

气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究

许迪, 李益农, 龚时宏, 张宝忠*

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 气候变化导致全球年平均气温上升、降水模式变化、河流特性改变、极端气候事件频发等, 显现出其对农业水资源和农业生产造成的影响, 使全球尤其是干旱和半干旱地区可持续农业发展和现代农业水管理面临重大挑战。该文介绍气候变化下的极端气候事件发生, 评价气候变化通过气温和降水的改变以及极端气候事件频度和程度加剧等各种方式对农业用水可利用量和水质以及作物需水造成的影响, 阐述气候变化通过水要素对灌溉用水、可用耕地、作物产量带来的影响, 综述气候变化对农业水管理的影响及应对策略, 提出在气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究上, 应认真考虑气候变化对农业水管理影响的尺度效应和不确定性, 从而有助于因地制宜地制定和合理选用农业水管理应对策略; 应积极构建基于多模型集成模式的气候变化对农业水管理影响的综合评估方法, 从而有利于改善综合预测评估结果的准确性和可靠性; 应深入进行农业水管理应对策略的适应-减缓利弊权衡研究和协同效用分析, 从而有效改进和提高应对策略的效用。建议国内应该加强对综合评估方法和效用分析的研究力度。

关键词: 气候变化; 农业; 水资源; 农业水管理; 农业生产; 应对策略; 适应; 减缓

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.14.010

中图分类号: S274, TV93

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-14-0079-11

许迪, 李益农, 龚时宏, 张宝忠. 气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 79—89. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.14.010 <http://www.tcsae.org>

Xu Di, Li Yinong, Gong Shihong, Zhang Baozhong. Impacts of climate change on agricultural water management and its coping strategies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(14): 79—89.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.14.010 <http://www.tcsae.org>

0 引言

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第5次评估报告指出在全球不同区域、不同领域(自然系统、生物系统、人类系统)内已普遍且广泛受到来自气候变化的显著影响, 未来粮食产量持续下滑、河流特性改变、冰川融水不断增加等现象加剧^[1], 意味着气候变化已成为当今及未来全球尤其是干旱和半干旱地区可持续农业发展面临的严峻问题和重大挑战。气候变化会增加温度和辐射, 影响降水和融雪, 改变降水模式, 导致更为频繁的极端气候事件发生^[2], 进而对水资源状况、灌溉农业、旱地农业以及与水有关的农业生态系统产生影响, 并加重农业水管理所面对的诸多经济和社会问题^[3-4]。在当今全球食物需求不断增长以及作物用水与环境用水间的竞争日趋激烈态势下, 人们迫切需要认真应对这一重大挑战。

农业水管理是对农业生产和农业可持续发展提供关

键投入的水资源的管理过程, 主要目的是在水资源稀缺现状下, 在满足全球不断增长的食物需求同时, 起到促进农业生产、发展农村经济、增加农民收入、应对气候变化、保护农田生态环境等支撑作用^[5]。随着全球气候变化带来的显著影响, 应对气候变化已成为农业水管理面对的重点任务, 亟待加大关注力度和相关研究^[6-7]。本文介绍气候变化下的极端气候事件发生, 评价气候变化以各种方式对农业用水和作物需水产生的影响, 阐述气候变化通过水要素对农业生产造成的影响, 综述气候变化对农业水管理的影响及应对策略。在此基础上, 提出在气候变化对农业水管理的影响及应对策略研究当中, 人们应予以关注的重点和热点, 给出相关建议。

1 气候变化下的极端气候事件

气候变化不仅影响诸如温度、降水、辐射等气候要素的长期变化趋势, 还会影响干旱、洪涝、飓风等极端气候事件发生的频度、强度和持续时间, 进而导致全球范围内异常温暖昼夜数量增加、区域强降雨事件增多、热带气旋极移、融雪和冰川融化补给类河流的峰值流量提前出现等诸多现象的发生^[8]。气候变化影响下的极端气候事件带来的灾难性后果, 对严重依赖天气状况的农业部门而言, 已引起人们的广泛关注^[9-11]。

1.1 干旱

干旱主要与干燥(降水不足)炎热(高温)的天气

收稿日期: 2018-02-27 修订日期: 2019-06-11

基金项目: 国家科技支撑计划重点项目(2011BAD25B00, 2012BAD08B00, 2014BAD12B00); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501016)

作者简介: 许迪, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事农业节水理论与技术研究。北京 中国水利水电科学研究院, 100048。Email: xudi@iwhr.com

*通信作者: 张宝忠, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事作物用水理论与技术研究。北京 中国水利水电科学研究院, 100048。

Email: zhangbz@iwhr.com

条件有关,在某些极端情况下还伴有热浪。农业干旱将严重威胁和损害不同区域尺度上的农业用水供给和农业生产,危及粮食安全^[12]。尽管全球许多地区在过去几十年里常面临更为频繁的严重干旱,但似乎仍无法得出气候变化引发全球干旱变化的一般性结论^[13]。然而,在地中海和非洲西部地区,干旱增长趋势较为明显,但在北美中部和澳大利亚西北部地区则有下降趋势,预计在南欧和中欧、中美洲、南部非洲等一些地区的干旱将有所加剧^[14]。此外,热浪常伴随着干旱而发生,持续升高的温度最终将带来农作物和牲畜生产的重大损失。如 2003 年欧洲出现的干旱热浪就造成 1540 年以来最温暖的夏季,导致欧洲总初级生产力下降 30%^[15];据预测全球 21 世纪末的热浪危害会更为频繁^[16]。

1.2 洪涝

受气候变化影响,强降雨事件和降水模式改变常导致土壤水分严重过剩,再加上农田排水不畅,由此产生的农田洪涝灾害会严重影响农业生产能力,预计洪涝灾害不仅使美国玉米产量损失在 2030 年翻番^[17],还将成为美国加利福尼亚州农业保险和灾害赔偿增长的主要诱因^[18]。此外,过量的降水和过剩的土壤水分还带来农业病虫害损失,延迟田间农耕作业时间,导致土壤侵蚀以及诸多环境问题,如叶真菌病原体流行以及土传病原体向非疫区传播等^[9]。洪涝灾害对农业造成的损失往往大于非农业,这是由于农业用地普遍位于山前冲洪积扇平原区,极易遭受洪涝灾害侵袭^[19]。将农业用地作为区域综合防洪管理的一部分内容,尽管已得到欧洲一些国家的认可^[20],但人们对城市洪涝受损失较为重视,而对农业洪涝损失却未给予足够关注^[21]。

飓风、龙卷风和台风是造成严重农田洪涝灾害的最具杀伤力极端气候事件,具有强风与暴雨相伴的特点,并常与海平面上升有关。气候变化下的飓风频率和强度有可能在未来发生变化,但不确定性较高,带来的影响十分复杂^[22]。如美国飓风对作物种植面积和作物价格的影响主要取决于受影响地区的成灾程度,常受飓风影响的路易斯安那州的稻米减产致使本地粮价上涨,并使其其他地方稻农受益^[23]。

2 气候变化对农业用水和作物需水的影响

气候变化可能会以各种方式影响农业用水,特别是通过温度和降水的变化以及极端气候事件频度和程度的加剧,显著影响农业用水的可利用量和水质以及作物需水,包括降水和灌溉在内的农业用水供给究竟能在多大程度上满足作物需水是决定作物产量的一个主要因素。

2.1 农业用水可利用量

2.1.1 地表水

气候变化对河流、湖泊、水库和湿地等地表水资源的影响主要取决于降水的时间、地点、数量和形式(雨水或雪水)等,与温度相比,气候变化的局部模式对降水的变化和重要性更大^[24]。据预测全球中低纬度地区的降水有下降趋势,而高纬度地区的降水在冬季和夏季都

会增加。除东亚地区外,中纬度地区的夏季降水可能会普遍减少,且许多亚热带地区的降水也可能会减少。此外,大多数热带干旱地区的年平均径流量预计会减少,而高纬度和潮湿热带地区则会增加^[2]。在以雨水为主的集汇水区域,河道水流特性的季节性变化将加大,这意味着出现高水位和低水位、以及持续干旱的时间会延长^[25]。由于全球许多大型灌溉系统均依赖地表水供给,故气候变化的影响可能会因流域上下游之间的水量分配问题以及存在于许多区域内的国际分水纠纷而变得异常复杂^[26]。

2.1.2 地下水

气候变异与变化将直接通过降水入渗补给和陆面蒸发影响到地下水,并通过地下水抽取量的增大间接影响地下水位^[27]。浅层无压水更易受到气候变化的影响,而深层承压水却对降水和温度的变化相对不敏感。Döll 等^[28]指出对巴西东北部、非洲西南部和地中海南缘地区,2050 年的潜在地下水补给量可能会减少 70%以上,但在西非、中东、中国华北、西伯利亚和美国西部等地却会增长 30%以上。以欧洲中部山区为例,夏季月平均地下水补给量和河道径流量可能会减少 50%,这对地下水的利用和保护均带来潜在挑战^[29],而随着澳大利亚中部降雨量减少和气温上升,会增加对地下水的压力^[30]。此外,气候变暖对冰雪融化的影响可能会增大春季河道的径流量而在夏季却可能减少,这将进一步增加对地下水的需求,且该状况可能还会因干旱和其他极端气候事件的增多而继续恶化^[31]。由于海平面上升和海水倒灌入侵,气候变化还将对岛屿和沿海地区的地下水资源造成巨大威胁^[24]。

2.1.3 雪和冰川

全球许多灌溉系统的水源都来自上游冰川区的积雪融化,冬季或早春温度的升高虽会增加作物生长季节前后的水量,但却可能减少作物生长季节内的水量。受长期气候变化影响,自 1980 年以来,全球冰川消退愈加迅速和普遍,一些冰川积雪已经消失。如美国阿拉斯加州监测的 2 000 条冰川中,已有 99%正在消退;欧洲冰川已减少约 1/4;中国 612 条冰川中有 95%正在消退^[25]。气候变暖效应可能会显著改变受积雪融化影响地区的水文循环状况和特性,气温上升将改变冬季降水模式从雪水向雨水转变地区的河道流态季节性,导致因冰雪融化形成的径流峰值出现时间发生明显改变。与以往相比,提前而至的积雪消失和冰雪融化将增加冬季径流量而减少夏季流量。且在降雪较少的低海拔地区对气候变暖效应更为敏感,径流量峰值在很多情况下甚至会提前至少 1 个月出现,由于水库的蓄水能力有限,常难以应对该最大径流量的变化,致使大部分水量被弃用排入海洋^[32]。如在加拿大草原,较早出现的春季径流峰值使得在作物需水期只能获得较少的灌溉用水,积雪减少和降水变异降低了灌溉供水的可靠性^[25]。

2.2 农业用水水质

气候变化不仅通过改变水体温度直接影响水质,还会通过对农业和其他部门的人类活动影响间接造成水质退化,导致污水排放和水污染。Whitehead 等^[33]和 Delpla

等^[34]概述了气候变化对水质产生的潜在影响, 介绍了用于评估和预测气候变化对水质影响的最新方法。

就农业而言, 气候变化对水质的影响主要表现在 2 个方面, 即农业用水是否受到水质下降后的制约以及农事活动的改变是否导致水质下降。由于气温升高和降雨强度增加, 伴随着冬季降水模式从雪水向雨水的转变将带来更高的土壤侵蚀率, 进而降低农业用水的水质^[35], 而从沿海地区含水层中抽取过多水进行灌溉则可能引起海水倒灌, 且全球变暖引起的海平面上升会加剧该现象^[36]。与此同时, 温度和降水的变化还将改变农业土地利用与管理方式, 土壤耕作、施肥、施药等农事活动会进一步影响水质^[37]。Bloomfield 等^[38]观察到降雨的季节性和强度变化以及气温升高是改变农药施用的主要气候驱动因子; Bates 等^[24]指出许多情况下因农事活动的改变将导致水质下降, 这包括: 极端暴雨期间来自农田的大量养分负荷; 旱季缺水期间由于水量减少而导致污染稀释不足; 灌溉退水引起土壤盐渍化、水体富营养化和污染物积累等。

2.3 作物需水

尽管气候变化对全球作物需水影响的研究已经开展, 但取得的相关结果却并不完全一致^[39]。Döll^[40]预测气候变化下的全球作物需水会略有增加, 而 Elliot 等^[4]指出当不考虑 CO₂ 效应时, 全球作物需水略有增加, 否则呈下降态势。Ohmura 等^[41]认为气温上升理论上会引起蒸散发增加, 但大气变暖的同时其他气象因素也发生变化, 因而蒸散发量并不一定升高。如中国华北和青藏高原观测的蒸散发量在过去 50 a 有下降趋势, 但平均气温却在上升^[42]。气候变暖致使蒸散发量降低的一个可能原因或许在于日温度变化范围 (日最高气温与日最低气温之差) 的缩窄, IPCC 报告中也表明这是导致蒸散发下降的主要因素^[1]。

气候变化对区域作物需水异质性的影响显著。预计在非洲、澳大利亚和中国等地, 气候变化对作物需水的影响相对较低, 而欧洲、印度北部、南美洲东部和美国东部地区的作物需水则可能受到气候变化的不利影响^[43]。具体而言, 受气候变化的影响, 中国北方和南方地区的作物需水可能会有不同的变化^[44], 而西欧的作物需水和水分亏缺则将有所减少, 但在东欧却是增加。由于降水的变化, 预计南欧要比北欧更易缺水, 尤其是在地中海国家以及中东欧一些地区, 作物水分胁迫可能会加剧^[24]。对特定地区而言, 雒新萍等^[45]利用 CROPWAT 作物模型模拟分析了 1961—2010 年间以及 IPCC 不同排放情景下 2020—2029 年间中国小麦作物需水量的变化趋势, 探讨各排放情景下小麦作物需水量的敏感性, 指出高排放情景下的小麦需水量敏感性区域要比中排放情景下明显扩大, 且轻度和中度敏感区域的扩大尤为明显。Ashofteh 等^[46]针对 2026—2039 年间的气候变化趋势, 利用大气-海洋全球环流模型 AOGCMs 模拟降水、气温等气候要素的变化趋势与规律, 评估阿塞拜疆 Aidoghmoush 灌区各种作物需水量增加所面临的不确定性。指出未来作物需水将随水

文年型而异, 预计丰水年、平水年和干旱年作物需水量变化的风险分别增加 3%、17%和 33%, 相应的绝对量值依次为 2.5×10^6 、 1.6×10^7 和 3.1×10^7 m³/a。灌区内种植的小麦和大麦对气候变化的敏感性要低于其他作物, 故可更好抵御气候变化影响。特定作物生长季节时间的改变将使得气候变化对作物需水量影响的估计趋于复杂化^[47]。温度上升将延长作物生育期, 使北半球温带地区提前播种和延迟收获, 这会增加作物需水, 而在其他任何地区则缩短了作物生育期长度^[48]。气候变化也可能使得某种作物不再适合特定地区内种植, 致使作物需水估算更为复杂。

3 气候变化通过水要素对农业生产的影响

气候变化对农业用水可利用量和水质以及作物需水产生的作用, 将会通过水要素对农业生产造成影响, 这主要涉及种植业和畜牧业。

3.1 种植业

3.1.1 灌溉用水

目前多基于模拟模型预测评估气候变化下的灌溉用水需求以及作物产量的变化。Elliott 等^[4]比较了基于 10 个全球水文模型和 6 个全球网格化作物模型集合预测的灌溉供需总体结果, 评估了全球未来灌溉供水对作物生产力的潜在影响。当考虑 CO₂ 施肥效应时, 气候变化对玉米、大豆、小麦和水稻的直接影响涉及 $1.7 \sim 5.9 \times 10^{18}$ J 的热量损失, 约占总量的 8%~24%; 若不考虑 CO₂ 施肥效应, 则为 $5.9 \sim 10.9 \times 10^{18}$ J, 占总量的 24%~43%。在美国西部、中国、亚洲西部和南部以及中部地区, 受水资源限制到 21 世纪末, 将有 20~60 亿 hm² 的灌溉面积被迫改为旱田, 这会进一步损失 $2.5 \sim 12.1 \times 10^{18}$ J 热量的粮食产量, 而在美国北部和东部、南美洲部分地区、欧洲大部分地区 and 东南亚地区, 原则上灌溉供需可以达到平衡。Wada 等^[49]使用 7 个全球水文模型量化预测 21 世纪末全球气候变化对灌溉用水需求和灌溉面积的影响, 评估温室气体和气候变化预测带来的不确定性。未来全球灌溉用水需求呈增长趋势, 变幅取决于全球变暖的程度以及相关区域的降水量变化。在高排放情景下, 与 2000 年相比, 到 2100 年北半球夏季灌溉用水量增加将超过 20%, 用水高峰期会延长到 1 个月或更长时间。全球水文模型和全球气候模型的不确定性都较大, 但前者超过后者。

Blanc 等^[50]将作物减产模型与水资源模型相组合, 评估气候变化以及经济社会变化对 2050 年美国灌溉用水需求和作物产量的影响。水资源短缺加剧将大幅减少特定作物 (如棉花和饲料) 或特定地区 (如美国西南部) 的产量。由于受水分胁迫影响最大的流域在美国灌溉面积中所占比例相对较小, 故美国作物产量的总体下降幅度很小, 减少温室气体排放可以减轻水分胁迫对灌溉作物产量的影响, 这足以抵消与无约束的温室气体排放情景相比所减少的 CO₂ 施肥效应。Woznicki 等^[51]使用土壤和水评价模型评估了气候变化对美国 Kalamazoo 流域玉米和大豆灌溉用水需求的影响, 来自 10 个全球气候模型和

4 种温室气体排放情景下的统计偏差校正降尺度气候变化数据被用于 SWAT 模型, 分别预测 2020—2039 年和 2060—2079 年间的灌溉用水需求和作物产量。共设置了 6 个改变作物播种期的适应方案, 以便充分利用雨热资源。模拟结果表明玉米和大豆的灌溉用水需求总体上呈下降趋势, 其中提前播种将增加灌溉用水和蒸散发量, 而延迟播种则会减少 2 种作物的灌溉用水需求。

Saadi 等^[52]基于 ENSEMBLES 气候模型获得的高分辨率气候数据, 评估气候变暖对地中海地区作物需水和灌溉用水需求以及产量的影响。在中排放情景下, 2000—2050 年间的年降水量将减少(39.1±55.1) mm, 而气温却上升(1.57±0.27)°C。冬小麦和番茄的种植面积分别增加 7%和 24%, 平均生育期分别缩短 15 和 12 d, 蒸散发分别减少 6%和 5%, 最佳供水条件下的净灌溉用水需求分别减少 11%和 5%, 中度亏缺供水下则分别下降 14%和 7%, 且雨养小麦的相对产量损失有所增加, 但番茄却不变, 这表明气候变暖对地中海南部冬小麦生长的影响显著, 需采取补充灌溉措施, 而对番茄的影响却较小。胡实等^[53]在气候变化背景下, 利用 IPCC 不同排放情景多模式集成数据, 分析 2011—2059 年中国海河流域冬小麦适宜品种、种植范围和农业种植模式的可能变化, 并以研究区二级子流域为单元, 采用 VIP 模型预测冬小麦种植区域的可能变化对其蒸散量、灌溉用水量的影响, 结果表明不同情景下 21 世纪 50 年代海河流域的农业用水缺口将增加 $3.7 \times 10^8 \sim 34.0 \times 10^8 \text{ m}^3$, 未来水分将取代热量成为海河流域北部冬小麦种植面积扩张的主要限制因素。

3.1.2 可用耕地

可用耕地之所以受到气候变化影响是因为适宜耕种的土地常取决于降水、温度等气候变量。具体而言, 土壤温度和空气湿度是决定土地适宜耕种的主要因素之一, 其直接受到气候变化的影响。温带地区的土壤温度升高常有利于当地农业生产, 而热带地区过高的土壤温度则会对作物生长有害, 更为潮湿的气候条件下适宜于土地耕种^[54]。Zhang 等^[55]评价了土地适耕性并评估了全球可用耕地分布状况, 在综合考虑土壤温度、空气湿度、土地坡度、土壤性质对可用耕地适宜性影响的基础上, 指出预测结果因温室气体排放水平和气候预测模型而异。中排放情景下可能导致全球可用耕地面积减少, 而低排放情景下则略有增加。高纬度地区可能受惠于全球变暖, 而低纬度和中纬度地区则可能受负面影响。大气湿度指数的降低是热带和亚热带地区可用耕地减少的主要驱动因素, 而温度升高则是高纬度地区可用耕地增加的主要驱动力。

Ramankutty 等^[56]预测全球可用耕地面积会略有减少, 而中国、俄罗斯和中亚地区却有显著增长; Bot 等^[57]估计受气候变化影响未来可用耕地将会有不同程度减少。然而, 这些研究并未明确考虑气候变化预测的不确定性和土地适宜性分类的模糊性。此外, 因南欧地区易受空气湿度下降和可用耕地随之减少的影响, 一些作物

种植区可能会从当地迁移到北欧或南方更高海拔的地区^[58]。由于 CO₂ 浓度增加和气候变暖为作物生长提供了有利条件, 预计北欧将开发新的耕作土地^[2]; 澳大利亚的作物种植边界很可能要向北移动, 还有约 24 万 hm² 的土地可供耕种^[59]; 气候变化还可能使地中海等地的土地荒漠化加剧, 进一步威胁农业用地^[60]。总之, 气候变化预计对高纬度地区的可用耕地产生正面影响, 而对低纬度地区则为负面效应^[1-2]。

3.1.3 作物产量

气候变化将通过 CO₂ 浓度变化、气温升高、降水和蒸散发变化、极端降水事件等影响作物产量, 包含积极和消极影响的复杂区域模式是这些因素结合的产物, 而这些因素却因作物、区域、水管理方法等而异^[10]。虽然对作物产量的预测结果会因不同作物和情景而变, 但根据来自发达国家和发展中国家的各种气候变化预测可知, 到 2050 年, 灌溉小麦和玉米的产量将下降, 其中发展中国家的灌溉小麦产量将下降 20%~28%^[61]。

针对全球和区域尺度, 人们已利用历史数据和统计模型试图了解影响作物产量的关键因素。IPCC 报告^[1-2]中指出气候变化对水稻和大豆产量的影响较小, 但对许多地区的小麦和玉米产量却影响较大。Lobell 等^[62]基于用于表征作物生长季节内降水量和温度增长的一些气候参数, 部分解释世界上 6 种最为广泛种植作物(小麦、水稻、玉米、大豆、大麦和高粱)的年均产量变化情况。Roberts 等^[63]指出高温对于干旱环境下的作物减产至关重要, 全球大多数地区的气温升高都可能导致产量急剧下降。Lobell 等^[64]发现全球玉米和小麦产量预计将分别减少 3.8%和 5.5%, 而气候变化对大豆和水稻影响的利弊则互为抵消, 主要原因或许是 1980~2008 年间的气温上升趋势超过了历史上的年际气候变化, 从而抵消了一些地区因技术发展、CO₂ 施肥效应等因素带来的惠益。此外, 该研究还发现作物产量与饱和水汽压差(vapour pressure deficit, VPD)有关, 较高的 VPD 值意味着较高的作物需水。同时, 较高的 VPD 值还与较少的云量和较强的太阳辐射有关, 这可促进光合作用; 当土壤水分受限时, VPD 与作物产量间可能会出现负相关性。马玉平等^[65]将传统的积分回归模型与气候预测模型相结合, 建立了中国不同省区玉米产量与气象要素间的相关模型, 基于预测成果探讨了未来 40 a 气候变化对中国玉米产量的可能影响, 指出若不改良现有玉米品种以及科技水平发展速度不变, 则未来玉米单产将以减产为主, 并随时间递增呈现减幅增大的趋势, 但一般在 5%以内。

3.2 畜牧业

3.2.1 牲畜用水

畜牧业占全球农业总产值的 40%, 且随着人口增长和饮食结构变化, 人们对畜产品的需求也随之增长^[66]。气候变化影响下的气温升高和降水模式改变均会对畜牧系统产生重大影响。特别是极端气候事件频发将明显影响畜牧业生产力, 尤其是对非洲等这类敏感地区。尽管牲畜用水占世界总需水量不到 1%, 但在一些国家和地

区, 该比例却高得多。如博茨瓦纳牲畜用水占总需水量的 23%, 甚至超过该国灌溉用水的比例^[67]。

气候变化对牲畜用水影响的研究成果较少。由于部分牲畜用水来自饲料中储存的水分, 故牲畜用水须从不同来源中加以估算, 而饲料中的水分含量却随气候变化有所差异^[68]。目前, 工业化的畜牧系统对发达国家畜牧业贡献最大, 其更易受到来自气候变化的间接影响而非直接影响, 而发展中国家所普遍采用的放牧-耕作混合畜牧系统却极易受到自然灾害的影响, 受气候变化的直接影响强烈, 人口增长和对动物产品需求的增加将给此类畜牧系统带来更大压力^[69]。如牧场占主导地位的地中海东部沿海地区, 由于有效水分的预期下降, 致使牲畜生产力降低^[48]。

3.2.2 牧草产量

牧草产量受天气和气候条件影响严重, 特别是在水分供给上。牧场是许多地区牲畜的主要饲料来源, 如蒙古牲畜每年从牧场获得超过 90% 的饲料, 温度和水分变化引起的牧草数量和质量变化可能会影响动物繁殖率^[70]。在美国科罗拉多州东北部, 受夏季温度升高和饲料品质下降的影响, 奶牛的体质量会减少^[71]; 澳大利亚畜牧业对气候因素也高度敏感, 气候变化下的畜牧系统将发生重大改变, 特别是该国的热带和亚热带地域^[72]。在南美洲, 专用于牧场的土地面积要比农作物面积高出 4~8 倍, 而在拉美地区, 由于一些重要的饲料作物生产力下降, 致使当地畜牧业生产受阻, 影响到食品安全^[73]。此外, 限制用水有可能恶化高温带来的不利影响, 迫使牲畜靠近供水点, 增加局部地区放牧压力, 导致土地质量退化^[66]。

4 气候变化对农业水管理影响的应对策略

为了应对以上气候变化对农业用水和作物需水及通过水要素对农业生产带来的影响, 有必要基于科学的发展理念和先进的技术与管理方法, 研究和制定具有适应和/或减缓特点的农业水管理应对策略, 选用相关的应对措施。适应通常是指对这些影响做出被动或主动的响应, 而减缓则是做出主动的防御, 适应较为实时, 短期效应显著, 减缓则具有一定时效滞后, 重在中长期效应。适应和减缓之间一般既有所区别但又关系密切, 如一些应对策略具有适应或减缓的特点, 而另一些则两者兼具。

4.1 农业水管理应对策略的选择和效果评估

在选择气候变化影响下的农业水管理应对策略上, Hardelin 等^[74]提出应在 3 个战略层面上给予重视: 一是加强农田适应能力建设和营造有利环境条件, 借助技术手段减少农田受气候变化影响的脆弱性; 二是制定农业节水激励政策和建立水市场, 借助经济杠杆诱使农民对气候变化影响做出积极响应; 三是构建与极端气候事件频发有关的气候风险管理机制, 借助保险制度增强农业生产对气候变化风险不确定性的抵御能力。Iglesias 等^[75]建立起用于选择和评价农业水管理应对策略的标准, 将人们广为采用的 33 个适应策略归类为提高灵活性和适应能力、应对供水变化、响应旱涝灾害、满足灌溉用水需求、

响应农业土地利用变化、应对水土质量恶化、响应生物多样性丧失等 7 种适应策略, 在确定各个适应策略的特性(行为主体、类型、时间尺度、技术难度、潜在成本、潜在利益)及其评价等级基础上, 采用效益成本比值分析方法开展相关经济效果的评估, 据此提出改善气候变化监测与预警能力、改进受气候变化影响下的协调规划方法、提高农业用水效率等 8 个为区域层面上最为有效的适应策略, 而农田层面上最为有利的适应策略则是修建小水库、改变作物种类及种植模式以及改善排水系统。在气候变化影响下的农业水管理应对策略效果评估上, Connora 等^[76]基于作物-水-盐生产函数以及相关模型, 针对澳大利亚 Murray-Darling 灌区, 研究了气候变化影响下缺水、供水变异和土壤盐分增加等要素对灌溉农业生产带来的影响。当气候变化加剧时, 若忽视其对上述所有要素的影响而只关注缺水时, 则势必夸大应对策略的作用并低估其对灌溉农业产生的潜在影响。供水变异加剧可能会严重影响多年生作物种植区, 低估效益损失高达 20%, 应对策略应是减少多年生作物的种植面积, 而应对土壤盐分增加的应对策略则是加大灌水量, 以便充分淋洗盐分, 但受灌区供水能力制约须采纳休耕部分农田的应对策略。Khilad 等^[77]使用离散随机规划模型, 在西班牙 Jucar 流域开展农业节水激励政策下气候变化对灌溉农业影响的研究, 评估了气候变化对当地农民采用的长期和短期应对策略效果以及相关政策干预的影响。指出气候变化很可能对当地灌溉和与水有关的生态系统产生负面影响, 其严重程度取决于应对政策的设置和农民对气候变化影响的响应。就经济效益而言, 采用水市场政策要优于灌溉补贴政策, 这有助于决策者设计和制定有效的灌溉供水机制, 进而应对南欧灌溉农业发展中遇到的气候变化问题。

Varela-Ortega 等^[78]将水文模型与经济模型相耦合, 评估了气候变化对西班牙 Guadiana 流域灌溉用水的影响, 基于多准则分析法识别和优化农业水管理应对策略与措施。提出采用新品种和现代灌溉技术等处于优先位置, 修建水库蓄水建筑物等位于最低等级, 而利用保险等公共软措施则排名居中。由于选择应对策略的标准是环保、资金可行性和创造就业机会, 故须加强不同利益相关群体间的联系, 共同推进适应气候变化的进程。Ashofteh 等^[79]基于大气环流模式 HadCM3 并结合高温室气体排放情景, 预测了 2026—2039 年间伊朗 Aidoghmoush 流域各气候变量的长期变化趋势, 采用 IHACRES 水文模型和联合国粮食及农业组织(FAO)蒸散发模型评价各气候变量对水库入流和灌溉用水产生的影响。与基准期间相比, 预测期内的水库入流和灌溉用水将分别减少 0.7% 和增加 6%。在推迟作物种植日期、亏缺灌溉、改善灌溉效率等应对策略中, 亏缺灌溉可以提高灌溉供水的可靠性, 而改善灌溉效率则能维持当地作物产量。

4.2 农业水管理应对策略的适应-减缓利弊权衡分析

鉴于气候变化影响下的一些农业水管理应对策略同

时兼具适应和减缓特点,两者之间存在着矛盾,故需开展适应-减缓的利弊权衡分析,以便提高这些应对策略的功效和作用^[80]。如农田退耕还林、促进土壤固碳等措施可能通过减少沉积物、养分和农药流失达到改善地表水质的目的,但永久性的林地植被覆盖须在全年内消耗水分,反而会增加用水量;采用喷灌和滴灌等先进节水灌溉技术固然可起到节水、提高灌溉效率的显著作用,但却可能增加应用时的能耗和温室气体排放。Mushtaq 等^[81]基于水文与经济组合的模型,从国家层面上评价了澳大利亚 5 种节水灌溉技术改造方案的实施效果,开展与节水灌溉技术替代转型相关的节水、能耗、温室气体排放、经济回报间的利弊权衡分析。其中 3 种改造方案是通过更换现有灌溉系统实现节水目的,但却增加了能耗和温室气体排放,如采用棉花滴灌可节水 120GL/a,但却增加能耗 889 TJ/a 和温室气体排放 25 万 t/a (CO₂ 当量),还每年新增约 500 万美元的额外费用;当更换低效能源密集型的手动式和滚线式喷灌系统时,特别是被滴灌所取代时,节水减排的效益明显。这表明最大的挑战或许来自在采用先进节水灌溉技术的同时,不对农田生态环境造成较大的负面影响,故在应对气候变化影响的同时,需要优化对先进节水灌溉技术的经济投入。

在影响采纳先进节水灌溉技术的诸多因素中,一般很少考虑气候变量的作用,这是由于相关研究多集中在气候相近的同一地理空间范围内,长期气候变量的平均值随时间变化不大,故难以衡量潜在在气候变化产生的影响。此外,狭窄的地理空间范围也导致气候变量间的多重共线性,这限制了被评估的气候变量的个数^[82]。为了确保气候变量具有足够的空间变化范围,Frisvold 等^[83]利用美国农业部经济研究局提供的农牧灌溉调查数据表,基于气候、农田规模、用水成本、能耗、劳力费用和土壤特性等对美国西部 17 个州的喷灌与地面灌溉间的技术选择开展了应用研究,指出采用先进的节水灌溉技术对当地灌溉农业应对气候变化至关重要。在气候变暖和干燥的气候变化条件下,采用喷灌的可能性较小,而利用其他措施(如亏缺灌溉、滴灌等)可能更为适宜。喷灌更适合在相对凉爽和极端降水事件增加的地区使用,且在片状和细沟侵蚀指数较高的山丘区使用更多,这反映出较高的降水量、陡峭的地形坡度和较低的土壤持水能力所带来的影响。

4.3 农业水管理应对策略中的气候风险管理机制

在气候变化影响下的农业水管理应对策略中,气候风险管理无疑是一个重要的组分。Brown 等^[84]指出气候风险管理的内容应该包括:1) 在应对气候变化的战略规划和决策中系统地利用气候信息和气候知识;2) 采用可有效减小气候变化影响脆弱性的气候信息技术和管理策略;3) 使用有利于农村弱势人口风险转移的气候信息政策和市场干预措施。与气候风险管理相关的措施主要有:控水工程系统、抗旱种质培育、生计多样化、早期灾害预警响应系统、金融风险转移机制等,相应的投资领域包含:1) 气候信息投资,以提高农业发展的恢复力并刺

激投资;2) 农村气候信息服务投资,以支撑对农业用水和农业生产的适应管理;3) 综合性的多种灾害预警系统投资,以支持对超出农村社区应对能力的极端气候事件做出更及时、更协调的反应。

极端气候事件频度和程度的加剧意味着应考虑为此造成的生产风险建立保险和赔偿制度,承保灾难性的气候风险应该是农业水管理应对气候变化的关键措施之一。目前世界各地多基于天气指数形式的保险产品形成管理气候风险的机制与方法,其中天气指数保险是根据天气指数(降雨、温度等)而非个人损失提供赔偿,其他类型的保险则是基于单位面积产量损失。天气指数保险产品已在或正在埃塞俄比亚(降雨指数)、印度(降雨、温度、湿度指数)、墨西哥(干旱指数)等国家试行^[85],其性能取决于与天气风险相关的不确定性程度。一般而言,基于单位面积产量损失的保险似乎效果更佳,但极端气候下的保费可能非常昂贵,而基于天气指数的保险成本则会相对较低^[86]。

5 研究重点与建议

全球气候变化对农业用水和作物需水及通过水要素对农业生产带来了显著影响,进而影响到农业水管理及其应对策略。为此,在相关研究方面,人们需要重点关注和研究气候变化对农业水管理影响的尺度效应和不确定性以及综合评估方法,开展应对气候变化影响的农业水管理策略效用分析研究。

5.1 气候变化对农业水管理影响的尺度效应和不确定性

气候变化对农业用水和作物需水及通过水要素对农业生产带来的影响,在全球、区域、局部不同空间尺度上显现出较大的异质性,呈现为“全球难下定论、区域特点明显、局部因地制宜”的气候变化尺度效应特征。降水在全球范围内未出现明显的一致性趋势变化,但北半球高纬度区域的降水及径流有一定增加,副热带区域和一些内陆区域却有所减少,且与降水有关的干旱洪涝极端气候事件的频度和强度变化趋势一般也仅具有区域性意义。同时,全球作物需水和灌溉用水也表现出非一致性的变化趋势,但区域间差异却较为明显,受地表升温影响,高纬度区域的作物生育期被延长,而其它区域则被缩短。对降水、作物需水、灌溉用水、可用耕地等而言,因地理地域位置所限,区域间差异可能较为明显,但在全球尺度上,这些区域间的差异则可能被相互平衡或彼此抵消。人们迫切需要深入了解和认知气候变化对区域和局部农业水管理造成的冲击和影响。

由此可见,在制定合理的农业水管理应对策略中,应认真考虑和反映气候变化尺度效应特征。联合国粮食及农业组织(FAO)针对全球气候变化影响的区域多样性和尺度效应特征,以地理位置、水问题、气候变化驱动力、脆弱性程度等为依据,将全球主要农业水管理系统归为 7 大类型在内的 24 个典型区域,给出了相应的适应性程度和响应对策的选择^[48],这有助于人们识别和确定世界各地与主要气候问题相关的区域,包括:1) 灌溉

受影响的区域,即以积雪融化为水源的大型自流灌区和需要更多储水以调节不规则降雨的补充灌区;2)受海水入侵、洪涝灾害、水质下降影响的河口三角洲区域;3)季风区内具有季节性储水系统的干旱、半干旱区域以及湿润热带区域。参照该分类,人们可依据特定地区和地点的现状条件,因地制宜地制定和选用应对气候变化影响的当地农业水管理策略。

在以上气候变化对农业用水和作物需水及通过水要素对农业生产影响的模拟评价当中,模拟预测结果的不确定性往往会受到气候变化预测与影响评估的不确定性影响,这尤其反映在局部尺度上。气候变化预测与影响评估的不确定性来源常归类为来自全球气候模型、温室气体排放情景、降尺度技术与方法、水文建模等的不确定性,这些不确定性的累积结果及其在区域或局部尺度上的传播最终导致不确定性范围的增加和量值的增大^[87]。段青云等^[88]利用 IPCC-AR5 气候模式并通过贝叶斯多模式推理方法,分析预估了海河和珠江典型流域的气候变化情况,指出未来情景的不确定性、气候系统内部自然变率的不确定性和表征气候过程的不确定性是造成气候变化预测不确定性的主要来源。尽管在气候变化预测与影响评估中存在着不确定性,但仍可在各种气候变化情景下获得一些具有一致性变化趋势的结果,有助于人们识别和确定不同时空尺度气候条件下已发生或正发生的一些气候控制因素的变化及其对农业水管理的影响。为了应对气候变化和水文建模中各种不确定性及其对农业水管理的影响,需要继续研发和完善全球(区域)气候模型、全球水文模型、全球作物模型等模拟手段和工具,开发和应用降尺度技术与方法以及水文建模方法,并探索广义不确定性系统理论与方法,以便更好地探索不确定性问题。

5.2 气候变化对农业水管理影响的综合评估方法

除了对气候变化需做出更为准确的预测外,气候变化对农业水管理影响的评估还应基于人们对改变环境的自然和社会响应机制的更多认知。自然响应机制包括作物对气候和水土环境变化响应的基本生物过程;在社会响应机制上,应特别关注小农户和自给型农业社区的迫切需求,因其更易受到气候变化对可利用水量的影响。鉴于与气候变化有关的各种控制因素对农业生产的影响可能会相互抵消,如满足作物需水要求不仅取决于作物需水量还与可利用水量有关,但气候变化下这两者既可能增加也可能减少。由于最终影响作物产量的是 CO_2 水平增加、降水和温度变化、极端气候事件以及一些社会经济因素的共同结果,为此,基于系统方法开展气候变化对农业水管理影响的综合评估,才能有宜于确定各种控制因素并有效量化气候变化的影响,为制定和选用更为协调一致的农业水管理应对策略提供支撑。

在气候变化对农业用水和作物需水及通过水要素对农业生产带来的影响评价以及农业水管理应对策略的效果评估中,基本上是采用全球气候模型分别与水文模型、作物模型、经济模型互为组合的方式开展,这固然反映

出未来气候变化影响与一部分控制因素间的关联性,但尚缺乏综合性的全面评估视野。尤其是在气候变化影响下的农业水管理应对策略效果评估中,需要明晰气候变化和流域水文状况与可利用水量的关系以及农业水管理与农业生产的关系,这迫切需要构建适宜的综合性评估架构,建立基于气候、水文、作物、土壤、经济、管理等多模型集成模式的综合评估方法,从而有效提高综合评估结果的可靠性。考虑到预测互为关联影响的各种控制因素、用水参与者的行为及未来状况预测的难度通常较大,在基于情景方案的模拟预测中,采用逐步综合评估的解决方式或许是有益的^[89],值得研究探讨。魏一鸣等^[90]总结归类了典型气候变化影响综合评估模型与方法,其中涉及的主要问题有模型框架、不确定性、技术进步、公平性和减排机制等,指出综合评估模型对技术进步的处理有从外生到内生的趋势。此外,考虑到各种控制要素之间往往相互依存,且受到来自技术、经济、管理、政策等多方制约,建议在构建综合性评估架构中引入优化技术与模型,基于模拟模型与优化模型相耦合的模拟-优化组合方式,可以更好地综合评估气候变化对农业水管理的影响以及应对策略的应用效果。

5.3 应对气候变化影响的农业水管理策略效用分析

农业水管理主要涉及灌溉排水、雨养农业、水土资源保护、流域管理、再生水利用等,气候变化对农业用水和作物需水及通过水要素对农业生产造成的显著影响均会程度不一地涉及这些内容。应对气候变化影响的农业水管理策略是基于资源管理、环境友好、绿色发展理念制定的,即发展节水灌溉农业、提升雨养农业水平、维系农田生态环境、创新流域管理模式、减少再生水利用风险等,相应的应对措施涉及工程、农艺、管理、政策等诸多方面。其中工程措施主要包括节水灌溉方法、渠道衬砌防渗、雨水积蓄等;农艺措施主要包含抗旱耐盐作物品种选育及应用、土壤蓄水保墒、保护性耕作等;管理措施主要含有节水灌溉制度、输配水优化、用水管理模式等;政策措施主要涉及节水体制、水权与水市场、风险管理等。选用这些不同的应对策略并集成组合发挥其最大效应的努力,不仅仅取决于人们对上述策略的合理抉择还与其适应-减缓利弊权衡分析密切相关。

气候变化影响下一些具有减缓效应的应对策略可能与适应背道而驰,如为了减少石油用量而规模化种植生物能源作物的做法就可能严重威胁当地粮食生产所需的水土资源,而一些具备适应效应的应对策略也可能与减缓相悖,如加大地下水开采量用于灌溉则可能会增加温室气体排放量,故应加强对这些策略的适应-减缓利弊权衡分析。与此同时,考虑到一些应对策略兼具适应和减缓的特点,如开展稻田水管理既可减少甲烷排放又能提高灌溉用水效率,增加土壤有机质和改善土壤保水性能既能增强应对极端气候事件的复原力也可增加土壤碳固存,故有必要开展对这些应对策略的适应-减缓协同增效作用分析。

在制定应对气候变化影响的农业水管理策略当中,

基于适应和减缓的应对思路固然十分必要,但有时重大技术变革或机制政策改革产生的效应可能会远超过适应和减缓的效应与作用。如个体农户对气候变化的自主适应就较为机动灵活,无需多少行政性干预,但农户自主选择各种投入模式和资源利用方式中存在的弊端却可能危及农田生态环境的完整性,增大未来气候风险。因此,在制定农业水管理应对策略过程中,应充分考虑来自技术、机制、政策、基础设施等方面的改变,以便对气候变化影响做出更为一致和积极有效的响应。此外,还应关注与气候变化预测不确定性有关的未知风险问题,面对极端气候事件频度和强度可能加剧的趋势,采用传统的危机管理方式已无法奏效,应将重点放在基于长期或预备措施的气候风险管理机制上,并加大与此相关的研究和应用力度。

6 结 论

全球气候变化对农业用水和作物需水以及通过水要素对农业生产均产生了较大冲击和影响,进而影响到农业水管理及其应对策略。应对气候变化已成为当今农业水管理面临的重大挑战和重要任务,迫切需要加大关注力度和相关研究深度。就本文提出的气候变化对农业水管理影响的尺度效应和不确定性、气候变化对农业水管理影响的综合评估方法、应对气候变化影响的农业水管理策略效用分析等研究重点上,现有国外研究多集中在气候变化对农业水管理影响的尺度效应和不确定性和应对气候变化影响的农业水管理策略效应分析上,并正在加强对应气候变化对农业水管理影响的综合评估方法的研究,而国内则对气候变化对农业水管理影响的尺度效应和不确定性的研究较多,应对气候变化对农业水管理影响的综合评估方法的研究相对薄弱,对应气候变化影响的农业水管理策略效应分析的研究基本处于空白。为此,亟待加强和深化气候变化影响下的农业水管理应对策略效用分析研究,借助涉及工程、农艺、管理、政策等多种要素的各种策略与措施的适宜选择及其集成组合,是应对全球气候变化影响的重要途径和可靠手段。

【参 考 文 献】

- [1] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability, Part A: global and sectoral aspects[R]// Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [2] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability, Part B: regional aspects[R]// Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [3] Iglesias A, Quiroga S, Diz A. Looking into the future of agriculture in a changing climate[J]. Eur Rev Agric Econ, 2011, 38(3): 427—447.
- [4] Elliot J, Deryng D, Müller C, et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change[J]. PNAS, 2014, 111(9): 3239—3244.
- [5] 许迪, 龚时宏, 李益农, 等. 农业水管理面临的问题及发展策略[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 1—7.
Xu Di, Gong Shihong, Li Yinong, et al. Problem and strategies on development of agricultural water management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [6] OECD. Climate Change, Water and Agriculture: Towards Resilient Systems[M]. OECD, 2014, Paris: IWA Publishing.
- [7] Cai Ximing, Zhang Xiao, Paul H N, et al. Impacts of climate change on agricultural water management: a review[J]. Water, 2015, 2(5): 439—455.
- [8] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation[R]// Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012, Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [9] Rosenzweig C, Iglesias A, Yang X, et al. Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests[J]. Glob Change Hum Health, 2001, 2(2): 90—104.
- [10] Tubiello F, Soussana J, Howden S. Crop and pasture response to climate change[J]. PNAS, 2007, 104(50): 19686—19690.
- [11] Lobell D, Hammer G, McLean G, et al. The critical role of extreme heat for maize production in the United States[J]. Nat Clim Change, 2013, 3(5): 497—501.
- [12] Schmidhuber J, Tubiello F. Global food security under climate change[J]. PNAS, 2007, 104(50): 19703—19708.
- [13] Trenberth K E, Dai A, van der Schrier G, et al. Global warming and changes in drought[J]. Nat Clim Change, 2014, 4(1): 17—22.
- [14] Planton S, Déqué M, Chauvin F, et al. Expected impacts of climate change on extreme climate events[J]. C R Geosci, 2008, 340(5): 564—574.
- [15] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, et al. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003[J]. Nature, 2005, 437(7058): 529—533.
- [16] Meehl G, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century[J]. Science, 2004, 305(5686): 994—997.
- [17] Rosenzweig C, Tubiello F, Goldberg R, et al. Increased crop damage in the US from excess precipitation under climate change[J]. Glob Environ Change, 2002, 12(3): 197—202.
- [18] Lobell D, Torney A, Field C. Climate extremes in California agriculture[J]. Clim Change, 2011, 109(1): 355—363.
- [19] Forster S, Kuhlmann B, Lindenschmidt K, et al. Assessing flood risk for a rural detention area[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci, 2008, 8(2): 311—322.
- [20] Wilkinson M, Quinn P, Hewett C. The floods and agriculture risk matrix: a decision support tool for effectively communicating flood risk from farmed landscapes[J]. Int J River Basin Manage, 2013, 11(3): 237—252.
- [21] Morris J, Brewin P. The impact of seasonal flooding on agriculture: the spring 2012 floods in Somerset, England[J]. J Flood Risk Manage, 2014, 7(2): 128—140.
- [22] Knutson T, Tuleya R. Impact of CO₂-induced warming on

- simulated hurricane intensity and precipitation: sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization[J]. *J Clim*, 2004, 17(18): 3477—3495.
- [23] Chen C, McCarl B. Hurricanes and possible intensity increases: effects on and reactions from US agriculture[J]. *J Agric Appl Econ*, 2009, 41(1): 125—144.
- [24] Bates B, Kundzewicz Z, Wu S, et al. Climate change and water[R]//Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008, Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat.
- [25] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[R]//Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- [26] Grafton R Q, Pittock J, Davis R, et al. Global insights into water resources, climate change and governance[J]. *Nat Clim Change*, 2013, 3(4): 315—321.
- [27] Taylor R G, Scanlon B, Döll P, et al. Ground water and climate change[J]. *Nat Clim Change*, 2013, 3(4): 322—329.
- [28] Döll P, Fiedler K. Global-scale modeling of groundwater recharge[J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2007, 4(10): 4069—4124.
- [29] Eckhardt K, Ulbrich U. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range[J]. *J Hydrol*, 2003, 284(1/2/3/4): 244—252.
- [30] Barron O, Crosbie R, Dawes W, et al. The Impact of Climate Change on Groundwater Resources: The Climate Sensitivity of Groundwater Recharge in Australia[R]. Australia, CSIRO, 2010.
- [31] Hagg W, Braun L, Kuhn M, et al. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments[J]. *J Hydrol*, 2007, 332(1/2): 40—53.
- [32] Barnett T, Adam J, Lettenmaier D. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303—309.
- [33] Whitehead P, Wilby R, Battarbee R, et al. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality[J]. *Hydrol Sci J*, 2009, 54(2): 101—123.
- [34] Delpla I, Jung A, Baures E, et al. Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production[J]. *Environ Int*, 2009, 35(8): 1225—1233.
- [35] Jeppesen E, Kronvang B, Olesen J E, et al. Climate change effects on nitrogen loading from cultivated catchments in Europe: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 663(1): 1—21.
- [36] Werner A D, Bakker M, Post V E, et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges[J]. *Adv Water Resour*, 2013, 51(1): 3—26.
- [37] Moss B, Stephen D, Balayla D M, et al. Continental-scale patterns of nutrient and fish effects on shallow lakes: synthesis of a pan-European mesocosm experiment[J]. *Freshw Biol*, 2004, 49(12): 1633—1649.
- [38] Bloomfield J, Williams R, Goody D, et al. Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater: a UK perspective[J]. *Sci Total Environ*, 2006, 369(1/2/3): 163—177.
- [39] Fischer G, Tubiello F, Van Velthuis H, et al. Climate change impacts on irrigation water requirements: effects of mitigation, 1990–2080[J]. *Technol Forecast Soc Change*, 2007, 74(7): 1083—1107.
- [40] Döll P. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective[J]. *Clim Change*, 2002, 54(3): 269—293.
- [41] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating?[J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1345—1346.
- [42] Song Z, Zhang H, Snyder R, et al. Distribution and trends in reference evapotranspiration in the North China Plain[J]. *J Irrig Drain Eng*, 2009, 136(4): 240—247.
- [43] Zhang Xiao, Cai Ximing. Climate change impacts on global agricultural water deficit[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1111—1117.
- [44] Tao F, Yokozawa M, Hayashi Y, et al. Future climate change, the agricultural water cycle, and agricultural production in China[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2003, 95(1): 203—215.
- [45] 雒新萍, 夏军. 气候变化背景下中国小麦需水量的敏感性研究[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(1): 38—43.
- Luo Xinpin, Xia Jun. Study on the sensitivity of wheat water requirement under future climate change[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 11(1): 38—43. (in Chinese with English abstract)
- [46] Ashofteh P-S, Bozorg-Haddad O, Mariño M A. Risk analysis of water demand for agricultural crops under climate change[J]. *J Hydrol Eng*, 2015, 20(4): 04014060.
- [47] Mínguez M, Ruiz-Ramos M, Díaz-Ambrona C, et al. First-order impacts on winter and summer crops assessed with various high-resolution climate models in the Iberian Peninsula[J]. *Clim Change*, 2007, 81(1): 343—355.
- [48] Turrall H, Burke J, Faurès J. Climate Change, Water and Food Security[M]. Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2011, Rome.
- [49] Wada Y, Wisser D, Eisner S, et al. Multimodel projections and uncertainties of irrigation water demand under climate changes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(17): 4626—4632.
- [50] Blanc E, Caron J, Fant C, et al. Is current irrigation sustainable in the United States? an integrated assessment of climate change impact on water resources and irrigated crop yields[J]. *Earth's Future*, 2017, 5(8): 877—892.
- [51] Woznicki S A, Nejadhashemi P, Parsinejad M. Climate change and irrigation demand: uncertainty and adaptation[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2015, 3: 247—264.
- [52] Saadi S, Todorovic M, Tanasijevic L, et al. Climate change and Mediterranean agriculture: Impacts on winter wheat and tomato crop evapotranspiration, irrigation requirements and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147(1): 103—115.
- [53] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 冬小麦种植区域的可能变化对黄淮海地区农业水资源盈亏的影响[J]. *地理研究*, 2017, 36(5): 861—871.
- Hu Shi Mo Xingguo Lin Zhonghui. Impacts of possibility planting region change for winter wheat on agricultural water

- surplus and deficit in Huang-Huai-Hai Region[J]. Geographical Research, 2017, 36(5): 861—871. (in Chinese with English abstract)
- [54] Xiao X, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Transient climate change and potential croplands of the world in the 21st century[R]//MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change Report No. 18. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [55] Zhang X, Cai X. Climate change impacts on global agricultural land availability[J]. Environ Res Lett, 2011, 6(1): 1—8.
- [56] Ramankutty N, Foley J, Norman J, et al. The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change[J]. Glob Ecol Biogeogr, 2002, 11(5): 377—392.
- [57] Bot A, Nachtergaele F, Young A. Land Resource Potential and Constraints at Regional and Country Levels[M]. Food and Agriculture Organization of the United States, 2000, Rome.
- [58] Audsley E, Pearn K R, Simota C, et al. What can scenario modelling tell us about future European scale agricultural land use, and what not ?[J]. Environ Sci Policy, 2006, 9(2): 148—162.
- [59] Reyenga P, Howden S, Meinke H, et al. Global change impacts on wheat production along an environmental gradient in South Australia[J]. Environ Int, 2001, 27(2): 195—200.
- [60] Le Houérou H. Climate change, drought and desertification[J]. J Arid Environ, 1996, 34(2): 133—185.
- [61] Nelson G C, Rosegrant M W, Koo J, et al. Climate change impacts on agriculture and costs of adaptation[R]. International Food Policy Research Institute, 2009, Washington, DC.
- [62] Lobell D, Field C. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. Environ Res Lett, 2007, 2(1): 1—7.
- [63] Roberts M, Schlenker W, Eyer J. Agronomic weather measures in econometric models of crop yield with implications for climate change[J]. Am J Agric Econ, 2012, 95(2): 236—243.
- [64] Lobell D, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616—620.
- [65] 马玉平, 孙琳丽, 俄有浩, 等. 预测未来 40 年气候变化对我国玉米产量的影响[J]. 农业生态学报, 2015, 26(1): 224—232.
- Ma Yuping, Sun Linli, E Youhao, et al. Predicting the impact of climate change in the next 40 years on the yield of maize in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(1): 224—232. (in Chinese with English abstract)
- [66] Herrero M, Thornton P. Livestock and global change: emerging issues for sustainable food systems[J]. PN AS, 2013, 110(52): 20878—20881.
- [67] Wada Y, Van Beek L P H, Bierkens M F. Modelling global water stress of the recent past: on the relative importance of trends in water demand and climate variability[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2011, 15(12): 3785—3808.
- [68] Thornton P, Van de Steeg J, Notenbaert A, et al. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: a review of what we know and what we need to know[J]. Agric Syst, 2009, 101(3): 113—127.
- [69] Godber O, Wall R. Livestock and food security: vulnerability to population growth and climate change[J]. Glob Change Biol, 2014, 20(10): 3092—3102.
- [70] Harle K, Howden S, Hunt L, et al. The potential impact of climate change on the Australian wool industry by 2030[J]. Agric Syst, 2007, 93(1): 61—89.
- [71] Hanson J, Baker B, Bourdon R. Comparison of the effects of different climate change scenarios on rangeland livestock production[J]. Agric Syst, 1993, 41(4): 487—502.
- [72] Henry B, Eckard R, Gaughan J, et al. Livestock production in a changing climate: adaptation and mitigation research in Australia[J]. Crop Pasture Sci, 2012, 63(2): 191—202.
- [73] Seo S, McCarl B, Mendelsohn R. From beef cattle to sheep under global warming? an analysis of adaptation by livestock species choice in South America[J]. Ecol Econ, 2010, 69(10): 2486—2494.
- [74] Hardelin J, Lankoski J. Climate change, water and agriculture: challenges and adaptation strategies[J]. Euro Choices, 2015, 14(2): 10—15.
- [75] Iglesias A, Garrote L. Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe[J]. Agricultural Water Management, 2015, 155(1): 113—124.
- [76] Connora J D, Schwabe K, King D, et al. Irrigated agriculture and climate change: The influence of water supply variability and salinity on adaptation[J]. Ecological Economics, 2012, 77(2): 149—157.
- [77] Khila M T, Connor J D, Albiac J. Efficient water management policies for irrigation adaptation to climate change in Southern Europe[J]. Ecological Economics, 2015, 120(2): 226—233.
- [78] Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Esteve P, et al. How can irrigated agriculture adapt to climate change? insights from the Guadiana Basin in Spain[J]. Reg Environ Change, 2016, 16(1): 59—70.
- [79] Ashofteh P-S, Bozorg-Haddad O, Loáiciga H A. Development of adaptive strategies for irrigation water demand management under climate change[J]. J Irrig Drain Eng, 2017, 143(2): 04016077.
- [80] Straujuma L. Climate change and agriculture: multiple responses and responsibilities[J]. Euro Choices, 2015, 14(1): 4—10.
- [81] Mushtaq S, Maraseni T N, Reardon-Smith K. Climate change and water security: estimating the greenhouse gas costs of achieving water security through investments in modern irrigation technology[J]. Agricultural Systems, 2013, 117(1): 78—89.
- [82] Fleischer A, Lichtman I, Mendelsohn R. Climate change, irrigation, and Israeli agriculture: Will warming be harmful?[J]. Ecological Economics, 2008, 67(3): 109—116.
- [83] Frisvold G, Bai T. Irrigation technology choice as adaptation to climate change in the Western United States[J]. Journal of Contemporary Water Research & Education, 2016, 158(1): 1—10.

- 62—77.
- [84] Brown C, Hansen J. Agricultural water management and climate risk[R]// Report to the Bill and Melinda Gates Foundation, 2008, New York, USA: International Research Institute for Climate and Society.
- [85] Carter M, De Janvry A, Sadoulet E. Index-based weather insurance for developing countries: A review of evidence and a set of propositions for up-scaling[R]// Development Policies, Fondation pour les études et recherches sur le développement international, Working Paper N°111, 2014, Paris, France.
- [86] Anton J, Cattaneo A, Kimura S, et al. Agricultural risk management policies under climate uncertainty[J]. *Global Environmental Change*, 2013, 23(6): 1726—1736.
- [87] Minville M, Brissette F, Leconte R. Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 358(1/2): 70—83.
- [88] 段青云, 夏军, 缪驰远, 等. 全球气候模式中气候变化预测预估的不确定性[J]. *自然杂志*, 2016, 38(3): 182—188.
- Duan Qingyun, Xia Jun, Miao Chiyuan, et al. The uncertainty in climate change projections by global climate models[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2016, 38(3): 182—188. (in Chinese with English abstract)
- [89] Watanabe T, Nagano T. Integrated assessment of impacts of climate change on basin hydrology and water use in agriculture[C]// Paper No. 24 of Question 58.1 of the 22nd ICID Congress, 2014, Gwangju, Korea.
- [90] 魏一鸣, 米志付, 张皓. 气候变化综合评估模型研究新进展[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(8): 1905—1915.
- Wei Yimin, Mi Zhiful, Zhang Hao. Progress of integrated assessment models for climate policy[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2013, 33(8): 1905—1915. (in Chinese with English abstract)

Impacts of climate change on agricultural water management and its coping strategies

Xu Di, Li Yinong, Gong Shihong, Zhang Baozhong*

(1. *National Key Laboratory of Basin Water Cycle Simulation and Control, China Institute of Water Resources & Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research, Beijing 100048, China*)

Abstract: Climate change has led to an increase in globally average annual temperature, changes in regional precipitation patterns, changes in river characteristics, and frequently occurrence of extreme climatic events, and so on, showing its inevitable influence to agricultural water resources and agricultural production worldwide. The events above pose great challenge to the sustainable development of agriculture and modern agricultural water management in the world, especially in the arid and semi-arid regions. This paper introduced the occurrence of extreme weather events under climate change, mainly pointing out the adverse effects of drought and flooding on the global agricultural production, and evaluated the effects of climate change on the availability and quality of agricultural water resources and the water requirements for crops caused by climate change, which included the changing patterns of temperature and precipitation, as well as the frequency and extent of extreme weather events. The impacts of climate change on the surface water, groundwater, snow and glaciers, the causes for the changes of water quality, and the differences in crop water requirements across the globe were highlighted. Besides, the paper also explained the effects of climate change on farming and animal husbandry, mainly referring to the irrigation water, available cultivated land area, crop production, livestock water demands and herbage production, caused by water elements. And then reviewed the coping strategies to agriculture water management under the circumstance of climate change, including selection of coping strategies and performance evaluation of agricultural water management, analysis of adaptation-mitigation trade off, and climate risk management mechanism. Based on the research of climate change on agricultural water management and its coping strategies, the paper set forth to the following suggestions. Firstly, scale effect and uncertainties in the influence of climate change to agricultural water management need to be considered, thereby proper strategy and measure should be made and selected to suit the local conditions. Secondly, comprehensive evaluation method based on the integration of models need to be established actively, and thereby the accuracy and reliability of the comprehensive prediction and evaluation results should be improved profitably. Thirdly, analysis of adaptation-mitigation trade off and coordinate benefit of agricultural water management strategies need to be deeply strengthened, thereby the effect of the strategies should be promoted. Finally, the authors of paper suggested that domestic scholars should strengthen their research efforts to the comprehensive evaluation method and effect analysis, and pointed out that the appropriate selection and integration of various strategies with various factors, such as engineering, agronomy, management, policy and so on, was an important and reliable way to deal with the impact of global climate change.

Keywords: climate change; agriculture; water resources; agricultural water management; agricultural production; coping strategies; adaptation; mitigation