

DOI: 10.5846/stxb201505241039

刘涛, 周广胜, 谭凯炎, 周莉. 华北地区冬小麦灌溉制度及其环境效应研究进展. 生态学报, 2016, 36(19): 5979-5986.

Liu T, Zhou G S, Tan K Y, Zhou L. Review on research of irrigation regime and its environmental effect in winter wheat field of North China Plain. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19): 5979-5986.

## 华北地区冬小麦灌溉制度及其环境效应研究进展

刘 涛, 周广胜, 谭凯炎, 周 莉\*

中国气象科学研究院, 北京 100081

**摘要:** 充分利用有限的灌溉水资源确保冬小麦安全生产是华北地区冬小麦稳产高产面临的严峻挑战, 解决这一问题的关键在于如何基于环境效应科学地进行灌溉管理。综述了国内外有关冬小麦的灌溉管理制度, 即充分灌溉与非充分灌溉管理制度以及冬小麦关键灌溉期的环境效应, 在此基础上提出了华北地区冬小麦科学灌溉拟重点关注的研究任务: (1) 冬小麦生长发育需水时间与需水量的控制机制研究; (2) 冬小麦干旱发生发展过程与致灾临界气象条件研究; (3) 气候变化背景下极端干旱事件的冬小麦脆弱性诊断与适应性管理, 以为华北地区冬小麦安全生产措施制定提供依据。

**关键词:** 冬小麦; 华北; 灌溉; 环境效应

## Review on research of irrigation regime and its environmental effect in winter wheat field of North China Plain

LIU Tao, ZHOU Guangsheng, TAN Kaiyan, ZHOU Li\*

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

**Abstract:** The North China Plain known as “China granary” is the main winter wheat producing areas. However, it has been frequently and seriously affected by drought because of monsoon climate, especially winter drought and spring drought have been frequent and serious during recent decades. Making full use of the limited irrigation water resources to guarantee the safety of winter wheat production is a serious challenge for ensuring stable and high yield of winter wheat in the North China Plain. The key to solving this problem is how to make a scientific irrigation management based on the environmental effects. Although many studies have been done on drought and water-saving irrigation systems of winter wheat, there were less comprehensive commentary recently and still a lot of insufficiencies on interactive combinations of irrigation time, irrigation frequency and the environment effects, which have been based on overwintering water and the first springing water, especially for the adverse effects of current climate change and water shortage. This paper reviews the latest researches at home and abroad on the irrigation management systems (sufficient irrigation and deficit irrigation) and the environmental effects of irrigation in the key irrigation periods of winter wheat in the North China Plain. The responses of various developmental stages and physiological processes of winter wheat to water deficit are different. In particular developmental stages, the water deficit is not entirely negative effects, and it might have some adaptive effects on moderating water deficit to a certain extent. Deficit irrigation is through the artificial stage regulation to form state water budget at different developmental stages of winter wheat. Based on the theory of vulnerability and adaptability to drought, winter wheat will adjust its distribution pattern of assimilation to various organs. This process includes the impacts on many aspects: such as the development stages, weather conditions, the soil's physical, chemical and biological properties, and

**基金项目:** 公益性行业专项资助项目 (GYHY201106030); 国家自然科学基金重点项目 (41330531)

**收稿日期:** 2015-05-24; **网络出版日期:** 2016-01-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhouli@cma.cma.gov.cn

winter wheat yield. Eventually winter wheat will achieve the change of passive responses on water deficit. The purpose is to improve the conversion efficiency at each stages of irrigation water- soil water- plant water- photosynthesis- biomass- yield. The key to ensure stable and high yield of winter wheat in the North China Plain with deficit irrigation is to determine the critical water demand period under different environmental conditions. Overwintering water (usually is replaced by sowing water or in advance of reviving water), the first spring water and their irrigation interactive combination will make different environment effects, and affect the time and frequency of the other irrigation waters, various stages of growth and development of winter wheat, especially in reviving and the late growth. Finally the future research tasks of winter wheat scientific irrigation in the North China Plain are proposed, including (1) Control mechanisms on temporal and amount dynamics of water demand for the growth and development of winter wheat; (2) Processes of occurrence and development of winter wheat drought and its critical meteorological conditions for causing disasters; (3) Vulnerability diagnosis and adaptive management of winter wheat responding to extreme drought events under climate change. These researches would provide reference for the development of measures to safety production of winter wheat in the North China Plain.

**Key Words:** winter wheat; North China Plain; irrigation; environmental effect

被称为“中国粮仓”的华北地区,是中国冬小麦(*Triticum aestivum* L.)的主产区。该地区冬小麦主要分布在太行山以东、淮河以北、长城以南,产量和种植面积约占中国小麦产量和种植面积的 50%左右<sup>[1-2]</sup>,在国家粮食安全中具有举足轻重的作用。但是,该地区冬小麦生育期内的降水量仅 100—300 mm<sup>[1, 3]</sup>,多数地区不足 250 mm,远小于同期 400—500 mm 的需水量<sup>[4-6]</sup>。研究表明,基于播前底墒和自然降水仅能满足冬小麦需水量的 60%—70%,缺水率 30%以上的年份出现概率达 60%左右<sup>[7]</sup>。华北地区受季风气候影响,年降水量主要集中在夏季,春季降水较少。受全球气候变暖影响,近年来华北地区干旱发生更为频繁,冬旱和春旱形势十分严峻<sup>[1, 8]</sup>。因此,如何科学地进行灌溉,充分利用有限的灌溉水资源保证冬小麦越冬后正常返青及后期生长,是确保华北冬小麦安全生产和稳产高产面临的严峻挑战<sup>[4]</sup>。解决这一问题的关键在于科学处理好冬小麦冬前与春季第 1 水的组合灌溉时间。目前关于这两水的灌溉时间及其连锁效应对华北冬小麦的影响研究十分匮乏。

为此,本文试图综述国内外有关冬小麦灌溉及其环境效应的最近研究进展,探讨未来拟重点关注的研究任务,以为华北地区冬小麦稳产高产及科学灌溉提供依据。

## 1 灌溉制度

传统灌溉理论认为,农田灌溉以作物获得最大单产为目标<sup>[9]</sup>。作物需水量的确定、灌溉制度的规划和灌溉用水量的推算等均是建立在农田充分灌溉的基础上,即确保灌溉的“及时足量”,以期达到丰水高产。目前,广泛沿用的灌溉制度和灌溉模型大多以充分灌溉为前提<sup>[10]</sup>。充分灌溉是在作物生育期完全按作物高产需要水量实施的灌溉方式。

据研究,华北地区超过 70%的灌溉水资源被用于冬小麦的生产灌溉,灌溉用水主要来自超过 30 m 或 40 m 的深层地下水<sup>[11]</sup>。由于该地区一直广泛采用以畦灌为主的传统地面灌溉方法,农作物水分利用效率较低<sup>[12-14]</sup>,进一步加剧了华北地区水资源的短缺。随着工农业生产的快速发展和水资源供需矛盾的日益突出,为避免地下水资源的过度开发、确保有限灌溉水资源下可持续的作物高产,迫切需要优化华北冬小麦已有的灌溉管理制度。正是在这一背景下,非充分灌溉理论应运而生。非充分灌溉(DI)指通过人为在作物生长需水的非关键期采取减少灌溉或不灌溉的节水措施<sup>[15-16]</sup>,实现实际蒸散量小于潜在蒸散量的灌溉(EDI)<sup>[17]</sup>,包括调亏灌溉(RDI)<sup>[18]</sup>、局部灌溉和分根交替灌溉(APRI)<sup>[19]</sup>等方式。非充分灌溉是利用作物自身的抗旱节水生理特点,在有限水量投入前提下寻求作物在整个生育期内最佳的灌水时间、灌水次数和灌水定额组合,提高灌溉水分利用效率,减少营养生长水分消耗,获得最大经济产量<sup>[20-21]</sup>。华北地区田间试验研究表明,充分灌

溉处理下冬小麦的水分利用效率最低,且没有因过量灌溉得到更高产量;冬小麦达到最高产量所需灌溉量为 300 mm,而对应的蒸发散(ET)为 426 mm<sup>[22]</sup>。华北冬小麦在非充分灌溉处理下的产量最高<sup>[23]</sup>;随着冬小麦灌溉量的增加,灌溉水分利用率(IWUE)显著下降<sup>[24]</sup>。冬小麦生育期内一定程度的水分亏缺不仅不会导致产量降低,甚至可能提高产量<sup>[25-26]</sup>。因此,确保冬小麦稳产高产的关键是如何将有限的灌溉水资源科学地分配到冬小麦不同的生育阶段,解决需水关键期的水分需要,使冬小麦因水分胁迫受到的影响降至最低。

冬小麦灌溉制度的研究大多基于农田水分平衡原理<sup>[27-28]</sup>、充分灌溉理论<sup>[22,29]</sup>、非充分灌溉理论<sup>[10,30]</sup>、亏缺灌溉理论<sup>[18,31-32]</sup>、补充灌溉理论<sup>[33-34]</sup>和模型模拟<sup>[23,35-36]</sup>。华北地区冬小麦生产实践中普遍采用全生育期灌溉 4—5 次水的灌溉制度<sup>[7,23]</sup>,分冬前灌溉和春季灌溉。冬前灌溉一般包括底墒水和越冬水灌溉,春季灌溉通常有返青水、起身水、拔节水、孕穗水、抽穗水、开花水和灌浆水灌溉。其中,底墒水必不可少。由于缺少灌溉时间指标,变动最大的是越冬水(简称冬灌)和春季第 1 次灌水(简称春季第 1 水),进而影响后续的灌水时间。李宝萍等<sup>[37]</sup>认为,越冬灌溉是保证小麦安全越冬的重要措施,但实际上越冬水常被底墒水或提前灌溉返青水代替。受制于地区差异和灌溉习惯等因素,春季第 1 水的灌溉时间通常横跨越冬结束至拔节期。因此,春季第 1 水对冬小麦生长发育及其稳产高产具有特别重要的意义。

## 2 灌溉环境效应

冬小麦各发育阶段和生理过程对水分亏缺的响应不同。在特定的发育时期,水分亏缺并非完全是负效应,冬小麦对适度的水分胁迫具有一定的适应性效应<sup>[38]</sup>,一定的水分胁迫对冬小麦的品质和产量提高也存在一定的促进作用<sup>[25-26]</sup>。基于缺水条件下华北冬小麦的生理生化过程响应,非充分灌溉通过人为调控阶段性的灌溉水分,形成不同发育阶段的水分盈亏状态,利用冬小麦自身对干旱的脆弱性和适应性,调节其光合产物向不同组织器官分配的倾斜,此过程中包括了对冬小麦生育期、气象条件、土壤物理、化学和生物学性质、作物生长状况及产量等诸多方面的影响<sup>[39]</sup>。通过人为调控最终可实现冬小麦对水分亏缺的被动响应向主动调控的转变,提高灌溉水-土壤水-作物水-光合作用-生物量-产量各环节的转化效率,达到节水增产的目的<sup>[38]</sup>。而实现冬小麦非充分灌溉增产的关键就是要确定不同环境条件下的关键需水时期。根据当前华北冬小麦的灌溉制度,将冬小麦的发育进程分为冬前和春季两个生长阶段,冬灌和春季第 1 水灌溉组合形成的环境效应将对春季其他灌溉时间的选择以及对经济产量的影响具有至关重要的作用。

### 2.1 冬灌环境效应

冬小麦出苗至越冬前这段时间是其生根分蘖、形成壮苗,为翌年夺取高产打好基础的关键发育阶段<sup>[40]</sup>。华北地区受西伯利亚寒流和西北季风影响,冬季寒冷且时间较长,加之秋冬季降水偏少,冬旱时有发生,且伴随温度过低,容易造成干冻<sup>[41]</sup>。冬小麦在越冬前适时灌溉能起到储水保墒、早春防旱作用,是保证冬小麦安全越冬的重要措施。研究发现,冬灌后能够形成良好的土壤水分环境,有效缓解入冬后降水不足造成的旱情;同时可提高土壤热容量,缓和地温的剧烈变化,弥实土壤缝隙,防止麦苗遭受冻害;而且由于冬灌使得土壤踏实,可确保冬小麦根系下扎,避免玉米秸秆还田后旋耕播种造成的土壤悬虚。冬灌的水分以结晶状态存于土壤中,为来年冬小麦返青提供水分,实现了冬水春用,有利于产量增加<sup>[41-42]</sup>。田间试验表明,冬灌可以减缓冬小麦夜间土壤温度的降低效应,增强冬小麦的抗寒能力;冬灌的蓄水保墒作用明显,能够推迟春季第 1 水的灌溉时间<sup>[42]</sup>。但是,不同的降水年型应采取不同的灌溉措施,干旱年越冬灌溉能促进根系在表层土壤的增加,而平水年则可以免灌越冬水<sup>[43]</sup>。

尽管冬灌是北方冬麦区行之有效的增产措施之一,但如果冬灌时的气温、墒情、地温和苗情等不适宜,轻则抑制冬小麦分蘖生长,造成叶面干尖,重则导致麦苗死亡,给生产带来危害<sup>[37]</sup>。研究表明,冬小麦底墒较好时可以不灌溉越冬水<sup>[7,44]</sup>。一般认为,冬小麦播种前底墒充足,且土壤含水量(0—50 cm)不低于 60%时,可以免灌越冬水<sup>[45]</sup>。足墒播种能够使冬小麦更快出苗、及早分蘖,有利于根系下伸,是获得冬前壮苗和丰产群体的重要措施;同时,足墒播种还可提高冬小麦的土壤水分利用率<sup>[46]</sup>。冬小麦生长季大量的水分消耗来自于



底墒和其他灌溉补充,特别是在干旱年份,底墒是否充足对冬小麦的生长发育和最终产量均有重要影响<sup>[47]</sup>。因此,充足的底墒可以弥补无冬灌下冬小麦春季土壤水分的不足。

冬小麦冬灌的适宜时间应根据气温、苗情和土壤墒情确定。目前,关于冬小麦的冬灌时间主要来自生产实践的经验。研究发现,土壤相对含水量在 60% 以下时可能对冬小麦造成干冻,应进行越冬灌溉<sup>[45,48]</sup>。通常在 11 月下旬至 12 月上旬越冬期来临前,选择在晴天 9:00—17:00 期间进行。同时,为避免冻害,一般在日平均气温降至 5—7 °C 时开始冬灌,在 3 °C 左右时停止冬灌;土壤开始“夜冻昼消”时为最佳冬灌时间<sup>[41]</sup>。冬灌过早,由于气温高、蒸发大,冬小麦入冬时失墒过多,起不到调节地温的作用;冬灌过晚,则由于土壤冻结,水分不易下渗,易造成麦根“凌抬”。冬灌的灌水量不宜过大,通常以 40—50 mm 为宜,忌大水漫灌,以当日渗完的灌溉量为宜,避免地面积水结冰造成麦苗冻害<sup>[37,41]</sup>。

## 2.2 春季灌溉环境效应

农业气象学认为,华北地区的春季为 3—5 月份,此期间的降水量仅占全年降水总量的 10%—15%<sup>[2]</sup>。华北地区春季气温回升快,日照充足,空气干燥,多大风天气,导致蒸发强烈,土壤失墒很快。春季常年蒸发量远大于降水量,土壤水分亏缺严重,发生春旱的几率在 70% 左右<sup>[2]</sup>,且干旱通常发生在冬小麦的需水关键期。春季干旱发生频率高、范围大、程度重已经成为华北麦区的突出特点。如果秋、冬两季的降水很少,往往易形成秋、冬、春季的连续干旱,将严重影响冬小麦的返青及其生长发育。同时,春季也正好是华北冬小麦返青至乳熟期,该时期冬小麦生长旺盛,需水量大,是产量形成的关键时期。因此,春季第 1 水灌溉对冬小麦稳产高产具有非常重要的保障作用。春季第 1 水灌溉除满足冬小麦的生理需水外,还具有调节土壤温度和空气湿度、控制土壤养分分解和利用等作用,有利于冬小麦生长发育形成合理的作物群体结构<sup>[49]</sup>。

由于冬小麦春季第 1 水灌溉与冬前和越冬期的土壤水分和气象条件密切相关,因此冬小麦春季第 1 水灌溉时间受冬灌的影响。冬灌在一定程度上弥补了春季降水的不足,起到了隔年墒的作用,为冬小麦及时返青提供了水分保障<sup>[7,44]</sup>。研究发现,在冬小麦春季需水关键阶段,由灌溉时间差异造成的产量损失,很难由后期的水分补偿得到恢复<sup>[50]</sup>。因此,确保春季水分敏感期的水分供应是冬小麦丰产的关键。

返青后期至起身期,冬小麦生长所需水量迅速增加,加之春季气温回升较快,蒸发随之加强,而自然降水补充较少,导致冬小麦土壤底墒开始迅速消耗<sup>[7]</sup>。冬小麦拔节前营养生长期较长,水肥需求量较低,且具有较强的补偿效应<sup>[51]</sup>。适度的水分亏缺对冬小麦产量的影响并不明显,甚至有利于根系的发育和水分利用率的提高和增强后期的耐旱抗旱能力<sup>[32,47,52]</sup>。冬小麦进入拔节期,营养器官生长旺盛,同时生殖器官生长加速,此时期持续的水分亏缺会造成干物质更多的向支持生长的生物量分配,导致穗部占比相对减少<sup>[53]</sup>。如果春季第 1 水灌溉推迟至孕穗期(从四分体至花粉粒形成过程,耗水强度大)进行,不能保证冬小麦在水分临界期供水及时,一旦持续干旱程度超过生理阈值,将严重影响花粉粒发育,使小花败育,穗粒数下降,导致大幅减产<sup>[24,54]</sup>。在冬灌前提下,返青至拔节期前控水对冬小麦具有一定的增产作用<sup>[50]</sup>。研究发现,与其他生育阶段的干旱影响相比,拔节期干旱导致的冬小麦减产幅度最大(达 19.8%)<sup>[53]</sup>。拔节期是冬小麦弱小分蘖的快速死亡期,适时适量的灌溉可以缓解水分亏缺,减少分蘖死亡,提高总穗数<sup>[53]</sup>。冬灌条件下,华北冬小麦春季明显的土壤水分亏缺出现在孕穗期<sup>[24]</sup>。拔节后的冬小麦主根区土壤处于干旱状态,拔节-成熟期是冬小麦耗水的主要时期,占总耗水比例超过 60%,其中拔节-开花期是需水的生理生态临界期<sup>[55]</sup>。冬小麦在拔节-开花期的水分亏缺导致的减产幅度最大<sup>[33]</sup>,保证拔节-灌浆初期的水分供应能够显著提高水分利用效率<sup>[56]</sup>,实现高产稳产。由此可见,拔节期是冬小麦春季需水的第一个关键时间节点,适当推迟春季第 1 水的灌溉时间至拔节期可以实现对冬小麦生育进程的调节,提高水分利用率,不仅有助于节水还利于冬小麦增产。

华北冬季漫长,无冬灌条件下冬旱发生概率较高,而充足的底墒可以保证冬小麦在无冬灌条件下安全越冬<sup>[57]</sup>。研究表明,足墒且冬季气象干旱发生条件下,仍可以推迟春季第 1 水至拔节期灌溉,不仅能降低无效耗水,还可以提高冬小麦的水分利用效率<sup>[24,58]</sup>。即使没有冬前灌溉,冬小麦播前或播种时充足的水分供应能够促使冬小麦根系下扎延展,逐渐适应干旱胁迫<sup>[43,59]</sup>;至拔节期时,冬小麦主要依靠根系吸收和利用较深层

的土壤水分维持生长发育,且拔节开始后,冬小麦植株快速生长,叶面积指数迅速增加,导致深层土壤水供给冬小麦棵间蒸发较小,水分利用效率很高<sup>[60]</sup>。同时,冬小麦对水分胁迫的反映往往存在滞后效应<sup>[32]</sup>,从而增加了春季第1水灌溉向后推迟的时间。Shao等<sup>[43]</sup>研究发现,华北地区冬小麦在湿润年份达到最大产量的灌溉组合中没有越冬水灌溉,相同灌溉量条件下有冬灌比无冬灌的冬小麦水分利用效率显著降低;华北冬小麦的越冬灌溉应该根据不同的土壤水分条件被早春或者晚春灌溉所替代。

虽然无冬灌条件下可以将冬小麦春季第1水推迟至拔节期,但也存在一定的减产风险。当遭遇暖冬或者春季气温迅速升高时,土壤水分蒸发强烈,底墒水被迅速消耗殆尽,使得冬小麦根系没有足够的时间伸长发展,导致根系较浅,难以吸收深层的土壤水分<sup>[23,61]</sup>,迫切需要通过灌溉来保证此时已逐渐进入需水较旺盛时期冬小麦的需水要求。研究表明,无冬灌会对冬小麦返青期的生长造成不利影响<sup>[43]</sup>;无冬灌条件下冬小麦春季延迟灌溉会导致叶面积和分蘖数的明显减少<sup>[24]</sup>。干旱发生的程度和时段不同对冬小麦减产率的影响也不相同,多个发育期连续干旱导致的冬小麦的减产倾向往往大于单一发育期干旱相叠加的减产倾向效应<sup>[62]</sup>。冬小麦需水关键期是其水分生理特性和气象条件综合作用的结果,因此,无冬灌条件下春季第1水的灌溉时间应充分考虑早春气象条件、土壤墒情和冬小麦苗情等变化,做到因土制宜、因墒制宜和因苗制宜。

### 3 研究展望

自20世纪60年代以来,国内外已经建立了大量的优化冬小麦灌溉制度的指标,包括灌溉土壤指标(土壤水分上下限、土壤水势和湿润层深度等)、灌水指标(灌水定额和灌水周期等)和作物指标(叶水势和作物冠层温度等)。同时,作物模型已被广泛用于评价作物对环境胁迫的响应,为确定灌溉时间和灌溉量提供了科学依据。目前主要的灌溉模型是基于作物对灌溉下各种环境因素(光、CO<sub>2</sub>、水分和温度等)的生理反应,主要包括CERES模型<sup>[63]</sup>,EPIC模型<sup>[64]</sup>,WOFOST模型<sup>[65]</sup>,Jessen模型<sup>[66]</sup>,DSSAT模型<sup>[36,67]</sup>,APSIM模型<sup>[68]</sup>,AquaCrop模型<sup>[69-70]</sup>,CROPWAT模型<sup>[35]</sup>,ALMANAC模型<sup>[71]</sup>,SVAT模型<sup>[72]</sup>,VIP(Vegetation Interface Processes)模型<sup>[72]</sup>和RZWQM(the Root Zone Water Quality Model)<sup>[73]</sup>等。卫星遥感技术和光谱研究也逐渐被应用于监测冠层温度和作物水分状况,进而通过模型评估和模拟大面积或区域的灌溉时间、灌溉量、灌溉次数的组合模式。然而,现有的灌溉理论还受到研究的时间和空间尺度限制,许多研究结果还不能综合反映不同地区的作物品种、气象条件和人为干预等因素的影响,通常仅考虑其中一个或几个因素的影响,具有一定的应用范围和局限性。有关华北冬小麦各季节灌溉始点与灌溉上下限和产量相结合的研究依然相对缺乏,迄今还没有建立起一个可用于推广的作物对灌溉时间选择的业务服务指标;模型与各种干旱指标体系之间仍缺乏系统与长期的验证,因而制约着解决华北地区用水危机和预防干旱对农业不良影响的科学政策与措施的制定。为此,迫切需要开展冬小麦灌溉时间与灌溉量评价指标体系的建设和研究,主要包括以下研究任务:

(1) 冬小麦生长发育需水时间与需水量的控制机制研究 冬灌与春季第1水灌溉是解决冬小麦生长发育关键阶段需水的重要手段,直接影响到冬小麦的产量。冬灌的时间和灌溉量不仅与冬灌时的气温、墒情、地温和苗情等有关,还将影响到春季第1水的灌溉时间与灌溉量。因此,冬小麦灌溉时间与灌溉量的确定应该围绕冬小麦的丰产与最大限度的节水目标,综合考虑冬小麦生长发育的整个过程、环境条件(包括气象条件与土壤墒情等条件)及其田间种植管理技术(包括播种技术、耕作方式和灌溉条件等),进一步量化不同时期不同干旱程度对冬小麦生长、生理过程、产量和水分利用效率的影响,从而根据冬小麦动态水分亏缺状况制定灌溉时间与灌溉量。

(2) 冬小麦干旱发生发展过程与致灾临界气象条件研究 针对华北地区冬小麦面临的干旱强度与干旱过程持续时间,研究冬小麦不同生育阶段干旱发生与发展过程及其光合生理生态、形态与功能变化机制;分析并确定冬小麦的生长对于干旱响应的敏感性指标;发展反映大气干燥程度、土壤供水能力和作物耐旱能力综合作用的冬小麦水分亏缺指数及其模拟模型,揭示冬小麦对于干旱发生发展过程的响应机制与致灾临界气象条件,实现冬小麦干旱发生发展动态监测和受旱程度的准确评估,有针对性地确定灌溉时间、灌溉量、灌溉次数

组合模式,为探讨冬小麦生产应对干旱的对策措施、确保冬小麦的生产安全提供理论依据。

(3) 气候变化背景下极端干旱事件的冬小麦脆弱性诊断与适应性管理 气候变化致华北地区干旱频繁发生,冬旱和春旱形势十分严峻,严重威胁冬小麦的种植分布和产量构成<sup>[74]</sup>。针对气候变化的区域差异、极端干旱事件和冬小麦对稳产高产的灌溉需求,研究气候变化及极端干旱事件影响下的冬小麦敏感性指标及其控制因子,明确冬小麦不同发育期对不同干旱强度与持续时间的脆弱性阈值,研发不同时空尺度冬小麦对干旱脆弱性的诊断技术,因地制宜发展针对脆弱冬小麦农田生态系统的适应灌溉技术(包括喷灌、滴灌、渗灌、膜上灌、膜下灌、分根灌溉等)和管理措施(包括建设适用灌溉基础设施、发展现代集水农业等),加大对现代化节水灌溉管理技术与冬小麦生长和产量关系的研究力度,并进行示范和推广,为冬小麦安全生产提供决策依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一). 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895.
- [2] 吕厚荃. 中国主要农区重大农业气象灾害演变及其影响评估. 北京: 气象出版社, 2011: 6-153.
- [3] Li Y. The Northern China needs a water-saving agriculture. Irrigation and Drainage, 1993, 12: 10-20.
- [4] 中国农业科学院. 中国农业气象学. 北京: 中国农业出版社, 1999: 540-557.
- [5] 胡玮, 严昌荣, 李迎春, 周元花, 刘勤. 冀京津冬小麦灌溉需水量时空变化特征. 中国农业气象, 2013, 34(6): 648-654.
- [6] Li H J, Zheng L, Lei Y P, Li C Q, Liu Z J, Zhang S W. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology. Agricultural Water Management, 2008, 95(11): 1271-1278.
- [7] 薛昌颖, 霍治国, 李世奎, 卢志光, 毛飞, 庄立伟, 王素艳. 灌溉降低华北冬小麦干旱减产的风险评估研究. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 131-136.
- [8] 矫梅燕, 周广胜, 陈振林. 农业应对气候变化蓝皮书: 气候变化对中国农业影响评估报告(No.1). 北京: 社会科学文献出版社, 2014: 61-149.
- [9] 汪志农. 灌溉排水工程学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] Araya A, Habtu S, Hadgu K M, Kebede A, Dejene T. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). Agricultural Water Management, 2010, 97(11): 1838-1846.
- [11] Yuan Z J, Shen Y J. Estimation of agricultural water consumption from meteorological and yield data: a case study of Hebei, North China. PLoS One, 2013, 8(3): e58685.
- [12] Wang H X, Liu C M, Zhang L. Water-saving agriculture in China: an overview. Advances in Agronomy, 2002, 75: 135-171.
- [13] Deng X P, Shan L, Zhang H P, Turener N C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 23-40.
- [14] Shao L W, Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Wang Z H. Effects of irrigation frequency under limited irrigation on root water uptake, yield and water use efficiency of winter wheat. Irrigation and Drainage, 2009, 58(4): 393-405.
- [15] 姚邦松, 董成森. 作物非充分灌溉研究进展. 湖南农业科学, 2003, (4): 42-44.
- [16] Shang S H, Mao X M. Application of a simulation based optimization model for winter wheat irrigation scheduling in north China. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 314-322.
- [17] 康绍忠, 蔡焕杰. 农业水管理学. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [18] Fereres E, Soriano M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(2): 147-159.
- [19] 杨静, 王玉萍, 王群, 方小宇, 张和喜. 非充分灌溉的研究进展及展望. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3301-3303.
- [20] Fang Q X, Chen Y H, Yu Q, Ouyang Z, Li Q Q, Yu S Z. Much improved irrigation use efficiency in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(10): 1517-1526.
- [21] Ali M H, Talukder M S U. Increasing water productivity in crop production—a synthesis. Agricultural Water Management, 2008, 95(11): 1201-1213.
- [22] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, Shen Y J, Zhang Y Q. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the north China plain. Agricultural Water Management, 2006, 85(1/2): 211-218.
- [23] Iqbal M A, Shen Y J, Stricevic R, Pei H W, Sun H Y, Amiri E, Penas A, Rio S D. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management, 2014, 135: 61-72.
- [24] Li J M, Inanaga S, Li Z H, Eneji A E. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain. Agricultural Water Management,



- 2005, 76(1): 8-23.
- [25] 李建民, 王璞, 周殿玺. 冬小麦节水高产栽培技术及其生理基础的研究 // 冬小麦水肥高效利用栽培技术原理. 北京: 中国农业大学出版社, 2000.
- [26] 杨晓亚, 于振文, 许振柱. 灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和氮素积累分配的影响. 生态学报, 2009, 29(2): 846-853.
- [27] Pleban S, Israeli I. Improved approach to irrigation scheduling programs. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1989, 115(4): 577-587.
- [28] Smout I K, Gorantiwar S D. Multilevel approach for optimizing land and water resources and irrigation deliveries for tertiary units in large irrigation schemes. I: method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2005, 131(3): 254-263.
- [29] Wang X X, Wang Q J, Fan J, Fu Q P. Evaluation of the AquaCrop model for simulating the impact of water deficits and different irrigation regimes on the biomass and yield of winter wheat grown on China's Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 2013, 129: 95-104.
- [30] Zhang B C, Li F M, Huang G B, Cheng Z Y, Zhang Y H. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an arid area. *Agricultural Water Management*, 2006, 79(1): 28-42.
- [31] 孟兆江, 贾大林, 刘安能, 庞鸿宾, 王和洲, 陈金平. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2003, 19(4): 66-69.
- [32] 杨静敬, 路振广, 潘国强, 和刚. 亏缺灌溉对冬小麦耗水规律及产量的影响. 节水灌溉, 2013, (4): 8-11.
- [33] Zhang H, Wang X, You M, Liu C. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Irrigation Science*, 1999, 19(1): 37-45.
- [34] 陈晓远, 罗远培, 李韵珠. 灌浆期复水对冬小麦根、冠生长及其相互关系的影响研究. 干旱地区农业研究, 2003, 21(4): 73-77.
- [35] 宋春雨, 韩晓增, 于莉, 王守宇, 金彩霞. CROPWAT 模型在调亏灌溉研究中的应用. 农业系统科学与综合研究, 2003, 19(3): 214-217.
- [36] 王文佳, 冯浩. 基于 CROPWAT-DSSAT 关中地区冬小麦需水规律及灌溉制度研究. 中国生态农业学报, 2012, 20(6): 795-802.
- [37] 李宝萍, 刘增进, 康迎宾. 冬小麦最优灌溉制度的研究. 华北水利水电学院学报, 1999, 20(3): 9-12.
- [38] 彭世彰, 徐俊增, 丁加丽, 缴锡云. 节水灌溉与控制排水理论及其农田生态效应研究. 水利学报, 2007, (S1): 504-510.
- [39] 齐学斌, 庞鸿宾. 节水灌溉的环境效应研究现状及研究重点. 农业工程学报, 2000, 16(4): 37-40.
- [40] 于振文, 田奇卓, 潘庆民, 岳寿松, 王东, 段藏禄, 段玲玲, 王志军, 牛运生. 黄淮海区冬小麦超高产栽培的理论与实践. 作物学报, 2002, 28(5): 577-585.
- [41] 李水莲, 张少豪. 小麦冬前管理技术要点. 安徽农学通报, 2011, 17(22): 102-102, 108-108.
- [42] 刘秀位, 苗文芳, 王艳哲, 孙宏勇, 邵立威, 陈素英, 张喜英. 冬前不同管理措施对土壤温度和冬小麦早期生长的影响. 中国生态农业学报, 2012, 20(9): 1135-1141.
- [43] Shao L M, Zhang X Y, Sun H Y, Chen S Y, Wang Y M. Yield and water use response of winter wheat to winter irrigation in the North China Plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 66(2): 104-113.
- [44] 安顺清, 刘庚山, 吕厚荃, 林日暖, 白月明, 郭安红. 冬小麦底墒供水特征研究. 应用气象学报, 2000, (S1): 119-127.
- [45] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 太行山前平原冬小麦优化灌溉制度的研究. 水利学报, 2001, (1): 90-95.
- [46] 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 吕厚荃, 白月明, 温民. 底墒对小麦根冠生长及土壤水分利用的影响. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 149-154.
- [47] 李红梅, 李志宏, 韩湘玲. 冬小麦降水年型与补水灌溉动态管理. 灌溉排水, 2001, 20(1): 60-64.
- [48] 郭艳波, 冯浩, 吴普特. 作物非充分灌溉决策指标研究进展. 中国农学通报, 2007, 23(8): 520-525.
- [49] 周德超. 从越冬后小麦的生长、发育和气候条件谈谈北方冬小麦春季灌溉的重要性. 生物学通报, 1962, (1): 20-21.
- [50] 张建军, 唐小明, 党翼. 灌水量及其分配方式对冬小麦水分利用效率、光合特性和产量的影响. 麦类作物学报, 2008, 28(1): 85-90.
- [51] 赵丽英, 邓西平, 山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述. 应用生态学报, 2004, 15(3): 523-526.
- [52] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(9): 1275-1284.
- [53] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 刘祖贵, 李晓东. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究. 灌溉排水学报, 2006, 25(2): 20-23.
- [54] 许旭旦, 诸涵素, 杨德兴, 庞向宇, 朱保本, 王德喜. 叶面喷施腐殖酸对小麦临界期干旱的生理调节作用的初步研究. 植物生理学报, 1983, 9(4): 367-374.
- [55] 张兴娟, 薛绪掌, 郭文忠, 李亮, 王志敏. 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究. 生态学报, 2014, 34(10): 2567-2580.
- [56] 王家仁, 郭风洪, 孙茂真, 崔若亮, 郭春荣, 边萍, 付光永. 冬小麦调亏灌溉节水高效技术指标试验初报. 灌溉排水学报, 2004, 23(1): 36-40.
- [57] 张其鲁, 魏秀华, 姜官恒, 郑以宏, 黄迎光, 张成. 小麦不同灌水组合模式优化研究. 山东农业科学, 2013, 45(8): 58-60.
- [58] 张胜全, 方保停, 王志敏, 周顺利, 张英华. 春灌模式对晚播冬小麦水分利用及产量形成的影响. 生态学报, 2009, 29(4): 2035-2044.
- [59] 张忠学, 于贵瑞. 不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2003, 22(2): 1-4.

- [60] 梁文清, 蔡焕杰, 王健. 冬小麦田间蒸发蒸腾与棵间蒸发规律研究. 灌溉排水学报, 2011, 30(6): 93-96.
- [61] 吴忠东, 王全九. 阶段性缺水对冬小麦耗水特性和叶面积指数的影响. 农业工程学报, 2010, 26(10): 63-68.
- [62] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 杨晓光, 王靖. 不同发育期干旱对冬小麦灌浆和产量影响的模拟. 中国生态农业学报. 2012, 20(9): 1158-1165.
- [63] Jones C A, Kiniry J R. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development. Texas: Texas A&M University Press, 1986.
- [64] Lu C H, Fan L. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain. Field Crops Research, 2013, 143(1): 98-105.
- [65] Ma H Y, Huang J H, Zhu D H, Liu J M, Su W, Zhang C, Fan J L. Estimating regional winter wheat yield by assimilation of time series of HJ-1 CCD NDVI into WOFOST-ACRM model with ensemble Kalman filter. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 759-770.
- [66] Vaux H J, Pruitt W O. Crop-water production functions // Hillel D, ed. Advances in Irrigation, Vol. II. Orlando, Florida, USA: Academic Press, 1983: 2-2.
- [67] Jones J W, Hoogenboom G, Porter C H, Boote K J, Batchelor W D, Hunt L A, Wilkens P W, Singh U, Gijsman A J, Ritchie J T. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 235-265.
- [68] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Asseng S, Chapman S, McCown R L, Freebairn D M, Smith C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267-288.
- [69] Steduto P, Hsiao T C, Raes D, Fereres E. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 426-437.
- [70] Raes D, Steduto P, Hsiao T C, Fereres E. AquaCrop—the FAO Crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy Journal, 2009, 101(3): 438-447.
- [71] Kiniry J R, Williams J R, Gassman P W, Debaeke P. A general, process-oriented model for two competing plant species. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1992, 35(3): 801-810.
- [72] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, Guo R P. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 134(1/2): 67-78.
- [73] Yu Q, Saseendran S A, Ma L, Flerchinger G N, Green T R, Ahuja L R. Modeling a wheat-maize double cropping system in China using two plant growth modules in RZWQM. Agricultural Systems, 2006, 89(2/3): 457-477.
- [74] Xu Z Z, Yu Z W, Zhao J Y. Theory and application for the promotion of wheat production in China: past, present and future. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(10): 2339-2350.