平原典型农田冬小麦-夏玉米轮作体系的农作物产量、SOC 和 TN 储量以及土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放情况。但是模型低估了 OM 处理的全氮储量, 下一步研究需对模型做相应改进。至 2050 年, 施用化肥和有机肥均可不同程度地提高有机碳和全氮储量, 且该地区可适当降低氮肥施用量 (减氮 25%), 并采用有机肥配施化肥或单施有机肥的方式来维持作物产量、提升土壤肥力, 同时降低温室气体排放。

**关键词:** 施肥; 土壤有机碳; 土壤全氮; 温室气体; SPACSYS 模型

## Prediction of greenhouse gas emissions and carbon and nitrogen stocks in farmland soils in 2050 by SPACSYS model

WANG Shu-hui<sup>1</sup>, ZHANG Xu-bo<sup>2\*</sup>, SUN Nan<sup>1\*</sup>, LI Zhong-fang<sup>3</sup>, XU Ming-gang<sup>1</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences Modeling/Key Lab of Ecosystem Network Observation and Modeling, Beijing 100101, China; 3 College of Food and Bioengineering, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

**Abstract:** 【Objectives】To optimize the fertilization regimes for cropland in the North China Plain, and to maintain crop yields and improve soil fertility while reducing greenhouse gas emissions. 【Methods】Based on the observation data of long-term experiment, three treatments of NPK, NPKM and OM were used to calibrate and validate the process model (SPACSYS) of modeling crop yields, soil organic carbon (SOC) and total nitrogen

收稿日期: 2018-05-30 接受日期: 2018-10-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFC0503805); 国家自然科学基金项目 (41701333, 41620104006); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (Y2017LM06) 资助。

联系方式: 王树会 E-mail: 18801084605@163.com

\* 通信作者 张旭博 E-mail: zxbmylove1003@163.com; 孙楠 E-mail: sunnan@caas.cn

(TN) storages, and dynamic changes of soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions, and predict the response of those items to different fertilizers and fertilization scenarios by 2050. 【 **Results** 】 Statistical analysis showed that the SPACSYS model gave a reliable and accurate simulation on the wheat yield and maize yields ( $R^2$  0.63–0.78, RMSE 3.78%–4.86%, EF 0.59–0.73), SOC and TN storages ( $R^2$  0.73–0.89, RMSE 2.69%–3.79%, EF 0.67–0.82) and soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions ( $R^2$  0.16–0.80, RMSE 4.03%–9.99%, EF 0.24–0.78), all the three correlations reached significant levels. According to the predictions of the model, reducing 50% of current nitrogen input would significantly reduce maize yield by 9%; reducing 25% of nitrogen fertilizer would not reduce yields significantly, and if combined with manure or applying the same manure N alone, the average annual SOC and TN storages could be significantly improved by 31%, 62% and 18%, 6%, while the average annual CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions would not be significantly increased, compared with single application of chemical fertilizers. 【 **Conclusions** 】 The SPACSYS model can simulate crop yields, SOC and TN storages, and soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions of the winter wheat–summer maize cropping system in the typical farmland of the North China Plain. However, the model underestimates the total N storages when organic manure is applied alone, need further improvements of the model parameters for the situation. According to the prediction, both the application of chemical fertilizers and manures can increase the SOC and TN storages with different degrees, and 25% of reduction of current nitrogen fertilizer level under combined application with manure or application of manure N alone could maintain crop yields, improve soil fertility and reduce greenhouse gas emissions in this region by 2050.

**Key words:** fertilizer application; soil organic carbon; soil total nitrogen; greenhouse gas; SPACSYS model

全球气候变化是 21 世纪以来人类所面临的重要环境问题<sup>[1]</sup>。中国是目前世界上温室气体排放量最高的国家, 根据《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》<sup>[2]</sup>, 2005 年其温室气体排放量已达到 74.67 亿吨 CO<sub>2</sub> 当量, 其中 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 分别占 80.03%、12.49% 和 5.27%。农田生态系统是重要的温室气体排放源, 2005 年中国农业源温室气体排放达到 819.97 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量, 占中国温室气体排放总量的 11%<sup>[2]</sup>。旱作农田是产生农田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的主要来源。华北平原是我国主要的粮食产区, 冬小麦–夏玉米一年两熟制是该地区主要的种植模式。近年来该地区氮肥的施用量有的甚至高达 N 600 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[3]</sup>, 研究表明, 这种施肥方式会造成环境污染<sup>[4–6]</sup>, 使得土壤排放大量的 CO<sub>2</sub><sup>[7–8]</sup> 和 N<sub>2</sub>O<sup>[9–10]</sup>, 因此, 合理施肥尤为重要。合理施用有机肥可以维持作物产量<sup>[11]</sup>、提高土壤肥力<sup>[12]</sup>、增加土壤有机碳 (SOC) 的固存<sup>[13]</sup>、减少土壤全氮 (TN) 的损失<sup>[14–16]</sup>及减缓温室效应<sup>[17]</sup>。可见, 优化农田管理措施对于维持或提高作物产量、固碳减排具有重要作用<sup>[18]</sup>。

模型是综合评价农田生态系统碳氮收支的有利工具。目前, 国内外很多的土壤–作物模型用于估计作物品种性能、优化农田管理措施<sup>[19–21]</sup>及预测未来气候条件下作物产量及温室气体排放的变化<sup>[22–23]</sup>。如 APSIM 和 SOILN-CROP 模型广泛用于农田作物产量

估算和土壤氮循环模拟<sup>[24–25]</sup>。DNDC 模型广泛用于农田不同管理措施和气候条件下作物生长、土壤碳氮动态变化、温室气体排放及土壤水分平衡的模拟<sup>[26–27]</sup>。利用模型来模拟及评价不同施肥措施下的农田土壤温室气体排放已成为当今研究热点及全球趋势<sup>[28]</sup>。SPACSYS 模型是一个多维的、田间尺度的、由气候驱动的机理过程模型<sup>[29]</sup>, 可以模拟土壤–植物–微生物之间的碳氮循环过程, 具有详细的植物生长发育模块和根系模块, 已广泛用于估计作物产量、SOC 和全氮储量、土壤氮淋溶、作物的资源利用率和气候变化对作物生长的影响<sup>[30–33]</sup>。本研究利用长期试验历史数据, 进行 SPACSYS 模型参数化和验证, 预测未来不同施肥 (减氮及增氮) 情景下作物产量、土壤碳氮储量及土壤温室气体排放的变化。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点位

试验点位于河南封丘中国科学院封丘农业生态国家实验站 (35°00'N、114°24'E)。该地区属暖温带季风气候区, 年均温 13.9℃, 年均降雨量 615 mm, 主要集中于 7—9 月份, 无霜期 220 d 左右。长期施肥试验开始于 1989 年秋, 采用冬小麦/夏玉米一年两熟种植制度。试验小区土壤为轻壤质黄潮土, 试验开始前耕层土壤 (0—20 cm) 的理化性质为: 有机质

5.83 g/kg、全氮 0.445 g/kg、全磷 0.50 g/kg、全钾 18.6 g/kg、pH 8.65。

## 1.2 试验设计

具体田间管理措施，如施肥量及施肥方式见表 1。冬小麦 10 月中旬播种，次年 6 月初收获，玉米播种于 6 月中旬，9 月底收获。化肥和有机肥均匀施于土壤表面，通过耕作翻耕到 0—20 cm 土层。每年分别在 6 月和 10 月耕作 2 次，1 月和 7 月灌溉两次。有机肥是小麦秸秆、大豆饼和棉籽以 100 : 45 : 40 的比例为原料，机械粉碎到 3~5 mm 后充分混匀并发酵 2 个月堆制而成。有机肥的化学性质如表 2 所示。

本研究选取 3 个施肥处理来参数化和验证 SPACSYS 模型对长期不同施肥措施下作物产量、土壤肥力及土壤温室气体排放的模拟效果。3 个施肥处理分别为：1) 氮磷钾化肥 (NPK)；2) 1/2 氮磷钾化肥 +

1/2 有机肥 (NPKM)；3) 有机肥 (OM)。其中 NPK 处理数据用于计算模型的参数，NPKM 和 OM 处理数据用于验证模型参数的准确性。SPACSYS 模型的主要参数设置如表 3 所示。在长期定位试验基础上，以 NPK、NPKM 和 OM 处理为当前施肥情景，在其基础上分别设置减氮 25% 和 50%，增氮 25% 和 50% 四种情景，即：75%NPK、50%NPK、125%NPK、150%NPK、75%NPKM、50%NPKM、125%NPKM、150%NPKM、75%OM、50%OM、125%OM 和 150%OM，利用建立的 SPACSYS 模型，模拟 1991—2050 年作物产量、SOC 和 TN 储量及土壤 CO<sub>2</sub> 和土壤 N<sub>2</sub>O 排放的动态变化，探讨至 2050 年不同施肥措施对农田土壤固碳减排的影响。

## 1.3 模型简介

SPACSYS 模型是一个多维的、田间尺度的、由气

表 1 化肥及有机肥年施用量

Table 1 Annual application rate of chemical fertilizer and manure to each crop under different treatments

处理 Treatment	基肥 Basal fertilizer									追施尿素 Topdressing urea (N kg/hm <sup>2</sup> )
	N (kg/hm <sup>2</sup> )			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/hm <sup>2</sup> )			K <sub>2</sub> O (kg/hm <sup>2</sup> )			
	总量 Total	有机肥 Manure	尿素 Urea	总量 Total	有机肥 Manure	过磷酸盐 Superphosphate	总量 Total	有机肥 Manure	硫酸钾 Potash sulfate	
玉米 Maize										
化肥 Chemical NPK (NPK)	60	0	60	75	0	75	150	0	150	90
有机肥 Manure (OM)	150	150	0	75	51	24	150	65	85	0
有机肥配施化肥 Half manure N plus half urea N (NPKM)	75	75	0	75	25.5	49.5	150	32.5	117.5	75
小麦 Wheat										
化肥 Chemical NPK (NPK)	90	0	90	75	0	75	150	0	150	60
有机肥 Manure (OM)	150	150	0	75	45	30	150	63	87	0
有机肥配施化肥 Half manure N plus half urea N (NPKM)	90	75	15	75	22.5	52.5	150	31.5	118.5	60

注 (Note)：该试验点数据已发表<sup>[34]</sup> Data in the table have been published<sup>[34]</sup>.

表 2 小麦、玉米施用的有机肥质量及年施用量

Table 2 Quality and annual application rates of manures used in wheat and maize

作物 Crop	水分 (g/kg) Moisture	全氮 (g/kg, DW) Total N	总碳 (g/kg, DW) Total C	C/N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg, DW)	K <sub>2</sub> O (g/kg, DW)	施用量 (kg/hm <sup>2</sup> , DW) Applying rate
玉米 Maize	703 ± 4	54.4 ± 2.0	422 ± 14	7.75	18.5 ± 5.5	23.5 ± 1.0	2758
小麦 Wheat	703 ± 4	54.3 ± 2.0	422 ± 14	7.75	16.3 ± 2.5	22.8 ± 1.1	2758

注 (Note)：数据为平均值 ± 标准差 Data are mean ± SD (n = 4)；DW—干物质重 Dry weight；数据来源于该试验点已发表文献<sup>[34]</sup> Data in the table have been published<sup>[34]</sup>.

表 3 SPACSYS 模型有关作物生长发育及碳氮循环过程的参数

Table 3 Related parameters of crop growth and development, carbon and nitrogen cycles in SPACSYS model

参数 Parameter	单位 Unit	值 Value	
		小麦 Wheat	玉米 Maize
植物播种到出苗所需积温 Accumulated temperatures required from sowing to emergence	°C·d	100	133
植物出苗到开花所需积温 Accumulated temperatures required from emergence to flowering	°C·d	529	681.78
植物出苗到旗叶完全展开所需积温 Accumulated temperatures required from emergence to flag leaf fully expansion	°C·d	750	1380.0
植物开花到成熟所需积温 Accumulated temperatures required from flowering to maturity	°C·d	900	1400.0
植物营养生长阶段不受光影响的临界光周期 Critical photoperiod without light impaction for vegetative stage	hr	10.42	13.87
植物营养生长阶段停止生长的临界光周期 Critical photoperiod to stop vegetative stage	hr	8.18	19.07
光周期响应函数系数 Coefficient in the photoperiod response function	hr	0.97	-1.99
植物出苗的临界温度 Threshold temperature for emergence	°C	5.0	7.0
植物营养生长临界温度 Threshold temperature for vegetative stage	°C	4.98	4.39
植物生殖生长临界温度 Threshold temperature for reproductive stage	°C	10.78	15.0
植物光合作用最低温度 Minimum temperature for photosynthesis	°C	4.0	10.0
植物光合作用最佳温度 Optimal temperature for photosynthesis	°C	15	20
植物春化作用最高温度 Maximum temperature for vernalisation	°C	21	
植物春化作用最低温度 Minimum temperature for vernalisation	°C	-1.3	
植物春化作用最适温度 Optimum temperature for vernalisation	°C	5.0	
消光系数 Extinct coefficient		0.4	0.85
叶透射系数 Leaf transmission coefficient		0.4	0.67
最适温度、水分和氮浓度时的光化学效率 Photochemical efficiency at optimal temperature, water and N conditions	CO <sub>2</sub> g/J	6.36 × 10 <sup>-6</sup>	5.0 × 10 <sup>-6</sup>
光饱和水平、最适温度、水分和氮浓度时叶片光合速率 Leaf photosynthesis rate at saturating light level, optimal temperature, water and N content	CO <sub>2</sub> g/(m <sup>2</sup> ·s)	0.009	0.05
光合作用的最低叶片氮浓度 Lowest leaf N concentration required for photosynthesis	N g/g,DM	0.005	0.01
植物光合作用不变的叶片氮浓度 Leaf N concentration for stable photosynthesis	N g/g,DM	0.02	0.02
植物维持呼吸的 Q10 值 Q10 value for respiration maintenance		3.0	1.62
单位叶生物量的叶面积 Specific leaf area	m <sup>2</sup> /g,DM	0.038	0.04
单位穗生物量的叶面积 Specific green ear area	m <sup>2</sup> /g,DM	0.00637	0.006
单位茎生物量的叶面积 Specific green stem area	m <sup>2</sup> /g,DM	0.0099	0.006
土壤碳氮循环 Soil C and N cycles			
水分函数系数 Coefficient in water function		0.5	
土壤表面矿物氮干沉降 Dry deposition mineral N to soil surface	N g/(m <sup>2</sup> ·d)	0.0069	
溶解性有机质中的腐殖质组分 Humus fraction from dissolved organic matter		0.05	
新鲜残体中的腐殖质组分 Humus fraction from fresh litter		0.05	
新鲜有机质中的腐殖质组分 Humus fraction from fresh organic matter		0.1	
腐殖质潜在分解速率 Potential decomposition rate for humus	d <sup>-1</sup>	0.00001	
固定作用临界 C/N 比 Critical C/N ratio favourable to immobilization		15.0	
微生物维持呼吸速率 Microbial maintenance respiration rate		0.4	
潜在反硝化速率 Potential denitrification rate	N g/(m <sup>2</sup> ·d)	0.04	
潜在硝化速率 Potential nitrification rate	N g/(m <sup>2</sup> ·d)	0.586	
降雨中的氮浓度 Precipitation N concentration	N g/m <sup>3</sup>	3.2	
饱和水分含量时的相对活度 Relative activity at saturated water content		0.4	

候驱动的机理过程模型。模型包括土壤-植物-微生物之间的碳氮循环模块、水分移动模块和热量传输模块,各模块间相互联系调用。模型不但可以模拟植物发育、光合、呼吸、光合产物的分配、根系生长及对养分和水分的吸收,而且具有可以准确模拟作物根系生长的3D根系模块。在土壤碳、氮循环模块中,有机质模块分为新鲜有机质库、可溶解有机质库、新鲜残体、微生物库和腐殖质库,无机氮(铵态氮和硝态氮)和可溶性有机氮等运移过程(随水在土壤剖面移动、随水移动到田间排水管或深层地下水、径流损失等)。SPACSYS模型的输入数据主要包括气象数据(日最高最低温度、降雨量、平均风速、日照时数和辐射等)、土壤性质数据(有机质、pH和黏粒粉粒砂粒含量)和田间管理数据(包括种植、施肥、耕作、灌溉等)。有关模型的结构及相应模块的方程设置可参考相关文献<sup>[29,35-36]</sup>。针对华北平原冬小麦/夏玉米农田生态系统,本研究主要对植物开花到成熟所需积温、消光系数、植物叶片最大光合效率等作物参数及腐殖质潜在分解速率、溶解性有机质中的腐殖质组分、新鲜有机质中的腐殖质组分等土壤碳氮循环过程参数进行模拟和校正,表3为模型调参后的主要参数设置,有关模型参数的具体介绍可参考相关文献<sup>[29-31,37-38]</sup>。调参后的模型能更好地模拟作物生长及土壤的碳氮循环过程。表4为模型调参后的模拟效果。

#### 1.4 数据分析

应用 SPACSYS 模型进行模拟,采用 SPSS v.22.0 进行数据分析,Microsoft Excel 2016 和 SigmaPlot 12.5

进行图表绘制。计算模拟值和实测值之间的相关系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和模型预测效率(EF),以定量评估模拟值与实测值的吻合度。

## 2 结果与分析

### 2.1 作物产量、土壤碳、氮储量的模拟

各处理产量的模拟值与实测值比较(图1)显示,SPACSYS模型模拟小麦和玉米产量的效果较好。由表4可知,用来参数化的小麦和玉米产量的相关系数分别为0.78( $n=5$ ,  $P<0.05$ )和0.76( $n=5$ ,  $P<0.05$ ),均方根误差分别为3.78%和3.81%。用来验证的小麦和玉米产量的相关系数分别为0.72( $n=10$ ,  $P<0.01$ )和0.63( $n=10$ ,  $P<0.01$ ),均方根误差分别为3.92%和4.86%。模型对小麦和玉米产量的模拟效率均趋近于1,说明SPACSYS模型可以模拟小麦和玉米的生长。

SOC和全氮储量的模拟值与实测值比较见图2和表4。1989—2009年,模型模拟的NPK、NPKM和OM处理的0—20 cm土层SOC储量的模拟变化量依次为C 607.9、920.3和1341.1 g/m<sup>2</sup>,实测变化量依次为C 480.2、910.2和1375.6 g/m<sup>2</sup>,二者较一致。三个处理0—20 cm土层TN储量的模拟变化量依次为N 37.8、70.0和70.0 g/m<sup>2</sup>,实测变化量依次为N 30.2、81.1和122.3 g/m<sup>2</sup>,模拟值较实测值NPK处理升高了25%,NPKM和OM处理分别降低了14%和43%。模型验证的NPK处理SOC和TN储量的模拟值与实测值之间的相关系数分别为0.88( $n=22$ )和0.76( $n=10$ ),均达到极显著水平( $P<0.01$ )。

表4 模拟作物产量、土壤碳氮储量及土壤CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O排放效果的统计分析

Table 4 Statistical analysis of the simulated crop yields, SOC and TN storages, CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions

标准 Criteria	检验 Test	作物产量 Crop yield		SOC	全氮 TN	土壤温度 Soil temperature	土壤水分 Soil moisture	CO <sub>2</sub> 排放 CO <sub>2</sub> emission	N <sub>2</sub> O 排放 N <sub>2</sub> O emission
		小麦 Wheat	玉米 Maize						
相关系数 $R^2$	参数化 Calibration	0.78*	0.76*	0.89**	0.73*	0.93**	0.23**	0.80**	0.16**
	验证 Validation	0.72**	0.63**	0.88**	0.76**	0.92**	0.12**	0.72**	0.21**
均方根误差 RMSE (%)	参数化 Calibration	3.78	3.81	2.69	3.79	2.32	8.87	4.03	9.99
	验证 Validation	3.92	4.86	2.75	3.66	2.11	9.32	4.11	9.97
模型预测效率 EF	参数化 Calibration	0.73	0.71	0.79	0.67	0.89	0.31	0.78	0.24
	验证 Validation	0.68	0.59	0.82	0.71	0.87	0.28	0.77	0.28
样本数 Number of samples	参数化 Calibration	5	5	11	5	83	63	68	66
	验证 Validation	10	10	22	10	166	126	136	132

注 (Note): \*和\*\*代表实测值和模拟值之间的一致性在0.05和0.01水平达到显著 Indicate a significant agreement between observed and simulated values at 0.05 and 0.01 levels.

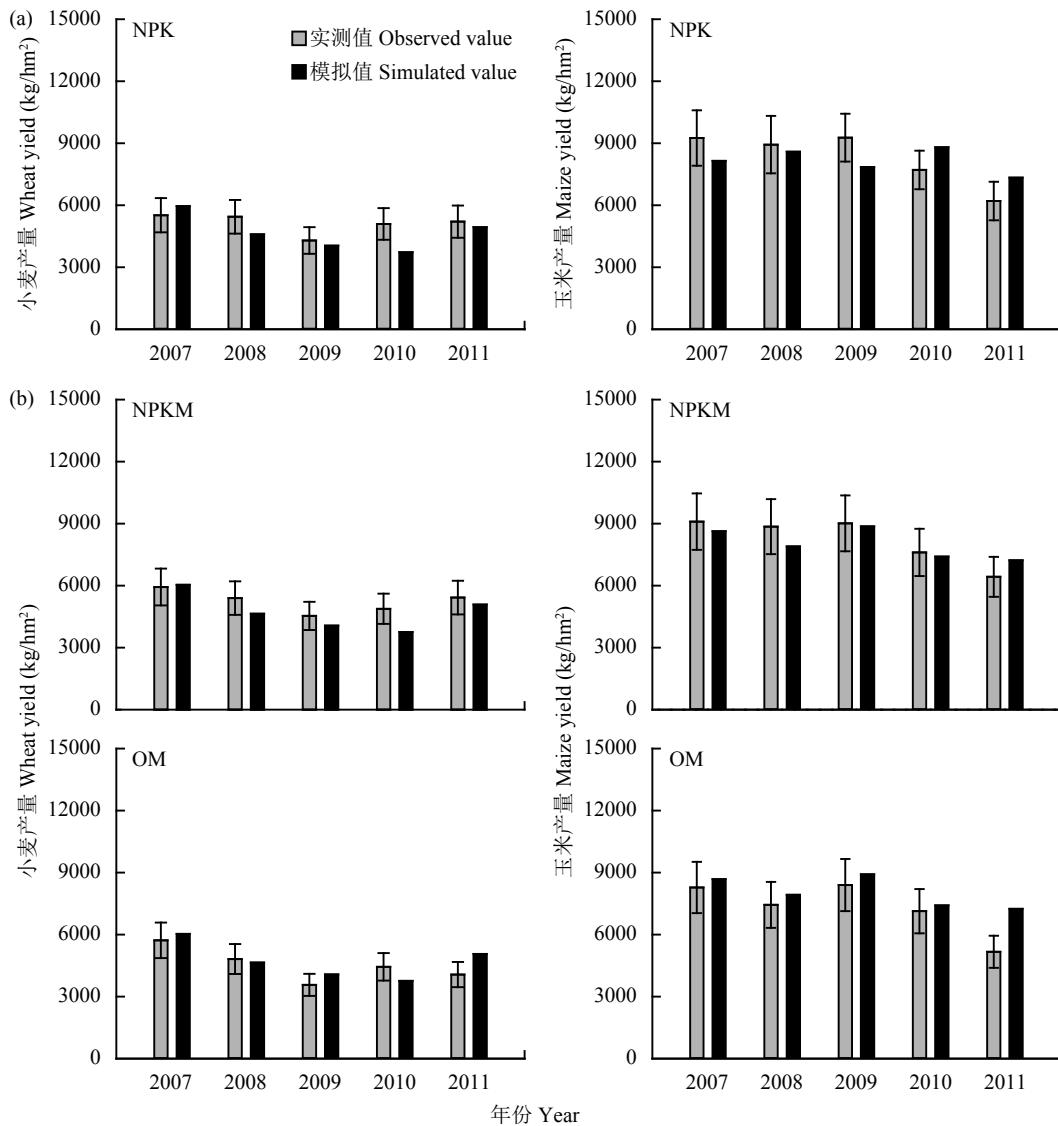


图 1 封丘点位小麦产量和玉米产量的模拟值与实测值

Fig. 1 Simulated and observed grain yields of wheat and maize over the simulated period at the Fengqiu site

[注 (Note): (a) 模型参数化的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for calibration; (b) 模型验证的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for validation; 误差线代表标准误差 The error bars represent standard deviations; 实测数据来源于已发表文献<sup>[39]</sup> Observed values come from published literature<sup>[39]</sup>.]

## 2.2 土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放模拟

准确模拟土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的基本条件是对土壤温度和土壤水分的准确模拟。结果显示 (图 3、表 4), 模型通过对土壤温度和土壤水分模拟的检验, 土壤温度的模拟效果,  $R^2$  为 0.92~0.93 ( $P < 0.01$ ), RMSE 为 2.11%~2.32%; 土壤水分的模拟效果,  $R^2$  为 0.12~0.23 ( $P < 0.01$ ), RMSE 为 8.87%~9.32%。

土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量的模拟值和实测值如图 4 所示。模型可以很好地模拟出土壤 CO<sub>2</sub> 排放的动态变化。NPK、NPKM 和 OM 三个施肥处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放量的模拟值依次为 C 0.25~3.57、0.27~3.80 和 0.22~3.15 g/(m<sup>2</sup>·d), 实测值依次为 C 0.04~4.13、

0.06~4.12 和 0.06~3.48 g/(m<sup>2</sup>·d)。统计结果表明 (表 4), 用于模型参数化的 NPK 处理和用于验证的 NPKM、OM 处理的 CO<sub>2</sub> 模拟值与实测值之间的相关系数分别为 0.80 ( $n=68$ ,  $P < 0.01$ ) 和 0.72 ( $n=136$ ,  $P < 0.01$ ), RMSE 分别为 4.03% 和 4.11%, EF 分别为 0.78 和 0.77。

模型模拟了土壤 N<sub>2</sub>O 排放的季节变化模式, 基本捕捉了农田施肥后的土壤 N<sub>2</sub>O 主要排放峰, 并且模拟的排放峰的峰值及出现时间均与实际监测的较为接近 (图 4)。用于模型参数化和验证的模拟值与实测值之间的相关系数分别为 0.16 ( $n=66$ ,  $P < 0.01$ ) 和 0.21 ( $n=132$ ,  $P < 0.01$ ), RMSE 分别为 9.99% 和 9.97%, EF 分别为 0.24 和 0.28 (表 4)。

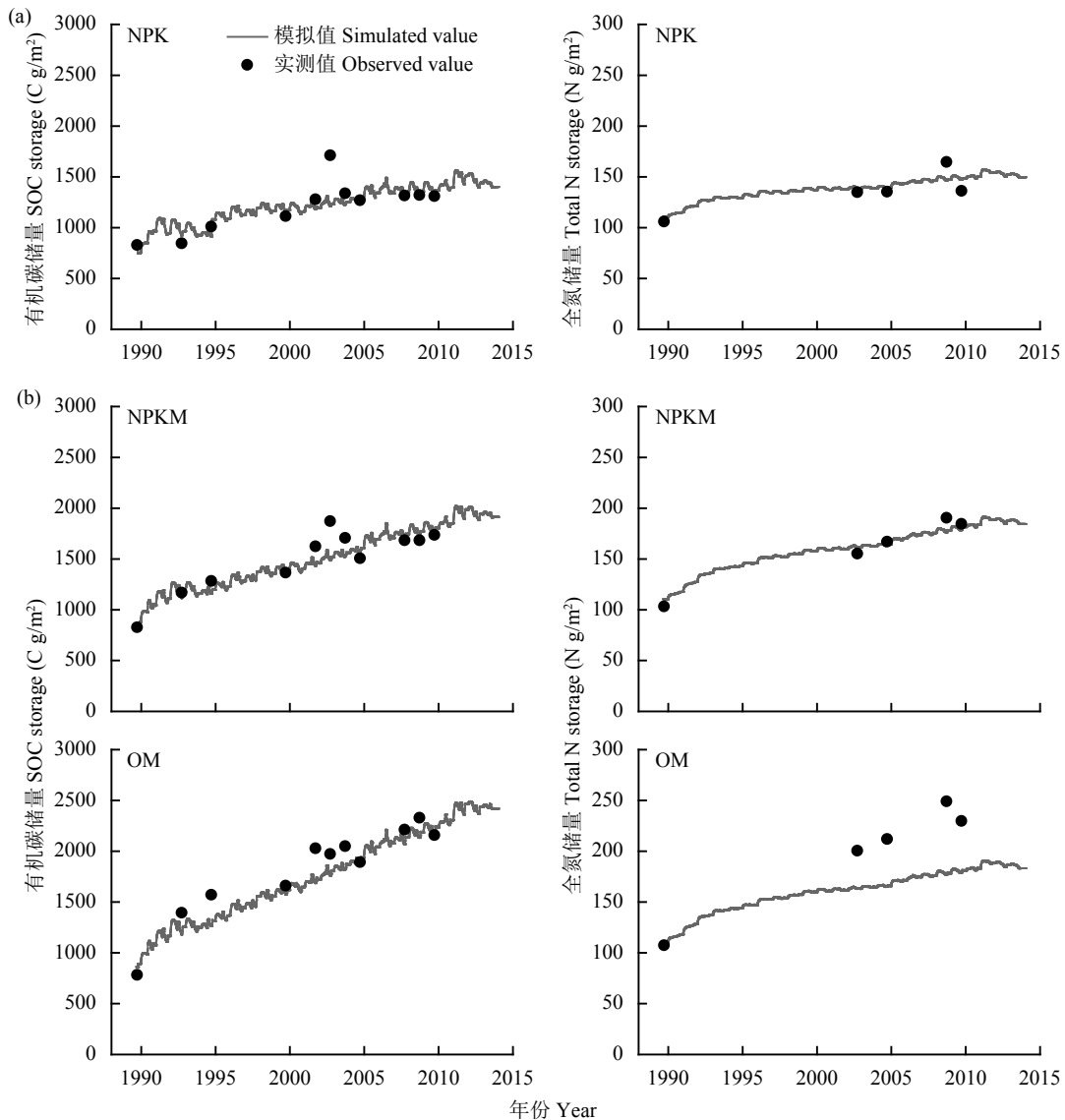


图 2 封丘点位 0—20 cm 土层 SOC 储量和全氮储量的模拟值与实测值

Fig. 2 Simulated and observed SOC and TN storages in top 20 cm of soil over the simulated period at the Fengqiu site

[注 (Note): (a) 模型参数化的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for calibration; (b) 模型验证的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for validation; 实测数据来源于已发表文献<sup>[34,39-42]</sup> Observed values come from published literature<sup>[34,39-42]</sup>.]

### 2.3 长期不同施肥情景下作物产量的变化

表 5 为 SPACSYS 模型模拟不同施肥情景 60 年 (1991—2050) 的作物年均产量、SOC 和 TN 年均储量及土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的年均排放量。与当前施肥情景相比, 减氮 50% 会显著降低玉米产量约 9%, 增氮 25% 或 50% 均不能显著提高小麦和玉米产量 (约提高 5%~7%)。

### 2.4 长期不同施肥情景下土壤有机碳储量和土壤全氮储量的变化预测

长期施肥 60 年 (1991—2050) 各处理 SOC 和全氮储量均表现为缓慢上升的趋势, 150%OM 处理 SOC

储量增量最大, 由 C 9.47 t/hm<sup>2</sup> 升高到 C 59.20 t/hm<sup>2</sup>, 提升了 525%; 50%NPK 处理增量最小, 由 C 9.18 t/hm<sup>2</sup> 升高到 C 21.08 t/hm<sup>2</sup>, 提升了 130%。全氮储量较 SOC 储量增加量小, 其中 150%NPKM 处理增量最大, 由 N 1.13 t/hm<sup>2</sup> 升高到 N 2.39 t/hm<sup>2</sup>, 提升了 112%; 50%NPK 处理增量最小, 由 N 1.11 t/hm<sup>2</sup> 升高到 N 1.49 t/hm<sup>2</sup>, 提升了 34%(图 5)。当前施肥情景及减氮 25% 施肥情景下, 有机肥配施化肥处理的 SOC 和全氮年均储量显著高于单施化肥处理, 如 NPKM 处理与 NPK 处理相比, SOC 和全氮年均储量分别增加了 C 6.4 t/hm<sup>2</sup> 和 N 0.31 t/hm<sup>2</sup>; 75%NPKM 处理与

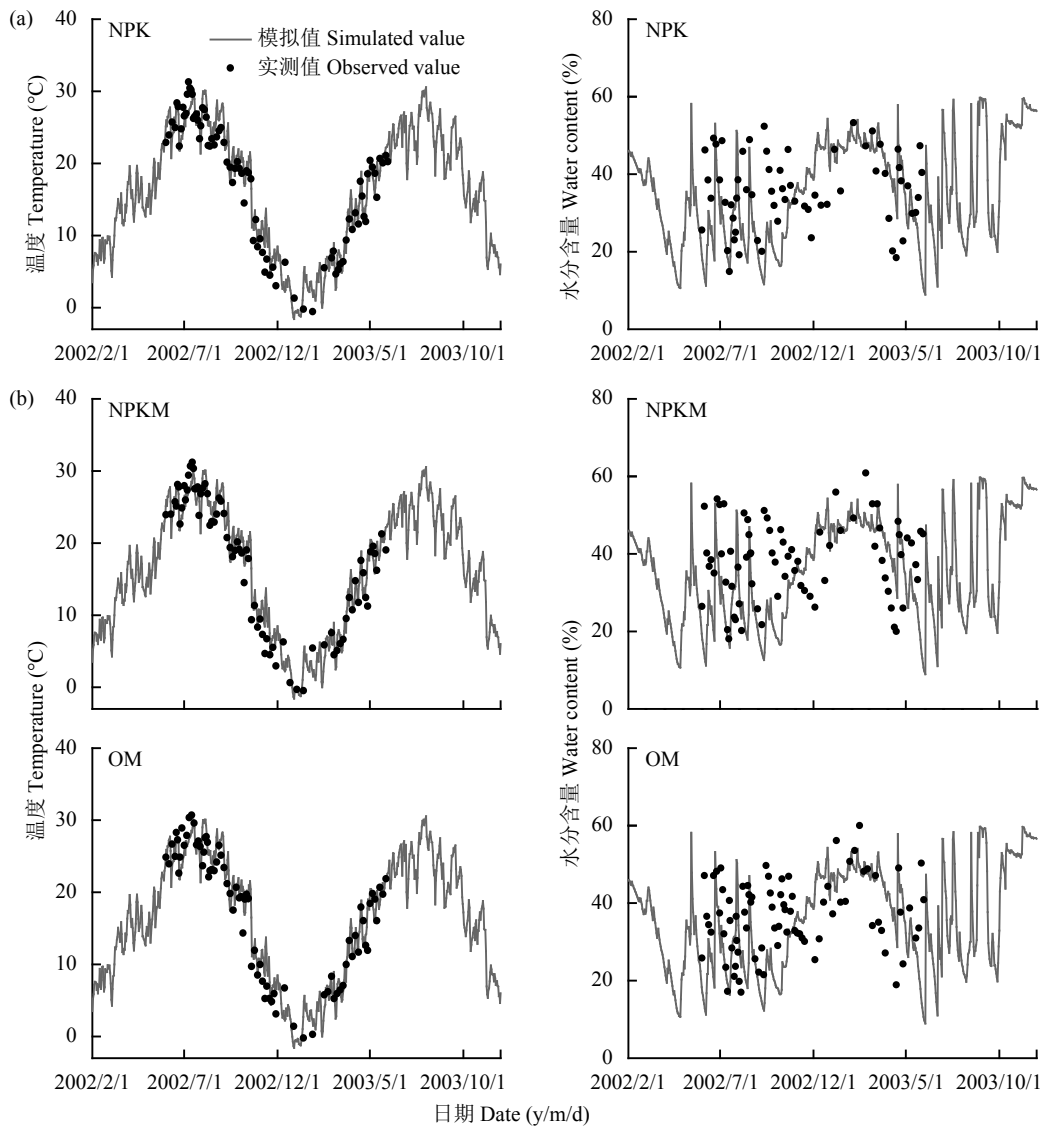


图 3 封丘 2002—2003 年 5 cm 土层土壤温度和水分的模拟值和实测值

Fig. 3 Simulated and observed soil temperature and water content at the 5 cm depth at Fengqiu from 2002 to 2003

[注 (Note): (a) 模型参数化的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for calibration; (b) 模型验证的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for validation; 实测数据来源于已发表文献<sup>[34]</sup> Observed values come from published literature<sup>[34]</sup>.]

75%NPK 处理相比, SOC 和全氮年均储量分别增加了 C 4.81 t/hm<sup>2</sup> 和 N 0.26 t/hm<sup>2</sup>(表 5)。

## 2.5 长期不同施肥情景下土壤-植物系统的年均碳氮收支

长期不同施肥情景下农田土壤均表现为表观碳库, 其中 150%OM 处理的土壤碳库最大, 达到 C 7885 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。与当前施肥情景相比, 减氮施肥可以减弱土壤的“碳汇”效应, 增氮施肥可以加强土壤的“碳汇”效应。同一施氮量水平下, 土壤表观碳库的大小顺序为: 单施有机肥 > 有机肥配施化肥 > 单施化肥 (表 6)。长期不同施肥情景下农田土壤氮收支

如表 7 所示, 150%OM 处理表现为表观“氮源”, 125%NPKM、125%OM 和 150%NPKM 处理表现为微弱的表观“氮汇”, 150%NPK 处理的土壤“氮汇”效应最大, 达到 N 115.4 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。同一施氮量水平下, 单施化肥处理的土壤“氮汇”效应大于有机肥配施化肥和单施有机肥处理。减氮施肥可以降低通过反硝化作用及淋溶径流途径的氮素损失。

## 2.6 长期不同施肥情景下土壤 CO<sub>2</sub> 和土壤 N<sub>2</sub>O 排放

长期施肥 60 年 (1991—2050) 各处理土壤 CO<sub>2</sub> 的年均排放量在 C 3288~3586 kg/hm<sup>2</sup> 之间, 均无显著差异 (表 5), 说明减氮施肥及有机肥配施化肥均不能显

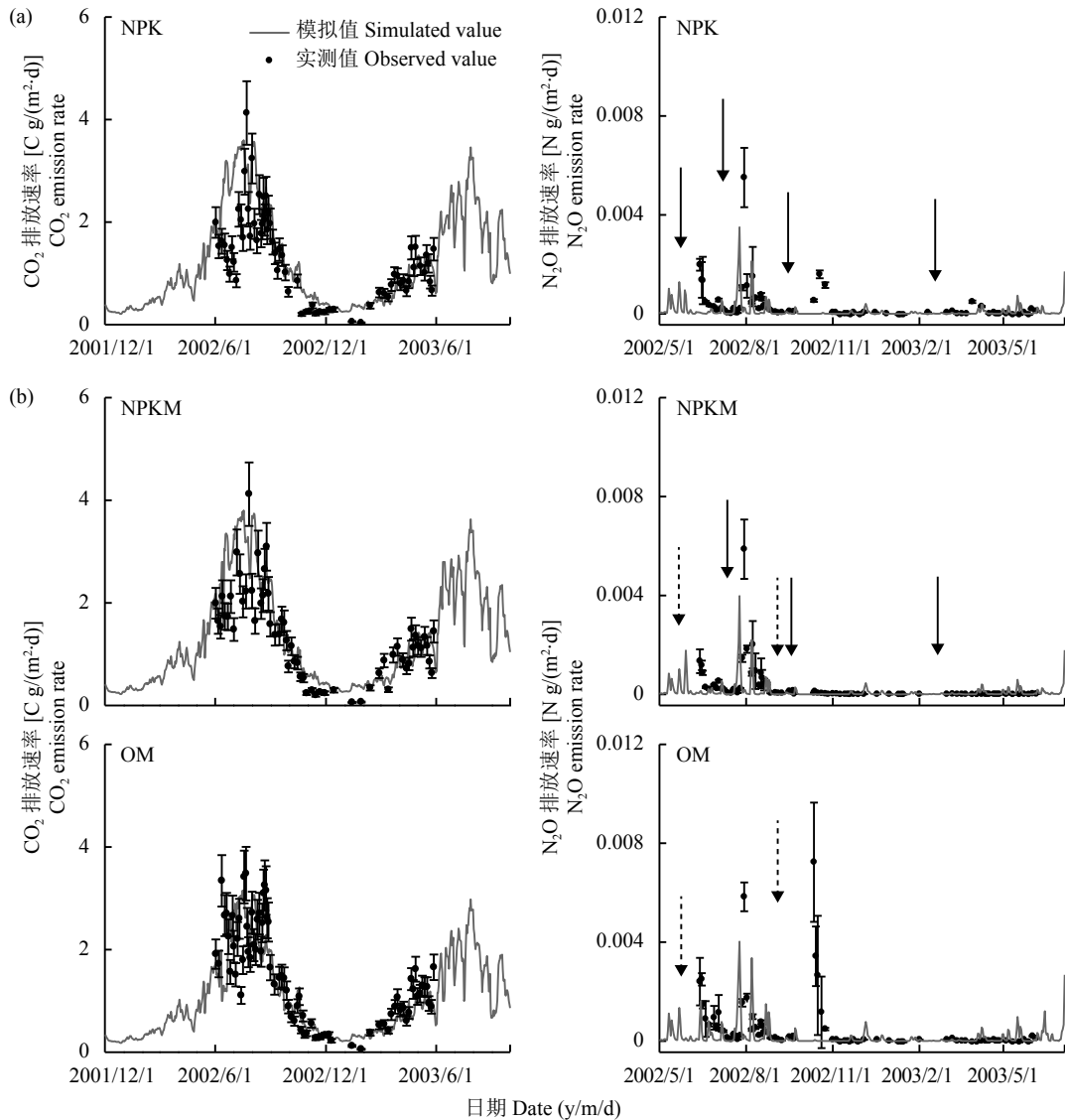


图4 封丘2002—2003年土壤CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放的模拟值和实测值

Fig. 4 Simulated and observed soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O flux from 2002 to 2003 at the Fengqiu site

[注 (Note) : (a) 模型参数化的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for calibration; (b) 模型验证的模拟值和实测值之间的比较 Comparison of simulated values with observed values for validation; (a) 和 (b) 中的实线箭头代表施用化肥, 虚线箭头代表施用有机肥 Solid arrows in (a) and (b) represent the application events of mineral fertilizers, dot arrows represent application events of manure. 误差线代表标准误差 The error bars represent standard deviations of data points ( $n=3$ ); 实测数据来源于已发表文献<sup>[34,43]</sup> Observed values come from published literature<sup>[34,43]</sup>.]

著降低土壤CO<sub>2</sub>年均排放量。长期施肥60年(1991—2050)各处理土壤N<sub>2</sub>O的年均排放量差异明显, 其中150%OM处理最高, 达到N 2.85 kg/hm<sup>2</sup>, 50%NPK处理最低, 为N 0.23 kg/hm<sup>2</sup> (图6)。当前施肥情景下, 单施有机肥处理减氮25%或减氮50%均能显著降低N<sub>2</sub>O年均排放量。

### 3 讨论

#### 3.1 模型模拟作物产量和土壤碳氮储量

统计结果显示 (表4), SPACSYS模型可以很好

地模拟小麦和玉米产量的年际动态变化, 只有个别年份的模拟值与实测值有些偏差, 如模型高估了OM处理2011年的玉米产量约42%, 这可能是由于模型在输入数据方面存在误差, 如模型使用的气象数据来源于中国气象局 (<http://data.cma.cn/site/index.html>) 开封实验站, 这可能与封丘当地的小气候之间存在差异。本研究显示SPACSYS模型低估了OM处理的全氮储量, 由于缺少试验数据支撑, 本文未对土层硝态氮的淋失进行验证, 因此, 高估氮素淋失量可能是造成全氮储量模拟值偏低的原因之一。有研

表 5 长期不同施肥情景下作物年均产量、土壤碳氮年均储量及土壤温室气体年均排放量 (1991—2050)

Table 5 Average annual grain yield, average annual SOC and total N storages and average annual greenhouse gas emissions under different long-term fertilization scenarios during the experimental period (1991—2050)

施肥情景 Fertilization scenarios	处理 Treatment	玉米产量 (kg/hm <sup>2</sup> ) Maize yield	小麦产量 (kg/hm <sup>2</sup> ) Wheat yield	SOC (C t/hm <sup>2</sup> )	全氮 Total N (N t/hm <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> [C kg/(m <sup>2</sup> ·a)]	N <sub>2</sub> O [N kg/(m <sup>2</sup> ·a)]
当前施肥 Current rate [N 300 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	NPK	6839 bcd	5074 abcd	15.55 h	1.49 hi	3288 a	0.30 e
	NPKM	6888 abcd	5152 abc	21.95 ef	1.80 c	3569 a	0.41 de
	OM	6922 abcd	5128 abc	28.26 c	1.60 f	3413 a	0.84 c
减氮 25% Reducing 25% N [N 225 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	75%NPK	6680 def	4879 bcd	15.50 h	1.43 ij	3283 a	0.26 e
	75%NPKM	6727 def	4984 abcd	20.31 fg	1.69 de	3558 a	0.31 e
	75%OM	6752 cde	4974 abcd	25.05 d	1.52 gh	3404 a	0.47 de
减氮 50% Reducing 50% N [N 150 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	50%NPK	6209 f	4484 d	15.48 h	1.37 j	3301 a	0.23 e
	50%NPKM	6244 ef	4556 cd	18.67 gh	1.58 fg	3541 a	0.26 e
	50%OM	6260 ef	4545 cd	21.84 ef	1.45 i	3386 a	0.31 e
增氮 25% Increase 25% N [N 375 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	125% NPK	7200 abcd	5382 ab	15.58 h	1.55 fgh	3304 a	0.36 de
	125%NPKM	7266 abc	5401 ab	23.58 de	1.91 b	3578 a	0.58 d
	125%OM	7301 ab	5439 ab	31.47 b	1.67 e	3425 a	1.56 b
增氮 50% Increase 50% N [N 450 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	150%NPK	7290 abc	5444 ab	15.60 h	1.61 f	3300 a	0.43 de
	150%NPKM	7379 ab	5530 a	25.20 d	1.99 a	3586 a	0.86 c
	150%OM	7413 a	5508 a	34.65 a	1.74 cd	3429 a	2.85 a

注 (Note): 数值后不同小写字母代表不同处理间差异显著达到 0.05 水平水平 Values followed by different small letters mean significant difference among different treatments at 0.05 level.

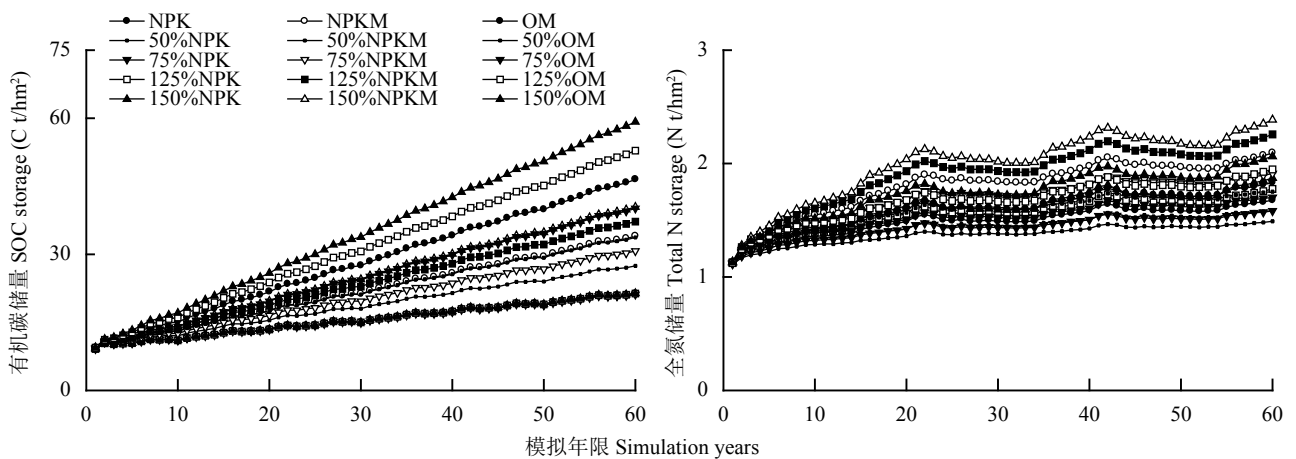


图 5 长期不同施肥情景下 0—20 cm 土层 SOC 储量和全氮储量的动态变化

Fig. 5 SOC and TN storages in the top 20 cm of soil under different long-term fertilization scenarios

究表明, 华北平原农田施氮量为 N 340 kg/(hm<sup>2</sup>·a) 时, 土层氮素淋失量为 N 17.3 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[44]</sup>。李晓欣等<sup>[45]</sup>对华北地区太行山山前平原冬小麦-夏玉米氮素淋失研究得出, 当施氮量为 N 200、400 和 800 kg/(hm<sup>2</sup>·a) 时, 通过 180 cm 土层的硝态氮淋失量分别为 2、38 和 160 kg/hm<sup>2</sup>。由此可见, 本研究可能高估了土壤硝态氮的淋失量进而导致对全氮储量的模拟偏低。

### 3.2 模型模拟土壤温度、土壤水分和土壤温室气体排放

SPACSYS 模型将土壤-植物-大气系统的水分分为冠层水、地表水和剖面水三个部分。模型利用 Penman-Monteith 方程<sup>[46]</sup>对植物潜在蒸散量进行估算。有研究表明辐射在 Penman-Monteith 方程中起到重要作用, 辐射的准确度直接影响到方程的计算精

表 6 长期不同施肥情景下土壤-植物系统的年均碳收支预测 [C kg/(hm<sup>2</sup>·a)]

Table 6 Simulated average annual C inputs and outputs of the soil-plant system under different long-term fertilization scenarios from 1991 to 2050

施肥情景 Fertilization scenario	处理 Treatment	输入 Input			输出 Output				收支 Budget
		光合 Photosynthesis	有机肥 Manure	收获 Harvest	植物呼吸 Crop respiration	土壤呼吸 Soil respiration	淋溶 Leaching		
当前施肥 Current rate	NPK	19755 ± 2995	0	11414 ± 1757	3525 ± 673	3288 ± 702	94 ± 64	1435 ± 819	
[N 300 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	NPKM	19885 ± 2969	2133	11493 ± 1754	3541 ± 669	3569 ± 744	36 ± 24	3379 ± 808	
	OM	19880 ± 2981	4265	11480 ± 1757	3545 ± 668	3413 ± 707	42 ± 27	5665 ± 799	
减氮 25% Reducing 25%N	75% NPK	19331 ± 2955	0	11168 ± 1735	3452 ± 670	3217 ± 714	190 ± 86	1305 ± 836	
[N 225 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	75% NPKM	19443 ± 2960	1600	11234 ± 1746	3463 ± 669	3487 ± 745	46 ± 31	2813 ± 811	
	75% OM	19450 ± 2954	3199	11231 ± 1742	3467 ± 667	3336 ± 708	49 ± 34	4566 ± 802	
减氮 50% Reducing 50% N	50% NPK	18145 ± 2968	0	10490 ± 1751	3232 ± 671	3020 ± 705	58 ± 46	1345 ± 810	
[N 150 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	50% NPKM	18098 ± 2947	1067	10452 ± 1735	3227 ± 669	3240 ± 745	146 ± 92	2100 ± 828	
	50% OM	18101 ± 2941	2133	10447 ± 1731	3229 ± 668	3098 ± 709	84 ± 60	3375 ± 807	
增氮 25% Increase 25% N	125% NPK	20855 ± 2973	0	12059 ± 1756	3713 ± 670	3469 ± 705	45 ± 35	1569 ± 803	
[N 375 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	125% NPKM	20916 ± 2979	2666	12090 ± 1762	3725 ± 668	3757 ± 743	32 ± 20	3978 ± 806	
	125% OM	20929 ± 2970	5332	12089 ± 1755	3731 ± 666	3596 ± 706	41 ± 26	6804 ± 794	
增氮 50% Increase 50% N	150% NPK	21044 ± 3017	0	12168 ± 1778	3751 ± 672	3498 ± 704	36 ± 29	1591 ± 804	
[N 450 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	150% NPKM	21143 ± 2984	3199	12220 ± 1767	3767 ± 667	3801 ± 744	32 ± 20	4522 ± 806	
	150% OM	21142 ± 2997	6398	12209 ± 1771	3771 ± 667	3635 ± 707	39 ± 25	7885 ± 796	

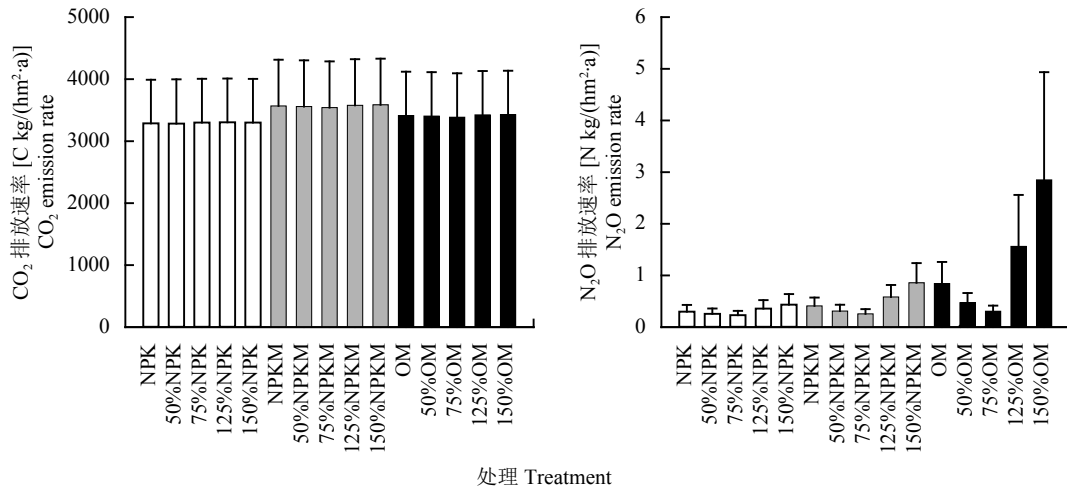
表 7 长期不同施肥情景下土壤-植物系统的年均氮收支预测 [N kg/(hm<sup>2</sup>·a)]

Table 7 Simulated average annual N inputs and outputs of the soil-plant system under different long-term fertilization scenarios from 1991 to 2050

施肥情景 Fertilization scenario	处理 Treatment	输入 Input			输出 Output					收支 Budget
		氮沉降 Deposition	化肥 Fertilizer	有机肥 Manure	收获 Harvest	淋溶 Leaching	径流 Runoff	反硝化 Denitrification	N <sub>2</sub> O 排放 N <sub>2</sub> O emission	
当前施肥 Current rate	NPK	44.4 ± 3.4	300	0	221.0 ± 21.6	22.1 ± 11.7	8.0 ± 10.9	2.92 ± 0.69	0.30 ± 0.13	90.4 ± 27.1
[N 300 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	NPKM	44.5 ± 3.4	150	150	271.2 ± 32.0	37.4 ± 20.3	7.1 ± 9.2	8.59 ± 2.44	0.41 ± 0.16	20.2 ± 43.0
	OM	44.5 ± 3.4	0	300	265.7 ± 31.6	48.9 ± 24.4	2.7 ± 2.5	11.09 ± 2.44	0.84 ± 0.42	16.1 ± 44.5
减氮 25% Reducing 25% N	75% NPK	44.5 ± 3.4	225	0	176.5 ± 16.9	12.0 ± 7.0	6.7 ± 8.6	1.90 ± 0.38	0.26 ± 0.10	72.4 ± 18.6
[N 225 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	75% NPKM	44.5 ± 3.4	112.5	112.5	217.5 ± 23.6	19.2 ± 10.5	6.0 ± 7.3	4.98 ± 1.39	0.31 ± 0.12	21.8 ± 29.1
	75% OM	44.5 ± 3.4	0	225	213.2 ± 24.0	28.2 ± 14.4	2.7 ± 2.5	6.82 ± 1.42	0.47 ± 0.19	18.6 ± 31.1
减氮 50% Reducing 50% N	50% NPK	44.5 ± 3.4	150	0	124.6 ± 13.5	5.0 ± 3.5	5.4 ± 6.2	1.25 ± 0.22	0.23 ± 0.08	58.3 ± 12.9
[N 150 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	50% NPKM	44.5 ± 3.4	75	75	151.5 ± 18.6	7.5 ± 4.9	5.0 ± 5.5	2.59 ± 0.64	0.26 ± 0.09	27.9 ± 19.9
	50% OM	44.5 ± 3.4	0	150	148.9 ± 18.6	13.4 ± 7.4	2.7 ± 2.6	3.78 ± 0.81	0.31 ± 0.11	25.7 ± 21.6
增氮 25% Increase 25% N	125% NPK	44.5 ± 3.4	375	0	271.0 ± 27.9	36.0 ± 18.9	9.3 ± 13.2	4.41 ± 1.20	0.36 ± 0.16	98.8 ± 38.1
[N 375 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	125% NPKM	44.5 ± 3.5	187.5	187.5	330.3 ± 41.2	61.3 ± 31.9	8.1 ± 11.0	13.01 ± 3.54	0.58 ± 0.23	6.8 ± 59.1
	125% OM	44.5 ± 3.5	0	375	323.6 ± 39.5	74.9 ± 37.3	2.6 ± 2.5	16.42 ± 3.78	1.56 ± 1.00	2.0 ± 59.4
增氮 50% Increase 50% N	150% NPK	44.5 ± 3.4	450	0	308.0 ± 34.1	54.4 ± 28.5	10.4 ± 15.4	6.33 ± 1.81	0.43 ± 0.21	115.4 ± 50.6
[N 450 kg/(hm <sup>2</sup> ·a)]	150% NPKM	44.5 ± 3.5	225	225	372.7 ± 48.3	91.8 ± 47.7	9.1 ± 12.8	18.06 ± 4.71	0.86 ± 0.38	2.8 ± 76.1
	150% OM	44.5 ± 3.5	0	450	366.9 ± 48.1	103.8 ± 50.7	2.6 ± 2.5	23.25 ± 5.78	2.85 ± 2.08	-2.0 ± 75.3

度<sup>[47]</sup>。因此, 本研究所使用的气象数据的误差可能是产生土壤水分模拟误差的原因之一。另外, 方程在估算植物蒸发量时将气孔阻力设置为一个定值, 而

实际上植物叶片的气孔阻力是随叶龄及生育期的变化而变化的<sup>[48]</sup>, 因此, 气孔阻力的设置也可能导致土壤水分的模拟效果不好。而本研究所使用的土壤水

图 6 长期不同施肥情景下土壤 CO<sub>2</sub> 和土壤 N<sub>2</sub>O 的年均排放量Fig. 6 Average annual soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions under different long-term fertilization scenarios

分实测数据为土壤表层 (0—5 cm) 水分含量, 易受外界环境因素 (如降雨、风速等) 的影响, 往往实测值的准确性也较低。土壤水分含量模拟的准确度会影响到土壤 N<sub>2</sub>O 排放量模拟的准确度, 土壤含水量主要通过影响土壤通气状况和土壤微生物的活性进而影响土壤 N<sub>2</sub>O 的排放<sup>[49]</sup>。

### 3.3 模型模拟不同施肥情景下的作物产量

不同施肥情景下作物产量的模拟结果显示 (表 5), 减氮 25%~50% 基本能够维持现有作物产量, 因此封丘地区可以适当降低氮肥施用量来减少资源浪费及环境污染。有研究表明华北平原部分地区农田减氮施肥不会降低小麦玉米产量<sup>[50]</sup>。朱兆良<sup>[51]</sup>研究表明, 每季作物施氮量控制在 120~180 kg/hm<sup>2</sup> 时, 小麦和玉米都能达到较高的产量。刘学军等<sup>[52]</sup>进一步研究表明在年施氮量减至 60 kg/hm<sup>2</sup> 时, 小麦产量会显著降低。

### 3.4 模型模拟不同施肥情景下的土壤碳氮储量、土壤碳氮收支及土壤温室气体排放

增氮情景下土壤碳、氮储量及土壤温室气体排放的模拟结果显示 (表 5), 单施化肥处理及有机肥配施化肥处理增氮 25% 均不能显著提高 SOC 年均储量, 单施有机肥处理增氮 25% 或 50% 均可显著提高 SOC 年均储量, 但也提高了土壤 N<sub>2</sub>O 排放量。当前施肥情景及减氮施肥情景下土壤碳氮储量及土壤温室气体排放的模拟结果显示 (表 5), OM 处理的 SOC 年均储量最大, 达到 C 28.26 t/hm<sup>2</sup>, 即 OM 处理对于土壤固碳的效应是最大的。然而 OM 处理的 N<sub>2</sub>O 年均排放量也是最高的, 达到了 N 0.84 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 约

为 NPKM 和 NPK 处理的 2~3 倍。NPKM 处理的 SOC 年均储量显著高于 NPK 处理, 而其 N<sub>2</sub>O 年均排放量显著低于 OM 处理。笔者的研究结果也验证了前人研究, 农田土壤施用有机肥可以提高 SOC 固定, 同时也增加了土壤 N<sub>2</sub>O 的排放量<sup>[53-55]</sup>。其原因可能是: 1) 有机肥的施用为异养微生物的活动提供了大量的能量来源, 因此增加了反硝化过程中的 N<sub>2</sub>O 产生量<sup>[56-57]</sup>; 2) 有机肥的施用刺激了硝化过程中的 N<sub>2</sub>O 产生量<sup>[58-59]</sup>。也有研究表明施用有机肥能够减少土壤 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[60]</sup>。

不同施肥情景下土壤碳氮收支的模拟结果表明 (表 6 和表 7), 不同施肥措施下封丘农田土壤-作物系统均作为大气 CO<sub>2</sub> 不同程度的“汇”, “碳汇”强度表现为单施有机肥 > 有机肥配施化肥 > 单施化肥。相比单施化肥处理, 有机肥配施化肥处理和单施有机肥处理能增加土壤“碳汇”, 这与前人研究结果较为一致。潘根兴等<sup>[61]</sup>认为长期有机无机肥料配合施用可以显著增加土壤表层有机碳含量; 金琳等<sup>[62]</sup>研究表明, 有机无机肥料配合施用对“碳汇”效应较为明显; 李洁静等<sup>[63]</sup>研究表明, 有机无机肥料配施处理的 SOC 含量是单施化肥处理的 3 倍。减氮施肥可以降低氮素损失, 当前施肥情景下单施化肥处理、有机肥配施化肥处理和单施有机肥处理通过淋溶、径流及反硝化途径的氮素总损失量分别达到施氮量的 11%、18% 和 21%, 这与 Zhang 等<sup>[30]</sup>的研究结果类似, 而与岳现录等<sup>[64]</sup>的研究结果有所不同, 他们指出有机肥的氮损失低于化肥氮损失约 30%, 这可能是由于所使用的有机肥不同所造成的<sup>[65-66]</sup>。

针对华北平原农田, 已有大量研究表明施用有机肥是保障粮食产量、提高土壤肥力及兼顾环境效

益的最佳选择<sup>[67-68]</sup>。农田氮肥施用量过高, 导致了一系列的环境问题, 减氮施肥成为当前华北平原农田施肥的重要措施<sup>[69-71]</sup>。已有研究表明减氮施肥对于维持作物产量及减缓温室效应具有重要作用。Han 等<sup>[72]</sup>研究得出华北平原农田土壤当前施氮量下 (250 kg/hm<sup>2</sup>) 减氮 20% 不会降低作物产量, 相反分别降低了冬小麦-夏玉米轮作周期土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放量 6.4% 和 16.2%。李新华等<sup>[73]</sup>对黄淮海地区小麦季减氮施肥条件下温室气体排放的研究得出, 与农民传统施氮量 (N 300 kg/hm<sup>2</sup>) 相比, 减氮 10%、20% 和 30%, 小麦产量无显著变化, 农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放量分别降低了 4.9%、18.7% 和 36.5%, N<sub>2</sub>O 排放量分别降低了 21.9%、32.5% 和 40.4%。综上, 封丘地区可在当前施氮量的基础上适当降低氮肥施用量 (减氮 25%) 并采用有机肥配施化肥或单施有机肥的方式来维持作物产量、提升土壤肥力及降低温室气体排放, 起到固碳减排的作用, 即可将 75%NPKM 或 75%OM 处理作为当前封丘农田的优化施肥处理。

## 4 结论

SPACSYS 模型可以模拟中国华北平原典型农田冬小麦-夏玉米轮作体系的农作物产量、SOC 和 TN 储量以及土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放情况。但是模型低估了 OM 处理的 TN 储量。因此, 下一步研究需对模型进行相应的改进。施肥管理情景模拟结果表明, 至 2050 年, 各处理 SOC 和全氮储量都有不同程度的提升。另外, 可适当降低该地区氮肥施用量 (减氮 25%) 并采用有机肥配施化肥或单施有机肥的方式来维持作物产量、提升土壤肥力, 同时降低温室气体排放。

## 参考文献:

- [1] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊峰, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. 环境化学, 2012, 31(4): 407-414.  
Pei S W, Zhang Y Y, Liu J F, *et al.* Greenhouse gas emission under the treatments of fertilization and wheat straw returning during the maize growing seasons[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(4): 407-414.
- [2] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013.  
Department of Climate Change, National Development and Reform Commission. Second national information circular on climate change of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Economic Press, 2013.
- [3] Cui Z L, Chen X P, Zhang F S. Current nitrogen management status and measures to improve the intensive wheat-maize system in China[J]. *Ambio*, 2010, 39(5-6): 376-384.
- [4] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China—Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2-3): 117-127.
- [5] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [6] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [7] 王少杰. 氮肥与秸秆还田对陕西关中灌区农田 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2012.  
Wang S J. Effect of nitrogen fertilizer and straw returning on CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from farmland in Guanzhong irrigation area of Shaanxi province[D]. Yangling, Shaanxi: MS Thesis of Northwest A&F University, 2012.
- [8] 王玉英, 李晓欣, 董文旭, 等. 华北平原农田温室气体排放与减排综述[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 167-174.  
Wang Y Y, Li X X, Dong W X, *et al.* Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 167-174.
- [9] 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰, Oswald Van Cleemput. 土壤含水量与 N<sub>2</sub>O 产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53-56.  
Huang G H, Chen G X, Han B, Van Cleemput O. Relationships between soil water content and N<sub>2</sub>O production[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 53-56.
- [10] Liu C Y, Wang K J, Zheng X. Responses of N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> fluxes to fertilizer nitrogen addition rates in an irrigated wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(2): 839-850.
- [11] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, *et al.* Long-term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 291(2): 275-290.
- [12] 宇万太, 姜子绍, 马强, 周桦. 施用有机肥对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1057-1064.  
Yu W T, Jiang Z S, Ma Q, Zhou H. Effect of applying manure on soil fertility[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1057-1064.
- [13] Maillard É, Angers D A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 666-679.
- [14] Smith K A, Jackson D R, Pepper T J. Nutrient losses by surface runoff following the application of organic manures to arable land. 1. Nitrogen[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 112(1): 41-51.
- [15] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Modeling global annual N<sub>2</sub>O and NO emissions from fertilized fields[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 28-29.
- [16] Zhou M H, Zhu B, Brüggemann N, *et al.* Sustaining crop productivity while reducing environmental nitrogen losses in the subtropical wheat-maize cropping systems: A comprehensive case study of nitrogen cycling and balance[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2016, 231: 1-14.

- [17] Smith P, Martino D, Cai Z C, *et al.* Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions Biological Sciences*, 2008, 363(1492): 789–813.
- [18] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, *et al.* Producing more grain with lower environmental costs[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 486–502.
- [19] Jeuffroy M H, Casadebaig P, Debaeke P, *et al.* Agronomic model uses to predict cultivar performance in various environments and cropping systems. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(1): 121–137.
- [20] Uzoma K C, Smith W, Grant B, *et al.* Assessing the effects of agricultural management on nitrous oxide emissions using flux measurements and the DNDC model[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 71–83.
- [21] Li H, Qiu J J, Wang L G, *et al.* Modeling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 24–33.
- [22] Wang Z Z, Qi Z M, Xue L L, *et al.* Modeling the impacts of climate change on nitrogen losses and crop yield in a subsurface drained field[J]. *Climatic Change*, 2015, 129(1/2): 323–335.
- [23] Ri X, Prentice I C, Spahni R, Niu H S. Modeling terrestrial nitrous oxide emissions and implications for climate feedback[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(2): 472–488.
- [24] Wang E, Oosterom E V, Meinke H, *et al.* The new APSIM-Wheat Model: Performance and future improvements[A]. Australian Society of Agronomy. 11th Australian society of agronomy conference[C]. Geelong, Australia: Australian Society of Agronomy, 2003.
- [25] Liang H, Hu K L, Batchelor W D, *et al.* An integrated soil-crop system model for water and nitrogen management in North China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25755–25774.
- [26] Li C S, Salas W, Zhang R H, *et al.* Manure-DNDC: a biogeochemical process model for quantifying greenhouse gas and ammonia emissions from livestock manure systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(2): 163–200.
- [27] Smith W N, Grant B B, Desjardins R L, *et al.* Assessing the effects of climate change on crop production and GHG emissions in Canada[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 179(5): 139–150.
- [28] Chirinda N, Kracher D, Lægdsmand M, *et al.* Simulating soil N<sub>2</sub>O emissions and heterotrophic CO<sub>2</sub> respiration in arable systems using FASSET and MoBiLE-DNDC[J]. *Plant and Soil*, 2011, 343(1/2): 139–160.
- [29] Wu L H, McGechan M B, McRoberts N, *et al.* SPACSYS: integration of a 3D root architecture component to carbon, nitrogen and water cycling-Model description[J]. *Ecological Modeling*, 2007, 200(3/4): 343–359.
- [30] Zhang X B, Xu M G, Sun N, *et al.* Modeling and predicting crop yield, soil carbon and nitrogen stocks under climate change scenarios with fertilizer management in the North China Plain[J]. *Geoderma*, 2016, 265: 176–186.
- [31] Bingham I J, Wu L H. Simulation of wheat growth using the 3D root architecture model SPACSYS: Validation and sensitivity analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(3): 181–189.
- [32] Wu L H, McGechan M B. Simulation of nitrogen uptake, fixation and leaching in a grass/white clover mixture[J]. *Grass and Forage Science*, 1999, 54(1): 30–41.
- [33] Wu L H, Whitmore A P, Bellocchi G. Modeling the impact of environmental changes on grassland systems with SPACSYS[J]. *Advances in Animal Biosciences*, 2015, 6(1): 37–39.
- [34] Meng L, Ding W X. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11): 2037–2045.
- [35] Wu L H, Rees R M, Tarsitano D, *et al.* Simulation of nitrous oxide emissions at field scale using the SPACSYS model[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 530-531: 76–86.
- [36] Zhang X B, Sun Z G, Liu J, *et al.* Simulating greenhouse gas emissions and stocks of carbon and nitrogen in soil from a long-term no-till system in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178(281): 32–40.
- [37] Wu L H, Shepherd A. Special features of the SPACSYS modeling package and procedures for parameterization and validation[J]. *Aspects of Applied Biology*, 2011, 107: 57–62.
- [38] Liang S, Li Y F, Zhang X B, *et al.* Response of crop yield and nitrogen use efficiency for wheat-maize cropping system to future climate change in northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 262: 310–321.
- [39] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变(第二版)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 408–415.
- Xu M G, Zhang W J, Huang S M, *et al.* Evolution of soil fertility in China (2nd Ed.)[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015. 408–415.
- [40] Yan X Y, Gong W. The role of chemical and organic fertilizers on yield, yield variability and carbon sequestration—results of a 19-year experiment[J]. *Plant & Soil*, 2010, 331(1/2): 471–480.
- [41] Cai Y J, Ding W X, Luo J F. Nitrous oxide emissions from Chinese maize-wheat rotation systems: A 3-year field measurement[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 65(65): 112–122.
- [42] Ding W X, Luo J F, Li J, *et al.* Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N<sub>2</sub>O and fertilizer-induced N<sub>2</sub>O emissions from an intensively cultivated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465: 115–124.
- [43] Ding W X, Meng L, Yin Y F, *et al.* CO<sub>2</sub> emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 669–679.
- [44] 李虎, 王立刚, 邱建军. 基于DNDC模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(4): 414–421.
- Li H, Wang L G, Qiu J J. Nitrate loss simulated with DNDC model and control technologies in typical cropland of North China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 414–421.
- [45] 李晓欣, 胡春胜, 张玉铭, 等. 华北地区小麦-玉米种植制度下硝态氮淋失量研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 7–10.
- Li X X, Hu C S, Zhang Y M, *et al.* Losses of nitrate-nitrogen from a wheat-corn rotation in north China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(6): 7–10.
- [46] Monteith J L. Evaporation and environment[A]. *Proceedings of the*

- 19th Symposia of the Society for Experimental Biology: The State and Movement of Water in Living Organisms[C]. London: Cambridge University Press, 1965. 205-234.
- [47] 刘国水. 作物蒸散量测定与计算方法研究[D]. 保定: 河北农业大学硕士学位论文, 2008.
- Liu G S. The study on the crop evapotranspiration measurement and computation[D]. Baoding: MS Thesis of Hebei Agricultural University, 2008.
- [48] 刘浩, 段爱旺, 孙景生, 等. 基于Penman-Monteith方程的日光温室番茄蒸腾量估算模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 208-213.
- Liu H, Duan A W, Sun J S, Liu Z G. Estimating model of transpiration for greenhouse tomato based on Penman-Monteith equation[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 208-213.
- [49] 营娜. 中国农田N<sub>2</sub>O直接排放、空间分布以及变化趋势[D]. 芜湖: 安徽师范大学硕士论文, 2014.
- Ying N. Agricultural N<sub>2</sub>O direct emissions, spatial distribution and trends in China[D]. Wuhu: MS Thesis of Anhui Normal University, 2014.
- [50] 云鹏, 高翔, 陈磊, 等. 冬小麦-夏玉米轮作体系中不同施氮水平对玉米生长及其根际土壤氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 567-574.
- Yun P, Gao X, Chen L, *et al.* Effects of different nitrogen levels on maize growth and rhizosphere soil N in winter wheat-summer maize rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(3): 567-574.
- [51] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 生态环境学报, 2000, 9(1): 1-6.
- Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction[J]. Soil and Environmental Sciences, 2000, 9(1): 1-6.
- [52] 刘学军, 巨晓棠, 张福锁. 减量施氮对冬小麦-夏玉米种植体系中氮利用与平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 458-462.
- Liu X J, Ju X T, Zhang F S. Effects of reduced nitrogen application on nitrogen use and balance in winter wheat-summer maize planting system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(3): 458-462.
- [53] Gu J X, Yuan M X, Liu J X, *et al.* Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 371-379.
- [54] Zhou M H, Zhu B, Wang S J, *et al.* Stimulation of N<sub>2</sub>O emission by manure application to agricultural soils may largely offset carbon benefits: a global meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2017, 23(10): 4068-4083.
- [55] Li C S, Frohling S, Butterbach-Bahl K. Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing[J]. Climatic Change, 2005, 72(3): 321-338.
- [56] Ju X T, Lu X, Gao Z L, *et al.* Processes and factors controlling N<sub>2</sub>O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. Environmental Pollution, 2011, 159(3): 1007-1016.
- [57] Chen Z M, Ding W X, Luo Y Q, *et al.* Nitrous oxide emissions from cultivated black soil: A case study in Northeast China and global estimates using empirical model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2015, 28(11): 1311-1326.
- [58] Meijide A, Diez J A, Sáñchezmartí N L, *et al.* Nitrogen oxide emissions from an irrigated maize crop amended with treated pig slurries and composts in a Mediterranean climate[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2007, 121(4): 383-394.
- [59] Ding W X, Luo J F, Li J, *et al.* Effect of long-term compost and inorganic fertilizer application on background N<sub>2</sub>O and fertilizer-induced N<sub>2</sub>O emissions from an intensively cultivated soil[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465(6): 115-124.
- [60] 翟振, 王立刚, 李虎, 等. 有机无机肥料配施对春玉米农田N<sub>2</sub>O排放及净温室效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2495-2501.
- Zhai Z, Wang L G, Li H, *et al.* Nitrous oxide emissions and net greenhouse effect from spring-maize field as influenced by combined application of manure and inorganic fertilizer[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(12): 2495-2501.
- [61] 潘根兴, 周萍, 张旭辉, 等. 不同施肥对水稻土作物碳同化与土壤碳固定的影响—以太湖地区黄泥土肥料长期试验为例[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3704-3710.
- Pan G X, Zhou P, Zhang X H, *et al.* Effect of different fertilization practices on crop carbon assimilation and soil carbon sequestration: A case of a paddy under a long-term fertilization trial from the Tai Lake region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3704-3710.
- [62] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. 中国农业科学, 2008, 41(3): 734-743.
- Jin L, Li Y E, Gao Q Z, *et al.* Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(3): 734-743.
- [63] 李洁静, 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉. 红壤丘陵双季稻田农田生态系统不同施肥下碳汇效应及收益评估[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2520-2525.
- Li J J, Pan G X, Li L Q, Zhang X H. Estimation of net carbon balance and benefits of rice-rice cropping farm of a red earth paddy under long term fertilization experiment from Jiangxi, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2520-2525.
- [64] 岳现录, 冀宏杰, 张认连, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米轮作体系秋季一次基施牛粪氮素损失与利用研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 592-599.
- Yue X L, Ji H J, Zhang R L, *et al.* Nitrogen loss and use efficiency of one-time basal application of cattle manure in autumn to a winter wheat-summer maize cropping system on the North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 592-599.
- [65] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放的综合影响[J]. 环境科学, 2003, 24(4): 7-12.
- Zou J W, Huang Y, Zong L G, *et al.* Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice paddy[J]. Environmental Science, 2003, 24(4): 7-12.
- [66] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5):

- 913–918.  
Dong Y H, Ouyang Z, Li Y S, *et al.* Influence of fertilization and environmental factors on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(5): 913–918.
- [67] 雷强. 有机化肥配施对华北高产农田土壤温室气体排放的影响[D]. 山西太谷: 山西农业大学硕士学位论文, 2015.  
Lei Q. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on emissions of greenhouse gases in the North China Plain[D]. Taigu, Shanxi: MS Thesis of Shanxi Agricultural University, 2015.
- [68] Liu H T, Li J, Li X, *et al.* Mitigating greenhouse gas emissions through replacement of chemical fertilizer with organic manure in a temperate farmland[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(6): 598–606.
- [69] 王秀斌, 梁国庆, 周卫, 等. 优化施下华北冬小麦/夏玉米轮作体系农田反硝化损失与N<sub>2</sub>O排放特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 48–54.  
Wang X B, Liang G Q, Zhou W, *et al.* Effect of optimized nitrogen application on denitrification losses and N<sub>2</sub>O emissions from soil in winter wheat-summer corn rotation system in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 48–54.
- [70] 盛康, 潘广元, 李友强, 等. 不同施肥模式对小麦产量和品质的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(4): 540–544.  
Sheng K, Pan G Y, Li Y Q, *et al.* Effect of different fertilizer treatments on yield and quality of wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(4): 540–544.
- [71] 杨莉琳, 贾良良, 胡春胜, 等. 太行山山前平原冬小麦-夏玉米推荐施肥指标的修正[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 89–94.  
Yang L L, Jia L L, Hu C S, *et al.* Revision of fertilizer recommendation for wheat and maize rotation in Taihang piedmont of North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 89–94.
- [72] Han X, Fan J W, Bai J H, *et al.* Effects of reduced nitrogen fertilization and biochar application on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a summer maize-winter wheat rotation field in North China[J]. *Agricultural Science and Technology*, 2016, 17(12): 2800–2808.
- [73] 李新华, 朱振林, 董红云, 等. 氮肥减施对黄淮海地区麦田温室气体排放的影响[J]. *土壤与作物*, 2016, 5(4): 215–222.  
Li X H, Zhu Z L, Dong H Y, *et al.* Effects of reduced N fertilizer application on greenhouse gas emissions from wheat fields in Huang-huai-hai area[J]. *Soils and Crops*, 2016, 5(4): 215–222.