

大气CO₂浓度升高对长江中下游地区 水稻灌溉需水量的影响

孙博凯^{1,2}, 王卫光^{1,2}, 刘国帅^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:利用1981—2013年长江中下游地区127个气象站的观测资料与历史大气CO₂浓度数据,对考虑和不考虑大气CO₂浓度变化的水稻需水量进行模拟,分析了大气CO₂浓度上升对长江中下游地区水稻需水量的影响。结果表明:不考虑大气CO₂浓度时,长江中下游地区水稻需水量多年平均值为400.16 mm,空间分布具有明显差异;考虑大气CO₂浓度会使水稻需水量比未考虑大气CO₂浓度时平均下降1.6%左右;大气CO₂浓度每上升1 μmol/mol,研究区水稻需水量平均下降0.071 mm;各子流域的灌溉需水量因有效降水量不同而具有一定差异,考虑大气CO₂浓度变化时,长江中下游地区水稻年需补充灌溉总量减少4.24 km³。

关键词:大气CO₂浓度;灌溉需水量;水稻;长江中下游

中图分类号:S161;TV93 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)03-0022-06

Effects of increased atmospheric CO₂ concentration on water demand for rice irrigation in middle and lower reaches of Yangtze River//SUN Bokai^{1,2}, WANG Weiguang^{1,2}, LIU Guoshuai^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the observation data of 127 meteorological stations and historical atmospheric CO₂ concentration data in the middle and lower reaches of the Yangtze River from 1981 to 2013, the water demand of rice was simulated with the change of atmospheric CO₂ concentration considered or not. The influence of atmospheric CO₂ concentration rise on the water demand of rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River was analyzed. The results show that, without considering the atmospheric CO₂ concentration, the annual average water demand of rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River was 400.16 mm, and the spatial distribution was obviously different. The water demand of rice considering atmospheric CO₂ concentration decreased by about 1.6% on average compared with that without considering CO₂ concentration. For every 1 μmol/mol increase in CO₂ concentration, the average water demand of rice in the study area decreased by 0.071 mm. The water demand for irrigation in each sub-basin varies due to different effective rainfall. Considering the change of atmospheric CO₂ concentration, the total irrigation water demand for rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River decreased by 4.24 km³.

Key words: atmospheric CO₂ concentration; irrigation water demand; rice; middle and lower reaches of Yangtze River

二氧化碳(CO₂)是影响全球气候变化的主要因子之一。随着人类活动的加剧^[1-2],美国国家海洋和大气管理局(<https://gml.noaa.gov/ccgg/>)观测到全球大气CO₂浓度近年来显著上升。大气CO₂浓度升高对生态环境、农业生产、自然水循环具有不可忽视的影响。相关研究^[3-4]表明,大气CO₂浓度的变化会使植物的各种生物酶活性发生改变,大气CO₂浓度不同时,植物的植株形态、光合作用、叶片气孔导度、植株蒸腾等生理生化指标具有明显差异。这意味着大气CO₂浓度上升给植物生长带来了综合作用。植物生长发育阶段的更迭会引起植物耗水量的改变,而在不断变化的气象环境中,作物的灌溉需

水规律也势必会有所不同。现阶段,计算作物需水量的主要方法包括水量平衡法、彭曼-蒙特斯(Penman-Monteith)公式法和 Hargreaves 模型法^[5-6]。但这3种方法均未将大气CO₂浓度变化作为影响因子考虑在内,无法用于分析大气CO₂浓度变化对作物需水量的影响。近期,Yang等^[7]将多种气候情景下植物对大气CO₂浓度的响应结果进行了对比,提出了把CO₂浓度作为计算变量的修正彭曼(PM)公式,可用于分析大气CO₂浓度变化对作物需水量的影响。

长江中下游地区是我国最重要的水稻产地,该地区水稻种植面积占全国水稻面积的60%,总产量占全国水稻总产量的70%^[8]。现阶段关于长江中下游地区水稻需水量的研究^[9-11]大多未考虑大气CO₂浓度变化的影响。近年来,随着区域气候的不断变化,长江中下游地区可利用的水资源量逐渐变得稀缺。评估大气CO₂浓度升高对长江中下游地区水稻灌溉需水量模拟的影响,对于区域水资源管理具有重要的科学意义。

本文以1981—2013年为研究时段,采用FAO-PM公式与考虑了大气CO₂浓度的修正PM公式,通过设置不同模拟试验组,评估了长江中下游地区水稻需水量的时空变化特征及其对大气CO₂浓度变化的响应规律,以期对长江中下游地区水资源合理配置提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

长江中下游地区通常指湖北宜昌以东的长江流域。按水系可分为洞庭湖流域、汉江流域、鄱阳湖流域、太湖流域、中游干流区及下游干流区。研究区总面积约79.51万km²,属于典型的亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温暖干燥,大部分为半湿润和湿润地区。地形地貌多为平原,地势由西向东降低,土壤类型主要包括红壤土、水稻土及黄棕壤。

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),127个标准气象站分布见图1。地面观测站逐日气象数据包括最高气温、最低气温、平均气温、平均相对湿度、日照时数、风速、降水量等。

大气CO₂浓度数据来源于Scientific Data^[12]公布的全球大气CO₂浓度数据集(<https://zenodo.org/record/5021361#.YoMiW3ZByU1>)。该数据是根据二氧化碳信息分析中心(CDIAC)化石燃料CO₂排放和大气CO₂浓度遥感观测的时空特征,重建了第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)历史和未来

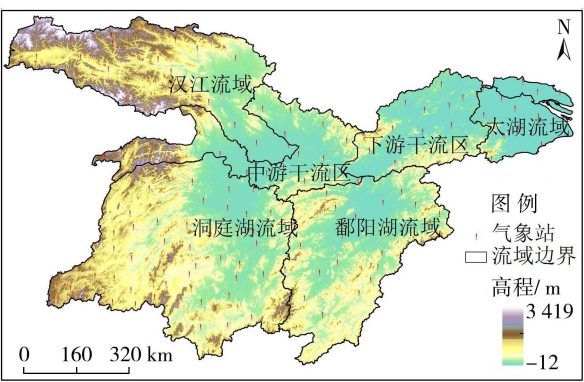


图1 长江中下游地区气象站点及子流域划分

路径情景下的全球月平均大气CO₂浓度数据集,包含了大气CO₂浓度的时间和空间异质特征。数据空间分辨率为1°,覆盖全球,时间分辨率为月。本研究采用的是数据集中的历史数据,时间范围为1850—2013年。

1.3 研究方法

1.3.1 水稻需水量

水稻生育期需水量采用单作物系数法计算:
$$ET_c = K_c ET_0 \tag{1}$$

式中: ET_c 为作物需水量,mm/d; ET_0 为参考作物蒸散量,mm/d; K_c 为作物系数。本文以长江中下游地区的单季稻为研究对象,根据江苏昆山、湖北漳河等灌溉试验站的水稻生育期资料,并参考文献[13-15],确定研究区不同区域内单季稻的水稻生育期如表1所示。同时,根据水稻生长发育阶段的不同,将水稻生长周期划分为生育前期(移栽至分蘖期末)、生育中期(拔节孕穗至抽穗开花期末)与生育后期(乳熟期至黄熟期),并根据联合国粮食及农业组织(FAO)推荐,确定水稻生育前期、中期、后期的作物系数分别为1.05、1.20和1.00^[16]。

表1 长江中下游地区单季稻各阶段生育期

地 区	生育前期/d	生育中期/d	生育后期/d	全生育期/d
汉江流域	49	37	23	109
太湖流域	50	50	25	125
洞庭湖流域	41	42	20	103
鄱阳湖流域	41	42	20	103
中游干流区	46	36	26	108
下游干流区	48	41	21	110

1.3.2 参考作物蒸散量

式(2)(3)为参考作物蒸散量计算公式,其中式(2)为FAO-PM公式^[16],式(3)为式(2)考虑大气CO₂浓度后的改进形式^[7],该改进公式在计算作物需水量及干旱指数等研究中已被广泛使用^[17-19]。本文使用的大气CO₂浓度数据时间尺度为月,气象因子时间尺度为日,故计算水稻生育期的月均日参考作物蒸散量。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900\gamma}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

$$ET_1 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900\gamma}{T + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\{1 + u_2[0.34 + 2.4 \times 10^{-4}(x - 300)]\}} \quad (3)$$

式中： ET_0 、 ET_1 分别为不考虑和考虑大气 CO_2 浓度时的参考作物蒸散量，mm； Δ 为水汽压随温度变化的斜率，kPa/℃； R_n 为净辐射，MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)； G 为土壤热通量密度，MJ/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)； γ 为干湿常数， $\gamma = 0.66$ ； T 为日平均气温，℃； u_2 为 2 m 高风速，m/s； e_s 为饱和水汽压，kPa； e_a 为实际水汽压，kPa； x 为大气 CO_2 浓度， $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。 R_n 、 G 、 Δ 、 u_2 基础数据均可从气象站观测资料获取，计算方法参见文献[16]。

1.3.3 水稻生育期灌溉需水量

水稻生育期灌溉需水量是生育期内水稻需水量与有效降水量的差值：

$$I_R = ET_c - P_e \quad (4)$$

式中： I_R 为水稻生育期灌溉需水量，mm； ET_c 为水稻需水量，mm； P_e 为有效降水量，mm。有效降水量采用美国农业部土壤保持局推荐的土壤水分平衡法^[20]，该方法综合考虑了作物腾发、降水和灌溉等因素，已被众多学者使用^[9-11,21]，其公式为

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(125 - 0.2P)}{125} & P < 250 \\ 125 + 0.1P & P \geq 250 \end{cases} \quad (5)$$

式中 P 为月总降水量，mm。

1.3.4 大气 CO_2 浓度对作物需水量的影响

为评估大气 CO_2 浓度变化对单季稻需水量的影响，本文在假设研究区全面积种植水稻的前提下，利用 1981—2013 年的气象数据与大气 CO_2 浓度数据，设计基准组与对照组两组模拟试验。基准组不考虑大气 CO_2 浓度，以式(2)计算参考作物蒸散量；对照组考虑大气 CO_2 浓度，以式(3)计算参考作物蒸散量。两组均采用单作物系数法对水稻需水量进行计算。对照组又分为静态组与动态组，两组采用相同的气象数据，静态组采用恒定的 1981 年大气 CO_2 浓度数据，动态组则采用 1981—2013 年的大气 CO_2 浓度数据，根据静态组与动态组的差异可分析大气 CO_2 浓度变化对作物需水量的影响。

对比基准组、静态组、动态组 3 组水稻需水量，可以探究大气 CO_2 浓度变化对长江中下游地区水稻需水量的影响。

2 结果与分析

2.1 1981—2013 年大气 CO_2 浓度变化

图 2 为研究区 1981—2013 年大气 CO_2 浓度均

值。可以看出，大气 CO_2 浓度在研究区中分布较为均匀，呈现西低东高的分布特征，多年浓度均值相差不大，变化范围为 368 ~ 374 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

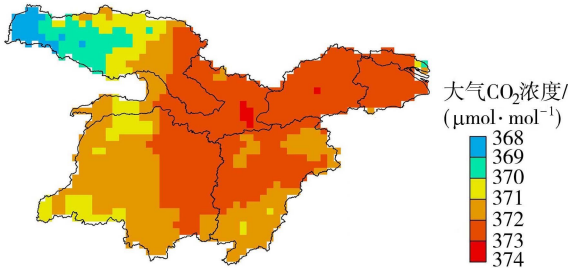


图 2 1981—2013 年大气 CO_2 浓度均值分布

研究区 6 个子流域在不同研究时段的大气 CO_2 浓度均值见表 2，可见相同时段内，各流域大气 CO_2 浓度均值差异极小。1991—2000 年，大气 CO_2 浓度平均每年上升 1.52 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，而 2001—2013 年，大气 CO_2 浓度平均每年上升 1.84 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，涨幅逐渐增加。

表 2 长江中下游地区不同时段大气 CO_2 浓度均值

地 区	单位： $\mu\text{mol}/\text{mol}$			
	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2013 年	1981—2013 年
汉江流域	349.44	365.99	390.46	370.62
太湖流域	351.70	368.25	392.27	372.70
洞庭湖流域	351.03	367.65	390.85	371.75
鄱阳湖流域	351.09	367.80	391.15	371.93
中游干流区	350.92	368.04	391.99	372.29
下游干流区	351.51	368.27	392.38	372.69

2.2 基准组水稻需水量变化

利用单作物系数法计算长江中下游地区 1981—2013 年不考虑大气 CO_2 浓度的水稻需水量，结果见图 3(a)。1981—2013 年研究区水稻需水量总体呈上

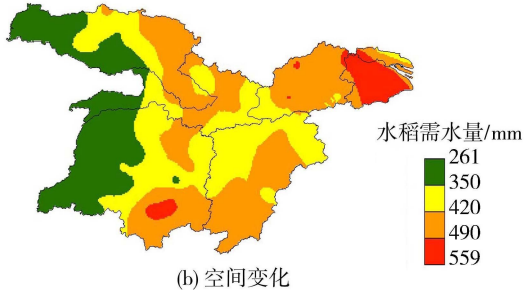
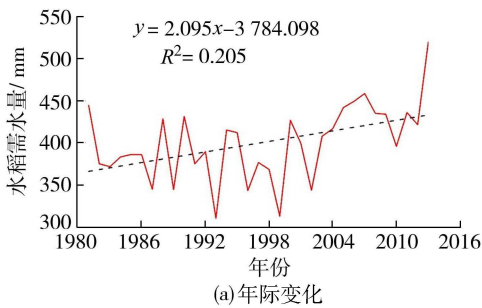


图 3 不考虑大气 CO_2 浓度的水稻需水量
年际变化与多年均值空间分布

升趋势,以 2.095 mm/a 的趋势增长。多年平均值为 400.16 mm,最小值为 1993 年的 310.84 mm,最大值为 2013 年的 520.33 mm。

基于克里金 (Kriging) 法对研究区多年水稻需水量均值进行空间插值,结果见图 3(b)。可以看出,长江中下游地区水稻需水量的空间分布存在显著差异,有明显的自西向东逐渐增加的趋势。研究区西部水稻需水量较低,多年均值小于 350 mm。中部区域水稻需水量增加,多年均值变化范围为 350 ~ 420 mm。太湖流域的水稻需水量均值最大,其大部分地区的水稻需水量均值达到 490 ~ 560 mm,整个流域的水稻需水量均超过 420 mm。

2.3 大气 CO₂ 浓度对长江中下游地区水稻需水量的影响

将基准组水稻需水量与动态组水稻需水量对比分析,结果见图 4(a)。相比于动态组,基准组结果会略微偏大,两者差值也在逐年增加,到 2013 年,考虑大气 CO₂ 浓度可使水稻需水量减少 10.6 mm。这说明在气候变化背景下,不考虑大气 CO₂ 浓度会高估长江中下游地区的水稻需水量。

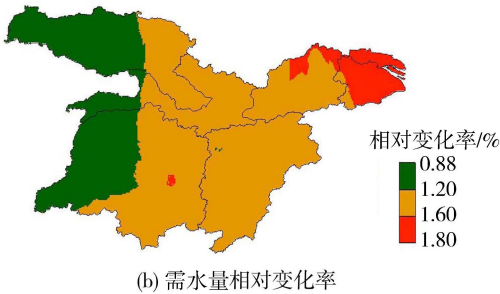
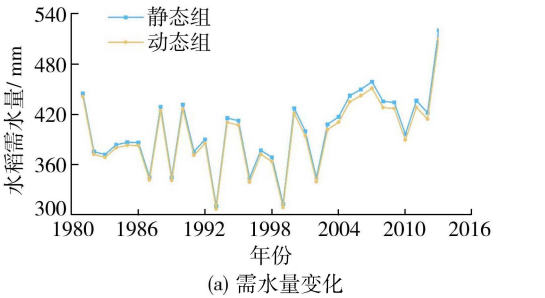


图 4 1981—2013 年大气 CO₂ 浓度引起的水稻需水量变化及多年平均相对变化率

图 4(b) 为 1981—2013 年基准组与动态组水稻需水量差值百分比的空间分布。1981—2013 年大气 CO₂ 浓度变化导致的需水量变化具有明显空间差异。太湖流域变化显著,考虑大气 CO₂ 浓度时,其水稻需水量每年平均下降约 1.8%。汉江流域西部、洞庭湖西部与中游干流区西部的变化率最小,变化率均小于 1.2%。研究区大部分区域相对变化率均在 1.2% ~ 1.6% 之间。

为厘清大气 CO₂ 浓度对水稻需水量的影响,将

动态组与静态组进行对比。两组模拟拟 CO₂ 数据不同,动态组大气 CO₂ 浓度是实际变化值,静态组大气 CO₂ 浓度为 1981 年固定值。计算 1982—2013 年每年大气 CO₂ 浓度与 1981 年大气 CO₂ 浓度的差值均值,并计算静态组与动态组水稻需水量的多年差值均值,结果见图 5。由图 5 可知,气象因子完全相同时,研究区大部分区域的水稻需水量差值随大气 CO₂ 浓度差值的增大而增大。但需指出,生育期长短的不同也会影响水稻需水量差值。如汉江流域的大气 CO₂ 浓度差值不是最大的,但因其流域内水稻生育期远长于其他流域,故其需水量差值最大。

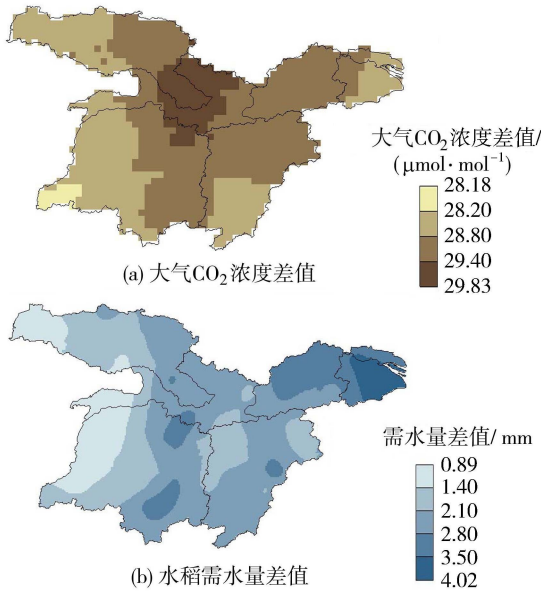


图 5 1982—2013 年大气 CO₂ 浓度多年变化差值及水稻需水量的多年差值均值

表 3 为 1982—2013 年间各流域静态组与动态组水稻需水量及其需水量差值与大气 CO₂ 浓度差值比均值。由数据可看出,随着大气 CO₂ 浓度上升,各子流域水稻需水量均呈下降趋势。其中,太湖流域的水稻需水量对大气 CO₂ 浓度变化反应最为明显,大气 CO₂ 浓度每升高 1 μmol/mol,其需水量将下降 0.126 mm。而汉江流域与洞庭湖流域的变化敏感性最低,大气 CO₂ 浓度每升高 1 μmol/mol,流域内水稻需水量分别下降 0.065 mm 与 0.069 mm。

表 3 1982—2013 年平均大气 CO₂ 浓度上升对水稻需水量的影响

地 区	大气 CO ₂ 浓度/ (μmol · mol ⁻¹)		水稻需水量/mm		差值比/(mm · (μmol · mol ⁻¹) ⁻¹)
	静态组	动态组	静态组	动态组	
汉江流域	342.60	371.55	372.68	370.78	0.065
太湖流域	344.93	373.73	515.13	511.51	0.126
洞庭湖流域	343.87	372.62	371.85	369.88	0.069
鄱阳湖流域	343.96	372.85	419.93	417.71	0.077
中游干流区	343.84	373.17	384.62	382.47	0.073
下游干流区	344.43	373.50	448.13	445.19	0.101

2.4 水稻生育期内有效降水量及需补充灌溉总量

利用降雨资料及 1.3.3 节所述方法,计算研究区 1981—2013 年间的有效降水量均值、水稻灌溉需水量均值及需补充灌溉总量均值,将基准组与动态组进行对比,两者差异见表 4。因各子流域的水稻需水量与有效降水量不同,其各自的灌溉需水量不同。其中,太湖流域、下游干流区及鄱阳湖流域的灌溉需水量最大,汉江流域的灌溉需水量最少。需补充灌溉总量方面,洞庭湖与鄱阳湖流域的总量远高于其他流域,虽然太湖流域水稻灌溉需水量最高,但因其流域面积最小,其需补充灌溉总量最少。在考虑 CO₂ 浓度的情况下,长江中下游地区每年在种植单季稻的周期中的需补充灌溉总量平均可减少 4.24 km³。

表 4 大气 CO₂ 浓度上升对水稻需补充灌溉总量的影响

地 区	面积/ 万 km ²	有效 降水 量/mm	灌溉 需水量/mm		需补充灌溉总量/km ³		
			基准组	动态组	基准组	动态组	差值
汉江流域	15.34	242.46	131.22	126.73	20.13	19.44	0.69
太湖流域	3.67	214.56	294.89	285.63	10.82	10.48	0.34
洞庭湖流域	26.19	208.08	166.70	161.93	43.66	42.41	1.25
鄱阳湖流域	16.21	203.45	219.85	214.41	35.64	34.76	0.88
中游干流区	9.51	221.98	173.69	168.62	16.52	16.04	0.48
下游干流区	8.61	204.23	249.73	242.75	21.50	20.90	0.60

3 讨 论

国内外学者^[4,7,18]研究发现,大气 CO₂ 浓度升高会减小植株气孔导度,使作物需水量减小,但同时会增加作物的叶面积指数(LAI),增加局部区域气温,从而加速作物蒸腾,增加作物需水量。这个相互反作用的过程在以下多项研究中得以体现。

Urban 等^[22]利用 APSIM 作物模型,通过不同模拟试验对比分析了历史情景中全球区域内大气 CO₂ 浓度变化对玉米、水稻、大豆、小麦需水量的影响,发现虽然温度升高和净辐射增加会加大作物需水量,但 C3 类农作物(小麦、水稻、大豆)在 CO₂ 的作用下,这种增大作用会被抵消。Zhang 等^[23]利用 FAO-PM 公式,考虑了大气 CO₂ 浓度变化,对中国区域内的玉米、水稻、大豆、小麦在未来特定气候情景下的灌溉需水量变化进行了研究,其推测在大气 CO₂ 浓度升高的情况下,作物的灌溉需水量可能会随时间推移逐渐下降。田静^[24]利用基于碳水耦合的蒸散发模型 PML-V2,评估了中国区域内植被蒸腾在历史情景下因大气 CO₂ 浓度变化而受到的影响,发现考虑大气 CO₂ 浓度会使植被蒸腾减小 0~5%,影响最大的区域是中国中东部。而本文的研究结果显示,不考虑大气 CO₂ 浓度时,长江中下游地区水稻需水量呈缓慢上升趋势,且空间分布具有明显差异;

考虑大气 CO₂ 浓度时,水稻需水量将比未考虑 CO₂ 浓度减小 1.6% 左右,这与上述研究具有良好的一致性。因此,灌溉需水研究中,应充分考虑 CO₂ 浓度对植物(作物)需水量的影响,以得出更准确、更合理的研究结论。

因研究内容不同,无法将本研究具体过程与相似研究进行参照对比。且现阶段国内外在 CO₂ 对水稻需水量影响的研究领域中暂未有系统、科学的实际试验资料,日后拟开展小型水稻试验进行理论验证。在计算过程中,本文进行了全流域面积种植水稻的假设,在研究区实际作物种植分布方面考虑得不够完善,日后计划结合实际土地利用情况进行细化深入计算分析。

4 结 论

a. 1981—2013 年研究区大气 CO₂ 浓度随时间推移呈上升趋势,且浓度涨幅逐渐增大。相同时间段内,研究区 6 个子流域之间的大气 CO₂ 浓度无明显差异。

b. 在不考虑大气 CO₂ 浓度的前提下,研究区水稻需水量多年平均值为 400.16 mm,平均每年上升 2.09 mm。太湖流域水稻需水量最大,范围在 420~560 mm 之间。研究区西部水稻需水量最小,均未超过 350 mm。

c. 考虑大气 CO₂ 浓度变化时,水稻需水量的模拟结果将比未考虑 CO₂ 浓度下降 1.6% 左右,各流域因大气 CO₂ 浓度变化所导致的需水量下降趋势也不同。大气 CO₂ 浓度每上升 1 μmol/mol,模拟得到的长江中下游地区水稻需水量下降 0.065~0.126 mm。

d. 研究区 6 个子流域在水稻生育期内灌溉需水量因其有效降水量的不同具有一定差异,太湖流域与下游干流区每年灌溉需水量最大,均超过了 200 mm,远高于其他流域。当考虑大气 CO₂ 浓度对参考作物蒸散量的影响时,会使长江中游地区模拟的年需补充灌溉总量减少 4.24 km³。

参考文献:

[1] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. Climate change 2014: synthesis report, contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva: IPCC, 2014.

[2] 雷莉萍, 钟惠, 贺忠华, 等. 人为排放所引起大气 CO₂ 浓度变化的卫星遥感观测评估[J]. 科学通报, 2017, 62(25): 2941-2950. (LEI Liping, ZHONG Hui, HE Zhonghua, et al. Assessment of atmospheric CO₂ concentration enhancement from anthropogenic emissions

- based on satellite observations [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(25): 2941-2950. (in Chinese))
- [3] 徐明怡, 倪红伟. CO₂ 浓度升高对植物光合作用的影响[J]. 国土与自然资源研究, 2016(2): 83-86. (XU Mingyi, NI Hongwei. Response of photosynthesis to elevated atmospheric CO₂ [J]. Territory & Natural Resources Study, 2016(2): 83-86. (in Chinese))
- [4] 圣倩倩, 高顺, 顾舒文, 等. CO₂ 浓度升高对植物生理生化影响的研究进展[J]. 西部林业科学, 2021, 50(3): 171-176. (SHENG Qianqian, GAO Shun, GU Shuwen, et al. Research progress on physiological and biochemical effects of elevated CO₂ concentration on plants[J]. Journal of West China Forestry Science, 2021, 50(3): 171-176. (in Chinese))
- [5] 石艳芬, 缴锡云, 罗玉峰, 等. 水稻作物系数与稻田渗漏模型参数的同步估算[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 27-30. (SHI Yanfen, JIAO Xiyun, LUO Yufeng, et al. Synchronous estimation of the crop coefficient for rice and the seepage model parameters for paddy fields[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 27-30. (in Chinese))
- [6] 曹丹, 易秀, 陈小兵. 基于农业灌溉需水量计算的黄河三角洲作物结构优化[J]. 水资源保护, 2022, 38(2): 154-159. (CAO Dan, YI Xiu, CHEN Xiaobing. Crop structure optimization based on agricultural irrigation water demand calculation in the Yellow River Delta[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 154-159. (in Chinese))
- [7] YANG Yuting, RODERICK M L, ZHANG Shulei, et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(1): 44-48.
- [8] 徐明, 马超德. 长江流域气候变化脆弱性与适应性研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [9] 罗玉峰, 彭世彰, 王卫光, 等. 气候变化对水稻灌溉需水量的影响: 以高邮灌区为例[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 609-613. (LUO Yufeng, PENG Shizhang, WANG Weiguang, et al. Impacts of climate change on irrigation water requirements of rice: a case study of Gaoyou Irrigation District[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 609-613. (in Chinese))
- [10] 郝树荣, 俞方易, 张展羽, 等. 气候变化对南京主要作物需水量的影响[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(3): 25-29. (HAO Shurong, YU Fangyi, ZHANG Zhanyu, et al. Impact of climate change on water requirement of main crops in Nanjing[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(3): 25-29. (in Chinese))
- [11] 王卫光, 彭世彰, 孙凤朝, 等. 气候变化下长江中下游水稻灌溉需水量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 656-664. (WANG Weiguang, PENG Shizhang, SUN Fengchao, et al. Spatiotemporal variations of rice irrigation water requirements in the mid-lower reaches of Yangtze River under changing climate[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(5): 656-664. (in Chinese))
- [12] CHENG Wei, DAN Li, DENG Xiangzheng, et al. Global monthly gridded atmospheric carbon dioxide concentrations under the historical and future scenarios[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 83.
- [13] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.
- [14] 丁加丽. 控制灌溉水稻水分利用规律及蒸发蒸腾量模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [15] 彭世彰, 徐俊增. 水稻控制灌溉理论与技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011.
- [16] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [17] 张更喜, 粟晓玲, 刘文斐. 考虑 CO₂ 浓度影响的中国未来干旱趋势变化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 84-91. (ZHANG Gengxi, SU Xiaoling, LIU Wenfei. Future drought trend in China considering CO₂ concentration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(1): 84-91. (in Chinese))
- [18] YANG Yuting, ZHANG Shulei, RODERICK M L, et al. Comparing Palmer Drought Severity Index drought assessments using the traditional offline approach with direct climate model outputs[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2020, 24(6): 2921-2930.
- [19] TIAN Jing, ZHANG Yongqiang. Detecting changes in irrigation water requirement in Central Asia under CO₂ fertilization and land use changes[J]. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124315.
- [20] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.
- [21] 白凯华, 韩冰, 罗玉峰. 气候变化对江苏省未来水稻灌溉需水量的影响[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 29-33. (BAI Kaihua, HAN Bing, LUO Yufeng. Impacts of climate change on future irrigation water requirements of rice in Jiangsu province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(6): 29-33. (in Chinese))
- [22] URBAN D W, SHEFFIELD J, LOBELL D B. Historical effects of CO₂ and climate trends on global crop water demand[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(12): 901-905.
- [23] ZHANG Yajie, WANG Yanfen, NIU Haishan. Effects of temperature, precipitation and carbon dioxide concentrations on the requirements for crop irrigation water in China under future climate scenarios[J]. Science of the Total Environment, 2019, 656: 373-387.
- [24] 田静. 大气 CO₂ 浓度增加对中国区域植被蒸腾的影响[J]. 地球科学进展, 2021, 36(8): 826-835. (TIAN Jing. Effects of atmospheric CO₂ concentration on vegetation transpiration over China[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8): 826-835. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-06-05 编辑: 俞云利)