

种植制度对中国主粮农田补水需求量时空特征的影响

曹永强,刘子华,常奂宇,么嘉棋,公海莹,郭雪儿,郑恒梁

(天津师范大学京津冀生态文明发展研究院,天津 300387)

摘要:针对当前农业用水领域研究对种植制度及物候信息与补水需求量的量化关系刻画不足的问题,选取 2000—2019 年中国主粮作物的物候信息刻画主粮的种植制度、生长阶段以及农作物更替情况,进而基于植被归一化指数、潜在蒸散发及降水数据,利用作物系数法核算了补水需求量,并量化了其种植制度的关联。结果表明:补水需求量在时间与空间上均呈现显著异质性,年际波动范围为 659 亿~1 273 亿 m^3 ,高值年份多与干旱事件同步,补水需求量的高值区集中于黄淮海平原与长江中下游等复种高强度区域;因作物生长旺盛期与降水高峰在时空上存在显著错位,补水需求量具有明显季节性峰值(5—8 月);小麦-玉米轮作的单位面积补水需求量均值在 2000—2019 年持续高于其他种植制度,成为影响补水需求量空间格局变化的主导因素。

关键词:种植制度;补水需求;主粮作物;农业水资源管理;粮食安全

中图分类号:TV213.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2025)05-0148-07

Impact of cropping systems on spatiotemporal characteristics of irrigation water demand in China's staple croplands//CAO Yongqiang, LIU Zihua, CHANG Huanyu, YAO Jiaqi, GONG Haiying, GUO Xue'er, ZHENG Hengliang(*Academy of Eco-civilization Development for Jing-Jin-Ji Megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China*)

Abstract: To address the insufficient quantitative characterization of the relationship between cropping systems, phenological information and irrigation water demand (IWD), this study utilized phenological data of staple crops in China from 2000 to 2019 to characterize cropping systems, growth stages and crop rotation patterns. Based on the normalized difference vegetation index, potential evapotranspiration and precipitation data, the IWD was estimated using the crop coefficient method, and its linkage with cropping systems was quantified. The results show that the IWD exhibited significant spatiotemporal heterogeneity, with interannual fluctuations ranging from 65.9 billion to 127.3 billion m^3 . High-IWD years were generally synchronized with drought events, and high-IWD regions were concentrated in high-intensity multiple-cropping regions, such as the Huang-Huai-Hai Plain and the middle-lower reaches of the Yangtze River. Due to the significant spatiotemporal mismatch between the peak crop growth periods and the peak precipitation period, the IWD showed distinct seasonal peaks from May to August. The mean unit-area IWD of the wheat-maize rotation system was consistently higher than those of other cropping systems from 2000 to 2019, making it the dominant factor influencing the spatial distribution of IWD.

Key words: cropping systems; irrigation water demand; staple crops; agricultural water resource management; food security

中国是世界上主粮轮作面积最大、历史最悠久的国家,主粮轮作在保障粮食安全和应对人口增长需求方面发挥了重要作用^[1-2]。然而,中国的粮食安全挑战不仅体现在产量保持与稳定性上,更突出地表现为严重的水资源约束^[3]。中国多年平均水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 ,占世界水资源总量的 6%,但却需要供给全球近 20% 的人口,中国农业用水量

长期占总用水量的 60% 以上^[4-6]。在粮食安全与水资源安全的双重压力下,中国的“粮水矛盾”已成为制约农业可持续发展的关键瓶颈。

农业用水核算是实现水资源优化配置和农业可持续发展的基础,但受限于数据的点位性与局部性,传统的核算方法难以反映大尺度空间差异^[7],虽然水文模型和作物模型在一定程度上提升了对气象站

基金项目:国家自然科学基金(52579016, 52379021, 52409041, 42301501);天津师范大学研究生科研创新项目(2024KYCX050Z, 2025KYCX003Z)

作者简介:曹永强(1972—),男,教授,博士,主要从事水土能碳互馈及调控机制研究。E-mail:caoyongqiang@tjnu.edu.cn

点农业用水核算的精确性^[8-9],但对区域异质性刻画仍有限。近年来,多源遥感与大数据方法的兴起,为获取作物生长状况和蒸散发信息提供了新途径,大幅提高了区域尺度核算的时空分辨率^[10]。

轮作制度作为人类调控农业水资源的重要手段受到越来越多关注。研究表明,适度轮作能够减少对地下水的依赖、提高灌溉效率并改善生态效益。农业大省河北的实践显示:自实施一季(小麦)休耕、一季(玉米)种植后,平均减少用水 2 250 m³/hm²^[11],一定程度上说明通过轮作休耕可显著降低农业用水强度。

然而,现有研究多集中于区域案例,缺乏全国尺度和跨气候区的系统性分析^[12]。在此背景下,明晰主粮作物的种植制度、生长需水量与补水需求量的关系,并揭示其时空演变规律,对于优化种植结构、提升灌溉效率和保障国家粮食安全具有重要意义。深入研究不同轮作制度下的水资源利用格局,明确自然降水的有效利用量与作物实际生长需水之间的缺口,进而估算补水需求量,对科学制定种植结构调整方案、优化灌溉管理策略等具有重要的现实意义。

1 研究区概况与数据

中国农业生态类型多样,涵盖温带平原、亚热带盆地和干旱内陆高原,依照农业气象环境可划分为九大农业区^[13]。从耕地面积以及主粮种植情况来看,中国的耕地面积约为 145.7 万 km²,其中玉米种植面积 42.70 万 km²,水稻 29.69 万 km²,小麦 19.14 万 km²,种植地点的选择与水热条件以及人类活动高度相关,3 种主粮作物主要在中国东部,此

区域也是人口密集区域。图 1 为中国九大农业区和主粮种植情况(本文地图均基于审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图制作)。

本文基于 2000—2019 年全国三大粮食作物 1 km 物候数据集(<https://doi.org/10.5194/essd-12-197-2020>)构建 2000—2019 年中国区域 1 km 分辨率种植制度数据集。日尺度的物候数据用于精准识别作物的种类、生长阶段、复种次数和成熟周期,进而准确界定种植制度的空间分布、轮作类型及变化规律,是评估种植制度对补水需求量影响的重要基础^[14],可精确刻画作物的生长阶段与复种情况;再将日尺度的物候信息转化为逐月的作物生长信息,并进一步形成年尺度的种植制度信息。这种由“逐日—逐月—年度”的推导方式兼顾了物候信息的精细性与实践应用的可行性,具有较高的科学合理性与实际意义。

在生长需水量、补水需求量核算方面,输入中国 1 km 分辨率逐月潜在蒸散发数据集(<https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>)用于反映特定气象条件下土地表面及植被的最大可能水分蒸散发量^[15]。均一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是监测农作物生长状态的重要遥感指标,用于估算作物系数(K_c)进而精准核算作物实际蒸散发(ET_c)^[16],本文将基于 K_c -NDVI 相关性运算得到的结果(NDVI 数据来自 <https://lpdaac.usgs.gov/products/myd13q1v006/>)与 GB/T 32136—2015《农业干旱等级》参考的 K_c 进行对比,得到的拟合度(R^2)为 0.8。中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(<https://doi.org/10.5281/zenodo>。

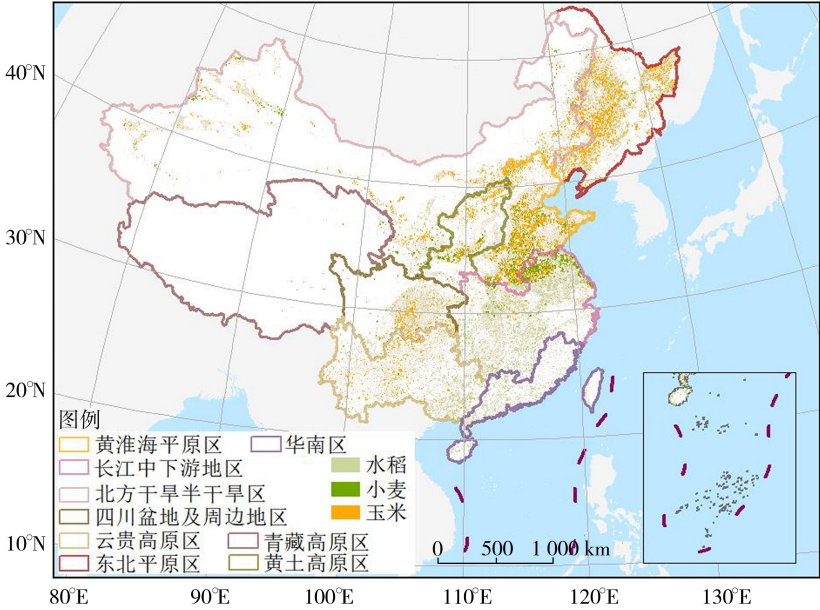


图 1 中国九大农业区和主粮种植情况

3114194)用于反映区域内自然降水量的空间分布与时序变化,为作物有效降水量及补水需求量的计算提供直接输入信息^[17]。

2 研究方法

进行农田补水需求量核算的关键环节是计算农田生长阶段的需水量和确定有效降水量,进而确定水资源缺口。作物的生长需水量(Q)由地块本身的潜在蒸散发(ET_0)和作物系数共同决定,作物系数基于 NDVI 进行校正^[17],具体计算公式为

$$Q = ET_c A \tag{1}$$

其中

$$ET_c = ET_0 K_c$$

$$K_c = 1.4038I - 0.0545$$

式中: A 为农田面积; I 为 NDVI。

降水量并不能全部被作物利用,需通过有效降水量的估算来判断可供作物生长利用的水量。基于降水量分段设定有效系数是一种常用方法,本文采用国内广泛应用的美国农业部推荐的经验系数,该经验系数计算公式(式(2))考虑了中低降水量条件下作物对水分利用效率更高,而在降水充足甚至过剩时会因渗漏、径流等途径流失的情况。

$$P_e = \begin{cases} P \frac{125\text{ mm} - 0.2P}{125\text{ mm}} & P \leq 250\text{ mm} \\ 125\text{ mm} + 0.1P & P > 250\text{ mm} \end{cases} \tag{2}$$

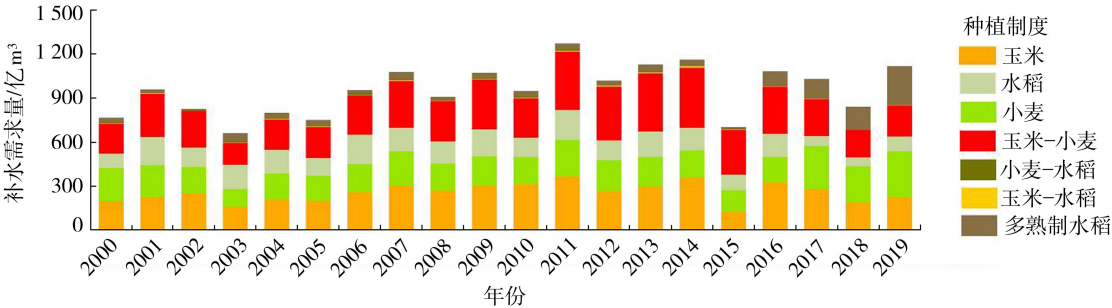
式中: P_e 有效降水量; P 为实际降水量。当有效降水量不足以满足作物需水要求时,需通过补水的方式进行补充,因此补水需求量 W 可表示为

$$W = (ET_c - P_e)A \tag{3}$$

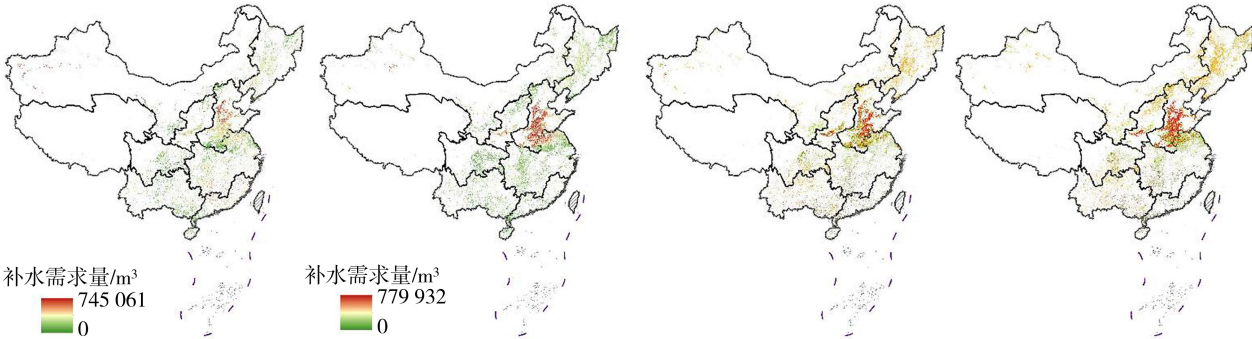
3 结果与分析

3.1 主粮农田种植制度及补水需求量核算结果

图 2(a)为按年度统计的各类种植制度对应的补水需求总量,以堆积柱状图形式直观呈现出不同时期中国农业用水缺口的年际波动。其中,2011 年补水需求总量达到最大值(1273 亿 m^3),而 2003 年则处于最低水平(659 亿 m^3),反映了中国农业水资源需求强度在 2000—2019 年表现出波动变化的特征,整体趋势表现为“下降—上升—波动”。同时也可以看出,历年的补水需求量主要由玉米-小麦轮作、玉米和小麦单季种植主导;此外,单季水稻的补水需求量持续减小、多熟制水稻补水需求量逐年增大。图 2(b)(c)分别为 2003 年与 2011 年两个最值年份全国补水需求量的空间分布情况。相比 2003 年,2011 年补水需求量的单位面积均值、高值均显著增加,且高值的分布范围有所扩张,尤其是在黄淮海平原和长江中下游等高强度种植区,单位面积补水需求量明显升高、高值区的面积也显著扩大。结合图 2(d)(e)的种植制度空间分布可以发现,这种差异与种植制度转变关系密切,补水需求量升高区域的共同特征在于种植制度的变化:单一作物种植向双季乃至多季作物复种转变的种植面积明显增加。如黄淮海平原由以冬小麦为主逐渐过渡为玉米-小麦轮作,长江中下游地区的多熟水稻种植面积扩张显著。种植强度的增强使得以上区域内的补水需



(a) 2000—2019 年补水需求量



(b) 2003 年补水需求量

(c) 2011 年补水需求量

(d) 2003 年种植制度

(e) 2011 年种植制度

图 2 中国主粮农田补水需求量及最值年份时空分布与种植制度

求量显著增大。

种植制度的选择也受到地域、气象条件的影响。北方干旱半干旱区由于热量不足与降水有限,以玉米、小麦这两种旱地作物的单季种植为主,补水需求量相对较低;而在黄淮海平原、长江中下游和华南地区,因具备较长的无霜期和较充足的降水资源,为双季乃至多季作物种植提供了有利的气候基础,从而带来了更高的水资源需求压力。尽管具体的种植制度选择在不同年份有所区别,但大致的种植制度格局基本保持稳定。可见图2全面展示了中国农业种植制度演化与农业水资源需求缺口之间的耦合关系:一方面,种植制度的时空变化直接造成了生长需水量与补水需求量的变化;另一方面,种植制度演化受制于自然资源禀赋、气候约束与政策激励,其对区域水资源的影响具有显著的空间异质性。未来在推进农业现代化与确保粮食安全的进程中,应进一步强化种植制度、气候条件、水资源承载之间的协同优化,以实现节水农业的高质量发展。

3.2 主粮农田补水需求量演变特征与趋势解析

为了进一步阐明农业水分胁迫在月尺度上的时空动态演变,绘制了2000—2019年逐月生长需水量、补水需求量的时间序列并进行年际变化趋势和季节性分解。如图3和图4所示,生长需水量与补水需求量均表现出显著的季节波动和非线性年际变化,5—8月为持续的高需水期,此时主粮作物小麦(水乳熟期)、水稻(分蘖期)和玉米(旺盛生长期)正处于需水高峰,表明全国范围内的农田需水受到物候学的强烈控制。中国的主粮农田所在气候区普遍位于季风区,作物需水量的生物学规律也受到了气候的季节性影响,如种植区夏季通常表现出较高

的潜在蒸散发^[18],进而造成主粮作物对水的强烈需求。除了季节性变化外,生长需水量的长期趋势成分在研究前期表现为持续增长,这种增长可能是种植面积的扩大、种植强度增强^[19]以及气候驱动的潜在蒸散发的增加导致的^[20]。然而,在2015年左右达到峰值后,生长需水量趋势趋于平稳或略有下降,这可能是由于种植模式的转变、节水政策推广或降水线向种植密集区域迁移的气候变化所致^[21]。

补水需求量除了表现出强烈的季节性特征外,还呈现出“下降—上升—波动”的趋势以及显著的年际波动,在2007年、2011年和2019年等干旱年份表现出急剧的增加,这表明补水需求量对自然降水、潜在蒸散发变化表现出高度敏感。在研究后期生长需水量趋于稳定的情况下,补水需求量仍然呈现出较高的增加趋势,这表明农业生产力的维持对水资源投入以及人类农业管理水平的依赖程度日益加深^[22]。此外,补水需求量的旺盛期相对于生长需水量存在时间滞后,这可能是区域的降水充沛期和作物生长旺盛期的错峰造成的,以地理单元为基准,对生长需水量、补水需求量、降水和有效降水的统计(图3~6)也佐证了这一观点;图5和图6刻画的代表性季节的相关气象因子表现出的时空不匹配间接说明水资源供给量与补充时机深刻影响着灌溉效率。

综上所述,生长需水量和补水需求量受气候变化和农业集约化程度上升的影响,其各自特征与两者间的错峰均发生明显变化。因此,制定适应性水资源管理战略的需求逐渐迫切,以便保证更精准、更迅速地应对季节性和年际缺水变化,进而在不同水文气候条件下实现粮食生产的可持续性。本文研究揭示了中国主粮农田的水资源需求与自然水资源供

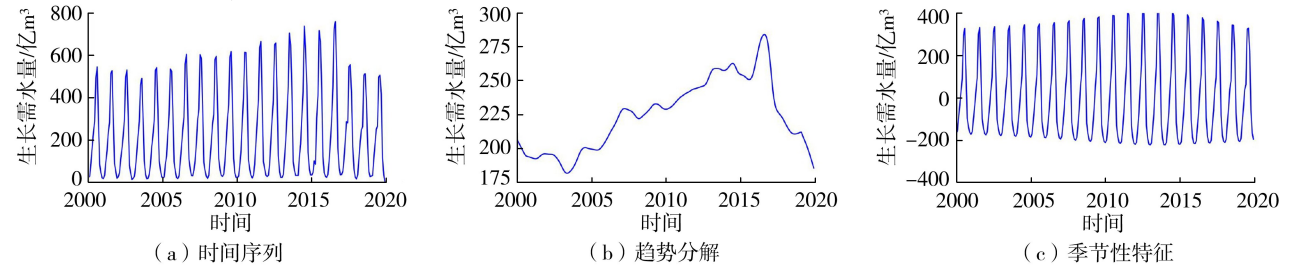


图3 2000—2019年中国主粮农田生长需水量的时间演变特征

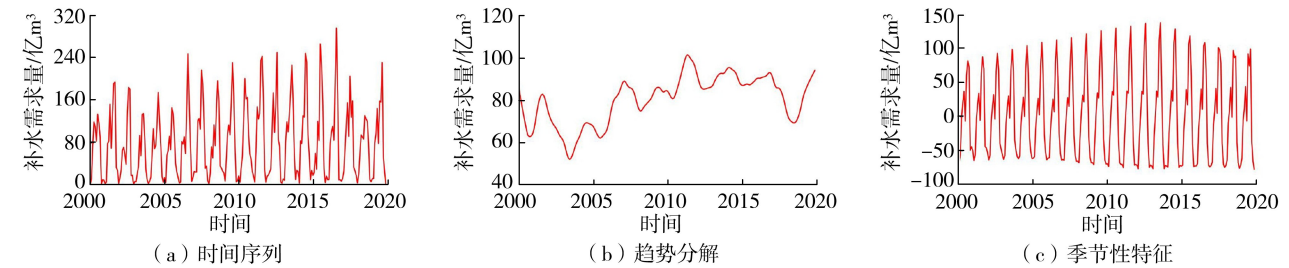


图4 2000—2019年中国主粮农田补水需求量的时间演变特征

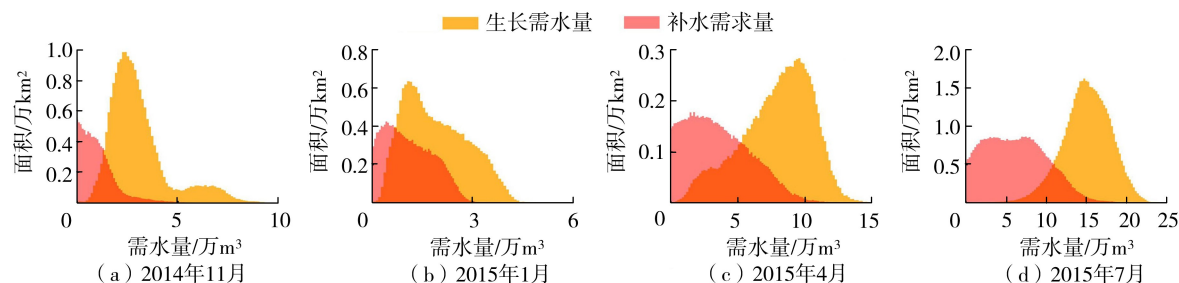


图5 代表性月份主粮农田生长需水量和补水需求量

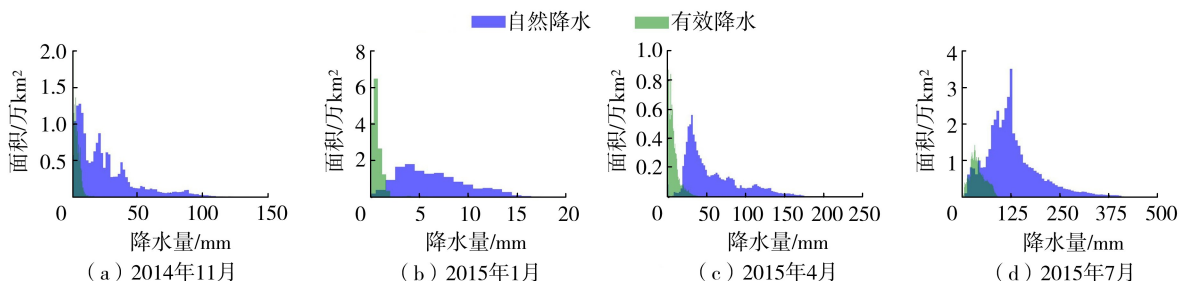


图6 代表性月份主粮农田自然降水 and 有效降水

给之间存在结构性的空间错配,主粮农田的生长需水量与自然降水时空错峰,效率不足与不完全匹配致使补水需求量发生了结构性变化,了解补水需求量的分布动态对于制定针对性的节水措施以及提高农田在气候变化下对水文变化的适应能力至关重要。

3.3 种植制度与主粮农田补水需求量相关性分析

为了揭示种植制度的时空配置与农业水分胁迫之间的结构关系,本文在种植制度演变基础上进一步分析了2000—2019年不同种植制度的种植面积差异以及单位面积补水需求量(W_1)的差异,结果如图7所示,可以看出两个显著特征:不同种植制度间的差异性显著、同种植制度的年际差异性也同样显著。

2003年单位面积补水需求量分布集中在低值区,其中单季玉米(2.1 万 ~ 21.3 万 m^3/km^2)、小麦(2.3 万 ~ 17.6 万 m^3/km^2)、水稻(1.6 万 ~ 20.3 万 m^3/km^2)分布较为集中,对水资源的压力相对温和。而玉米-小麦轮作制度的补水需求量分布明显右移,高值尾部拉长,显示其相较其他种植制度更具强烈的水分需求。统计结果显示,多熟制水稻(4.2 万 ~ 23.1 万 m^3/km^2)虽然提升了种植强度、增加了收获次数,但相较于单季水稻对水资源补充的需求却并没有呈倍数增长。2011年的数据则表明,伴随多熟种植制度的进一步扩张,玉米-小麦轮作制度的面积从2003年的 0.73 万 km^2 增长到2011年的 0.89 万 km^2 ,且单位面积补水需求量进一步升高,其分布高峰向 40 万 m^3/km^2 以上偏移,高值区面积显著扩大,集中在 28.5 万 ~ 57.7 万 m^3/km^2 ;与之对应的是玉米-小麦轮作制度的补水需求总量也

从 149 亿 m^3 上升到 393 亿 m^3 ,为当年补水需求量增长的贡献者。这一变化揭示出复种制度尤其是玉米-小麦轮作制度正在成为农业水资源消耗的主力,同时也是水资源胁迫最为集中的区域。相比之下,2011年的水稻(3.5 万 ~ 17.4 万 m^3/km^2)、小麦(4.1 万 ~ 29.9 万 m^3/km^2)等单季种植制度仍主要集中在较低补水需求量区间,但多熟制水稻在2011年的补水需求量分布出现明显尾部拉长现象,开始表现出高水资源消耗趋势,这可能与种植制度扩张到了自然降水不够充沛的区域有关,说明该种植制度未来在水资源管理中需重点关注。

综上,由于多熟制的生长期长、作物系数高,更容易造成局地性甚至区域性的水资源紧张,因此凸显了合理优化种植制度结构、控制复种强度并结合气象条件匹配种植计划,是缓解农业水资源胁迫的关键策略之一。

4 结论与展望

4.1 结论

a. 补水需求量呈现出显著的时空异质性特征。从时间变化来看,中国主粮农田的补水需求总量年际差异显著,在2000—2019年表现为“下降—上升—波动”的趋势,2003年最低,为 659 亿 m^3 ,2011年达到峰值,为 1273 亿 m^3 。单位面积补水需求量的空间异质性同样显著,高值区主要集中在黄淮海平原与长江中下游地区,这些区域也是高密度、高强度的种植区域。

b. 主粮农田补水需求量与生长需水量均表现出明显的季节性规律,5—8月为集中高峰期,对应

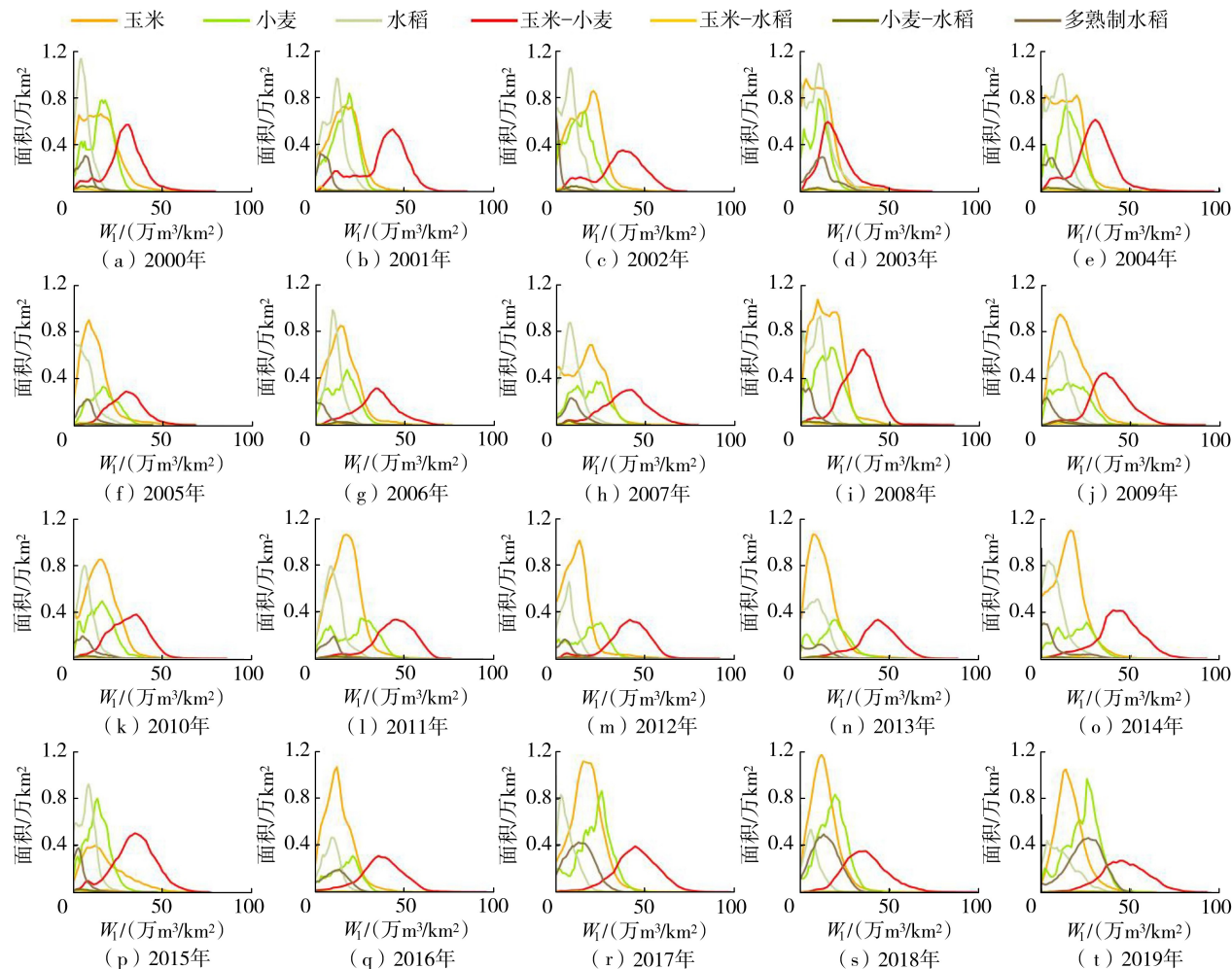


图7 不同种植制度的单位面积补水需求量统计

作物处于水分需求的关键生育期。这是由于生长需水量显著高于自然降水、降水的吸收效率有限、峰期与作物生长错峰等多种原因共同导致的,因此补水需求量相比生长需水量还表现出一定的滞后性。

c. 不同种植制度对补水需求量的贡献差异显著。以玉米-小麦轮作为代表的主粮轮作制度显著提升了区域对水资源的需求强度,不仅体现在玉米-小麦轮作的单位面积补水需求量高,还体现在种植面积大。2011年,该种植制度种植面积达8.9万km²,补水需求总量高达393亿m³。虽然在不同年份有一定的变化,在整个研究期内,是单位面积与补水需求总量最高的种植制度。多熟制水稻相较单季水稻的单位面积补水需求量增幅并不明显,为水稻生产、管理提供了新思路。整体上,全国主粮种植制度呈现出“东部集约、西北分散”的模式结构,并为补水需求量空间格局奠定了基础。

4.2 展望

本文将NDVI、潜在蒸散发、降水数据与种植系统特征相结合,对农田的补水需求量进行了精准刻

画,为种植制度对水资源短缺的驱动关系提供了新的理解。为了增强研究结果的稳健性和适用性,还需在以下几个方面进一步拓展:

a. 气候变化与极端事件的影响。本文研究主要从多年平均气候因子出发,尚未充分考虑热浪、暴雨等短期极端天气事件、干旱周期等长期气候异常及气候系统振荡对补水需求量的驱动效应。未来研究应更好地捕捉这些事件的非线性和滞后效应,以提升对于复杂气候的解释力。

b. 土壤类型与土壤水文过程的作用。目前分析未能深入探讨土壤质地与水文特性对补水需求量空间格局的调控作用,未来研究应结合土壤质地、蓄水能力、地形条件和地下水可用性,如基于地下水站点数据分析周边种植情况的变化与地下水水位之间的相关性。

c. 灌溉技术与管理措施的适应性评估。本文主要聚焦于自然水文与作物生长需求的核算,缺乏对人类管理因素的系统评估。后续研究中应引入适应性灌溉管理情景,评估不同技术路径对补水需求

量的削减效应,为农业节水提供定量依据。

参考文献:

[1] GODFRAY H C J,BEDDINGTON J R,CRUTE I R,et al. Food security: the challenge of feeding 9 billion people [J]. Science,2010,327(5967):812-818.

[2] FAO. The state of food and agriculture 2023: summary report [R]. Rome:FAO,2023.

[3] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258-269. (in Chinese))

[4] 徐刚. 国际粮食安全态势与中国应对[J]. 国家安全研究,2023(3):91-117. (XU Gang. International food security situation and China's response [J]. National Security Research,2023(3):91-117. (in Chinese))

[5] FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture: systems at breaking point (SOLAW 2021) [R]. Rome:FAO,2021.

[6] QIN Y,MUELLER N D,SIEBERT S,et al. Flexibility and intensity of global irrigation water use [J]. Nature Sustainability,2022,5(3):189-198. .

[7] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56) [R]. Rome:FAO,1998.

[8] EAGLESON P S. Climate, soil, and vegetation: 1. introduction to water balance dynamics [J]. Water Resources Research,1978,14(5):705-712.

[9] LI Bingbing, WANG Yunqiang, LI Zhi. Applicability of HYDRUS-1D model in simulating the soil moisture in deep profiles on the Weibei rainfed highland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(2):398.

[10] 李哈,陈哈,黄津辉,等. 区域遥感双源蒸散发模型研究进展[J]. 水资源保护,2022,38(4):87-94. (LI Han, CHEN Han, HUANG Jinhui, et al. Research progress on regional remote-sensing dual-source evapotranspiration models[J]. Water Resources Protection,2022,38(4):87-94. (in Chinese))

[11] 杨文明,姚雪青,邵玉姿,等. 轮作休耕 藏粮于地 [N]. 人民日报,2023-02-17(13).

[12] 华春莉,邓雯,唐怡,等. 基于水足迹的云南省热带地区种植结构优化[J]. 水利水电科技进展,2025,45(3):99-104. (HUA Chunli, DENG Wen, TANG Yi, et al. Optimization of planting structure based on water footprint in tropical regions of Yunnan Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(3):99-104. (in Chinese))

[13] 资源与环境科学数据中心 (RESDC). 中国九大农业区划 [DB/OL]. [2025-05-10]. <https://www.resdc.cn/>

data.aspx? DATAID=275.

[14] LUO Y,ZHANG Z,CHEN Y, et al. ChinaCropPhen1km:a high-resolution crop phenological dataset for three staple crops in China during 2000-2015 based on leaf area index (LAI) products[J]. Earth System Science Data,2020,12(1):197-214.

[15] 刘珂,姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学,2015,39(1):23-36. (LIU Ke,JIANG Dabang. Analysis of dry/wet variation in China using SPEI based on two potential evapotranspiration algorithms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1):23-36. (in Chinese))

[16] 李建柱,逯清,张婷,等. 基于 K_e 和 NDVI 关系的蒸散发量空间尺度提升及时空变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(3):417-426. (LI Jianzhu, LU Qing,ZHANG Ting, et al. Spatial scale enhancement and spatiotemporal variation of evapotranspiration based on the relationship between K_e and NDVI [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(3):417-426. (in Chinese))

[17] KANG Y,KHAN S,MA X. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security: a review[J]. Progress in Natural Science,2009,19(12):1665-1674.

[18] 薛联青,章郁涵,刘远洪. 干旱区与湿润区旱涝急转变特征对比研究[J]. 水资源保护,2024,40(4):1-8. (XUE Lianqing, ZHANG Yuhan, LIU Yuanhong. Comparative study on rapid drought-flood alternation in arid and humid regions[J]. Water Resources Protection, 2024,40(4):1-8. (in Chinese))

[19] GUO X, YIN J, LI K, et al. Fine classification and phenological analysis of rice paddy based on multi-temporal general compact polarimetric SAR data [J]. Frontiers in Plant Science,2024,15:1391735.

[20] HE T, ZHANG M, XIAO W, et al. Trend and potential enhancement of cropping intensity [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2025,229:109777.

[21] ZHAO G,GAO H,LI Y,et al. Decoupling of surface water storage from precipitation in global drylands due to anthropogenic activity[J]. Nature Water,2025,3(1):80-88.

[22] WANG Y, ZHANG Z, ZUO L, et al. Mapping crop distribution patterns and changes in China from 2000 to 2015 by fusing remote-sensing, statistics, and knowledge-based crop phenology[J]. Remote Sensing,2022,14(8):1800.

(收稿日期:2025-06-24 编辑:熊水斌)