应 用 生 态 学 报 2015 年 3 月 第 26 卷 第 3 期
Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2015, **26**(3): 793-799

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*

田 展[1,2] 牛逸龙[1,2] 孙来祥[3] 李长生[4] 刘春江[4] 樊冬丽[1**]
([1]上海应用技术学院, 上海 201418; [2]上海市气候中心, 上海 200030; [3]国际应用系统分析研究所, 拉克森堡 A-2361; [4]上海交通大学, 上海 200240)

摘 要 当前国内外开展了很多农业温室气体对气候变化的响应研究,但气候变化对农业温室排放的影响机制研究还很少见.本文利用国际上广泛应用的生物地球化学过程模型——DNDC 模型,模拟了中国过去 40 年(1971—2010 年)气候变化对水稻田温室气体排放的影响.结果表明:与 1971—1990 年相比,1991—2010 年的全国稻季平均气温上升了 0.49 ℃,稻季平均降雨上升了 11 mm;由于稻季气候变化导致全国水稻田 1991—2010 年的平均 CH_4 排放量上升了0.25 kg C · hm^{-2},平均 N_2O 排放量上升了0.25 kg N · hm^{-2}.表明温度升高会促进 CH_4 排放,降雨量增加会促进 N_2O 排放,气候变化影响了水稻温室气体排放机制.

关键词 DNDC 模型; 温室气体排放; 气候变化
文章编号 1001-9332(2015)03-0793-07 **中图分类号** S126 **文献标识码** A

China's rice field greenhouse gas emission under climate change based on DNDC model simulation. TIAN Zhan[1,2], NIU Yi-long[1,2], SUN Lai-xiang[3], LI Chang-sheng[4], LIU Chun-jiang[4], FAN Dong-li[1] ([1]*Shanghai Institute of Technology*, *Shanghai* 201418, *China*; [2]*Shanghai Climate Center*, *Shanghai* 200030, *China*; [3]*International Institute of Applied System Analysis*, *Laxenburg A*-2361, *Austria*; [4]*Shanghai Jiaotong University*, *Shanghai* 200240, *China*). *-Chin. J. Appl. Ecol.*, 2015, **26**(3): 793-799.

Abstract: In contrast to a large body of literature assessing the impact of agriculture greenhouse gas (GHG) emissions on climate change, there is a lack of research examining the impact of climate change on agricultural GHG emissions. This study employed the DNDC v9.5, a state-of-art biogeochemical model, to simulate greenhouse gas emissions in China's rice-growing fields during 1971-2010. The results showed that owing to temperature rising (on average 0.49 ℃ higher in the second 20 years than in the first 20 year) and precipitation increase (11 mm more in the second 20 years than in the first 20 years) during the rice growing season, CH_4 and N_2O emissions in paddy field increased by 0.25 kg C · hm^{-2} and 0.25 kg N · hm^{-2}, respectively. The rising temperature accelerated CH_4 emission and N_2O emission increased with precipitation. These results indicated that climate change exerted impact on the mechanism of GHG emissions in paddy field.

Key words: DNDC model; greenhouse gas emission; climate change.

在过去的半个世纪里,气候变化已经引起了人们的广泛关注.根据政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告,1951—2012 年全球地表平均温度每 10 年上升 0.12 ℃[1].造成近 100 年气候变化的主要原因是人类活动排放了大量的温室气体,其中农业温室气体排放占全球温室气体排放总量的 20%~35%[2-3],仅次于能源,位居第二.在各类农作物中,水稻是产生 CH_4 和 N_2O 两大温室气体的代表性作物.大气中有 10%~20%的 CH_4 来源于水稻种植[4-5],中国稻田排放的 CH_4 占世界的 29%[6];而 N_2O 作为增温潜势最高的温室气体,有近 90%的 N_2O 排放来源于农业活动.

据统计,2012 年中国水稻种植面积占世界水稻种植面积的 18.7%,而中国的水稻产量为 2.04 亿 t,

* 国家自然科学基金项目(41371110)和上海应用技术学院科技发展基金项目(KJ2012-01)资助.
* * 通讯作者. E-mail: fandl@sit.edu.cn
2014-08-05 收稿,2015-01-16 接受.

占世界水稻产量的 28.6%,中国水稻产量仅次于玉米(2.08 亿 t),位居中国粮食产量第二位[7].根据《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》[8]显示,在 2005 年的温室气体排放清单中,中国农业 CH_4 气体排放占 CH_4 总排放量的 56.6%,而种植水稻产生的 CH_4 占农业 CH_4 气体排放量的 31.5%.因此,开展中国水稻田温室气体研究具有重要的现实意义.

目前,运用机理模型对中国水稻温室气体进行估算已经开展了很多研究[9-13],主要采用的有 Brown 等[14]开发的反硝化-分解模型(DNDC 模型)及张稳等[15-16]开发的 CH4MOD 模型等.CH4MOD 模型特点是输入数据较少且易获取,模拟 CH_4 排放考虑气泡的传输和排放,但只对 CH_4 这一种温室气体排放进行针对性的模拟.而 DNDC 模型作为一个被广泛验证和推广的生物地球化学过程模型,被许多科研工作者应用在土壤 C、N 变化以及农业温室气体排放的研究中[17-20].以往研究大多以一个区域的水稻田温室气体排放为模拟对象.例如,张远等[21]利用 DNDC 模型对三江平原稻田 CH_4 排放进行了模拟和估算;孙园园等[22]利用 DNDC 模型对川中丘陵地区稻田的 CH_4 和 N_2O 排放进行了模拟分析.这些研究大多只涵盖了一个省或几个省,覆盖全国范围的研究较少.同时,大多数研究关注土壤因子对水稻温室气体的影响,如张黎明等[23]利用 DNDC 模型对太湖地区水稻土 CH_4 排放进行模拟,分析了土壤因子对 CH_4 排放的影响.但是对气候变化与水稻田温室气体排放之间的关系研究较少.因此,需要全面开展空间尺度气候变化对中国水稻田温室气体排放的影响研究.本研究利用 DNDC 模型以及一系列气象、土壤和田间管理数据,对过去 40 年中国气候变化影响下的水稻田温室气体排放进行了模拟,分析气候变化对水稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响,为水稻适应气候变化生长和制定水稻温室气体减排策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 作物模型

DNDC 模型是一个模拟农业生态系统中 C、N 循环的生物地球化学过程模型,最初是由新罕布什尔大学地球海洋与空间研究所开发的,用来模拟和估算美国作物用地的 N_2O 排放的一款模型,也可用于估算 CH_4 排放.DNDC 模型拥有数量众多的子模型来收集输入数据,计算中间变量,包括水热流子模型、反硝化子模型及分解子模型等[14].DNDC 模型的核心是模拟作物生长过程中在土壤中发生的、有各种微生物参与的一系列 C、N 相关的物理化学反应,通过严格的元素守恒原理,可以模拟出较为精确的结果.DNDC 模型所需要的输入数据包括每日气象数据、土壤因子数据及田间管理数据.在处理好这些数据之后,DNDC 模型不仅能进行每个站点的点位模拟,而且能进行多个站点的区域模拟,因此,作为一款已经过大量验证的模拟温室气体排放的模型,DNDC 模型得到了多个国家的大量科学研究人员的认可,并用来模拟各国农作物生长过程、农业温室气体排放、面源污染等.这些国家包括中国、美国、加拿大、英国、德国、新西兰及澳大利亚[24-26].在模拟这些国家的温室气体排放的过程中,DNDC 模型也被各国的研究人员应用和修改,从而研发出适应各国气候情景和农业特点的专门模型,例如 NZ-DNDC 模型[26]和 UK-DNDC 模型[14].但是,有关中国的专门模型还正在研发,模型默认的作物库也需要进一步升级来满足区域模拟的需求.本研究所使用的是 DNDC 基础模型 9.5 版本,也是目前公开的版本中最完善的一个版本.

1.2 数据处理

1.2.1 气象数据 DNDC 模型所需要的气象输入数据包括每日最高气温、最低气温、降雨和风速.本研究使用的是 1971—2010 年全国 756 个气象观测站点的历史观测数据,通过插值计算,扩展为 10 km×10 km 的格点数据,并按照 DNDC 模型需要的格式写入文件并存放在模型中.

1.2.2 田间管理数据 DNDC 模型所需要的田间管理数据包括播种收获日期、翻耕日期、淹灌日期、淹灌类型、肥料管理及秸秆残留.播种收获日期、翻耕日期、淹灌日期等数据来自中国气象局 14 个农业气象观测站的历史观测数据(表 1),按照不同的地理位置分配到各个格点.熟制统一设定为一熟,无其他作物轮作,淹灌类型设置为干湿交替,即烤田处理,这种管理方式已经在中国广泛应用,在模型模拟水稻生长过程中,会有一次烤田,即将水稻田水分晒干后恢复.肥料管理统一施用 200 kg N · hm^{-2} 的无机肥和 50 kg N · hm^{-2} 的农家肥,农家肥的 C/N 为 50∶1,以上肥料参数的选取是通过对文献的查阅和模型的调试以及作物库中水稻的需氮量计算得到的,这一设置能够保证水稻正常生长的施肥量,确保水稻不会因为肥料不足引起的氮胁迫,造成减产和发育不良.

表 1　水稻农业气象观测站信息

Table 1　Information of agricultural meteorological observation stations of paddy

站点简称 Abbreviation	站点名称 Site name	经度 Longitude	纬度 Latitude	品种信息 Rice cultivar
AHHF	安徽合肥	117°14′	31°52′	91499
GDGZ	广东广州	113°28′	23°3′	粳籼 89
HBWH	湖北武汉	114°6′	30°37′	2222
HLWC	黑龙江五常	127°9′	44°54′	林中 5 号
HNCS	湖南长沙	113°5′	28°12′	湘矮早九号
HNHK	海南海口	110°12′	20°3′	广优 4 号
HNXY	河南信阳	114°5′	32°7′	豫籼 3 号
JLYJ	吉林延吉	129°28′	42°53′	珍富 10 号
JSZJ	江苏镇江	119°28′	32°11′	9-108
JXNC	江西南昌	115°57′	28°33′	中优 81
LNDT	辽宁灯塔	123°19′	41°25′	辽盐 241
SCCD	四川温江	103°50′	30°42′	汕优 63
SDLY	山东临沂	118°21′	35°3′	8202
YNKM	云南昆明	102°42′	25°1′	昆粳 5 号

1.2.3 土壤数据　土壤所需数据包括土壤有机碳含量、土壤黏土含量、土壤 pH 值及土壤容重范围.本研究的土壤数据来自联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD).使用距地面 30 cm 的耕作层的土壤数据,并进行插值处理.

1.3　研究方法

首先将插值后的气象数据和土壤数据与 2000 年中国土地使用地图进行匹配,从而选出耕地中的水稻田格点.经过挑选,找到了 4244 个水稻田格点,其中包括山地水稻田、丘陵水稻田、平原水稻田及大于 25°坡地水稻田.将以上 4244 个水稻田格点的气象数据、土壤数据和田间管理数据处理成 DNDC 模型需要的文件格式置入模型中.对1971—2010年中国水稻田温室气体排放进行模拟,记录并分析结果,将结果中的错误数据筛选掉,并对正确的数据每 20 年进行一次汇总和平均,然后观察其变化规律,主要考虑 CH_4 和 N_2O 排放量(图 1).

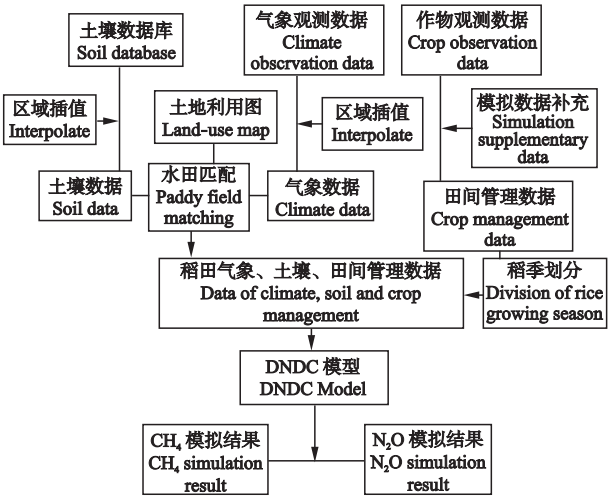


图 1　研究技术路线图

Fig.1　Technical roadmap of the study.

2　结果与分析

2.1　稻季气温和降雨量变化

1991—2010 年全国稻季平均温度为 24.61 ℃,而 1971—1990 年全国稻季平均温度为 24.12 ℃,1991—2010 年比 1971—1990 年上升了 0.49 ℃,除贵州、广西、广东、四川等地的小部分地区以及湖北、安徽、江西 3 省交界地区,其他地区稻季气温都有所上升(图 2).

1991—2010 年全国稻季平均降水雨量为 581.04 mm,与 1971—1990 年相比增加了 11 mm.东北三省、四川盆地及云南、广东、广西等地稻季降雨量明显减少,而其他地区稻季降雨量明显增多.

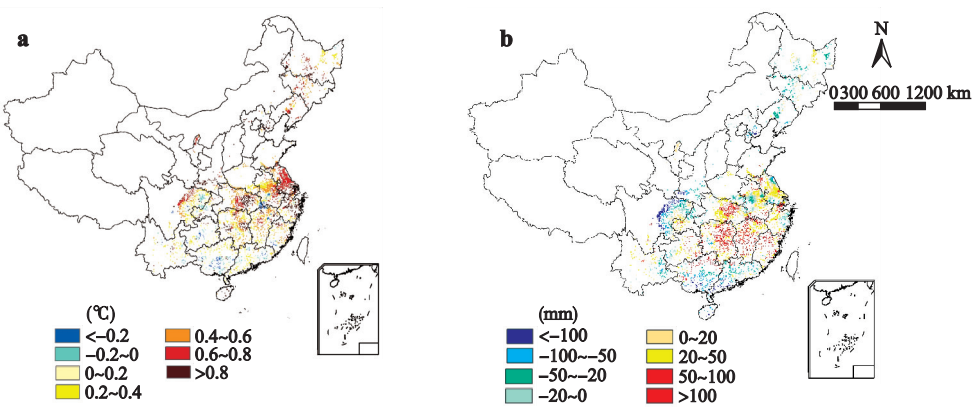


图 2　前 20 年与后 20 年全国水稻田稻季平均气温(a)和降水量(b)的变化

Fig.2　Changes of average temperature (a) and precipitation (b) in paddy of China during the first 20 year to the second 20 year.

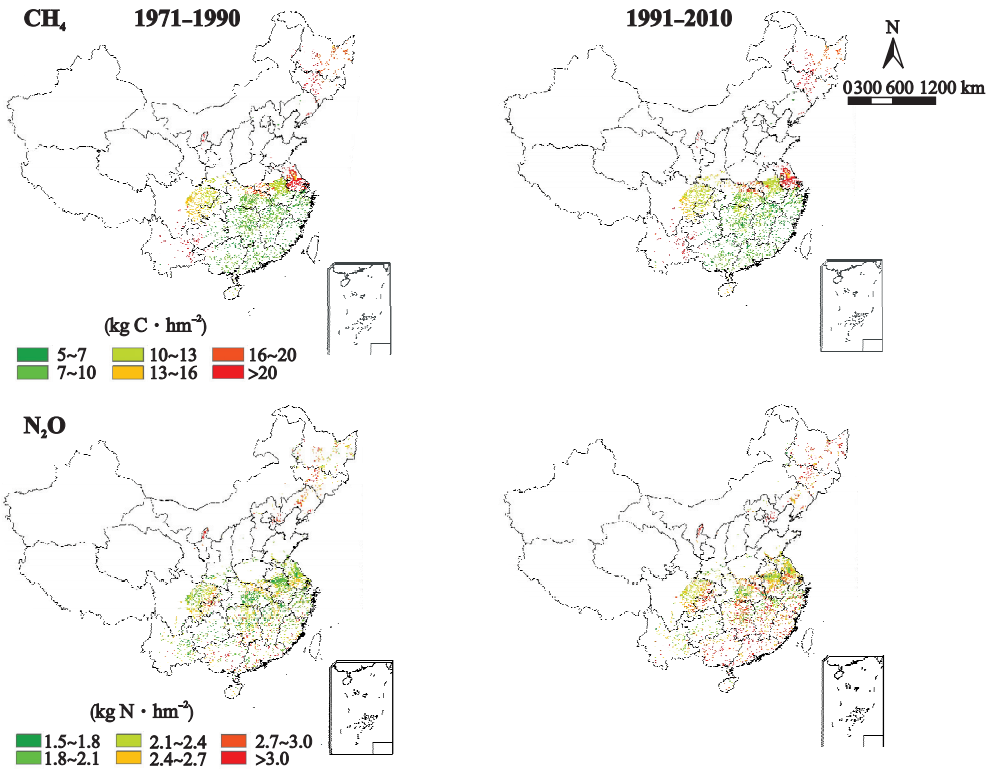


图 3 前 20 年与后 20 年全国水稻 CH_4 和 N_2O 排放量的变化

Fig.3 Changes of CH_4 and N_2O emissions from paddy of China in the first 20 year and the second 20 year.

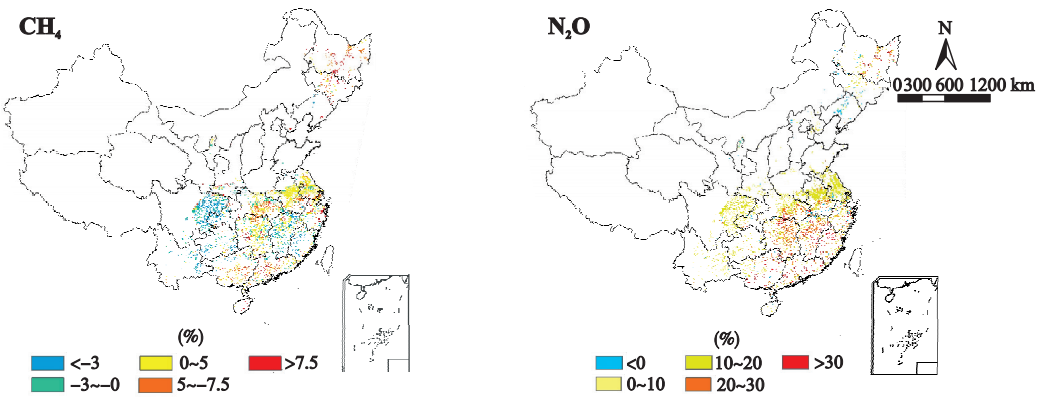


图 4 前 20 年与后 20 年全国水稻 CH_4 和 N_2O 排放的变化

Fig.4 Changes of CH_4 and N_2O emissions from paddy in China during the first 20 year and the second 20 year.

2.2 CH_4 和 N_2O 排放量变化

模拟结果中,1991—2010 年全国水稻 CH_4 平均排放量为 11.4 kg C · hm^{-2},比 1980s 平均排放量上升了 0.25 kg C · hm^{-2},整体呈增加趋势.东北地区 CH_4 平均排放量高于南部,但是如果考虑南部水稻两熟或三熟的实际情况,排放量分布将会改变.在云贵高原、四川盆地及福建、江西两省,CH_4 排放均有下降的趋势.

1991—2010 年全国水稻 N_2O 平均排放量为 2.49 kg N · hm^{-2},比 1980s 平均排放量增加了 0.25 kg N · hm^{-2},整体呈增加趋势,N_2O 排放最高的地区排放量可达 3.71 kg N · hm^{-2}.与 CH_4 的排放分布不同,除辽宁省外,其他地区都呈现明显的增加趋势(图 3、图 4).

表 2 各因素之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of parameters

	CH_4 排放 CH_4 emission	N_2O 排放 N_2O emission
温度 Temperature	0.402**	−0.034**
降雨量 Precipitation	−0.070**	0.176**

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

表 3　气温与土壤各层温度的相关系数
Table 3　Correlation coefficients between air temperature and soil temperature in different depths

	气温 Air temperature
土壤表层温度 Soil temperature at surface	0.985**
土壤 10 cm 温度 Soil temperature at 10 cm depth	0.981**
土壤 30 cm 温度 Soil temperature at 30 cm depth	0.944**

** $P<0.01$.

3　讨　　论

3.1　气候变化与中国水稻田 N_2O 排放

相关分析结果表明,N_2O 排放变化与温度变化之间的关系不大,而与降雨变化呈正相关.这是因为土壤中 N_2O 的排放机制与排放过程都受到土壤含水量的影响,当土壤含水量为 45%~75%田间持水量时,会产生较多的 N_2O,而在高土壤含水量情况下,N_2O 排放则不与土壤含水量呈正比[27].由于水稻生长过程中,除烤田阶段外,一直处于淹灌状态,在淹水阶段土壤含水量达到饱和,很少有 N_2O 排放;而在烤田阶段,土壤含水量由饱和迅速下降,此时如果发生降雨,则会使土壤含水量维持在饱和含水量的 45%~75%,同时促进更多 N_2O 排放.N_2O 排放与温度之间的相关性很弱.这是由于在水稻生长期间,土壤温度一直处于硝化细菌和反硝化细菌适宜生长的温度,所以温度变化对微生物活动的影响较小.N_2O 排放与土壤温度和土壤含水量的关系与 Rudaz 等[28]对瑞士一草原牧场 N_2O 排放规律的研究结果一致.也有研究表明,水稻土排放的 N_2O 随土壤含水量的增加而降低[29].这与模型模拟的结果有一定差异,原因是模型仅模拟了水稻单作的情况,模拟结果与轮作模式下的 N_2O 排放规律有所差异.根据对模拟结果的分析可知,适当选择烤田时间,综合考虑水稻生长规律和降雨分布规律,尽量避免降雨时烤田,可以减少 N_2O 排放.

3.2　气候变化与中国水稻田 CH_4 排放

结合气候变化与水稻田 CH_4 排放量结果来看,水稻田 CH_4 排放量的变化与降雨量变化关系不大,但与温度变化呈正相关.这主要是因为根据 CH_4 排放规律,大量 CH_4 集中在淹灌时期排放,烤田时期由于 CH_4 产生受到抑制,CH_4 氧化速率加快,几乎没有 CH_4 排放.因此,在淹灌时期,降雨量变化不会改变大田的淹灌状态,土壤含水量仍然处于饱和状态,对 CH_4 的排放影响不大.但是在模拟结果中,CH_4 变化值与温度变化值的相关系数达到 0.4,并且呈显著的正相关.这是因为在模拟过程中,土壤温度的变化与气温的变化在每一年都保持良好的一致性,而土壤温度在土壤氧化还原电位 Eh 处于适宜 CH_4 产生的水平时,是影响 CH_4 排放的重要因素[30].

与历史统计数据和其他研究[21-22]相比,本次模拟结果中的 CH_4 排放量较低.这是因为在模拟中,水稻种植管理模式,尤其是水管理模式,与历史统计数据不同,与持续淹灌模式相比,干湿交替模式会排放更少的 CH_4.有研究表明,从 20 世纪 80 年代起,世界范围内三大温室气体增长情况出现差异,CO_2 和 N_2O 仍然迅速增长,而 CH_4 的增速减缓.同时,中国在水稻种植水管理模式上进行了改革,由持续淹灌转变为干湿交替.这很可能为全球 CH_4 的增速减缓做出重要贡献[31].因此,在不违背水稻生长规律的前提下,适当增加烤田时间,抑制 CH_4 产生,同时加速 CH_4 氧化,能够减少 CH_4 排放.

3.3　问题与不足

本研究使用中国历史气象观测数据,对气候变化如何影响水稻田温室气体排放进行了区域模拟研究,结果表明,气候变化可影响水稻田温室气体排放.但是,与站点模拟相比,区域模拟会将一些过程和参数进行简化处理,所以,对于气候变化影响水稻田温室气体排放的机理,仍然需要站点试验和站点模拟来进行更深入的研究.同时,有关模型的完善也需要继续进行,例如田间管理数据中使用的中国气象站农业气象观测数据,虽然可以准确获取相关日期等数据,但是对品种参数等信息暂时不能通过模型表达,对模型作物品种库的扩充将是今后研究的重点.

4　结　　论

关于温室气体对气候变化的影响研究已经趋于成熟,有关气候变化对农作物生长和温室气体排放的影响也引起了人们的关注[32-33].本研究利用 DNDC 模型对 40 年来中国水稻温室气体排放进行了模拟,结果表明,40 年来稻季期间的温度和降雨都发生了明显的改变,总体上平均温度有所上升,降雨量有所增加.温度升高会促进水稻 CH_4 排放,而降雨量增加则会促进水稻 N_2O 排放.在不违背水稻生长规律的前提下,合理进行烤田管理,可以减少 CH_4 和 N_2O 排放.气候变化如何影响水稻田温室气体排放

的机理和过程仍需通过站点试验和站点模拟进行进一步研究,如对模型中的作物品种信息进行完善,以得到更加清晰的结果.同时,利用作物模型模拟估计气候变化与农作物生长和农业温室气体排放之间的关系是研究农业温室气体排放的一种有效的方法.

参考文献

[1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2014

[2] Vermeulen SJ, Campbell BM, Ingram JSI. Climate change and food systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, **37**: 195-222

[3] Smith P, Martino D, Cai ZC, *et al*. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**: 789-813

[4] Scheehle EA, Kruger D. Global anthropogenic methane and nitrous oxide emissions. *The Energy Journal*, 2006, **27**: 33-44

[5] US-EPA. Global Anthropogenic Non-CO_2 Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020[EB/OL]. (2006)[2014-08-01]. http://www.epa.gov/methane/pdfs/GreenhouseGasReport.pdf

[6] Yan XY, Akiyama H, Yagi K, *et al*. Global estimations of the inventory and mitigation potential of methane emissions from rice cultivation conducted using the 2006 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, **23**: 1-15

[7] FAO. FAO Statistical Databases[EB/OL]. (2014)[2014-06-08]. http://faostat.fao.org/

[8] Department of Climate Change in National Development & Reform Commission of China (国家发展和改革委员会应对气候变化司). The People's Republic of China Second National Communication on Climate Change. Beijing: China Economic Press, 2004 (in Chinese)

[9] Huang Y (黄 耀), Zhang W (张 稳), Zheng X-H (郑循华), *et al*. Estimates of methane emission from Chinese rice paddies by linking a model to GIS database. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(4): 980-988 (in Chinese)

[10] Li C-S (李长生). Biogeochemical concepts and methodologies: Development of the DNDC model. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2001, **21**(2): 89-99 (in Chinese)

[11] Wang X-K (王效科), Ouyang Z-Y (欧阳志云), Miao H (苗 鸿). Application of DNDC model in estimation of CH_4 and N_2O emissions in agricultural ecosystems in Yangtze River delta. *Environmental Science* (环境科学), 2001, **22**(3): 15-19 (in Chinese)

[12] Huang Y (黄 耀), Sun W-J (孙文娟), Zhang W (张 稳), *et al*. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Scientia Sinica Vitae* (中国科学: 生命科学), 2010, **53**(7): 766-775 (in Chinese)

[13] Wang P (王 平), Huang Y (黄 耀), Zhang W (张 稳). Estimates of methane emission from rice paddies in China over the period 1955-2005. *Advances in Climate Change Research* (气候变化研究进展), 2009, **5**(5): 291-297 (in Chinese)

[14] Brown L, Syed B, Jarvis SC, *et al*. Development and application of a mechanistic model to estimate emission of nitrous oxide from UK agriculture. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**: 917-928

[15] Zhang W (张 稳), Huang Y (黄 耀), Zheng X-H (郑循华), *et al*. Modeling methane emission form rice paddies: Model and modification. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(11): 2347-2352 (in Chinese)

[16] Zhang W (张 稳), Huang Y (黄 耀), Zheng X-H (郑循华), *et al*. Modeling methane emission form rice paddies: Model validation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2004, **24**(12): 2679-2685 (in Chinese)

[17] Kurbatova J, Li CS, Varlagin A, *et al*. Modeling carbon dynamics in two adjacent spruce forests with different soil conditions in Russia. *Biogeosciences*, 2008, **5**: 969-980

[18] Fumoto T, Kobayashi K, Li CS, *et al*. Revising a process-based biogeochemistry model (DNDC) to simulate methane emission from rice paddy fields under various residue management and fertilizer regimes. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 382-402

[19] Wang L-G (王立刚), Qiu J-J (邱建军), Tang H-J (唐华俊), *et al*. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China. *Geoderma*, 2008, **147**: 47-55

[20] Zhang X-L (张啸林), Pan X-J (潘晓健), Xiong Z-Q (熊正琴), *et al*. Effects of farming managements on the global warming potentials of CH_4 and N_2O from a rice-wheat rotation system based on the analysis of DNDC modeling. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(3): 690-696 (in Chinese)

[21] Zhang Y (张 远), Li Y (李 颖), Wang Y-Y (王毅勇), *et al*. Simulation and estimation of methane emissions from rice paddies in Sanjiang Plain of the Northeast China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2011, **27**(8): 293-298 (in Chinese)

[22] Sun Y-Y (孙园园), Sun Y-J (孙永健), Wang R-T (王锐婷), *et al*. Research of tillage-cropping systems on CH_4 and N_2O emission from permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of southwest China. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2011, **20**(6-7): 1003-1010 (in Chinese)

[23] Zhang L-M (张黎明), Yu D-S (于东升), Shi X-Z (史学正), *et al*. Simulation of methane emissions from rice fields in the Taihu Lake Region, China by using different unit of soil database with the DNDC model. *Environmental Science* (环境科学), 2009, **30**(8): 2185-2192 (in Chinese)

[24] Giltrap DL, Li CS, Saggar S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils.

Agriculture, *Ecosystems and Environment*, 2010, **136**: 292−300

[25] Butterbach-Bahl K, Kahl M, Mykhayliv L, *et al*. A European-wide inventory of soil NO emissions using the biogeochemical models DNDC/Forest-DNDC. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**: 1392−1402

[26] Saggar S, Giltrap DL, Li CS, *et al*. Modelling nitrous oxide emissions from grazed grasslands in New Zealand, *Agriculture*, *Ecosystems & Environment*, 2007, **119**: 205−216

[27] Li H-F (李海防), Xia H-P (夏汉平), Xiong Y-M (熊艳梅), *et al*. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: A review. *Ecology and Environment* (生态环境), 2007, **16**(6): 1781−1788 (in Chinese)

[28] Rudaz AO, Walti E, Kyburz G, *et al*. Temporal variation in N_2O and N_2 fluxes from a permanent pasture in Switzerland in relation to management, soil water content and soil temperature. *Agriculture*, *Ecosystems & Environment*, 1999, **73**: 83−91

[29] Li X-L (李香兰), Xu H (徐　华), Cai Z-C (蔡祖聪). Effect of water management on nitrous oxide emission from rice paddy field: A review. *Soils* (土壤), 2009, **41**(1): 1−7 (in Chinese)

[30] Xu H (徐　华), Cai Z-C (蔡祖聪), Li X-P (李小平), *et al*. Effect of soil Eh and temperature on seasonal variation of CH_4 emission from rice field. *Agro-Environmental Protection* (农业环境保护), 1999, **18**(4): 145−149 (in Chinese)

[31] Li C-S (李长生), Xiao X-M (肖向明), Frolking S, *et al*. Greenhouse gas emissions from croplands of China. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2003, **23**(5): 493−503 (in Chinese)

[32] Ogle SM, Olander L, Wollenberg L, *et al*. Reducing greenhouse gas emissions and adapting agricultural management for climate change in developing countries: Providing the basis for action. *Global Change Biology*, 2014, **20**: 1−6

[33] Hao X-Y (郝兴宇), Han X-J (韩雪居), Lin E-D (林而达). Impact of climate change on soybean production: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(10): 2697−2706 (in Chinese)

作者简介　田　展,男,1978 年生,博士,副研究员.主要从事气候变化的影响与适应研究. E-mail: zhantzy@ gmail.com

责任编辑　张凤丽