doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.032

气候与种植结构变化对温室气体排放及灌溉需水的影响

栾晓波[1,2]　高子涵[1,2]　薛　静[1,2]　孙世坤[1,2]　唐一荷[1,2]　高　飞[1,2]

(1.西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西杨凌 712100;
2.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西杨凌 712100)

摘要:针对气候变化和种植结构调整对黄淮海地区农业生产作用不明晰的问题,基于反硝化分解模型(Denitrification-decomposition,DNDC),采用情景分析法评估了气候与种植结构变化对黄淮海地区农业温室气体(CO_2、CH_4和N_2O)排放和灌溉需水量的影响。结果表明:从 1995 年到 2015 年,研究区气候向暖湿化方向发展,其中年均最高温度无显著变化,年均最低温度上升 0.7℃,年降水量增长 46.5 mm;1995 年研究区玉米、小麦和水稻种植面积分别约为 7.9×10^6、1.4×10^7、2.9×10^6 hm^2;2015 年 3 种作物种植面积均增大,而水稻、小麦种植比例减小。气候变化影响下,黄淮海地区农业温室气体排放增加,灌溉需水量小幅减小。与 1995 年相比,2015 年 CO_2、CH_4、N_2O 排放强度分别增长至 3 730.5、443.2、5.9 kg/hm^2,增幅分别为 4.7%、0.8%、26.2%,灌溉需水量减小为 499.3 mm,减幅为 6.6%。种植结构调整改变温室气体排放和灌溉需水量,黄淮海地区种植结构演变使 CO_2、CH_4、N_2O 排放总量增加至 9.9×10^7、1.4×10^6、1.3×10^5 t,分别增加 13.8%、8.6%、13.3%,同时,玉米作为高耗水作物,部分地区灌溉需水量随其种植比例的增大而增大。研究结果可为黄淮海地区未来农业节水减排政策的制定提供理论依据。

关键词:种植结构;灌溉需水量;温室气体;DNDC 模型

中图分类号:S19　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)12-0327-11　　**OSID**:

Effects of Climate and Plantation Structure Changes on Greenhouse Gas Emissions and Irrigation Water Demand

LUAN Xiaobo[1,2]　GAO Zihan[1,2]　XUE Jing[1,2]　SUN Shikun[1,2]　TANG Yihe[1,2]　GAO Fei[1,2]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*
2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

Abstract: Aiming at the unclear effect of climate change and planting structure adjustment on agricultural production in Huang-Huai-Hai region, based on denitrification-decomposition model (DNDC), the effect of climate and planting structure change on agricultural greenhouse gas (CO_2, CH_4 and N_2O) emission and irrigation water demand in the Huang-Huai-Hai area was assessed by scenario analysis. The results showed that from 1995 to 2015, the climate in the study area developed towards the direction of warm and humid, in which the average annual maximum temperature did not change significantly, the average annual minimum temperature increased by 0.7℃, and the annual precipitation increased by 46.5 mm. In 1995, the planting area of maize, wheat and rice was about 7.9×10^6 hm^2, 1.4×10^7 hm^2 and 2.9×10^6 hm^2, respectively. In 2015, the planting area of three crops was increased, while the planting proportion of rice and wheat was decreased. Under the influence of climate change, agricultural greenhouse gas emissions were increased and irrigation water demand was decreased slightly in the Huang-Huai-Hai region. Compared with that in 1995, the emission intensity of CO_2, CH_4 and N_2O was increased by 4.7%, 0.8% and 26.2% respectively to 3 730.5 kg/hm^2, 443.2 kg/hm^2 and 5.9 kg/hm^2 in 2015, and the irrigation water demand was decreased to 499.3 mm with decrease of 6.6%. The adjustment of planting structure changed greenhouse gas emissions and irrigation water

收稿日期:2023-05-11　修回日期:2023-05-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51979230、52109065)和中国博士后科学基金项目(2022M712605)

作者简介:栾晓波(1988—),男,讲师,博士,主要从事农业水土资源管理研究,E-mail:luanxb23@126.com

demand. The evolution of planting structure in the Huang – Huai – Hai region increased the total emissions of CO_2, CH_4 and N_2O to 9.9×10^7 t, 1.4×10^6 t and 1.3×10^5 t, which was increased by 13.8%, 8.6% and 13.3%, respectively. Meanwhile, in some areas, the irrigation water demand was increased with the increase of corn planting proportion as a high water-consuming crop. The research results can provide theoretical basis for the formulation of future agricultural water saving and emission reduction policies in the Huang – Huai – Hai region.

Key words: planting structure; irrigation water demand; greenhouse gases; DNDC model

0 引言

政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)发布的第 6 次评估报告指出,2019 年,农业、林业等土地利用部门温室气体排放占比达到 22%,排名第 3[1]。影响温室气体排放的因素众多,国内外学者针对此类问题进行了大量研究,其大致分为气候条件、土壤性质、田间管理措施以及田间作物特性[2]。其中气候因子中的水、热条件是影响投入碳转换效率的关键因子[3]。PATHAK 等[4]利用生命周期方法分析印度 24 种农作物的碳足迹,发现不同农作物的碳足迹存在较大差别。种植结构指某一区域范围内所种植农作物的种类、种植面积、种植比例以及时空分布[5]。现有研究大多针对单个作物或轮作系统的温室气体排放进行分析,但种植结构变化对温室气体排放的影响亦不可忽视。SUN 等[6]认为,根据作物水分利用效率的差异,合理规划作物种植面积,可以有效利用该地区的农业用水。

农业用水受多种因素影响。WU 等[7]研究发现,全球农业取水占总取水比重下降,但灌溉耗水比重却有所上升。因此,仅单独关注取水量已不能反映农业用水全貌。张智韬等[8]在泾惠渠灌区基于 Penman – Monteith 公式与遥感影像研究发现灌区种植结构调整后的作物需水量状况更符合区域有效降水特点。孟建等[9]基于 Penman – Monteith 公式分析得出大幅减少高耗水作物种植面积是未来河北省降低作物灌溉总需水量的有效途径。王小军等[10]通过构建气候变化背景下灌溉用水响应模型,得出随未来气温升高也会导致灌溉用水随之增大的结论。

黄淮海平原农业生产规模大,农业缺水严重。针对气候变化和种植结构调整对黄淮海地区农业生产作用不明晰的问题,本研究基于 DNDC 模型,探究气候与种植结构变化对该地区农业温室气体排放量与灌溉需水量的影响机理,为该地区减少农田温室气体排放和提高农业用水效率提供决策支持。

1 研究数据与方法

1.1 研究区域

选择中国三大平原之一的黄淮海平原(图 1)作为研究区(包括京津冀、山东省、河南省、安徽省)[11-12]。黄淮海平原位于东经 110°~123°,北纬 29°~43°。该地区人口众多,经济活跃,同时也是我国重要的粮食主产区之一[13-14]。该地区的气候条件为半干旱、半湿润气候[15-16]。优良的水热条件与平坦的地形非常有利于农业生产与发展。黄淮海平原粮食产量约占全国粮食产量的 30%,主要农作物为小麦、玉米、水稻等,该地区冬小麦产量对全国冬小麦产量贡献超过 50%,玉米产量对全国玉米产量贡献超过 30%[17]。

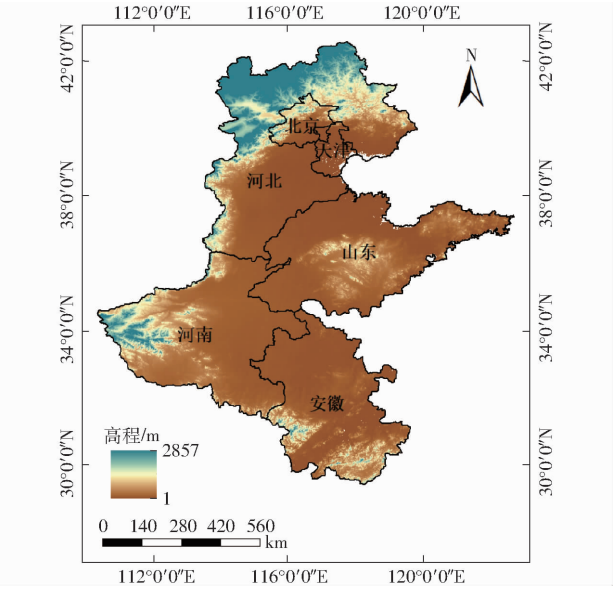

图 1 研究区域

Fig. 1 Study area

1.2 研究数据

1995 年与 2015 年黄淮海平原各地区逐日气象数据(日最高温度、日最低温度、日降水量、风速、相对湿度和日照时数等)来源于中国气象局(http://data.cma.cn/)。土壤数据(粘土含量、pH 值、有机质含量和容重等)来自世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, HWSD)[18]。1995、2015 年黄淮海平原各市粮食产量、种植面积、氮肥施用量和灌溉

面积等数据来源于各省市统计年鉴和《中国统计年鉴》(http://www.stats.gov.cn/tjsj/)等。不同地区作物的生长期和栽培条件来自文献[19-21]。研究区 DNDC 模型点位验证数据来源于文献[22-24]的田间实测数据。

1.3 DNDC 模型

DNDC 模型主要用于模拟农业生态系统中碳和氮的生物地球化学过程[25-26]。模型点位模拟需要输入的参数主要分为气象要素(日最高气温、日最低气温和日降水量),土壤要素(土壤 pH 值、土壤质地、土壤黏粒含量、有机碳含量和土壤容重)以及田间管理措施(种植日期、收获日期、耕地次数与日期、灌溉方式与日期、施肥量、施肥日期和施肥方式等)。本研究利用 DNDC 模型进行区域模拟,将每个市级行政区视为一个模拟单元,并赋予特定编号,所有模拟单元所需的输入数据存储在特定的数据库中,DNDC 模型从数据库中获取所需信息,并将其转换为模型内部特定文件,从而进行模拟研究。

1.4 作物需水量及灌溉需水量计算

采用联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)推荐使用的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量,计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \tag{1}$$

式中　ET_0——参考作物蒸发蒸腾量,mm

Δ——饱和水汽压与气温曲线斜率,kPa/℃

R_n——作物冠层表面净辐射,MJ/(m²·d)

u_2——2 m 高处平均风速,m/s

G——土壤热通量,MJ/(m²·d)

γ——湿度计常数,kPa/℃

T——2 m 高处平均气温,℃

e_s——饱和水汽压,kPa

e_a——实际水汽压,kPa

结合主要作物的作物系数,各种作物的需水量计算公式为

$$ET_c = K_c ET_0 \tag{2}$$

式中　ET_c——作物需水量,mm

K_c——作物系数

作物生长所需水量一部分由降水提供(有效降水量),另一部分由灌溉提供(净灌溉需水量),通过作物生育期内作物需水量与有效降水量之差获得[27]。净灌溉需水量计算公式为[28-29]

$$I_n = ET_c - P_e \tag{3}$$

式中　I_n——净灌溉需水量,mm

P_e——生育期内有效降水量,mm

有效降水量指降雨、降雪等降水流入田间且不流失的部分[30]。

1.5 全球增温潜势

全球增温潜势(Global warming potential, GWP)是在 100 年的时间框架内,各种温室气体的温室效应对应于相同效应的二氧化碳的质量。在 100 年时间尺度中,单位质量 CH_4 与 N_2O 的 GWP 分别为 CO_2 的 25、298 倍[31]。GWP 计算公式为

$$GWP = M_{CO_2} + M_{N_2O} + M_{CH_4} \tag{4}$$

式中　GWP——全球增温潜势,kg/hm²

M_{CO_2}——CO_2 累积排放通量,kg/hm²

M_{N_2O}——N_2O 累积排放通量,kg/hm²

M_{CH_4}——CH_4 累积排放通量,kg/hm²

1.6 模型适用性评价指标

在研究区内首先进行点位验证,通过比较现场实测数据(产量、CO_2 排放通量、CH_4 排放通量以及 N_2O 排放通量)与模型模拟结果,分别对模拟值进行验证,来判断 DNDC 模型在研究区内的站点模拟效果。在验证模型适用性良好的基础上,基于实际产量数据在区域内模拟产量时进行参数校正,并利用决定系数(Coefficient of determination, R^2)和平均绝对误差(Mean absolute error, MAE)进行区域模拟效果的验证。

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型验证

在站点尺度上对比分析 3 种主要作物(玉米、小麦和水稻)的产量和温室气体(CO_2、CH_4 和 N_2O)排放强度模拟值与实测值的差异。通过点位验证结果可知(图 2),该模型在该区域具有较强的适用性,模拟值与实测值的误差均在合理范围内。同时将 3 种作物的单产作为区域模拟的验证对象(图 3),对模型进行区域化。将研究区 1995、2015 年 3 种主要粮食作物的实际单产与 DNDC 模拟单产进行比较,通过蒙特卡洛方法,形成了一套匹配研究区的作物参数。经过模型参数化后,1995、2015 年的实际单产与 DNDC 模拟单产的 R^2 分别为 0.98、0.96,MAE 分别为 121、144 kg/hm²,说明该套 DNDC 模型作物参数在研究区具有良好的适用性,模拟结果符合区域的实际情况。

2.2 黄淮海地区气候与种植结构变化趋势

气候变化一般指气候平均状态随时间的变化,可以反映气候变化的气象要素众多,本研究重

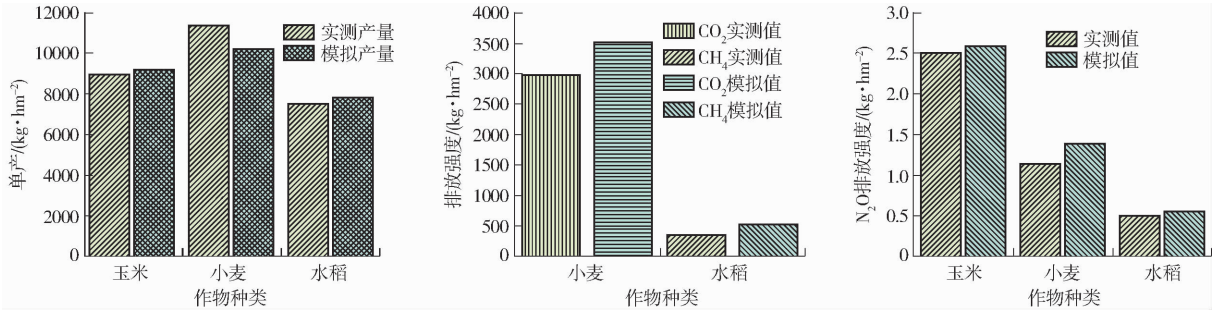

图 2 点位验证

Fig. 2 Point verification

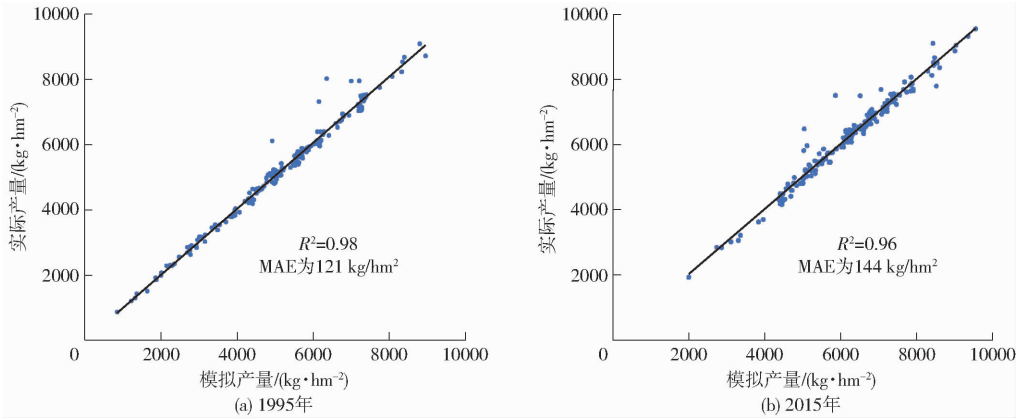

图 3 区域作物产量验证

Fig. 3 Regional crop yield verification

点分析研究区 1995、2015 年的年平均最高温度、年平均最低温度、年降水量以及日均日照时数这 4 个气象要素的时空变化情况。1995 年研究区年平均最高温度为 19.7℃,年平均最低温度为 9.6℃,2015 年研究区年平均最高温度没有较大变化,依然为 19.7℃,但年平均最低温度变化较大,为 10.3℃。图 4a、4b 分别为研究区日均最高温度与年平均最低温度变化趋势,相较于 1995 年,2015 年研究区中南部年平均最高温度增幅普遍表现为减小趋势,但北部及东部地区却表现为明显的增大趋势。大部分地区的年平均最低温度均表现为增大趋势,增幅在 0.1 ~ 3.2℃之间。图 4c 为研究区年降水量变化趋势,1995 年研究区年降水量为 768.5 mm,2015 年增长至 815.0 mm,增加 46.5 mm。相较于 1995 年,2015 年研究区北部及东部各地区年降水量表现为减小趋势,减幅在 2.9 ~ 343.6 mm 之间,而中南部各地区则表现为增大趋势,增幅在 10.7 ~ 674.1 mm 之间,其中增幅较大的地区主要分布在安徽省。同时研究区内年降水量呈增大趋势的地区数量多于呈减小趋势的地区。图 4d 为研究区日均日照时数变化趋势,1995 年研究区日均日照时数为 6.4 h,2015 年则下降为 5.5 h。相较于 1995 年,2015 年研究区大部分地区的日均日照时数均表现为下降趋势,其中降幅较大的地区主要分布在研究区南部。综上所述,研究区气候整体朝着暖湿化方向发展,同时日均日照时数受降水增多影响也有一定程度的缩短。

种植结构的变化包括种植面积与种植比例,本研究以玉米、小麦和水稻 3 种主要的粮食作物为研究对象,分析黄淮海地区种植结构的时空变化趋势。从种植面积来说,1995 年黄淮海地区 3 种主要粮食作物的总种植面积约为 2.48×10^7 hm^2,其中玉米、小麦和水稻种植面积分别约为 7.9×10^6、1.4×10^7、2.9×10^6 hm^2,3 种主要粮食作物占总粮食作物种植面积的 80.1%。图 5a 为 2015 年 3 种作物及其总面积相较 1995 年增长的比例,其中 2015 年总种植面积相较于 1995 年增长 15.4%,玉米增长趋势最为显著,增幅为 39.1%,小麦与水稻的种植面积分别增加 3.7% 和 6.1%。同时,2015 年 3 种粮食作物占总粮食作物种植面积的 90.2%,相较于 1995 年增长 10.1%,以玉米、小麦、水稻为主导的种植集中度提高。图 5b 是 1995、2015 年 3 种作物的种植面积比例变化,2 个年份的小麦种植比例均为最大,且超过 50.0%,但从 1995 年到 2015 年,其种植比例呈现逐步减小趋势,玉米的种植比例排位第 2,其种植比例均超 30.0%,且表现为逐步增大趋势,水稻的种植比例最小,均稳定在 11.0% 左右,变化并不显著。

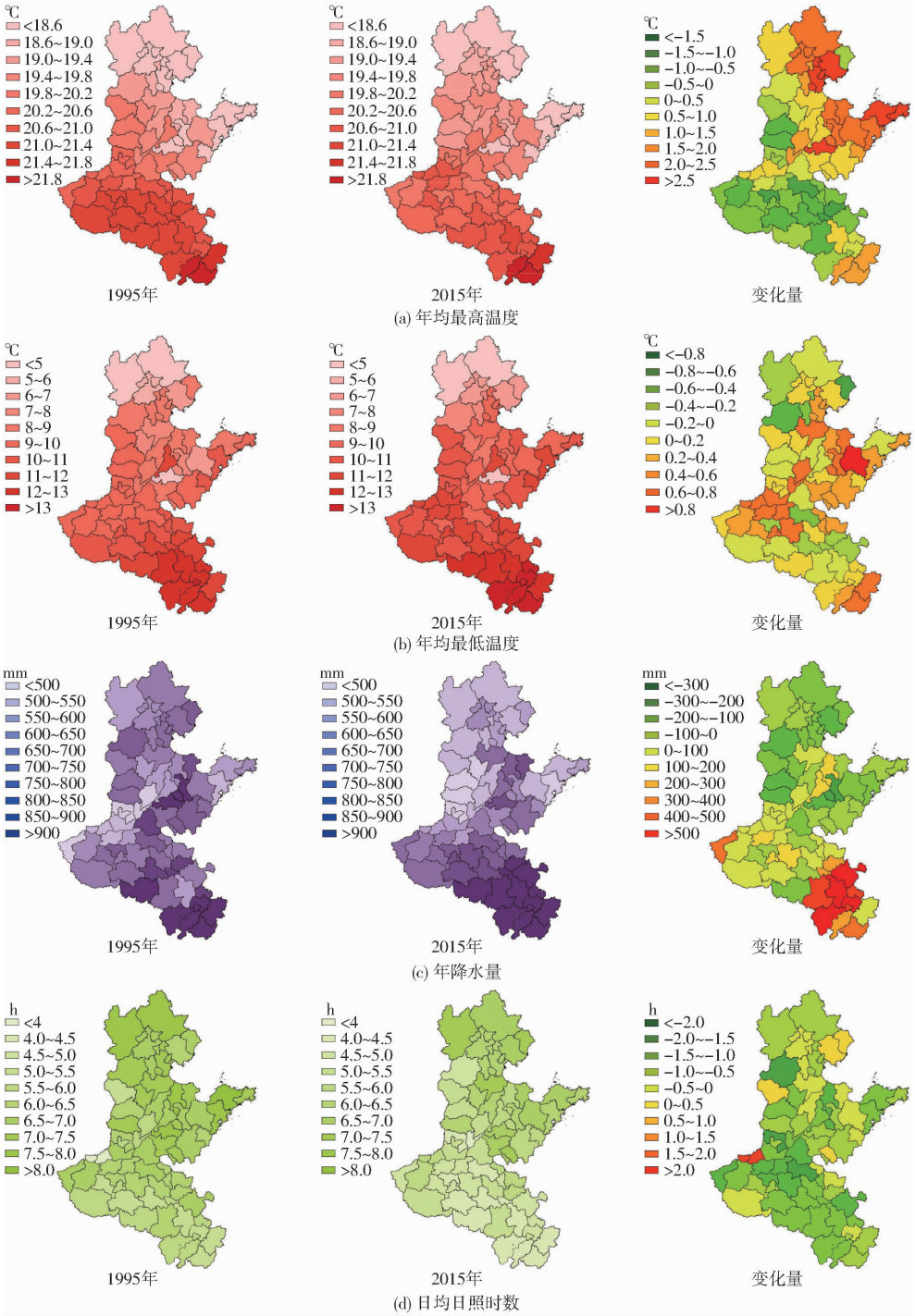

图 4　黄淮海地区气象要素时空变化

Fig. 4　Spatiotemporal variation trend of meteorological elements in Huang－Huai－Hai region

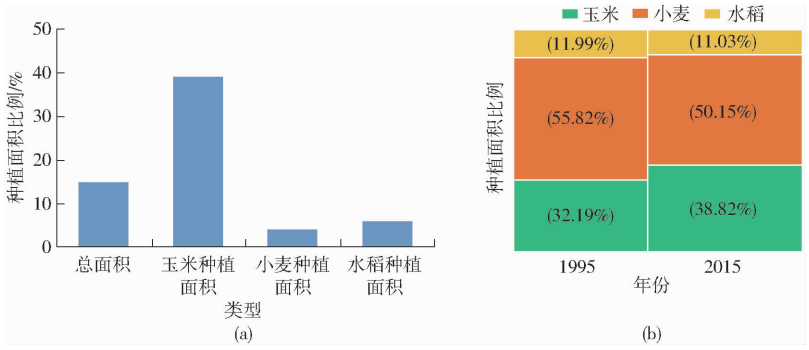

图 5　黄淮海地区主要粮食作物种植结构变化

Fig. 5　Changes of planting structure of main grain crops in Huang－Huai－Hai area

进一步分析了研究区 1995 年(图 6a)及 2015 年(图 6b)各地区种植结构时空变化趋势,黄淮海地区玉米种植比例较大的地区主要分布在河北省,水稻种植比例较大的地区主要分布在安徽省,小麦种植比例较大的地区主要分布在河南省和山东省。1995 年至 2015 年,京津冀地区、山东省、河南省都存在玉米种植比例显著增加的地区,几乎整个研究区的小麦种植比例均呈现减小趋势,个别水稻种植比例增幅较大的地区分布在河南省。

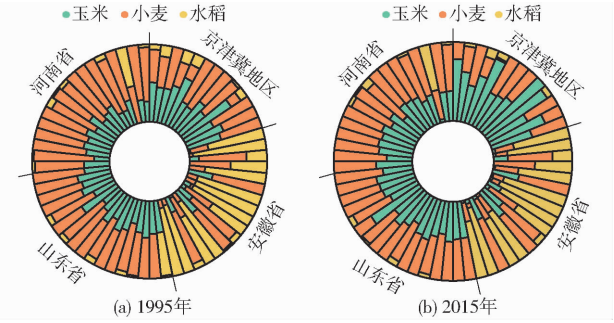

图 6 黄淮海地区主要粮食作物种植比例变化

Fig. 6 Change of planting proportion of grain food crops in Huang – Huai – Hai region

2.3 气候变化对黄淮海地区农业温室气体排放与灌溉需水影响评估

为研究气候变化对黄淮海地区农田温室气体(CO_2、CH_4和 N_2O)排放的影响,本研究基于 DNDC 模型,利用情景分析方法,只更改气候条件,对研究区各类农田温室气体排放及灌溉需水量进行了模拟计算。1995 年气候条件下,研究区内 CO_2、CH_4和 N_2O 单位面积排放强度分别为 3 565.4、439.5、4.7 kg/hm^2。2015 年气候条件下,3 种气体(CO_2、CH_4和 N_2O)排放强度分别增长为 3 730.5、443.2、5.9 kg/hm^2;与 1995 年相比,3 种气体排放强度增幅分别为 4.7%、0.8% 和 26.2%。相较于 1995 年,研究区内的大部分地区 CO_2(图 7a)、CH_4(图 7b)和 N_2O(图 7c)也均表现为增大趋势。GWP 变化趋势分析结果显示:1995 年,研究区 GWP 为 15 940.9 kg/hm^2,2015 年增至 16 561.9 kg/hm^2。其中,CH_4的排放强度小于 CO_2,但其单位质量温室气体的增温效应高于 CO_2(达 25 倍),在 1995 年与 2015 年的 GWP 中贡献均超过 70.0%,对研究区的气候变暖造成重要影响。

作物需水量和作物生育期内的有效降水量共同决定了作物的灌溉需水量 I_n,1995 年黄淮海地区的平均 I_n 为 534.4 mm,在 2015 年气候条件下减小为 499.3 mm,减幅为 6.6%。从空间分布来看(图 8),1995 年气候条件下,I_n 超过 650.0 mm 的地区主要分布在山东省与河南省,I_n 相对较低的地区主要分布在河北省北部与安徽省南部,其中 I_n 低于 400.0 mm 为河北省秦皇岛市、承德市与安徽省黄山市。2015 年,研究区内 I_n 虽然整体依然表现为中部大、两端小的趋势,但研究区中部 I_n 较大的地区由中部向西部转移。相较于 1995 年,2015 年研究区内大部分地区 I_n 均表现为减小趋势,其中安徽省部分地区减小趋势十分显著,减幅超过 100.0 mm 的有合肥、蚌埠、亳州等市。但同时也有一部分地区表现为增大趋势,主要分布在研究区北部与中部偏西地区。

2.4 种植结构变化对黄淮海地区农业温室气体排放与灌溉需水影响评估

为研究种植结构变化对黄淮海地区农田温室气体(CO_2、CH_4和 N_2O)排放的影响,本研究基于 DNDC 模型,利用情景分析方法,只改变种植结构,对研究区内各类农田温室气体排放及灌溉需水量进行了模拟计算。1995 年,研究区内 CO_2、CH_4和 N_2O 排放总量分别约为 8.7×10^7、1.3×10^6、1.1×10^5 t。2015 年种植结构条件下,3 种温室气体排放总量相较于 1995 年均呈现出增长趋势,分别增大 13.8%、8.6% 和 13.3%,这与 2015 年 3 种主要粮食作物(玉米、小麦和水稻)种植面积均增大有关。

由于 CH_4气体的排放仅来源于水稻作物,种植结构的调整对其市级排放强度没有影响。本研究进一步分析了 CO_2与 N_2O 气体在不同种植结构条件下单位面积排放强度的时空变化特征。2015 年种植结构下,3 种温室气体单位面积排放强度分别为 3 517.0、449.7、4.6 kg/hm^2。相较于 1995 年,CH_4单位面积排放强度增大,增幅为 2.3%;CO_2与 N_2O 单位面积排放强度均减小,减幅分别为 1.4% 与 1.8%。此外,从空间分布来看,相较于 1995 年,研究区大部分地区 CO_2 单位面积排放强度减小(图 9a),而南部 N_2O 单位面积排放强度呈现增大趋势的地区增幅较大(图 9b)。

2015 年种植结构下,黄淮海地区 I_n 增大,增长至 624.4 mm,增幅为 16.8%。如图 10 所示,在 2015 年种植结构下,除研究区北部、东部及最南部部分地区灌溉需水量相对较小外,整个中南部区域内各地区 I_n 均较大。相较于 1995 年,研究区内大部分地区的 I_n 呈增大趋势,且较多地区的增幅超过 100.0 mm,这些地区主要分布在研究区中部及南部。表现为减小趋势的地区分布于河北省北部、山东省东部及安徽省南部。分析可得,政策规划、城市发展等情况的不同,使得各地区农作物种植面积和种植比例变化产生差异,导致上述结果中各地区 I_n 的差异。

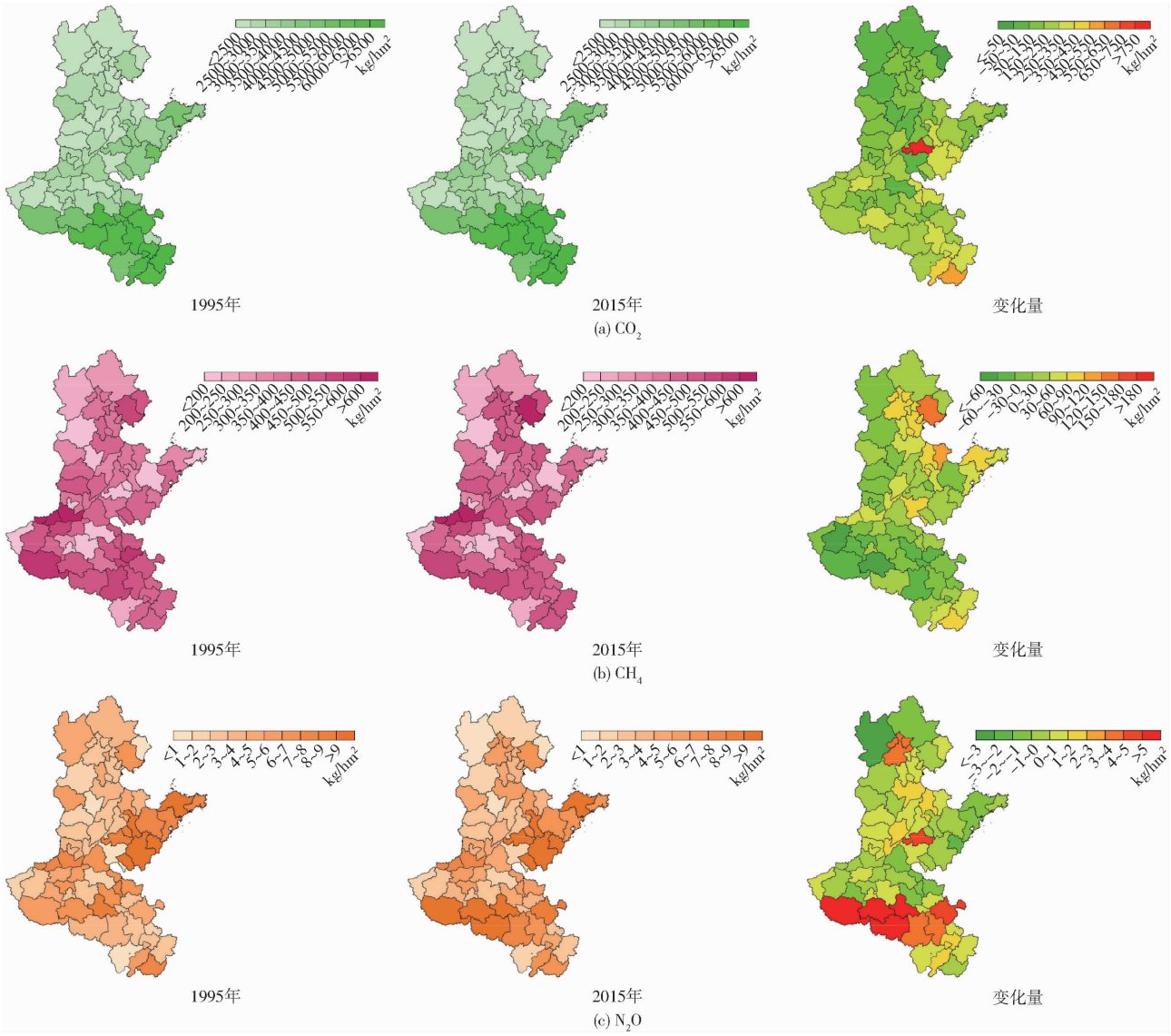

图 7　黄淮海地区气候条件变化下温室气体排放时空变化

Fig. 7　Spatiotemporal variation trend of greenhouse gases under climate change conditions in Huang－Huai－Hai region

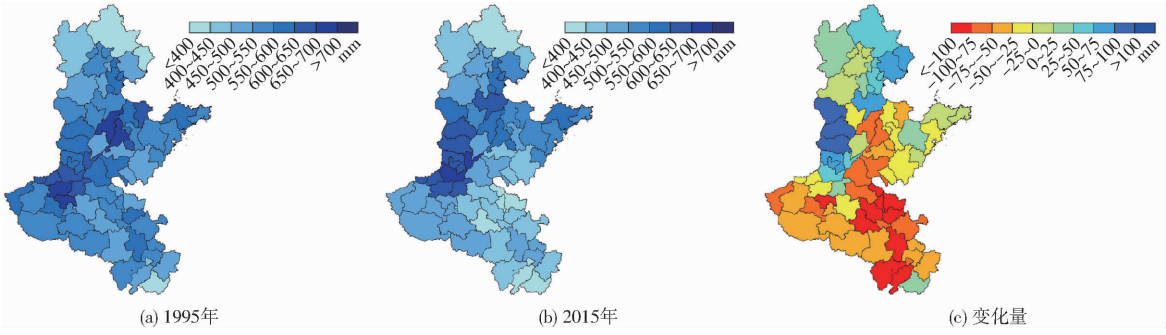

图 8　黄淮海地区气候条件变化下灌溉需水量时空变化

Fig. 8　Spatiotemporal variation trends of irrigation water demand under climate change conditions in Huang－Huai－Hai region

3　讨论

3.1　气候对农业温室气体排放及灌溉需水量影响机理

气候的暖湿化，使得阴雨天增多，从而导致日照时数减少，同时对研究区内各类温室气体排放强度都产生了一定的促进作用。已有大量研究表明，增温会影响土壤呼吸速率，从而促进 CO_2 排放[32]。同时，也会使 CH_4 排放速率增大[33－34]。LIU 等[35]通过分析大量文献中的测量值得到，在一定的范围内，温度升高使 N_2O 在 3 种温室气体中增长最为显著。另一方面，吴林等[36]研究发现土壤释放的 CO_2 会伴

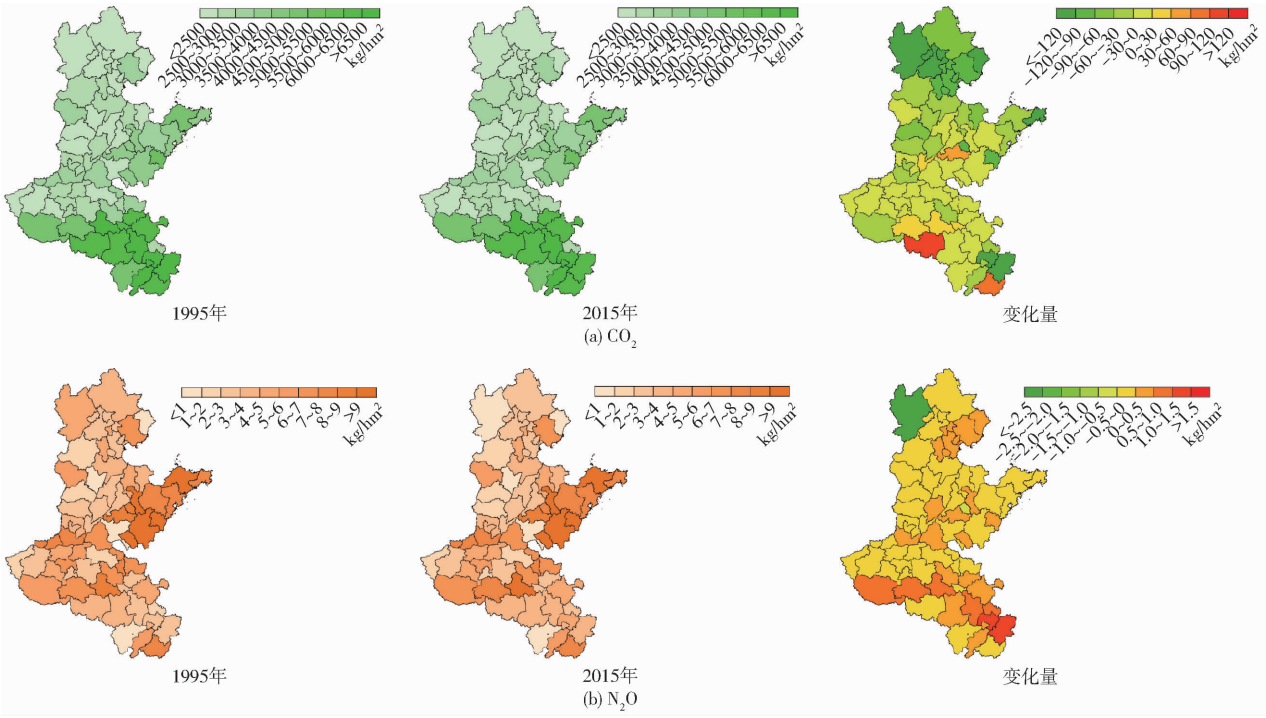

图 9 黄淮海地区种植结构变化条件下温室气体排放时空变化

Fig. 9 Spatiotemporal variation trend of greenhouse gases under changes in planting structure in Huang – Huai – Hai region

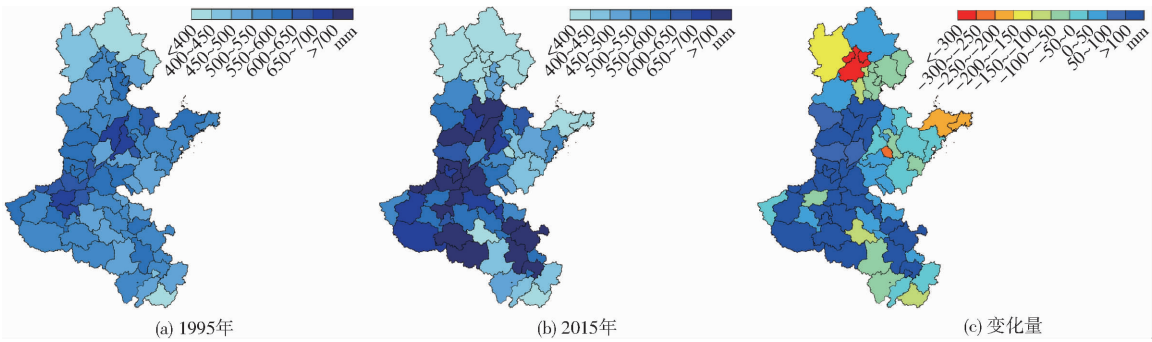

图 10 黄淮海地区种植结构变化下灌溉需水量时空变化

Fig. 10 Spatiotemporal variation trend of irrigation water demand per unit area under changes in planting structure in Huang – Huai – Hai region

随降水的增加呈线性或非线性增长趋势。同时,降水的增多会改变土壤湿度,而这与土壤中 N_2O 排放量呈正相关[37]。郝庆菊等[38]发现降水导致的土壤饱和或淹水情况促进 CH_4 的排放。本研究中所得气候变化对各类温室气体排放产生促进作用的结论,与以往的研究结果一致。同时,伴随着气候向暖湿化方向发展,研究区内作物需水量受多种气象要素影响,但有效降水伴随着实际降水量的增加产生更为显著的增长,使得 I_n 整体呈减小趋势。

3.2 种植结构对农业温室气体排放及灌溉需水量影响机理

不同作物生长发育机理存在差异,因此其在生长过程中排放入大气中的碳、氮也存在不同。本研究单独分析了黄淮海地区主要粮食作物(玉米、小麦和水稻)各自的温室气体单位面积排放强度(图 11)。研究结果表明,对于 CO_2 排放强度而言,水稻排放强度排位第 1。对于 N_2O 排放强度而言,3 种作物中小麦排放强度最大。LI[39]研究发现长期淹水会激活土壤发酵作用产生 CH_4。不同种植结构下,水稻的 CH_4 排放强度约为 440.0 kg/hm^2。本研究进一步对各作物的 GWP 做出了评估,结果表明水稻的 GWP 最大,远超小麦与玉米作物的 GWP。

相较于 1995 年,研究区 CO_2 单位面积排放强度的减小归因于具有高排放特性的小麦与水稻种植比例的减小,N_2O 单位面积排放强度的减小与小麦种植比例的减小有关。仅有 CH_4 单位面积排放强度增大,这是研究区部分 CH_4 排放强度较大地区的水稻种植比例减小导致的。

同时,2015 年种植结构下,I_n 增幅较大地区主要分布在河南省,造成这一现象的主要原因是该地

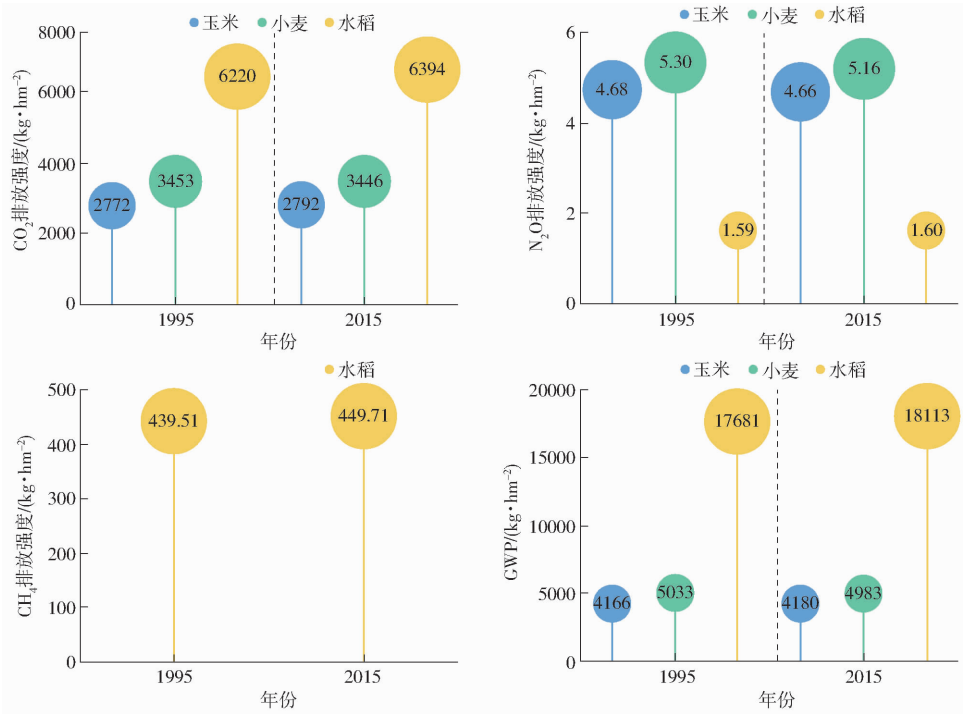

图 11　黄淮海地区主要粮食作物各类温室气体排放强度与全球增温潜势

Fig. 11　Intensity of various greenhouse gas emissions and global warming potential from major grain crops in Huang – Huai – Hai region

区大部分地区具有高耗水特性的玉米作物种植比例显著增加。

4　结论

(1)1995 年黄淮海地区年平均最低温度、年平均最高温度、年降水量以及日均日照时数分别为 9.6℃、19.7℃、768.5 mm 和 6.4 h。相较于 1995 年,2015 年平均最高温度变化并不明显,年平均最低温度与年降水量分别增大 0.7℃与 46.5 mm,但日均日照时数减小为 5.5h,气候整体朝着暖湿化方向发展。1995 年研究区玉米、小麦和水稻种植面积分别约为 7.9×10^6、1.4×10^7、2.9×10^6 hm^2,3 种主要粮食作物(玉米、小麦和水稻)的种植面积分别增长 39.1%、3.7% 和 6.1%,其中玉米的种植比例呈增大趋势,小麦与水稻的种植比例呈减小趋势。

(2)伴随着气候的暖湿化,研究区内 3 种温室气体(CO_2、CH_4 和 N_2O)单位面积排放强度分别增长为 3 730.5、443.2、5.9 kg/hm^2,相较于 1995 年增幅分别为 4.7%、0.8%、26.2%。同时 GWP 也增长为 16 561.9 kg/hm^2。作物需水量虽然受温度影响增大,但因有效降水有更为显著的增加,使得研究区作物灌溉需水量整体呈减小趋势,减小至 499.3 mm,相较于1995 年减幅为 6.6%。

(3)伴随着种植结构的调整,3 种温室气体(CO_2、CH_4 和 N_2O)的总排放量均随种植面积的增大而增长至 9.9×10^7、1.4×10^6、1.3×10^5 t,增幅分别为 13.8%、8.6%、13.3%。CO_2 与 N_2O 单位面积排放强度的减小与具有高排放特性的小麦与水稻种植比例的减小有关。同时研究区内部分地区随着高耗水作物玉米种植比例的增大,灌溉需水量也呈显著的增大趋势。

参　考　文　献

[1]　IPCC. Climate change 2022: mitigation of climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

[2]　许双. 冬小麦苗期农田温室气体排放及其影响因素分析[D]. 新乡: 河南师范大学, 2021.
XU Shuang. Analysis of emission and effect factors of greenhouse GASES in seedling stage from winter wheat fields[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2021. (in Chinese)

[3]　LI J W, ZIEGLER S E, LANE C S, et al. Legacies of native climate regime govern responses of boreal soil microbes to litter stoichiometry and temperature[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 66: 204 – 213.

[4]　PATHAK H, JAIN N, BHATIA A, et al. Carbon footprints of Indian food items[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 139: 66 – 73.

[5]　官春云. 农业概论[M]. 2 版. 北京:中国农业出版社, 2000.

[6]　SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. Impact of changing cropping pattern on the regional agricultural water productivity[J].

Journal of Agricultural Science, 2014, 153(5): 767 - 778.
[7] WU B F, TIAN F Y, ZHANG M, et al. Quantifying global agricultural water appropriation with data derived from earth observations[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 358: 131891.
[8] 张智韬, 粟晓玲, 党永仁, 等. 泾惠渠灌区作物种植结构变化对灌溉需水量的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 122 - 130,100.
ZHANG Zhitao, SU Xiaoling, DANG Yongren, et al. Influence of crop planting structure change on irrigation water requirement in Jinghuiqu irrigation district[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10): 122 - 130, 100. (in Chinese)
[9] 孟建, 姚旭擎, 杨晓琳, 等. 地下水超采区农业种植结构与作物耗水时空演变研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 302 - 312.
MENG Jian, YAO Xuqing, YANG Xiaolin, et al. Spatial and temporal evolution of agricultural planting structure and crop water consumption in groundwater overdraft area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 302 - 312. (in Chinese)
[10] 王小军, 贺瑞敏, 尚熳廷.气候变化对区域农业灌溉用水影响分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(1): 29 - 32,36.
WANG Xiaojun, HE Ruimin, SHANG Manting. Research on regional irrigation water demand under climate change[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(1): 29 - 32, 36. (in Chinese)
[11] LI Y J, QI X Y, WANG K X, et al. Response of the water footprint of maize production to high temperatures in the Huang - Huai - Hai region of China[J/OL]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022. https://doi.org/10.1002/jsfa.12020.
[12] WANG K X, SUN S K, LI Y J, et al. Response of regional agricultural water use to the change of climate and plantation structure in the typical agricultural region of China[J]. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13(3): 1370 - 1388.
[13] 焦艳平, 陈阜, 唐衡, 等. 我国主要农作区粮食产量贡献率分析[J]. 作物杂志, 2006(1): 17 - 20.
JIAO Yanping, CHEN Fu, TANG Heng, et al. Analysis of contribution rate of grain output in main agricultural areas[J]. Crops, 2006(1): 17 - 20. (in Chinese)
[14] 田永中, 陈述彭, 岳天祥, 等. 基于土地利用的中国人口密度模拟[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 283 - 292.
TIAN Yongzhong, CHEN Shupeng, YUE Tianxiang, et al. Simulation of Chinese population density based on land use[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(2): 283 - 292. (in Chinese)
[15] 褚荣浩, 申双和, 吕厚荃, 等. 气候变化情景下黄淮海冬麦区农业气候资源变化特征[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(26): 1 - 10,18.
CHU Ronghao, SHEN Shuanghe, LÜ Houquan, et al. Characteristics of agricultural climate resources in Huang - Huai - Hai winter wheat region under climate change scenarios[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(26): 1 - 10,18. (in Chinese)
[16] 李茂松, 王道龙, 张强, 等. 2004—2005 年黄淮海地区冬小麦冻害成因分析[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 51 - 55.
LI Maosong, WANG Daolong, ZHANG Qiang, et al. Cause analysis of frost dam age to winter wheat in Huang - Huai - Hai plain during 2004—2005[J]. Journal of Natural Dsasters, 2005, 14(4): 51 - 55. (in Chinese)
[17] 李宗新, 王良, 刘树堂, 等. 冬小麦-夏玉米周年水肥高效利用[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4333 - 4341.
LI Zongxin, WANG Liang, LIU Shutang, et al. Annual high efficiency utilization of water and fertilizer of a wheat - maize double cropping system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(21): 4333 - 4341. (in Chinese)
[18] FISCHER G, NACHTERGAELE F, PRIELER S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture[C]// IIASA, Laxenburg and FAO, Rome, 2008.
[19] 郑永丹. 中国主要粮食作物生育期时空格局及其变化[D]. 武汉:华中师范大学, 2015.
ZHENG Yongdan. Research on the spatial-temporal distribution of growth period of main grain crops and its change in China [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2015. (in Chinese)
[20] WU D, FANG S B, LI X, et al. Spatial-temporal variation in irrigation water demand for the winter wheat-summer maize rotation system since the 1980s on the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 214: 78 - 86.
[21] PENG S B, TANG Q Y, ZOU Y B. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2008, 12(1): 3 - 8.
[22] 徐驰. 气候变化对华北农田粮食生产和净温室效应的影响及其适应技术[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
XU Chi. The effects and adaptive technology of climate change on grain production and net greenhouse effect in North China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
[23] 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 Xinhua, ZHU Zhenlin, DONG Hongyun, 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. (in Chinese)
[24] 陈晓龙. 耕作方式对迁区单季稻田和冬小麦田温室气体排放的影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
CHEN Xiaolong. Effects of different tillage methods on the emission of methane and nitrous oxide from the rice-wheat rotation cropland of polder[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[25] LI C S, FROIKING S, FROIKING T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by precipitation events: 1. Model structure and sensitivity[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1992, 97(D9): 9759 - 9776.
[26] LI C S, FROIKING S, HARRISS R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. Global Biogeochemical Cycles,

1994, 8(3): 237 – 254.
[27] 马黎华, 康绍忠, 粟晓玲, 等. 农作区净灌溉需水量模拟及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 11 – 18.
MA Lihua, KANG Shaozhong, SU Xiaoling, et al. Simulation and uncertainty analysis of net irrigation requirement in agricultural area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8): 11 – 18. (in Chinese)
[28] HU W, YAN C R, LI Y C, et al. Impacts of climate change on winter wheat growing period and irrigation water requirements in the North China Plain[J]. Acta Ecological Sinica, 2014, 34(9): 2367 – 2377.
[29] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6 – 12.
LIU Yu, WANG Lin, NI Guangheng, et al. Spatial distribution characteristics of irrigation water requirement for main crops in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 6 – 12. (in Chinese)
[30] DOLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resource Research, 2002, 38(4): 1037.
[31] IPCC. Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2014.
[32] 桑琳. 增温及秸秆施用对农田土壤呼吸及酶活性的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
SANG Lin. Effects of warming and straw application on soil respiration and enzyme activities in a cropland[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017. (in Chinese)
[33] GAIHRE Y K, WASSMANN R, VILLEAGAS-PANGGA G. Impact of elevated temperatures on greenhouse gas emissions in rice systems: interaction with straw incorporation studied in a growth chamber experiment[J]. Plant and Soil, 2013, 373(1 – 2): 857 – 875.
[34] LAINE A M, MEHTATALO L, TOLVANEN A, et al. Impacts of drainage, restoration and warming on boreal wetland greenhouse gas fluxes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 647: 169 – 181.
[35] LIU S W, ZHENG Y J, MA R Y, et al. Increased soil release of greenhouse gases shrinks terrestrial carbon uptake enhancement under warming[J]. Global Change Biology, 2020, 26: 4601 – 4613.
[36] 吴林, 苏延桂, 张元明. 模拟降雨对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(13): 4103 – 4113.
WU Lin, SU Yangui, ZHANG Yuanming. Effects of simulated precipitation on apparent carbon flux of biologically crusted soils in the Gurbantunggut Desert in Xinjiang, Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(13): 4103 – 4113. (in Chinese)
[37] 刘连杰, 白红英, 母国宏, 等. 土壤质地及环境因子对农田 N_2O 排放的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14): 6075 – 6077.
LIU Lianjie, BAI Hongying, MU Guohong, et al. Effects of soil texture and environmental factors on N_2O emission in farmland [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(14): 6075 – 6077. (in Chinese)
[38] 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原湿地 CH_4 排放通量研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 194 – 199.
HAO Qingju, WANG Yuesi, SONG Changchun, et al. Study of CH_4 emission from wetlands in Sanjiang Plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 194 – 199. (in Chinese)
[39] LI C S. Mitigating greenhouse gas emissions from agroecosystems: scientific basis and modeling approach[J]. ACS Symposium, 2011, 1072(4): 299 – 330.

(上接第 279 页)

[29] YU F, KOLTUN V. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions[J]. arXiv Preprint, arXiv:1511.07122, 2015.
[30] CHATTERJEE N, KAUSHIK N, BANSAL B. Inter-subdomain relation extraction for agriculture domain[J]. IETE Technical Review, 2019, 36(2): 157 – 163.
[31] LI R, LI D, YANG J, et al. Joint extraction of entities and relations via an entity correlated attention neural model[J]. Information Sciences, 2021, 581: 179 – 193.
[32] HAN S, ZHANG R F, SHI L, et al. Classifying social determinants of health from unstructured electronic health records using deep learning-based natural language processing[J]. Journal of Biomedical Informatics, 2022, 127: 103984.
[33] 蒲攀,张越,刘勇,等. Transformer 优化及其在苹果病虫命名实体识别中的应用[J].农业机械学报,2023,54(6):264 – 271.
PU Pan, ZHANG Yue, LIU Yong, et al. Transformer optimization and application in named entity recognition of apple diseases and pests[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 264 – 271. (in Chinese)
[34] 李书琴,张明美,刘斌. 融合字词语义信息的猕猴桃种植领域命名实体识别研究[J].农业机械学报,2022,53(12):323 – 331.
LI Shuqin, ZHANG Mingmei, LIU Bin. Kiwifruit planting entity recognition based on character and word information fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12): 323 – 331. (in Chinese)
[35] 刘新亮,张梦琪,谷情,等.基于 BERT – CRF 模型的生鲜蛋供应链命名实体识别[J].农业机械学报,2021,52(增刊):519 – 525.
LIU Xinliang, ZHANG Mengqi, GU Qing, et al. Named entity recognition of fresh egg supply chain based on BERT – CRF architecture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 519 – 525. (in Chinese)