农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

淮河流域稻麦轮作系统CH_4通量模拟及减排研究

虞晓兰, 张方敏, 方砚秋, 卢燕宇, 张凯迪, 倪婷

引用本文:
虞晓兰, 张方敏, 方砚秋, 卢燕宇, 张凯迪, 倪婷. 淮河流域稻麦轮作系统CH_4通量模拟及减排研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2346-2357.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0536

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究
王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静
农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829-1838 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181

稻麦轮作下秸秆不同利用方式还田对稻田甲烷排放的影响
张熙栋, 严玲, 周伟, 吴秋玲, 杨波, 马煜春
农业环境科学学报. 2021, 40(3): 685-692 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1003

不同遮阴处理下施肥对稻田CH_4和N_2O排放的影响
王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健
农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464-472 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响
马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISETThongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳
农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2039-2048 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477

厢作免耕下生态种养对稻田CH_4和N_2O排放的影响
陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶
农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354-1365 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015

关注微信公众号，获得更多资讯信息

虞晓兰, 张方敏, 方砚秋, 等. 淮河流域稻麦轮作系统CH_4通量模拟及减排研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2346-2357.
YU X L, ZHANG F M, FANG Y Q, et al. Simulation and reduction of CH_4 flux emission in a rice-wheat rotation system in the Huai River Basin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2346-2357.

淮河流域稻麦轮作系统CH_4通量模拟及减排研究

虞晓兰[1], 张方敏[1*], 方砚秋[1], 卢燕宇[2,3], 张凯迪[2], 倪婷[3]

(1.南京信息工程大学应用气象学院气象灾害预报预警与评估协同创新中心/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2.安徽省气象局气象科学研究所/大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3.寿县国家气候观象台,中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 安徽 寿县 232200)

摘　要: 为研究气候变化下不同管理措施对淮河流域稻麦轮作农田生态系统CH_4通量的影响,通过参数率定后的DNDC(DeNitrification-DeComposition)模型,估算了淮河流域历史时期(2000—2020年)及未来(2021—2049年)RCP4.5(中等排放强度情景)和RCP8.5(高排放强度情景)两种情景下稻麦轮作农田CH_4通量时空分布特征,评估了未来气候变化下多种田间管理措施对流域CH_4的减排能力。结果表明:淮河流域历史时期区域CH_4通量平均排放强度为125.3 kg·hm^{-2},未来两种情景(RCP4.5和RCP8.5)下区域CH_4通量平均排放强度分别为140.5 kg·hm^{-2}和150.5 kg·hm^{-2},总体均呈显著上升趋势($P<0.01$)。空间上,未来两种情景下CH_4通量空间分布特征相似,均呈现南部和西北部地区CH_4通量高,东北部和中西部地区CH_4通量低的特征。与基础措施相比,不同施肥量措施均减少了CH_4排放,但不同秸秆还田措施提高了CH_4排放水平。研究表明,在仅考虑控制淮河流域CH_4通量的情况下,秸秆不还田+减量施肥20%是未来气候变化情景下最佳田间管理措施。

关键词: 稻麦轮作农田;气候变化;CH_4通量;DNDC模型;减排措施;秸秆还田

中图分类号: S181　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2023)10-2346-12　　doi:10.11654/jaes.2023-0536

Simulation and reduction of CH_4 flux emission in a rice-wheat rotation system in the Huai River Basin, China

YU Xiaolan[1], ZHANG Fangmin[1*], FANG Yanqiu[1], LU Yanyu[2,3], ZHANG Kaidi[2], NI Ting[3]

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters / Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Anhui Institute of Meteorological Sciences / Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China; 3. Shouxian National Climatology Observatory, Huai River Basin Typical Farm Eco-meteorological Experiment Field of CMA, Shouxian 232200, China)

Abstract: To study the impact of different management measures on CH_4 fluxes in rice-wheat rotation cropland ecosystems in the Huai River Basin under future climate change scenarios, the CH_4 fluxes and their spatiotemporal characteristics during the historical period (2000—2020) and the future (2021—2049) under RCP4.5 (medium emission intensity) and RCP8.5 (high emission intensity) scenarios were estimated using the DeNitrification-DeComposition (DNDC) model following parameter calibration. Compared with the basic measure during the historical period, the CH_4 reduction capacities of different field management measures were evaluated under different future climate change scenarios. The following results were obtained. The average emission intensity of regional CH_4 flux in the basin during the historical period was 125.3 kg·hm^{-2}, whereas those in the future were 140.5 kg·hm^{-2} and 150.5 kg·hm^{-2} under RCP4.5 and RCP8.5

收稿日期: 2023-07-05　　**录用日期:** 2023-09-27

作者简介: 虞晓兰(1998—),女,江苏常熟人,硕士研究生,从事气候变化研究。E-mail:xiaolan-yu@qq.com

*通信作者:张方敏　E-mail:fmin.zhang@nuist.edu.cn

基金项目: 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(BK20220017);中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金(2021SYIAEKFMS37);中国气象局气象能力提升联合研究专项(22NLTSQ011)

Project supported: Provincial Science and Technology Innovative Program for Carbon Peak and Carbon Neutrality of Jiangsu of China (BK20220017); Joint Open Fund of Shenyang Institute of Atmospheric Environment & China Meteorological Administration (2021SYIAEKFMS37); Joint Research Project for Meteorological Capacity Improvement (22NLTSQ011)

scenarios, respectively. Furthermore, they all exhibited significant upward trends ($P<0.01$). The spatial distribution characteristics of CH_4 flux were similar under the two future scenarios, with high and low CH_4 fluxes in the southern and northwestern and northeastern and central western regions, respectively. Compared with the basic measure, different fertilizer application measures reduced CH_4 emissions, whereas straw returning measures increased them. Hence, when only CH_4 flux in the Huai River Basin was regulated, the optimal field management measure under the two future climate change scenarios was no return straw to the field with a 20% reduction in fertilizer application.

Keywords: rice-wheat rotation farmland; climate change; CH_4 flux; DNDC model; reduction measure; straw returning

20世纪中叶以来，全球气候变暖已经引起了人们的广泛关注，温室气体浓度增加是导致气候变暖的主要原因[1]。温室气体中CH_4对全球气候变暖的贡献率仅次于CO_2，但其增温潜能值是CO_2的28倍[2]。农田生态系统作为大气CH_4源和汇的重要来源，对全球CH_4通量变化有重要影响。据统计，由农业活动排放的CH_4占全球人为排放量的52%[3]，我国作为农业大国，农田生态系统CH_4通量研究已成为我国气候变化研究的重要内容与热点。

目前，区域农田CH_4通量的研究已有许多，研究发现不同区域的农田CH_4通量存在很大的空间差异。Zhang等[4]研究了我国稻田CH_4排放的空间特征，发现温度高、有机质施用量大的华南、华中和华东地区CH_4排放水平较高；吴梦琴等[5]以湖北省为例，发现汉江平原CH_4排放量最高，鄂东南次之，鄂西北最低。同一地区不同时期的CH_4排放量也存在很大差异，比如，在三江平原，随着水稻种植量的爆炸性增长，2000年代和2010年代的CH_4排放量均明显多于1990年代[6]。此外，已有研究表明气候变化以及种植制度会影响农田CH_4通量。田展等[7]发现气候变化导致我国水稻田1991—2010年的平均CH_4通量增加了0.25 $kg\cdot hm^{-2}$。研究认为稻麦轮作的CH_4排放量高于水稻-冬闲（油菜、玉米、紫云英或蚕豆）轮作[8-12]。同时，稻麦轮作制度是我国典型的种植制度之一，占我国粮食生产面积的8.2%，是我国温室气体排放的重要来源，其中稻田产生的CH_4占农田CH_4排放量的31.5%[13]。因此，在未来气候变化情境下，探究区域稻麦轮作农田的CH_4通量对我国温室气体减排和粮食安全保障措施实施有重要意义。

近年来，国家一直鼓励秸秆还田，但不同的秸秆还田模式或比例对农田CH_4通量的影响有所不同[14]。研究表明，相比于秸秆不还田，全量还田和半量还田分别使CH_4排放量增加39.56%和12.38%，且相较于全还田与不还田，秸秆半量还田可以获得较高的作物产量和较低温室气体排放量[15]。此外，张俊等[16]指出秸秆还田模式下，适当减少后期氮肥用量可使CH_4减排31.7%~75.7%，但是，赵峥等[17]指出化肥减量25%+秸秆还田会增加CH_4排放量，却也增加土壤的碳储量。由此可见，在未来气候变化背景下，可以通过控制秸秆还田比例或选择合理的秸秆还田+减肥方式，制定出最优减排措施，进而应对气候变化并保证粮食生产。

淮河流域作为我国重要的粮食生产基地，稻麦轮作是该流域主要耕作模式之一，该流域农田生态系统CH_4通量的研究对我国区域农田CH_4通量总量有重要影响。因此，本文以淮河流域作为研究对象，运用站点观测资料验证后的DNDC模型，分析淮河流域历史时期（2000—2020年）和未来（2020—2049年）不同气候变化情景下稻麦轮作农田CH_4通量的时空变化特征，并评估未来不同气候变化情景下的减排措施，以期为准确评估全球气候变化下的农田生态系统的CH_4通量及制定相应的减排措施提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮河流域的地理位置位于30.96°~36.31°N、111.94°~121.39°E（淮河水利委员会，2012），在省级区划上包括江苏、安徽、河南三省以及山东南部部分地区，流域总面积超过27万平方公里。该流域整体上地势平坦开阔，以平原地貌为主，只有西部、南部和东北部的部分地区海拔较高。淮河流域的气候特征以淮河为分界，亚热带区主要在淮河以北，而淮河以南基本为暖温带区。流域内水资源充足，土地利用类型多样。根据资源环境科学与数据中心（http://www.resdc.cn/DataSearch.aspx）2010年的土地利用类型数据资料，流域中81.7%为耕地，西南山地和东北地区以草原和森林为主，占4.1%和7.2%，而水域、城乡用地和未利用地则分别占4.7%、2.2%和0.1%[18]。

1.2 数据与情景设置

本研究采用被广泛应用的过程模型－DNDC

(DeNitrification-DeComposition)模型模拟农田生态系统中碳氮循环。模型由两大模块组成:一是土壤和气候、植物生长和有机质分解模块,其作用是预测植物-土壤系统中环境因子的变化;二是反硝化作用、硝化作用和发酵作用模块,其作用是模拟土壤环境的生物化学过程,估算土壤系统中温室气体如CO_2、CH_4、N_2O的通量和总量。研究通过收集气候、土壤、植被以及人类活动等生态因子并建立数据库,对淮河流域稻麦轮作农田CH_4通量进行探究。

DNDC模型模拟所需的数据包括气象数据、土壤数据、植被管理措施及土地利用数据。气象数据包括从国家气象中心获得的历史时期(2000—2020年)淮河流域38个气象站点的逐日气象数据和从CMIP5中的北京气候中心气候系统模型1.1数据库中获取的未来(2021—2049年)两种气候情景(RCP4.5,RCP8.5)下的气象数据。采用DNDC模型需要的降雨量、日最高气温和日最低气温,并按照所需格式进行处理构建气象数据库。土壤数据从HWSD(Harmonized World Soil Database version 1.1)中选取,包括土壤有机碳含量、酸碱度、黏土含量和容重。植被管理措施来自淮河流域各县市2000—2020年统计年鉴,植被数据包括农作物类型、播种时间、收获时间、作物最大生物量、根系、茎叶和果实的碳氮比等,管理数据包括耕作方式和时间、施肥种类、耕作时间和深度、秸秆还田方式和秸秆施用量、灌溉时间和灌溉量等。2010年的土地利用类型数据资料来自于资源环境科学与数据中心网站(http://www.resdc.cn/DataSearch.aspx)。

研究以2000—2020年为历史情景,比较2021—2049年未来两种不同气候情景(RCP4.5,RCP8.5)对CH_4通量的影响。同时,为确定淮河流域最优的减排管理措施,对未来两种气候情景采取不同施肥和秸秆还田措施,模拟淮河流域农田CH_4通量。以历史情景的管理措施(S0F0)为基础措施,设置传统施肥、减量10%和减量20%三种施肥水平,并与无秸秆还田、50%秸秆还田和100%秸秆还田进行组合,共设置9种管理措施情景(表1)。

1.3 模型验证与统计方法

模型验证是模型模拟的前提,本研究基于寿县国家气候观象台CH_4通量观测资料(2019—2021年)进行模型验证,同时将有关淮河流域的其他相关研究中的CH_4通量点位观测数据和本研究区域模拟数据进行比较,从而验证模型。采用均方根误差(*RMSE*)[19]和决定系数(R^2)[20]反映评估模型拟合程度。*RMSE*值越接近0,表明模型拟合程度越好。R^2的取值范围介于0到1,当其值越接近1,模拟值与实测值的相关性就越好。通过对模型进行参数调整,可以不断降低*RMSE*和提高R^2的值,从而提高模型预测和模拟的准确度。

表1 CH_4通量减排措施情景设置

Table 1 Scenario settings of CH_4 flux emission reduction measures

缩写	措施
S0F0	无秸秆还田-传统施肥
S0F1	无秸秆还田-施肥量减少10%
S0F2	无秸秆还田-施肥量减少20%
S1F0	秸秆还田50%-传统施肥
S1F1	秸秆还田50%-施肥量减少10%
S1F2	秸秆还田50%-施肥量减少20%
S2F0	秸秆还田100%-传统施肥
S2F1	秸秆还田100%-施肥量减少10%
S2F2	秸秆还田100%-施肥量减少20%

基于时间的线性趋势分析可以反映指标随时间变化的特征,已经在很多领域的时间序列分析研究中得到了广泛的应用[21]。因此,以年份为自变量,CH_4通量为因变量,采用最小二乘法计算时间序列的趋势线斜率即为淮河流域CH_4通量的线性倾向率,线性倾向率的绝对值越大,表明变化速率越快,当该值大于0时,表示CH_4通量值增加,反之则减少。另外,利用变化率(S)表示不同气候情景、不同措施对CH_4通量的影响程度:

$$S = \left(L - L_0\right) / L_0 \times 100\%$$

其中L为不同气候情景(不同措施)下的CH_4通量值,$kg \cdot hm^{-2}$;L_0为历史情景(基础措施)下的CH_4通量值,$kg \cdot hm^{-2}$。当$S>0$时,为增长率。

2 结果与分析

2.1 DNDC模型率定与验证

本研究利用寿县国家气候观象台CH_4通量观测资料(2019—2021年),对模型进行参数率定,如图1所示,模拟值与实测值R^2=0.72,*RMSE*=0.03 $kg \cdot hm^{-2}$,模拟效果较好,并且能较好地模拟出该站点CH_4通量变化特征,表明经参数率定后的模型在该站点适用。

为了验证模型在流域尺度上的适用性,我们比较了淮河流域其他相关研究中的CH_4通量点位观测数据和本研究区域模拟数据。如表2所示,淮河流域实测的CH_4通量排放强度在55~523 $kg \cdot hm^{-2}$之间,而本研究模拟CH_4通量结果与实测值R^2=0.84,*RMSE*=

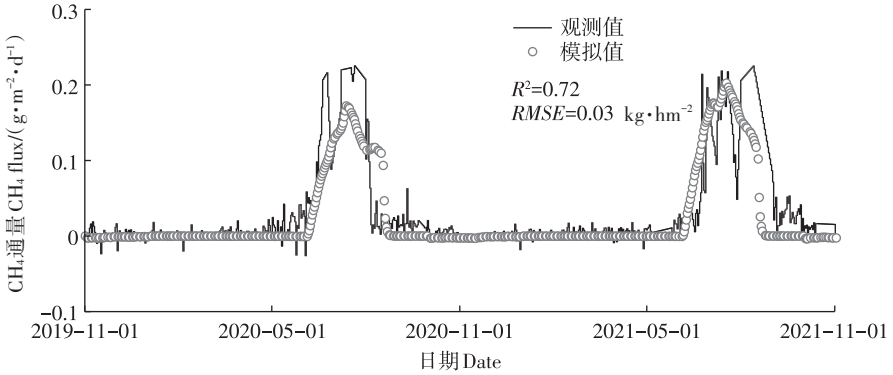


图1 站点CH_4排放通量模拟

Figure 1 CH_4 emission flux simulation

表2 淮河流域农田CH_4实测值与模拟值比较

Table 2 Comparison of measured and simulated values of CH_4 fluxes in the Huai River Basin

地点	年份	实测值/(kg·hm^{-2})	本研究模拟值/(kg·hm^{-2})	文献来源
淮安，江苏	2009—2010	117.6	113.0~122.0(117.5)	[22]
盐城，江苏	2016	192.0	144.0	[23]
海安，江苏	2015	296.1	292.3	[24]
舒城，安徽	2018	198.2	233.9	[25]
长丰，安徽	2008	55.0~523.0 (289.0)	295.8	[26]
枣阳，湖北	2016	389.0	317.3	[27]

注：实测值为该流域其他研究中点位田间试验数据，本研究模拟值为DNDC模型模拟的结果，括号内表示平均值。

Note: The measured value is the field test data of other studies in this basin. The simulated value in this study is the simulation result of DNDC model, and the average value is indicated in brackets.

38.25 kg·hm^{-2}，两者吻合较好。结果表明，参数率定后的DNDC模型对淮河地区的CH_4通量具有较高的模拟精度，可以用于模拟淮河流域农田CH_4通量。

2.2 气候变化情景下CH_4通量的变化特征

2.2.1 CH_4时间变化特征

从年际变化来看（图2），历史情景下，2000—2020年间淮河流域CH_4平均排放强度为125.3 kg·hm^{-2}，总体呈显著上升趋势（P<0.01），线性倾向率为1.06 kg·hm^{-2}·a^{-1}，CH_4排放强度最高值出现在2018年，为147.6 kg·hm^{-2}，最低值出现在2003年，为85.6 kg·hm^{-2}。

未来RCP4.5和RCP8.5两种情景下，2021—2049年间淮河流域CH_4平均排放强度分别为140.5 kg·hm^{-2}和150.5 kg·hm^{-2}，CH_4排放强度总体均呈显著上升趋势（P<0.01）。相较而言，由线性倾向率可知RCP4.5情景下上升幅度更为明显，但RCP8.5情景下的区域CH_4排放强度较RCP4.5增加了7%。RCP4.5情景下，CH_4排放强度最高值出现在2047年，最低值出现在2024年；RCP8.5情景下，最高值出现在2046年，最低值出现在2041年。两种气候变化情景下区域CH_4排放强度最高值仅相差8.5 kg·hm^{-2}，但最低值相差25.0 kg·hm^{-2}。

相较于历史情景下平均区域CH_4排放强度，未来RCP4.5、RCP8.5情景下2021—2049年间平均区域CH_4排放强度分别增加了12%、20%，其中RCP4.5情景下2020年代、2030年代、2040年代分别增加了5%、12%、19%，RCP8.5情景下三个年代分别增加了14%、19%、26%（图3）。

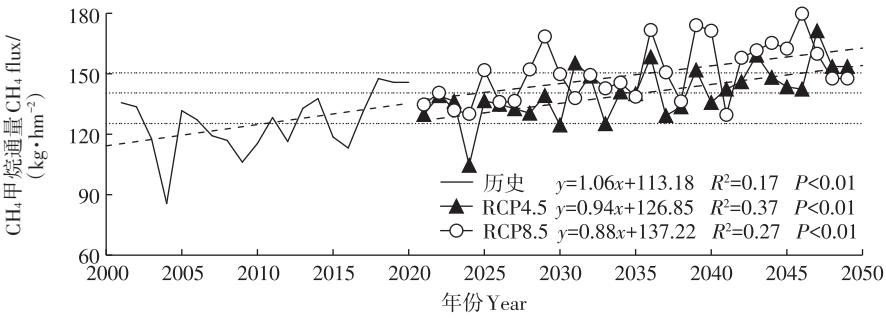


图2 淮河流域CH_4通量年际变化

Figure 2 Interannual variation of CH_4 flux in the Huai River Basin

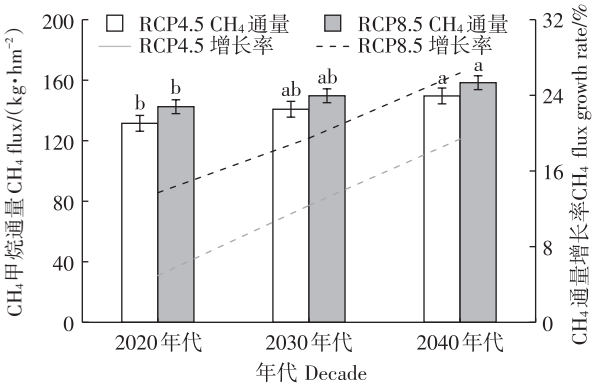


图3 未来气候情景下CH_4通量及其对应的增长率

Figure 3 CH_4 fluxes and the corresponding growth rates under future climate scenarios

2.2.2 CH_4空间变化特征

历史情景下年均淮河流域CH_4通量的空间分布如图4a所示，淮河流域内CH_4通量基本处在80~160 kg·hm^{-2}，高值大多位于南部，其次是西北部和东南部，其中滁州市、六安市南部和东部、信阳市中部CH_4通量大于160 kg·hm^{-2}，而低值区位于日照市、枣庄市、阜阳市、驻马店市中部，这些区域的CH_4通量低于80 kg·hm^{-2}。

RCP4.5和RCP8.5气候变化背景下淮河流域CH_4通量的空间分布如图4b和图4c所示，两种气候变化背景下CH_4通量空间分布特征相似，均呈现南部和西北部地区CH_4通量高，东北部和中西部地区CH_4通量低的特征。平均而言，淮河流域内CH_4通量大多处在80~160 kg·hm^{-2}，其中CH_4通量为100~140 kg·hm^{-2}的区域占大多数。RCP4.5情景下，淮河流域CH_4通量高值大多位于南部，其中滁州市、六安市（除中部）、信阳市南部、扬州市南部、开封市中部、商丘市CH_4通量大于160 kg·hm^{-2}；淮河流域CH_4通量低值区位于日照市、枣庄市、阜阳市、连云港市与临沂市交界处、驻马店市中部、平顶山市南部，这些区域的CH_4通量低于80 kg·hm^{-2}。与RCP4.5相比，RCP8.5情景下CH_4通量大于180 kg·hm^{-2}的区域大幅增加，主要集中在信阳市南部、六安市西南部、宿州市中部、商丘市中部、开封市中部；同时CH_4通量处于80~120 kg·hm^{-2}间的区域大幅减少，主要集中在驻马店市、阜阳市、临沂市、枣庄市北部和济宁市东部。

两种气候情景（RCP4.5、RCP8.5）下淮河流域CH_4年均通量相对于历史情景的变化率均在34°N和32.5°N附近处较大（图5）。RCP4.5情景下，大部分区域CH_4通量变化率都处于0~20%之间，只有极少部分区域变化率小于0，集中于淮河流域最北部，变化率大于30%的区域集中在徐州市东部、扬州市南部和淮安市与滁州市交界处。RCP8.5情景下，CH_4通量变化率同样总体呈现中部高、南北低的分布，大部分区域变化率在10%~25%之间，只有淮河流域最北部和东南部区域变化率小于10%，变化率大于30%的区域主要集中在商丘市中部、宿州市西北部、徐州市东部和西部、扬州市西南部、滁州市和淮安市交界处、阜阳市南部以及驻马店市东南部。

2.3 不同管理措施对CH_4通量影响

由图6可知，两种气候变化情景下，秸秆还田均会导致农田CH_4排放量明显增加，秸秆还田50%约为不还田的2.5倍，秸秆全还田更是达到不还田的3倍以上。相比之下，两种情景下减量施肥对农田CH_4通量影响均较小，仅施肥减量10%，CH_4排放量减少3.7%，仅施肥减量20%，CH_4排放量减少7.8%。RCP4.5和RCP8.5两种情景下，100%秸秆还田+全量施肥的农田CH_4排放量最高，较基础措施（S0F0）分别增加了236%和238%；而秸秆不还田+减量施肥20%的农田CH_4排放量最低，较基础措施（S0F0）分别减少了7.86%和7.84%。两种情景较基础措施的CH_4通量变化率相近，但RCP8.5情景变化率均略高于RCP4.5。同时，RCP8.5情景CH_4通量均高于RCP4.5。

仅考虑秸秆还田的影响（图7），相比于基础措施，50%秸秆还田使RCP4.5、RCP8.5两种情景CH_4排放量均增加了110~290 kg·hm^{-2}；100%秸秆还田则使两种情景均减少了190~490 kg·hm^{-2}。RCP4.5情景和RCP8.5情景下，50%秸秆还田与100%秸秆还田较基础措施CH_4排放量增加较多的区域多位于淮河流域南部、西北部与中部地区，少量位于中东部；而增加较少的区域多位于东北部和中西部。两种情景相比而言，RCP8.5情景下，50%秸秆还田措施下CH_4排放量较基础措施增加少于250 kg·hm^{-2}的区域显著多于RCP4.5情景；而100%秸秆还田措施下CH_4排放量增加少于430 kg·hm^{-2}的区域显著多于RCP4.5情景。

仅考虑施肥量影响（图8），相比于基础措施，减量施肥10%使RCP4.5、RCP8.5两种情景CH_4排放量均减少了1~8.5 kg·hm^{-2}；减量20%则使两种情景均减少了3~18 kg·hm^{-2}。RCP4.5情景下，减量施肥10%与20%较基础措施CH_4排放量减少较多的区域均位于34°N附近，而与基础措施CH_4排放量相近的区域多位于33°N附近及淮河流域东北部地区。RCP8.5情景则

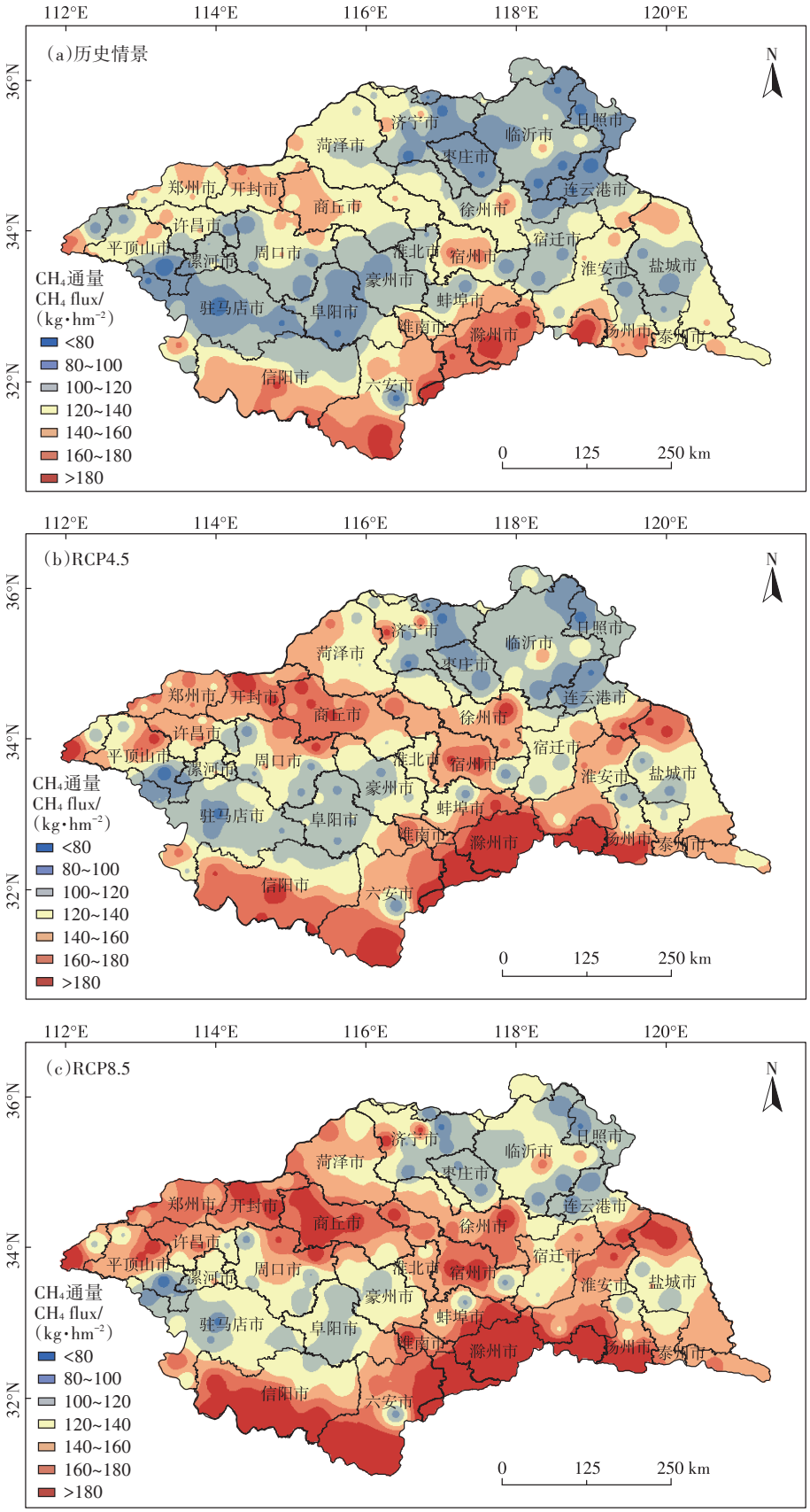


图4 历史时期和未来不同气候情景下的淮河流域CH_4通量空间分布

Figure 4 Spatial distribution of CH_4 flux under historical periods and future climate scenarios

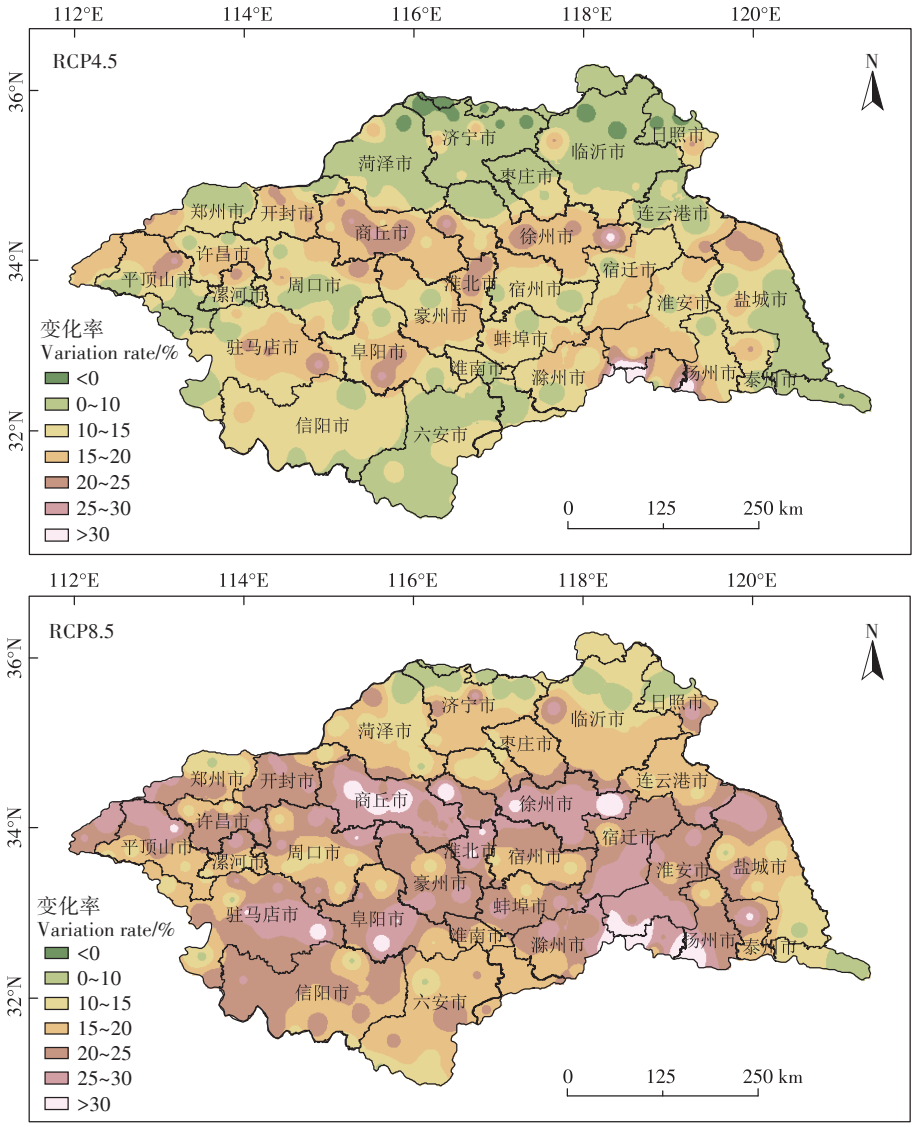


图5 不同气候情景下CH_4通量的空间变化率

Figure 5 Spatial variation rate of CH_4 flux under different climate scenarios

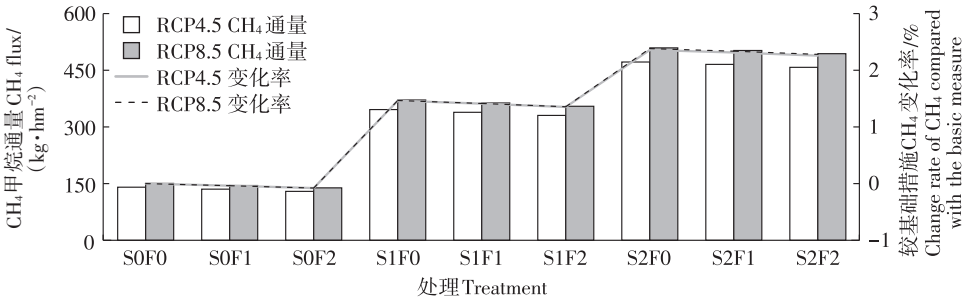


图6 未来气候情景下不同处理的CH_4通量及对应的变化率

Figure 6 CH_4 fluxes and change rates with different treatments under future climate scenarios

与RCP4.5情景相似。两种情景相比之下，相同的施肥量RCP8.5情景下的CH_4排放通量均高于RCP4.5。此外，两种情景下的CH_4通量均呈现排放量随施肥量减少而减少的现象。

3 讨论

历史情景下，2000—2020年淮河流域CH_4通量呈波动上升趋势。一是因为2010年代以来，气温的升

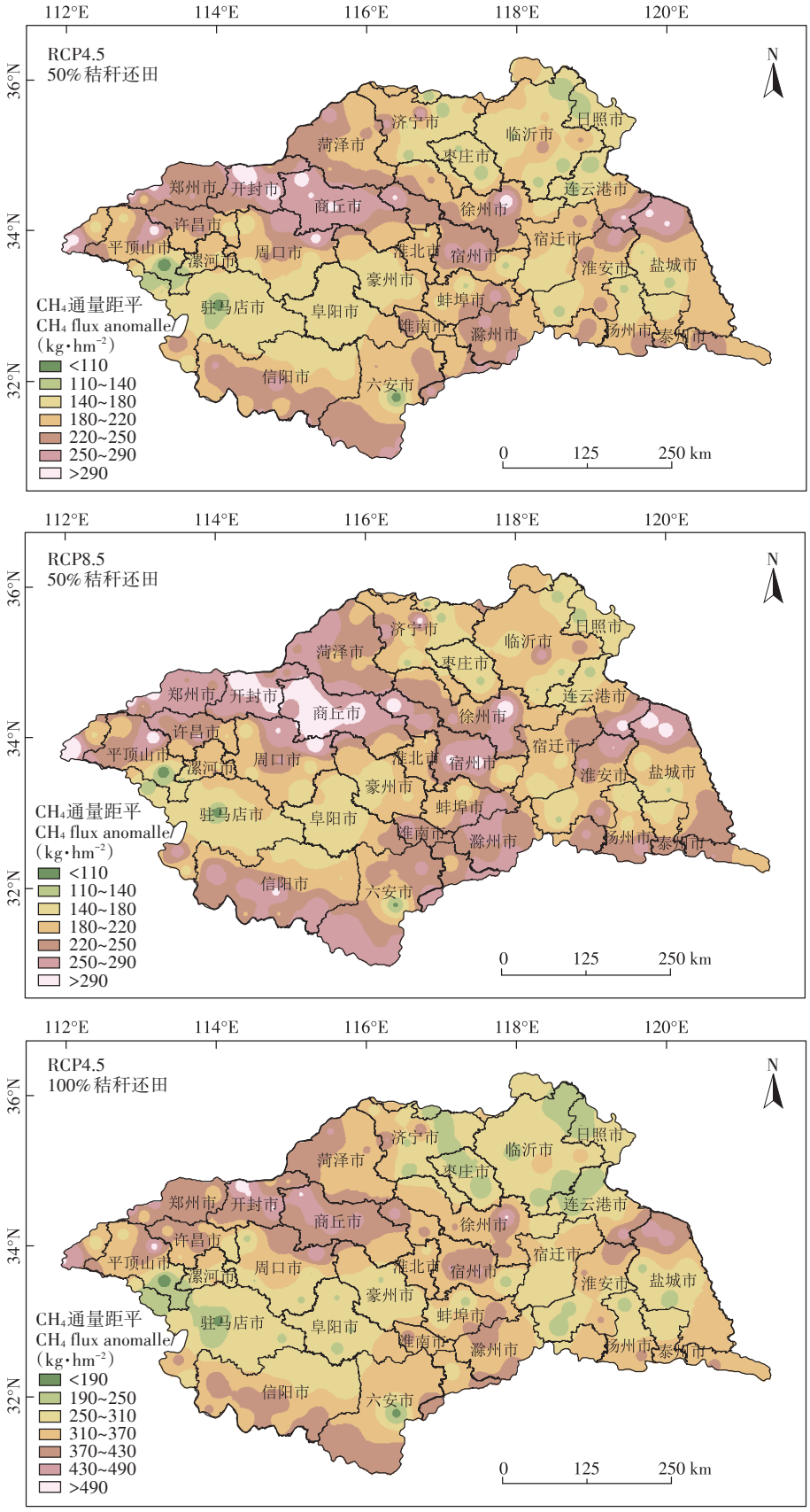
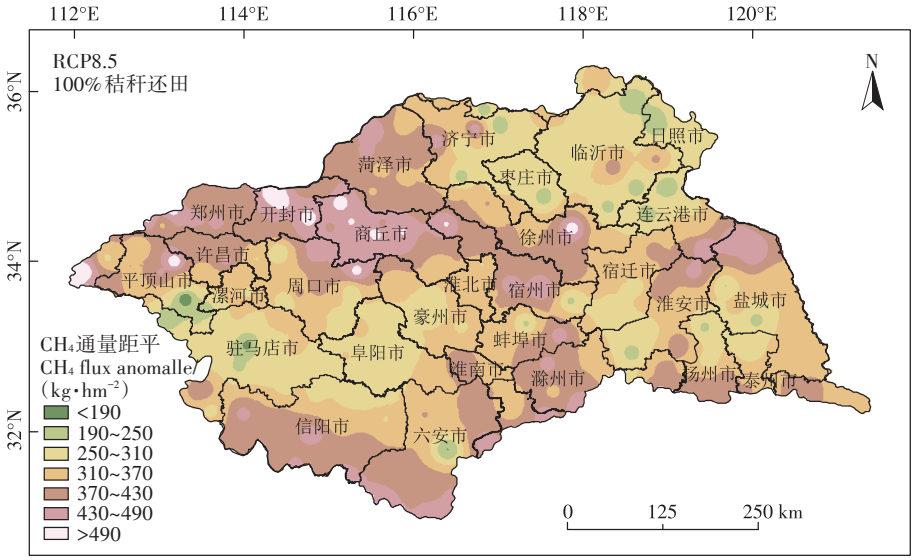


图7 未来气候情景下不同秸秆还田措施的CH_4通量较基础措施的距平

Figure 7 CH_4 flux anomalies of different straw returning measures under future climate scenarios compared with the basic measure



续图7 未来气候情景下不同秸秆还田措施的CH_4通量较基础措施的距平

Continued figure 7 CH_4 flux anomalies of different straw returning measures under future climate scenarios compared with the basic measure

高和降雨量的增加为水稻提供了更适宜的环境，从而有效地减少了积温不足对水稻生长的不利影响。二是由于近年来农田管理措施的优化，例如施肥种类和水稻品种的改良，促进了作物的生长，从而增加了农田CH_4通量[28]。三是由于近年来温室气体排放增加导致全球变暖，进而使CH_4排放增多[29]。1960—2015年黑龙江省[30]农田生态系统CH_4变化趋势与本研究淮河流域历史时期的CH_4变化趋势一致，但本研究的平均排放强度低于黑龙江省（125.3 kg·hm^{-2} *vs* 194.1 kg·hm^{-2}），这可能与不同区域间的气候差异、田间管理措施、作物品种不同等有关。相较于历史情景，RCP4.5，RCP8.5情景下2021—2049年间平均区域CH_4排放量均有所增加，且相比于RCP4.5，RCP8.5情景下平均区域CH_4排放量增加了更多，这与2021—2049年两种气候变化情景的平均气温高于历史情景相关，RCP8.5情景下的平均气温也比RCP4.5情景下的平均气温高。温度升高将导致农田CH_4排放量增加[29]，采取有效措施减少农田CH_4排放量势在必行。

本研究发现未来气候变化情景下淮河流域CH_4通量空间分布特征与历史时期相同，Nie等[30]在黑龙江省和Zhang[31]在全国也得出一致结果。淮河流域CH_4通量空间分布呈南部和西北部高，东北部和中西部低，这是由于不同地区的土壤属性具有空间差异[26]，而相关研究表明土壤有机质含量、黏粒含量、酸碱度、容重等均是影响农田CH_4排放的重要因素，如农田CH_4排放量与土壤有机质含量呈正相关[26]，与黏粒含量呈负相关[32]。

本研究结果表明，秸秆还田显著提高了淮河流域146%~238%的CH_4通量，其原因可能在于秸秆这类有机物料为产甲烷菌提供了丰富的作用底物，且在稻田淹水的条件下，秸秆会快速分解，导致土壤氧化还原电位下降，为产甲烷菌提供足够的厌氧环境，从而促进CH_4的生成[33]，说明减少秸秆还田量是降低CH_4排放量的一种可行措施。另一方面，氮肥施用量对农田CH_4排放量也存在一定影响，在减量施肥20%时，淮河流域农田CH_4排放量最低。因为随着氮肥的减量，改变了农田土壤养分状况，一定程度上抑制了水稻和冬小麦的生长，减少了根系分泌物，从而减少了产CH_4菌的反应底物[34]。因此，对于淮河流域而言，秸秆不还田和减量施肥20%是减少农田CH_4排放量的有效措施。

目前，本研究在制定减排措施时仅考虑了CH_4通量，如何能既保证温室气体的排放达到最低又能保证作物的产量，使得淮河流域农业可持续发展，值得在今后的研究中进一步探索。

4 结论

（1）历史时期（2000—2020年）区域CH_4通量平均排放强度为125.3 kg·hm^{-2}，总体呈显著上升趋势。RCP4.5（中等排放强度情景）和RCP8.5（高排放强度情景）两种情景下，2021—2049年间淮河流域CH_4排放强度总体同样均呈显著上升趋势，但RCP4.5情景下上升幅度更为明显，两种情景下区域CH_4平均排放强度较历史时期分别增加了12%和20%。

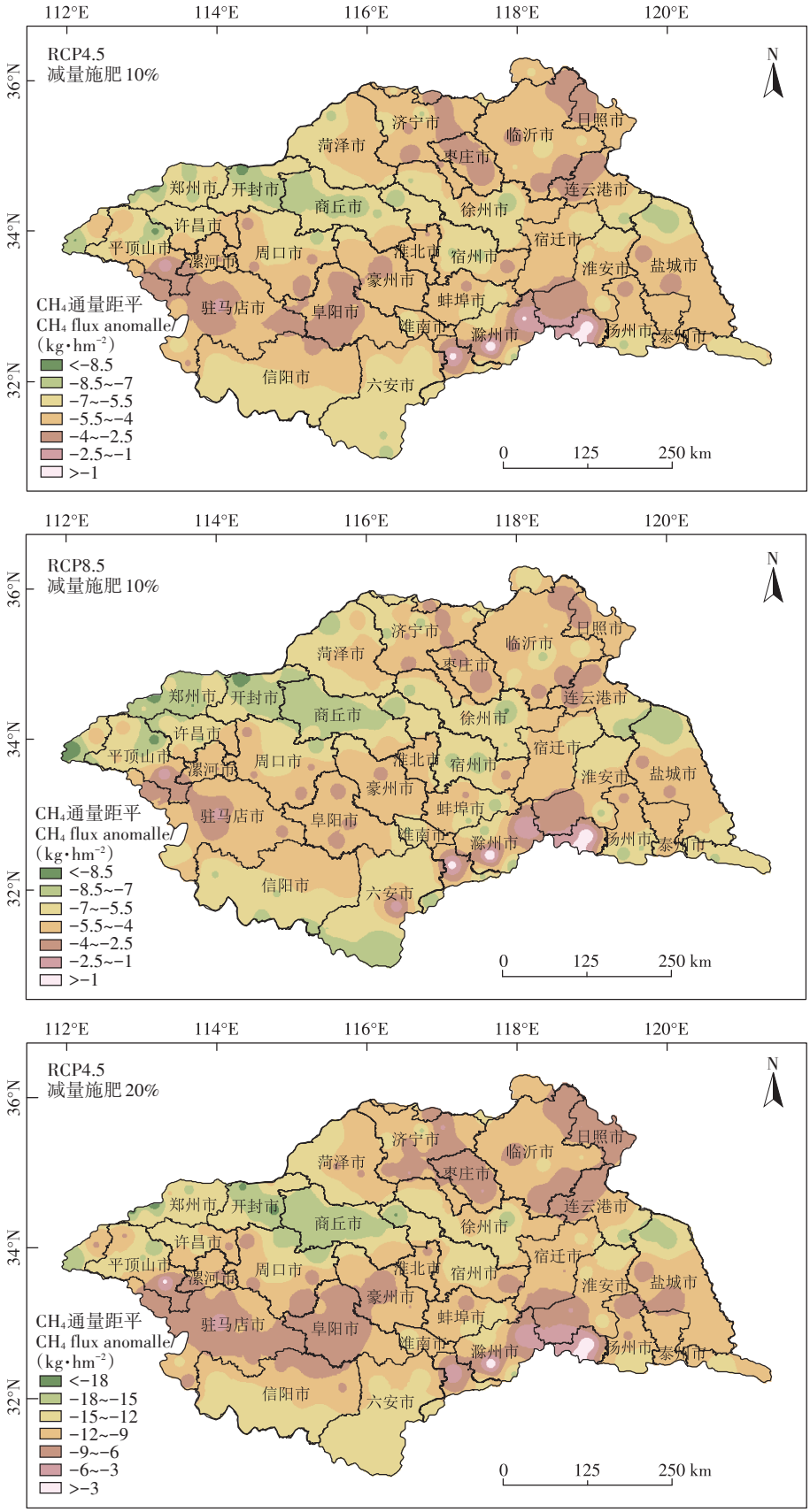
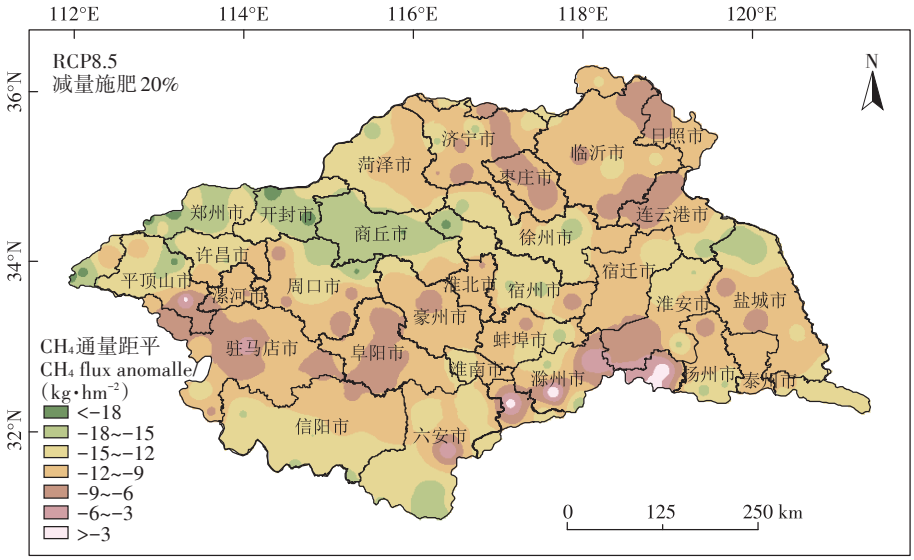


图8 未来气候情景下不同减量施肥措施的CH_4通量较基础措施的距平

Figure 8 CH_4 flux anomalies of different reduced fertilization measures under future climate scenarios compared with the basic measure



续图8 未来气候情景下不同减量施肥措施的CH_4通量较基础措施的距平

Continued figure 8 CH_4 flux anomalies of different reduced fertilization measures under future climate scenarios compared with the basic measure

（2）空间上，两种气候情景（RCP4.5，RCP8.5）与历史情景区域CH_4通量空间分布特征相似，均呈现南部和西北部地区CH_4通量高，东北部和中西部地区CH_4通量低的特征。此外，两种气候情景下流域CH_4年均通量相对于历史情景年均通量的变化率均在34°N和32.5°N附近处较大。

（3）相较于基础措施，施肥量措施均减少了CH_4排放，减量施肥20%时排放量最低；秸秆还田措施则显著提高了CH_4排放水平。田间管理措施为秸秆不还田+减量施肥20%时，CH_4排放最低，因此在仅考虑淮河流域CH_4通量的情况下，该措施是未来气候变化情景下的最佳田间管理措施。

参考文献：

[1] 何竹，薛利红，杨林章，等. 磷对稻田甲烷排放的影响及其可能机制[J]. 农业环境科学学报，2021，40(2)：445-450. HE Z, XUE L H, YANG L Z, et al. Effects of phosphorus on methane emissions from rice fields and its possible mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2)：445-450.

[2] 王全成，陈匆琼，杨智杰，等. 模拟降水减少对中亚热带杉木人工林土壤甲烷吸收的影响[J]. 生态学报，2019，39(10)：3517-3525. WANG Q C, CHEN C Q, YANG Z J, et al. Effects of precipitation exclusion on soil methane uptake under *Cunninghamia lanceolate* plantation in mid-subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(10)：3517-3525.

[3] SMITH P, MARTINO D, CAI Z C, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B：Biological Sciences*, 2007, 363(1492)：789-813.

[4] ZHANG W, YU Y, HUANG Y, et al. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(12)：3511-3523.

[5] 吴梦琴，李成芳，盛锋，等. 基于DNDC模型评估湖北省不同稻作系统不同管理措施温室气体排放的周年变化[J]. 中国生态农业学报，2021，29(9)：1480-1492. WU M Q, LI C F, SHENG F, et al. Assessment of the annual greenhouse gases emissions under different rice-based cropping systems in Hubei Province based on the denitrification-decomposition (DNDC) model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9)：1480-1492.

[6] ZHANG Y, SU S L, ZHANG F, et al. Characterizing spatiotemporal dynamics of methane emissions from rice paddies in Northeast China from 1990 to 2010[J]. *Plos One*, 2012, 7(1)：e29156.

[7] 田展，牛逸龙，孙来祥，等. 基于DNDC模型模拟气候变化影响下的中国水稻田温室气体排放[J]. 应用生态学报，2015，26(3)：793-799. TIAN Z, NIU Y L, SU L X, et al. China's rice field greenhouse gas emission under climate change based on DNDC model simulation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3)：793-799.

[8] 李成伟，刘章勇，龚松玲，等. 稻作模式改变对稻田CH_4和N_2O排放的影响[J]. 生态环境学报，2022，31(5)：961-968. LI C W, LIU Z Y, GONG S L, et al. Effects of changing rice cropping patterns on CH_4 and N_2O emissions from paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(5)：961-968.

[9] 宿敏敏，况福虹，吕阳，等. 不同轮作体系不同施氮量甲烷排放比较研究[J]. 植物营养与肥料学报，2016，22(4)：913-920. SU M M, KUANG F H, LV Y, et al. Impact of N fertilization on methane emission from paddy field under different rotation systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4)：913-920.

[10] 胡安永，孙星，刘勤. 太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体(CH_4和N_2O)排放的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(1)：99-106. HU A Y, SU X, LIU Q. Effects of different rotation systems on greenhouse gas (CH_4 and N_2O) emissions in the Taihu Lake region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1)：99-106.

[11] XIA L L, XIA Y Q, LI B L, et al. Integrating agronomic practices to re-

duce greenhouse gas emissions while increasing the economic return in a rice-based cropping system[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 231:24-33.

[12] 邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 等. 基于DNDC模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9):1291-1301. ZOU F L, CAO C G, MA J Y, et al. Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jianghan Plain based on DNDC model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9):1291-1301.

[13] YAN X Y, YAGI K, AKIYAMA H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(7):1131-1141.

[14] 靳红梅, 沈明星, 王海候, 等. 秸秆还田模式对稻麦两熟农田麦季CH_4和N_2O排放特征的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(2):333-339. JIN H M, SHEN M X, WANG H H, et al. Influence of straw returning patterns on methane and nitrous oxide emission during wheat-growing season in a rice-wheat double cropping system[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 33(2):333-339.

[15] 杨娟, 王昌全, 白根川, 等. 秸秆还田下麦-稻轮作生产生命周期能耗及温室气体排放[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1):196-204. YANG J, WANG C Q, BAI G C, et al. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of wheat-rice rotation system with straw returning[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1):196-204.

[16] 张俊, 邓艾兴, 尚子吟, 等. 秸秆还田下水稻丰产与甲烷减排的技术模式[J]. 作物杂志, 2021(6):230-235. ZHANG J, DENG A X, SHANG Z Y, et al. Innovative rice cropping for higher yield and less CH_4 emission under crop straw incorporation[J]. *Crops*, 2021(6):230-235.

[17] 赵峥, 周德平, 褚长彬, 等. 不同施肥和秸秆还田措施对稻麦轮作系统碳氮流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):36-41. ZHAO Z, ZHOU D P, ZHU C B, et al. Impacts of different fertilization and straw returning measures on the loss of carbon and nitrogen in rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):36-41.

[18] 翁升恒, 张方敏, 卢燕宇, 等. 淮河流域蒸散发时空变化与归因分析[J]. 生态学报, 2022, 42(16):6718-6730. WENG S H, ZHANG F M, LU Y Y, et al. Spatiotemporal changes and attribution analysis of evapotranspiration in the Huai River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16):6718-6730.

[19] ARAYA A, HOOGENBOOM G, LUEDELING E, et al. Assessment of maize growth and yield using crop models under present and future climate in southwestern Ethiopia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015(214/215):252-265.

[20] WILLMOTT, CORT J. Some comments on the evaluation of model performance[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, 63(11):1309-1369.

[21] 徐勇, 奚砚涛. 江苏省植被覆盖动态变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4):195-201. XU Y, XI Y T. Change of vegetation coverage in Jiangsu Province and its relation with climatic factors[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4):195-201.

[22] 徐兴英, 段华平, 张丽, 等. 江苏省农业源甲烷排放清单研究[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(4):498-501. XU X Y, DUAN H P, ZHANG L, et al. Study on agriculture methane emission inventory in Jiangsu Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2012, 33(4):498-501.

[23] GE H X, ZHANG H S, ZHANG H, et al. The characteristics of methane flux from an irrigated rice farm in east China measured using the eddy covariance method[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 249:228-238.

[24] 杭玉浩, 王强盛, 许国春, 等. 水分管理和秸秆还田对稻麦轮作系统温室气体排放的综合效应[J]. 生态环境学报, 2017, 26(11):1844-1855. HANG Y H, WANG Q S, XU G C, et al. Effects of water regimes and straw incorporation on greenhouse gas emissions in a rice-wheat cropping system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(11):1844-1855.

[25] 卜容燕, 李敏, 韩上, 等. 有机无机肥配施对双季稻轮作系统产量、温室气体排放和土壤养分的综合效应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1):145-153. PU R Y, LI M, HAN S, et al. Comprehensive effects of combined application of organic and inorganic fertilizer on yield, greenhouse gas emissions, and soil nutrient in double-cropping rice systems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1):145-153.

[26] 张庆国, 李鹏飞, 徐丽, 等. 皖中沿江平原水稻田CH_4和N_2O排放估算及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2012, 43(1):212-218. ZHANG Q G, LI P F, XU L, et al. Estimation of CH_4 and N_2O emissions from the paddy fields in Wan-zhong-yan-jiang Plain and analysis of their influence factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(1):212-218.

[27] 柴凯斌. 秸秆还田对稻麦系统作物产量及温室气体排放的影响[D]. 武汉:华中农业大学, 2018. CHAI K B. The effects of straw incorporation on crop yield and greenhouse gas emissions under rice-wheat cropping systems[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.

[28] LIU Y, WANG P, CROWLEY D, et al. Methanogenic abundance and changes in community structure along a rice soil chronosequence from east China[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(4):443-455.

[29] WANG B, LI J, WAN Y, et al. Responses of yield, CH_4 and N_2O emissions to elevated atmospheric temperature and CO_2 concentration in a double rice cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 96:60-69.

[30] NIE T, ZHANG Z, QI Z, et al. Characterizing spatiotemporal dynamics of CH_4 fluxes from rice paddies of cold region in Heilongjiang Province under climate change[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Healthy*, 2019, 16:6925.

[31] ZHANG W, YU Y Q, HUANG Y, et al. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(12):3511-3523.

[32] SASS R L, FISHER F M, LEWIS S T, et al. Methane emissions from rice fields: effect of soil properties[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(2):135-140.

[33] WANG J Y, ZHANG X X, XIONG Z Q, et al. Methane emissions from a rice agroecosystem in south China: effects of water regime, straw incorporation and nitrogen fertilizer[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(1):103-112.

[34] KIM G W, GUTIERREZ-SUSON J, KIM P J. Optimum N rate for grain yield coincides with minimum greenhouse fields[J]. *Field Crops Research*, 2019, 237:23-31.

(责任编辑:叶飞)