

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180636

张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454–1464

ZHANG X Y. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454–1464

华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究*

张喜英

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室
石家庄 050022)

摘 要: 本文总结了中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心围绕华北典型地区冬小麦-夏玉米一年两熟开展的节水灌溉研究。在位于华北中北部的中国科学院栾城农业生态系统试验站的定点试验结果显示, 从 1980 年到 2017 年, 在充分灌溉条件下冬小麦产量增加 55.7%、夏玉米产量增加 59.7%。冬小麦生育期耗水(ET)从 400 mm 增加到 465 mm; 玉米耗水年平均稳定在 375 mm 左右; 年耗水量从 777.0 mm 增加到 834.4 mm; 满足冬小麦、夏玉米生育期耗水条件下, 年灌溉需水量平均 300 mm, 必须减少灌溉用水和田间耗水, 才能解决区域地下水超采问题。研究发现在限水灌溉条件下, 冬小麦拔节期 1 次灌溉可显著促进作物营养生长和根系生长, 利于后期土壤水分高效利用, 在维持作物稳产基础上, 比充分灌溉年节水 165.2 mm。研究发现进一步利用小定额灌溉技术, 通过增加灌水频率、缩减次灌水量, 可增加有限水对作物的有效性, 实现作物根系、土壤水分和养分在空间上的耦合, 进一步提升有限灌溉对作物的增产作用。只考虑维持播种时良好土壤水分条件、生育期不进行灌溉的最小灌溉模式, 与充分灌溉模式相比, 产量减少 28%, 但可节约灌溉水 69%, 田间耗水减少 43%, 水分利用效率提高 13%, 年耗水量维持在 560 mm 左右。相对于减熟制节约灌溉水措施, 冬小麦-夏玉米一年两熟最小灌溉模式总产量高于两年 3 作 5.5%~12.0%, 年耗水量低于两年 3 作 10%~13%, 可显著消减减熟制带来的休闲期土壤蒸发损失。因此, 实施冬小麦、夏玉米生育期节水灌溉, 如最小灌溉、关键期灌溉, 可大幅度降低灌水量和作物生育期耗水量, 同时又能维持一定的生产能力, 是华北实施地下水限采措施下应优先考虑的技术选择。

关键词: 节水灌溉; 最小灌溉制度; 关键期灌溉制度; 休闲期蒸发; 根系吸水; 冬小麦-夏玉米一年两熟; 华北平原
中图分类号: S341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)10-1454-11

Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain*

ZHANG Xiying

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: This paper summarized the researches of Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences on water-saving irrigation for winter wheat and summer maize at the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, a typical farming area in the North China Plain (NCP). The results from long-term field studies showed that for the period from 1980 to 2017, yield of winter wheat was increased by

* 国家重点研发计划课题(2017YFD0300904, 2016YFC0401403)资助
张喜英, 主要从事农田节水机理和技术研究。E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn
收稿日期: 2018-07-06 接受日期: 2018-07-16

* Supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0300904, 2016YFC0401403)
Corresponding author, ZHANG Xiying, E-mail: xyzhang@sjziam.ac.cn
Received Jul. 6, 2018; accepted Jul. 16, 2018

55.7% and that of summer maize by 59.7% under fully irrigated conditions. Water consumption (ET) of winter wheat was increased from 400 mm to 465 mm, ET of summer maize was relative stable at about 375 mm. Annual ET was increased from 777.0 mm in the 1980s to 834.4 mm in the 2010s. The annual irrigation water demand was averagely around 300 mm. Therefore, it was necessary to reduce irrigation water use to conserve local groundwater resources. Under limited irrigation, one irrigation of winter wheat at jointing stage significantly increased vegetative and root growth of this crop, which was beneficial for the efficient use of soil water at later stages of crop growth. Under this critical stage irrigation schedule, annual ET was reduced by 165.2 mm, while grain production remained stable at relative higher level. Results also showed that by reducing irrigation amount per application and increasing irrigation frequency under limited irrigation, the combined effects of interaction of crop root, soil water and soil nutrient at the topsoil layer could increase water availability to the crop and thereby increase grain production and water use efficiency. A minimum irrigation (MI) schedule was developed for more serious water shortage regions, which was to maintain good soil moisture conditions at the time of sowing and no other irrigation being applied during the other growth periods. As compared with full irrigation, yield was reduced by 28%, but irrigation water use was reduced up to 69%, reduction in ET was by 43% and water use efficiency increased by 13%. Annual ET was reduced to 560 mm and annual irrigation water use was reduced to 120 mm. Significant reduction in irrigation water use was achieved as compared with the full irrigation schedule. As compared with the reduction in cropping intensity (RCI) measure (changing annual double cropping of winter wheat and summer maize to three crops every two years), MI schedule could fully use the rainfall resources and reduce soil evaporation consumption during fallow period under RCI. Yield of winter wheat and summer maize for MI under double cropping system was 5.5%–12.0% higher than that for RCI, with annual ET of 10%–13% less. Based on results from the long-term field experiment, the implementation of water-saving irrigation schedule such as MI and critical irrigation scheduling significantly reduced irrigation water use and at the same time maintained stable grain production. Therefore, water-saving irrigation schedule under double cropping of winter wheat and summer maize was recommended as one of the important measures for solving the problem in groundwater overdraft in the NCP.

Keywords: Water-saving irrigation; Minimum irrigation schedule; Critical stage irrigation schedule; Soil evaporation in fallow time; Root water uptake; Winter wheat-summer maize double cropping system; North China Plain

华北是我国重要的粮食生产区, 主要作物冬小麦(*Triticum aestivum*)和夏玉米(*Zea mays*)一年两季种植年耗水量在 800 mm 以上, 大部分区域平均年降水量在 400~600 mm, 作物生长时期需要灌溉才能维持较高的作物产量, 而很多区域依赖于地下水的灌溉导致地下水位逐年下降, 威胁区域灌溉农业可持续发展。华北农业节水问题一直是我国节水农业研究的焦点问题^[1-3], 从 20 世纪 80 年代到现在, 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心科研人员, 围绕华北典型区域农业节水问题, 在作物需耗水规律、优化灌溉制度和灌溉技术、耕作覆盖保墒、选用节水高产品种等工程、农艺、生物等节水机理和技术方面开展了系统研究, 促进了区域节水农业理论和技术的发展^[4-6]。本篇文章将总结华北典型区域农田耗水与节水灌溉方面的研究工作, 并结合新形势下华北地下水压采政策实施, 讨论地下水限采策略下的节水灌溉模式。本文所用的田间试验结果来源于中国科学院栾城农业生态系统试验站(以下简称“栾城试验站”)的长期定位灌溉试验, 试验的详细情况可参阅参考文献[7-9]。

1 华北典型农田耗水及其变化

1.1 农田耗水定义及计算方法

农田水分消耗是土壤水分通过土壤和作物将水

分散发到大气的过程, 由两部分组成: 作物蒸腾(crop transpiration, T)和土壤蒸发(soil evaporation, E), 统称为蒸散(evapotranspiration, ET)。植被蒸腾与气孔导度、碳循环以及植物水分利用效率相耦联, 成为了生态系统的关键控制器。植物用水 99%以上通过蒸腾而散失。尽管区域尺度上的水循环研究有助于大尺度的水资源管理, 但最终的农田水资源管理是在田间尺度进行的, 因此在大田尺度分析作物蒸散及其组成的变化规律, 可以明确不同作物、不同节水措施下的耗水量和耗水组成, 为农田节水提供理论依据。农田尺度的 ET 常用水分平衡公式计算:

$$ET = P + I + SWD - R + C - D \quad (1)$$

式中: P 为降水, I 为灌溉, SWD 为土壤水分消耗, R 为径流, C 为毛管上升水, D 为根层土壤水分向下的渗漏。一般当地下水位埋深大于 3 m, 毛管上升水可以忽略。用公式(1)可以计算一个时段或整个生育期的农田蒸散量。计算过程中需要考虑根层土壤水分向下的运移量, 即渗漏量。根据土壤水分垂直运移方程(达西定律, $q = -K \times dh/dz$, 其中 q 是土壤水分通量, K 是土壤导水率, h 是土壤水势, z 是土壤深度), 当土壤在非饱和状态下时也存在土壤水在重力梯度作用下的向下移动, 一般情况下土壤水分根层渗漏量是不能忽略的, 如果忽略该值, 将增大农田耗水量的估算值。如表 1 给出了 3 个生长季冬小麦从生

育期不灌水到灌溉 5 次水的田间水平衡各分量及蒸散量。从表 1 可以看出, 2014—2015 生长季如果

不考虑根层渗漏量, 冬小麦生育期灌溉 3~5 水情况下, 总蒸散会增加估值 45~112 mm。

表 1 栾城试验站冬小麦 2014—2017 年 3 个生长季不同灌溉条件下农田水分平衡各分量及生育期蒸散量*

Table 1 Components of water balance and seasonal evapotranspiration under different irrigation treatments for winter wheat in three seasons from 2014 to 2017 at Luancheng Station*

灌水次数 Irrigation numbers	2014—2015				2015—2016				2016—2017			
	灌水量 Irrigation amount	根层 渗漏量 Drainage from root zone	土壤 储水消耗 Soil water depletion	蒸散 Evapotrans- piration	灌水量 Irrigation amount	根层渗漏量 Drainage from root zone	土壤 储水消耗 Soil water depletion	蒸散 Evapotrans- piration	灌水量 Irrigation amount	根层渗漏量 Drainage from root zone	土壤 储水消耗 Soil water depletion	蒸散 Evapotrans- piration
0	0.0	0.0	78.4	148.4	0.0	4.0	182.2	265.4	0.0	29.1	246.4	325.7
1	100.0	0.0	135.9	305.9	75.0	12.4	191.7	341.5	80.0	32.0	208.0	364.5
2	175.0	18.4	192.1	418.7	135.0	12.1	132.4	342.5	140.0	30.4	200.3	418.3
3	230.0	45.5	168.2	422.7	195.0	10.0	92.2	364.4	200.0	54.9	256.7	510.2
4	325.0	71.6	156.5	479.9	270.0	17.3	62.5	402.4	260.0	51.7	218.0	534.7
5	390.0	112.0	120.4	468.4	270.0	16.5	61.8	402.5	320.0	69.9	197.7	556.2

* 研究区域的地下水埋深 40 m, 毛管上升水为零; 作物生长期降水较少, 没有径流发生, 水分平衡公式中的 C 和 R 为 0。2014—2015 年、2015—2016 年和 2016—2017 年冬小麦生育期降水量分别为 70 mm、87.2 mm 和 108.4 mm。* Due to the deep groundwater level below soil surface (40 m) and the small rainfall during the growing season, capillary rise and runoff in the water balance equation are taken as zero. Precipitations in growth seasons of 2014—2015, 2015—2016 and 2016—2017 were 70 mm, 87.2 mm and 108.4 mm, respectively.

1.2 灌水与蒸散

通过优化灌溉制度, 减少灌溉用水量是农田节水的重要方面。但农田灌水量的降低并不等于农田耗水的降低, ET 与灌溉量并不是一个直线关系, 在非充分灌溉条件下, 作物生育期灌水减少可能带来土壤耗水增加和根层渗漏量减少, 农田 ET 并没有发生显著变化。因此, 在节水农业研究中, 灌水的减少量并不都能转化为节水量, 只有农田 ET 真正降低才代表真实意义上的节水。如表 1 所示, 2014—2017 年的 3 个冬小麦生育期, 从灌溉 2 水减少到灌溉 1 水, 灌水量分别降低 75 mm、60 mm 和 60 mm, 而实际蒸散分别降低 112.8 mm、1.0 mm 和 53.8 mm。2014—2015 年实际蒸散降低幅度大于灌水量的降低幅度, 而其他两个生长季小于灌水量的降低幅度, 特别是 2015—2016 年, 灌水量的降低并没有带来农田蒸散的减少。主要原因是灌水量降低时, 作物增

加了对土壤储水的利用量, 如 2015—2016 年生育期, 土壤储水利用量从不灌水的 182.2 mm 到灌溉 5 次水的 61.8 mm, 差异达 120.4 mm, 相当于 2 次灌水量。因此, 在评价节水灌溉制度或节水技术节约灌溉水效果时, 需要考虑是否真正降低了农田水分消耗。

1.3 典型农田耗水、产量和水分利用效率变化

随着品种更新、土壤肥力提升和化肥用量增加, 1980—2017 年栾城试验站定点试验地块在充分灌溉条件下冬小麦的平均产量从 $4\,698.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高到 $7\,313.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 产量增加 55.7%; 夏玉米平均产量从 $5\,169.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高到 $8\,254.8\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 产量增加 59.7%。随着产量增加, 作物生育期耗水量冬小麦从 400 mm 左右增加到 465 mm; 玉米耗水保持稳定, 从 376 mm 变化到现在的 369 mm(表 2)。冬小麦-夏玉米年耗水量从 777 mm 增加到 834 mm, 虽然耗水量有所增加, 但产量增加幅度更明显^[10-11]。

表 2 栾城试验站冬小麦夏玉米在充分灌溉下 1980—2017 年不同年代平均产量、生育期耗水量和水分利用效率的变化
Table 2 Average yield, seasonal evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of winter wheat and summer maize under sufficient water supply during 1980s, 1990s, 2000s and 2010s at Luancheng Station

年代 Decade	产量 Yield ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		耗水量 ET (mm)		水分利用效率 WUE ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	
	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize	冬小麦 Winter wheat	夏玉米 Summer maize
1980—1989	4 695.9	5 169.1	401.4	375.7	1.19	1.35
1990—1999	5 631.3	7 179.9	417.3	381.1	1.31	1.84
2000—2009	6 639.4	7 760.5	458.6	396.2	1.45	1.98
2010—2017	7 313.8	8 254.8	465.1	369.3	1.70	2.24

水分利用效率(WUE)定义为产量与蒸散的比值(常用单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{hm}^{-2}$), 可用于评价作物生长过程中水分利用效率的高低。冬小麦、夏玉米的 WUE 近 37 年来增幅为 42.9%~65.9%, 冬小麦 WUE 从 20 世纪 80 年代的平均 $1.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右增加到现在的 $1.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 增加 42.9%; 夏玉米从 $1.4 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到现在的 $2.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 增加 65.9%。上述结果显示随着品种更新、土壤肥力提升和农业科技进步, 农田水分利用效率得到显著改善, 实现在不增加或稍增加作物耗水情况下, 大幅度提升作物产量, 这对于水资源短缺区域维持粮食生产有重要意义^[4,10]。

冬小麦、夏玉米年耗水量和年平均降水量的差值为灌溉需水量。图 1 为 1980—2017 年不同年代的冬小麦、夏玉米灌溉需水量的变化。在满足冬小麦、夏玉米生育期耗水条件下, 研究区域冬小麦、夏玉米年需要灌溉水平均在 300 mm, 而地下水侧向和垂向补给总量小于 200 mm, 年超采量在 100 mm 以上, 因此减少灌溉用水和田间耗水, 发展节水灌溉是实现区域地下水采补平衡的重要措施。

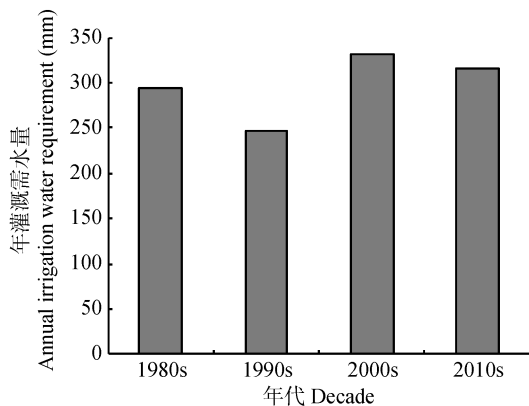


图 1 栾城试验站 1980—2017 年不同年代冬小麦、夏玉米在充分灌溉下平均蒸散量与平均年降水量的差值(灌溉需水量)

Fig. 1 Average differences between annual evapotranspiration and rainfall as irrigation requirements for the double cropping system of winter wheat and summer maize under sufficient water supply during 1980s, 1990s, 2000s and 2010s at Luancheng Station

2 节水灌溉制度

2.1 节水灌溉机理

土壤水分是作物生命活动的主要基础条件, 作物的一切生理过程都与水息息相关。当根系吸水不能满足作物地上部分蒸腾需水要求时, 作物就发生了水分亏缺, 对作物的生长发育产生影响。很早以来就存在着两种观点: 一种认为在作物生长的各生育阶段, 任何程度的水分亏缺都将造成作物产量的

降低; 另一种观点是作物生长的某些生育阶段, 适当控制水分对于作物的增产更为有效。实际上水分亏缺并不总是造成减产, 例如轻度水分亏缺影响叶片扩张生长, 但并不影响光合速率; 又如在中度水分亏缺条件下, 气孔导度降低引起蒸腾速率大幅度下降, 而光合速率下降并不明显, 因为水分散失对气孔开度的依赖大于光合对气孔的依赖。随着水资源短缺的加剧, 水分胁迫对作物的影响及其提高水分生产效率的机理已成为当前研究的热点, 植物高效用水生理调控与非充分灌溉理论研究不断深入, 补水调控(灌溉调控)已由传统的丰水高产型灌溉转向节水优产型灌溉^[1,4,7-8]。大量研究表明, 植物各生理过程对水分亏缺的反应各不相同, 而且水分胁迫可以改变光合产物的分配。同时一些研究还表明, 水分胁迫并非完全是负效应, 特定发育阶段、有限的水分胁迫对提高产量和品质是有益的, 结果证明作物在某些阶段经受适度的水分胁迫, 对于有限缺水具有一定的适应性和抵抗性效应。一般认为, 植物在水分胁迫解除后, 会表现出一定的补偿生长功能。在某些情况下, 水分亏缺不仅不降低作物的产量, 反而能增加产量、提高水分利用效率。

大量的研究发现根区土壤充分湿润的作物通常其叶气孔开度较大, 以致于单位水分消耗所产生的 CO_2 同化物(即水分利用效率)较低。作物叶片的光合作用与蒸腾作用对气孔的反应不同, 在一般条件下, 光合速率随气孔开度增大而增加, 但当气孔开度达到某一值时, 光合增加不明显, 即达到饱和状态, 而蒸腾耗水则随气孔开度增大而线性增加。因此, 在充分供水、气孔充分张开的条件下, 即使出现气孔开度一定程度上的缩窄, 其光合速率不下降或下降较小, 则可减小大量奢侈的(luxury)蒸腾耗水, 达到以不牺牲光合产物积累而大量节水的目的。

不同植物产量与蒸散量的关系曲线是不同的, 而这种差异正好反映这种作物对水分亏缺的敏感程度, 曲线越陡, 这种作物或植物对水分亏缺越敏感。不同作物存在对水分亏缺敏感的差异, 同一作物不同品种间也存在差异^[4-5], 同时这种关系随地点不同也出现变动。最终作物产量与蒸散量的关系取决于作物种类、作物品种和生产地点。一般情况下作物产量与总耗水量之间存在一个直线或类似于直线的关系, 也就是说随着作物耗水量增加, 产量也增加, 当达到最大蒸散量时, 产量也达到最大, 特别是对于以收获整个植物体为经济产出的作物或植物, 这个直线关系更明显, 如苜蓿(*Medicago sativa*), 其茎

叶均是产出的一部分。而对于粮食作物如小麦, 产出主要为籽粒, 总耗水与籽粒产量的关系是一种曲线形式, 当耗水量较小时, 随着耗水量增加, 产量明显增加, 而当耗水量增大到一定程度, 产量随耗水量增加的幅度放缓, 进而产量达到最高水平, 而这时的耗水量并不是最高, 最高耗水量并不对应最高产量。因此针对一些植物或作物, 为了达到最优产出, 供水不一定完全满足其耗水需要, 因此可根据作物耗水与产量的相关关系, 制定节水高效的灌水制度^[12-13]。

2.2 灌水次数影响

栾城试验站所在区域冬小麦在底墒充足条件下, 生育期灌水次数从 20 世纪 80 年代 6~8 次减少到现在的 3~4 次, 特别是近年来由于地下水位下降明显, 农民逐步认识到多灌水不一定增产, 冬小麦生育期灌水次数

进一步降低为 2~3 次, 在地面小畦灌溉条件下, 每次灌水平均用量为 70~90 mm, 全生育期灌水量为 210~270 mm^[14-15]。图 2 是近 10 年栾城试验站定点试验冬小麦生育期从不灌水到灌水 5 次的产量表现, 从不灌水到灌 1 水, 平均增产 1 611.5 kg·hm⁻², 增产率 35.2%; 从 1 水到 2 水, 平均增产 709.3 kg·hm⁻², 增产率 11.5%; 从 2 水到 3 水, 平均增产 266.7 kg·hm⁻², 增产率 3.9%; 从 3 水增加到 4 水和从 4 水到 5 水, 增产率在 0.5%~1.2%, 增产幅度很小, 有些年份还出现减产情况。通常年份下冬小麦灌水 3 至 5 次的产量基本相同。上述结果可以看出, 冬小麦生育期在一般年份下灌水 3 次, 能取得高产。图 2 也显示有些年份冬小麦生育期灌水 2 次产量反而高于或等于灌 2 水以上的产量。从灌水 2 次以后, 再增加灌水次数, 增产幅度显著变小。因此, 冬小麦生育期灌水 2 次是较优化的灌水次数^[8]。

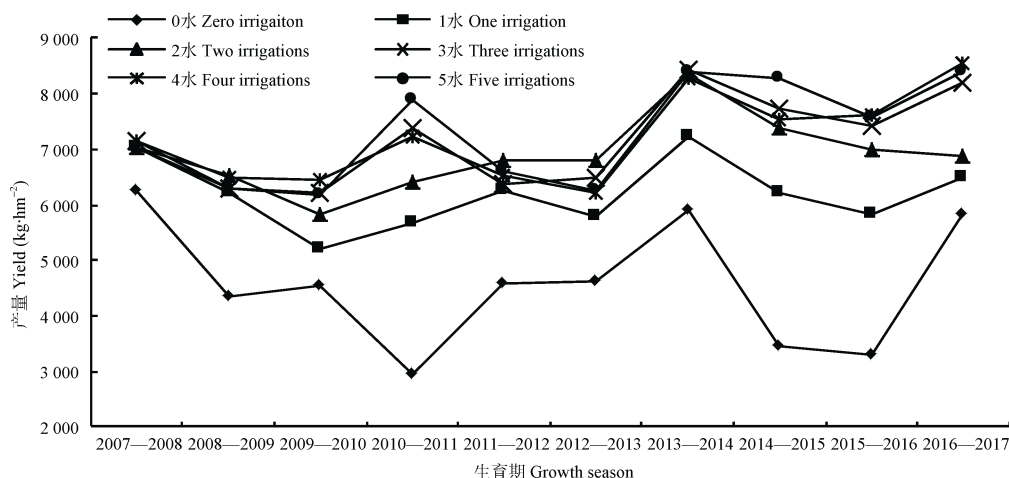


图 2 栾城试验站 2007—2017 冬小麦 10 个生育期从不灌水到灌水 5 次的产量变化

Fig. 2 Yields of winter wheat from no irrigation up to five irrigations for 10 growth seasons during 2007–2017 at Luancheng Station

对于华北地区冬小麦, 作物生育期并不是灌溉水分越多越好, 而是适度亏缺对干物质形成和向籽粒产量的转移更有利。作物产量和 WUE 对供水条件的响应与作物营养生长、生殖生长阶段的干物质形成和向籽粒产量的转移过程有关。一般来说, 随着耗水量的增加, 冬小麦抽穗前的干物质积累、收获期的总干物质和抽穗后的干物质积累随着蒸散量的增加而增加, 当增加到一定程度, 生物量达到最高后, 不再随着耗水量的增加而增加, 说明在华北平原冬小麦生育期比较短的条件下, 最优生物量的取得不需要充分的水分供应。冬小麦最终产量与收获期的生物量关系是二次曲线关系, 在总生物量低时, 随着生物量的增加, 冬小麦产量直线递增; 当冬小麦生物量达到一定水平后, 产量不再增加, 反而下降, 说明冬小麦最高产量的取得不需要达到

最大的生物量。同时作物经济产量与收获指数关系密切。冬小麦收获指数与灌浆期间干物质向籽粒产量的转移效率(DMRE)有明显的相关关系, 而 DMRE 受到作物生育期水分条件的影响。结果显示冬小麦生长期需要适度的水分亏缺取得最优生物量和最高经济产量^[7]。

比较不同灌水次数下的生育期 ET 和 WUE, 近 10 年从生育期不灌水到灌溉 5 次水, 其平均 WUE 分别为 2.06 kg·m⁻³、1.92 kg·m⁻³、1.84 kg·m⁻³、1.73 kg·m⁻³、1.57 kg·m⁻³、1.52 kg·m⁻³, 随着灌水次数增多, WUE 呈明显下降趋势。重要原因之一是随着灌水次数增多, 土壤蒸发耗水增大。相对应的生育期 ET 分别为 238.2 mm、329.1 mm、383.3 mm、419.3 mm、464.1 mm、480.7 mm。上述结果显示, 无论从产量和 WUE, 还是从灌水用量和生育期蒸散, 冬小麦生育期灌水两次可

取得稳产高产和较高的 WUE。

对于夏玉米, 生育期与雨季吻合, 灌溉主要在播种出苗时期, 冬小麦在其生育期对土壤水分利用能力强, 收获时特别是上层土壤水分较低, 为了保证玉米尽快出苗, 延长生育期, 多数年份需要灌溉玉米播种水。图 3 显示在玉米播种灌水 1 次条件下, 能保证玉米多数年份获得与再增加灌水 1~3 次相当的产量。但在夏季降水小于 300 mm 的生长季, 例如 2016 年和 2017 年, 中后期增加 1 次灌水的增产率可以达到 28.5%~33.2%, 增产效果非常明显。因此, 对于栾城试验站所在的华北北部山前平原区, 玉米播种时进行灌溉, 生育中后期根据降水情况再补充 1 次灌溉, 能取得玉米稳产高产。

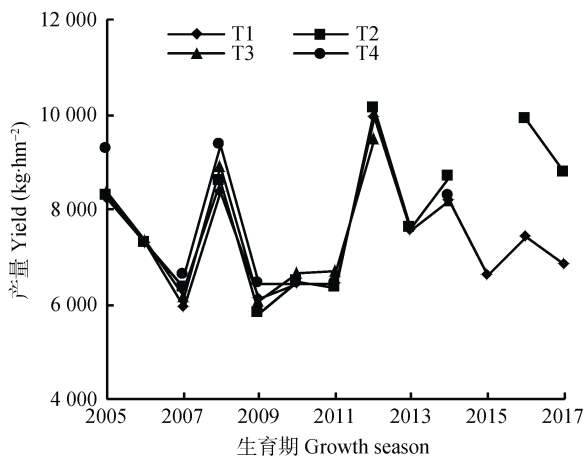


图 3 栾城试验站 2005—2017 夏玉米 13 个生育期从播种灌水 1 次至生育期再增加 1~3 水的产量变化(T1 处理为播种灌水 1 次; T2~T4 处理为除了播种水外, 生育期增加灌水次数 1~3 次; 2015 年只有 T1 处理)

Fig. 3 Yields of summer maize with one irrigation at sowing (T1 treatment) to one to three more irrigations during growing seasons (T2, T3 and T4 treatments) for 13 growth seasons during 2005–2017 at Luancheng Station

2.3 有限供水下灌水时间和频率影响

2.3.1 灌水时间影响

华北平原位于季风气候区, 降雨主要集中在夏季, 冬小麦生长期(10 月—翌年 6 月)的降雨量远低于作物需水量, 合理灌溉不仅有助于根系对土壤水分的有效利用, 而且对提高冬小麦水分利用效率也具有重要作用。冬小麦在返青以前, 对土壤水分吸收主要集中在 80 cm 以上的土层, 随着拔节—开花期间根系迅速生长, 根系对 80 cm 以下土层的水分利用增加, 特别是到灌浆期, 灌水少的冬小麦主要依靠中下层土壤储水来维持蒸腾。研究发现当根长密度低于 $0.8 \text{ cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时, 根系就成为影响作物充分吸收土壤水分的限制因子^[16-17]。深层根系不足限制了作物对深层土壤储水的吸收利用^[18]。栾城试验站

冬小麦长期灌溉试验结果显示, 冬小麦在限水灌溉条件下, 其营养生长阶段需要一定水分供应, 才能形成一定的生物量, 同时也可以促进地下部分根系形成, 为灌浆期充分利用土壤储水打好基础, 因而这个阶段蒸散量的多少对最终产量影响明显^[19-20]。如果营养生长阶段水分条件差, 作物地上生长发育受到影响, 进而地下部分根系生长较少, 使作物不能充分利用深层土壤储水, 最终影响限水灌溉下冬小麦产量。

根据气象资料分析, 近年来冬小麦生长期间春季干旱发生概率大、持续时间增长, 春季灌溉对促进冬小麦营养生长至关重要。栾城试验站的长期试验结果显示, 冬小麦完全雨养、播种前灌溉 1 次水、拔节灌溉 1 次水、生育期灌溉 2 次水和生育期灌溉 3 次水的平均产量分别为 $3274.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4820.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $5920.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $6583.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6721.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 拔节期灌溉 1 次水比雨养增产 80.0%, 播种时灌溉 1 次水比雨养增产 47.2%, 灌水 1 次条件下拔节水比播种水增产潜力更大。图 4 是冬小麦播种时灌水实现冬小麦开始生长时良好的土壤水分条件和拔节期灌水 1 次的产量比较, 结果显示 2005—2014 共 9 个生长季拔节期灌水 1 次比只播前灌溉 1 次水平平均增产约 16.1%。造成同样灌水一次, 而产量结果差异较大的原因与冬小麦根系对土壤储水的利用能力相关, 根系对土壤储水利用与土壤水分和作物根系在土壤剖面的分布相联系。两种处理下播种前土壤储水对冬小麦生育期 ET 的贡献分别为 103 mm 和 145 mm, 表明同样灌水一次, 灌于拔节期左右, 冬小麦利用根层土壤储水能力高于灌溉在播种时。主要原因在于冬小麦从播种直到休眠期结束, 对水分需求较少。返青后, 冬小麦生长加快, 灌于拔节期的水分补充了上层土壤水的消耗, 并在此关键时期提供了足够的水分供给作物使用, 利于地上和地下生长发育, 较大冠层和较大的根系系统可促进作物对土壤储水利用, 增加了抽穗后作物耗水量, 利于作物产量形成。栾城试验站的多年结果也显示, 在限水灌溉下冬小麦产量与抽穗后的蒸散量显著相关 ($P < 0.01$)^[9]。因此, 在限水灌溉条件下, 冬小麦拔节期 1 次灌溉可显著促进营养生长和根系生长, 利于后期土壤水分高效利用。由于冬小麦从播种到返青耗水量小, 如果播种时墒情足够冬小麦出苗, 冬灌由于增加了土壤蒸发和土壤水分养分淋溶风险, 故可不进行, 冬小麦播种时的灌溉可调整到拔节期, 这对冬小麦产量形成更有利。因此, 冬小麦高效用水模式应根据降水条件, 通过灌溉调控营养生长、

促进地下部分生长、生殖生长阶段充分利用土壤储水来实现。

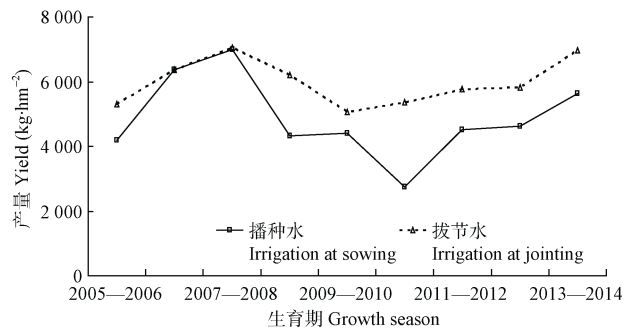


图 4 栾城试验站冬小麦生育期灌水一次的灌水时间(播种水或拔节水)对产量的影响(2005—2014 年)

Fig. 4 Effects of irrigation time under one irrigation application to winter wheat (irrigation at sowing or at jointing) on grain production from 2005 to 2014 at Luancheng Station

2.3.2 灌水频率影响

在限水灌溉下, 增强土壤水对作物有效性是提升作物产量的重要途径。作物对土壤水利用能力与根系分布和土壤水分分布密切相关。一般条件下作物根系主要分布在上层土壤, 下层根系分布量较小, 很多研究显示深层根量不足是作物充分利用土壤水分的限制因素。上述研究结果也显示在冬小麦生育期只灌溉 1 次水, 这次水灌溉在拔节期可增强冬小麦对土壤储水利用能力, 增加抽穗后作物耗水量, 显著提升产量。但由于受深层根系限制, 收获时仍有一部分水残留在土壤中, 没有被作物充分利用。因此, 在限水灌溉下通过增加灌水频率, 使更多的灌溉水分布在作物根系集中的上层土壤, 同时上层土壤也是土壤养分集中层次, 实现根-水-养分在空间上的耦合, 提升水分养分对作物的有效性^[21-23]。另一方面需要考虑的是增加灌水频率将增加土壤表层水分湿润时间, 增大土壤蒸发损失。但当叶面积指数大于一定数值时, 土壤蒸发占蒸散比例显著降低(图 5)。因此, 对于冬小麦限水灌溉下增加灌溉频率的时间应在作物生长的中后期。

在栾城试验站利用测坑试验(面积 4 m²)研究了有限供水(冬小麦生育期灌水 90 mm)下不同灌水频率[1 次(拔节期 90 mm)、2 次(拔节期和抽穗扬花期各 45 mm)和 3 次(拔节期、抽穗期、灌浆期各 30 mm)]对冬小麦产量、产量构成和水分利用效率的影响。图 6 显示增加灌水频率显著增加了冬小麦产量, 特别是扬花期的 1 次灌水 4 个生育期平均增产幅度达 13.9%。主要是后期供水增加了粒重和收获指数, 在不增加耗水量条件下, 显著增加了经济产量。上述结果显示限水灌溉下, 适当增加灌水频率、缩减次灌水

量利于作物根系、土壤水分和养分实现空间上的耦合, 提升作物经济产量。

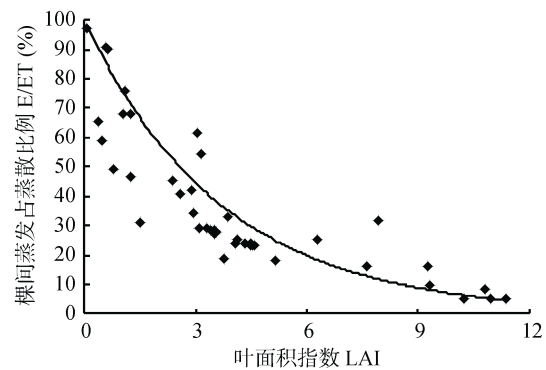


图 5 冬小麦棵间蒸发(E)占蒸散比例(ET)随叶面积指数的变化

Fig. 5 Relation of the ratio of soil evaporation (E) over evapotranspiration (ET) with the leaf area index (LAI) of winter wheat

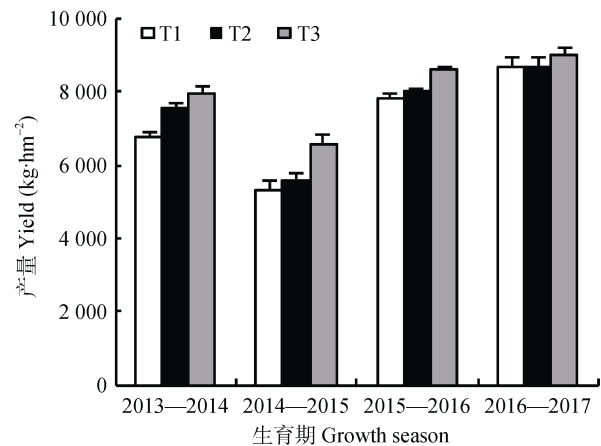


图 6 栾城试验站 2013—2017 年冬小麦在限水灌溉(生育期总供水 90 mm)下灌水频率对产量的影响(T1: 1 次灌水 90 mm; T2: 2 次灌水, 每次灌水 45 mm; T3: 3 次灌水, 每次灌水 30 mm)

Fig. 6 Effects of combinations of irrigation amount and frequency on yield of winter wheat at Luancheng Station (T1: one irrigation with 90 mm; T2: two irrigations with 45 mm each; T3: three irrigations with 30 mm each)

华北大田作物灌溉方式现阶段一般为畦灌, 减少次灌水量和增加灌水频率需要相应灌溉技术支持, 利用微喷和滴灌技术可实现小定额灌溉。栾城试验站的研究结果显示, 增加灌溉频率增加了上层土壤含水量。滴灌和微喷相对于畦灌, 在总灌水量不变条件下, 增加灌水次数后, 0~100 cm 土层的平均土壤含水量明显增加, 尤其是灌浆阶段。滴灌和微喷是实现小定额灌溉的有效技术, 但由于微喷和滴灌投入高, 与畦灌方式相比, 有限供水下微灌系统比地面灌溉系统产量的增加不能补偿灌溉系统安装成本的增加, 还需要研究简便易行投资低的节水

灌溉系统用于大田作物生产^[21]。

3 适应地下水压采的节水灌溉制度

栾城试验站所在的河北平原由于长期超采地下水, 导致地下水位持续下降, 引起一系列环境问题^[24-25]。为改善和修复河北省地下水生态环境, 国家在华北地下水严重超采区实施了地下水超采综合治理工程, 在地下水压采政策实施下, 未来农田灌溉用水应依据可用水量的多少决定, 并科学合理分配有限灌溉用水, 通过提升水分利用效率, 维持区域粮食生产能力^[26-28]。

3.1 非充分灌溉策略

有限水在一个区域分配, 是完全满足部分农田灌溉需水要求, 还是用有限的灌溉水尽可能扩大灌溉面积? 研究发现作物生理生态指标对土壤水分有一个明显的阈值反应, 当土壤含水量在一定范围之上时, 含水量的降低对作物一些生理生态指标不产生影响^[29]。对于河北平原的冬小麦, 灌浆期短, 灌浆后期容易受干热风影响, 使产量潜力不能充分发挥, 适度亏缺条件下冬小麦生长发育过程提前, 灌浆期适度延长, 更有利于花后干物质积累和向籽粒产量的转移, 最终提高作物收获指数, 实现有限供水下维持一定的作物生产能力^[30]。如图 7 所示, 在缺水条件下 (NI), 增加单位耗水产量平均增加 21 kg·hm⁻²; 水分充足条件下 (FI) 增加单位耗水产量平均增加 5 kg·hm⁻², 缺水条件下水分状况改善的增产幅度远大于在较充分供水下再增加耗水的增产量。

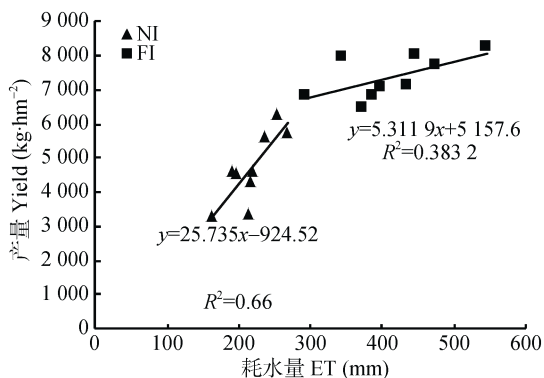


图 7 栾城试验站不同供水条件下 (NI: 水分亏缺; FI: 供水充足) 冬小麦耗水量与产量的相关关系

Fig. 7 Correlation of evapotranspiration (ET) with yield under two different water supply conditions for winter wheat at Luancheng Station (NI: deficit irrigation; FI: full irrigation)

栾城试验站多年研究结果也显示 (图 2), 冬小麦生育期从不灌水到灌 1 水, 平均增产 1 611.5 kg·hm⁻²、从 1 水到 2 水平均增产 709.3 kg·hm⁻²、从 2 水到 3 水平均增产 266.7 kg·hm⁻²。从上述结果可以看出, 用有限的水扩大灌溉面积比有限面积增加灌

溉次数更利于产量提高。因此, 在华北地下水压采区应尽可能维持灌溉面积, 通过降低单位农田灌水用量、实施非充分灌溉策略维持区域粮食生产能力。

3.2 两季作物最小灌溉与减熟制

华北地下水严重超采区域粮食作物生产以冬小麦-夏玉米一年两熟为主, 但在冬小麦种植的 10 月至翌年 6 月初, 降水较少, 不能满足作物需求。冬小麦长期以来靠抽取地下水灌溉维持高产, 成为该区第一灌溉作物。为此, 国家对华北平原地下水严重超采区实施限采治理中, 压缩冬小麦种植面积作为“压采”的一项重要措施。但考虑到河北平原地下水超采区冬小麦生产在区域粮食安全中的重要性以及冬小麦秋播后可形成有效的地表覆盖层, 对减少冬春沙尘风险有重要作用, 冬小麦和夏玉米一年两季种植可实施满足地下水压采的最小灌溉制度, 在满足地下水压采条件下, 维持一年两季作物生产。

图 8 是冬小麦和夏玉米分别实施最小灌溉 (保证作物出苗的水分条件, 生育期不进行灌水) 的生育期耗水量和年耗水量, 最小灌溉制度下冬小麦近 10 个生育期平均耗水 238.1 mm、夏玉米 326.2 mm, 年耗水量平均 564.4 mm。在最小灌溉模式下, 增加关键期灌溉, 平均年耗水量为 662.8 mm, 充分灌溉模式年平均耗水量为 828.0 mm。冬小麦最小灌溉方式相对于关键期灌溉方式产量减少 20%, 节约灌溉水 55%, 田间耗水减少 28%, WUE 提高 8%; 相对于充分灌溉方式产量减少 28%, 节约灌溉水 69%, 田间耗水减少 43%, WUE 提高 13%^[31-32]。

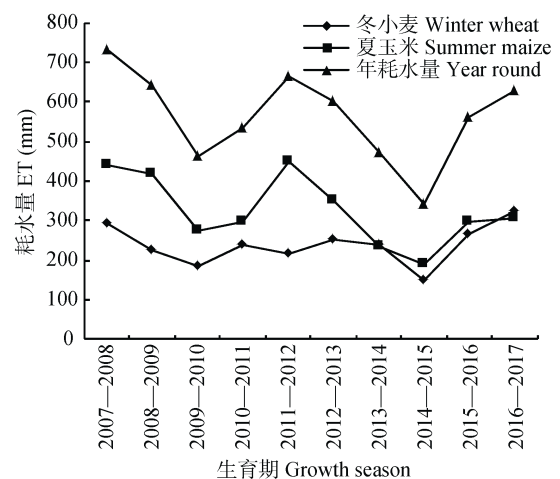


图 8 2007—2017 年冬小麦、夏玉米保证出苗水分条件下生育期不进行灌溉的生长季和年耗水量

Fig. 8 Seasonal and annual evapotranspiration (ET) for winter wheat and summer maize under minimum irrigation schedule (irrigation at sowing to ensure good soil moisture condition for germination, no other irrigation during the growth season)

该试验的 10 年期间年平均降水量 434.9 mm, 低于栾城试验站多年平均降水量 480 mm, 60% 年份属于干旱年份。如果降水量达到常年水平, 最小灌溉模式对作物产量的影响将显著减少。最小灌溉下 10 年平均年耗水量高于降水量 129.5 mm, 在地下水侧向和垂向补给大于 100 mm 的地区利用最小灌溉模式就可实现地下水采补平衡。

通过调整传统的冬小麦-夏玉米熟制, 改一年两熟为二年 3 熟、一年 1 熟, 可降低农田耗水, 但由于种植强度降低, 对周年产量会产生不利影响。同时由于休闲期会产生土壤蒸发, 年蒸散量降低幅度会减少。根据栾城试验站研究结果, 二年 3 熟[冬小麦+夏玉米-春玉米(冬春休闲)和冬小麦+夏玉米-冬小麦(夏季休闲)]或一年 1 熟(1 季小麦或 1 季玉米)与充分灌溉、最小灌溉和关键期灌溉的冬小麦-夏玉米一年两季产量和农

田耗水量比较结果见图 9。冬小麦+夏玉米-春玉米和冬小麦+夏玉米-冬小麦两年 3 熟年产量分别为 $11\,658.7\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $10\,985.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 比充分灌溉一年两熟减产 22.8% 和 27.2%; 年耗水量分别为 631.3 mm 和 667.1 mm, 比充分灌溉一年两熟农田耗水减少 178 mm 和 142 mm。冬小麦一年 1 熟产量比一年两熟减产 55%、夏玉米一年 1 熟产量比一年两熟减产 40%; 农田耗水分别减少 230~240 mm 和 350~370 mm。农田耗水量减少量小于 1 季作物的耗水量, 主要原因是进行作物种植的休闲地会产生土壤蒸发, 夏季休闲正是雨季, 除了控制杂草生长消耗水分养分外, 土壤蒸发耗水在 150~160 mm; 冬小麦季休闲, 由于此期间多为小雨, 很大一部分降水都转化为土壤蒸发, 休闲期土壤蒸发量在 60~80 mm。因此, 熟制改革消减种植强度需要考虑休闲期无效土壤蒸发损失。

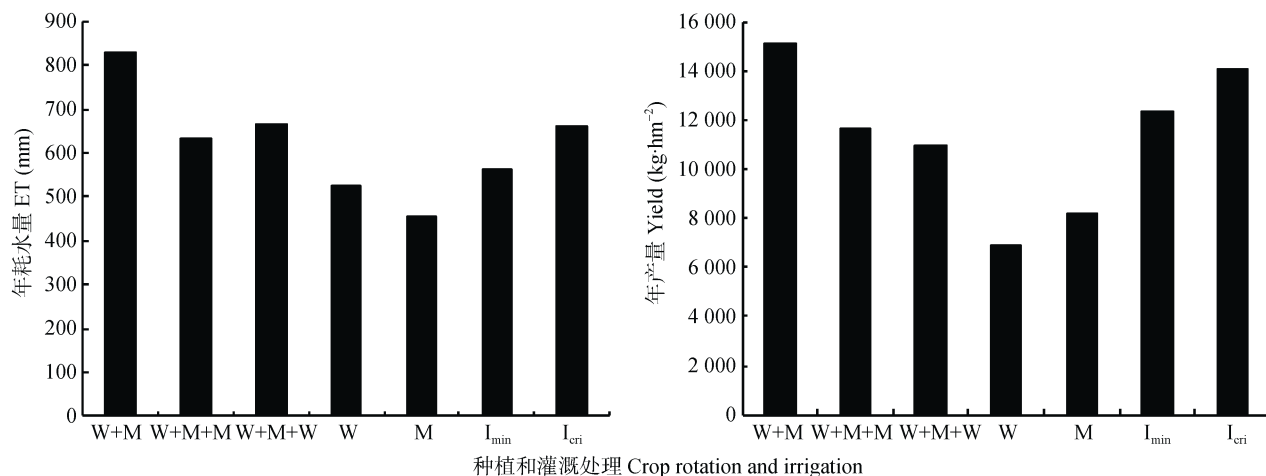


图 9 不同种植制度和灌水制度下作物年产量和年耗水量比较

Fig. 9 Annual grain yield and evapotranspiration (ET) under different cropping systems and irrigation schedules

W+M: 充分灌溉下的冬小麦和夏玉米一年两作; W+M+M: 冬小麦+夏玉米+玉米两年 3 作; W+M+W: 冬小麦+夏玉米+冬小麦两年 3 作; W: 一年 1 作冬小麦; M: 一年 1 作玉米; I_{min}: 冬小麦夏玉米一年两作实施最小灌溉制度; I_{cri}: 冬小麦夏玉米一年两作实施关键期灌溉制度。W+M: annual double cropping of winter wheat-summer maize with full irrigation; W+M+M: triple cropping in two years of winter wheat-summer maize-maize; W+M+W: triple cropping in two years of winter wheat-summer maize-winter wheat; W: single cropping in one year of winter wheat; M: single cropping in one year of maize; I_{min}: minimum irrigation of annual double cropping of winter wheat-summer maize; I_{cri}: critical irrigation of annual double cropping of winter wheat-summer maize.

图 9 也显示冬小麦-夏玉米一年两季最小灌溉制度总产量高于两年 3 作 5.5%~12.0%, 年耗水量低于两年 3 作 10%~13%; 关键期灌溉的年耗水量与两年 3 作基本相同情况下, 年产量高于二年 3 作 21%~28%。上述结果显示减熟制由于带来休闲期土壤无效蒸发的增加, 在年耗水量与一年两作相比没有大幅降低情况下, 年总产降低幅度较大。实施冬小麦-夏玉米生育期减量灌溉, 如最小灌溉、关键期灌溉, 可大幅度降低灌水量和作物生育期耗水量, 同时又能维持一定的生产能力, 因而是实施地下水压采措施应优先考虑的技术选择。

4 小结

随着水资源短缺的加剧, 灌溉农业逐步从充分灌溉发展到非充分和亏缺灌溉^[13,33]。面对华北地下水多年超采导致的灌溉水资源极度短缺问题, 华北典型地下水超采区的农业灌溉必须走限水灌溉之路, 有限灌水下取得作物最优产量和较高的水分利用效率将依赖于有限水在作物生育期的优化分配^[34]。对于华北平原主要灌溉作物冬小麦和夏玉米, 冬小麦灌浆期短, 后期容易遇到干热风, 常常使充分灌溉的冬小麦产量潜力不能得到充分发挥, 而在冬小麦实施非充分灌溉条件下(足墒播种条件下, 结合追肥

只灌溉拔节水), 虽比充分灌溉(生育期灌溉 3 次水)冬小麦减产, 但能维持冬小麦产量稳定在 $6\ 000\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 灌溉用水量可降低 100 mm。在冬小麦实施非充分灌溉条件下, 可使其提早成熟, 夏玉米实现早播, 增加玉米生产潜力。华北北部夏玉米生长期较短, 产量潜力不能充分发挥, 如能实现玉米早播和晚收, 延长生育期 7~10 d, 使玉米产量提高, 可弥补冬小麦实施亏缺灌溉导致的产量降低, 实现周年稳产增效; 同时玉米生育期延长利于玉米后期脱水, 便于机械化脱粒收获。因此, 对于华北地下水严重超采区冬小麦-夏玉米一年两作可实施消减冬小麦生育期灌溉水量, 只在关键生育期拔节期左右灌溉 1 次的节水灌溉模式。而在地下水超采更严重的区域, 可实施冬小麦、夏玉米最小灌溉制度, 即仅保证出苗时墒情好, 作物能建立适度群体, 其他时间不灌溉, 在这种灌溉制度下, 多数区域的地下水补给能满足作物灌溉需水要求, 维持区域地下水采补平衡。最小灌溉制度相比两年 3 作或一年 1 作, 可消减成熟后休闲期土壤无效蒸发损失, 更利于维持区域粮食生产能力, 而同时又显著降低了年耗水量。

参考文献 References

- [1] DU T S, KANG S Z, SUN J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in North China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 66–74
- [2] QIU G Y, WANG L M, HE X H, et al. Water use efficiency and evapotranspiration of winter wheat and its response to irrigation regime in the North China Plain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1848–1859
- [3] YANG Y H, WATANABE M, ZHANG X Y, et al. Optimizing irrigation management for wheat to reduce groundwater depletion in the piedmont region of the Taihang Mountains in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82(1/2): 25–44
- [4] ZHANG X Y, CHEN S Y, LIU M Y, et al. Improved water use efficiency associated with cultivars and agronomic management in the North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(3): 783–790
- [5] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 27–33
DONG B D, ZHANG Z B, LIU M Y, et al. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation schedulings[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(9): 27–33
- [6] CHEN S Y, ZHANG X Y, PEI D, et al. Effects of straw mulching on soil temperature, evaporation and yield of winter wheat: Field experiments on the North China Plain[J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 150(3): 261–268
- [7] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. *Irrigation Science*, 2008, 27(1): 1–10
- [8] ZHANG X Y, PEI D, HU C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain[J]. *Irrigation Science*, 2003, 21(4): 159–166
- [9] ZHANG X Y, WANG Y Z, SUN H Y, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(5): 1103–1112
- [10] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1097–1104
- [11] ZHANG X Y, WANG S F, SUN H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 50: 52–59
- [12] CHAVES M M, OLIVEIRA M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: Prospects for water-saving agriculture[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(407): 2365–2384
- [13] FERERES E, SORIANO M A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(2): 147–159
- [14] 张喜英. 中国科学院栾城农业生态系统试验站农田节水研究过去、现在和未来[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 987–996
ZHANG X Y. A review of agricultural water-saving research at Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station of Chinese Academy of Sciences over the last 30 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 987–996
- [15] 可福存, 师连生, 李建军. 冬小麦灌溉制度研究[M]//王绍仁. 生态农业实验研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1994: 121–126
KE F C, SHI L S, LI J J. Study on Irrigation Scheduling of Winter Wheat[M]//WANG S R. *Experimental Research on Eco-Agriculture*. Beijing: China Science and Technology Press, 1994: 121–126
- [16] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Root size, distribution and soil water depletion as affected by cultivars and environmental factors[J]. *Field Crops Research*, 2009, 114(1): 75–83
- [17] ZHANG X Y, PEI D, CHEN S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain[J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(12): 2275–2287
- [18] KIRKEGAARD J A, LILLEY J M, HOWE G N, et al. Impact of subsoil water use on wheat yield[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2007, 58(4): 303–315
- [19] KAGE H, KOCHLER M, STÜTZEL H. Root growth and dry matter partitioning of cauliflower under drought stress conditions: Measurement and simulation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(4): 379–394

- [20] SLAFER G A, ARAUS J L, ROYO C, et al. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments[J]. *Annals of Applied Biology*, 2005, 146(1): 61–70
- [21] FANG Q, ZHANG X Y, SHAO L W, et al. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 196: 133–143
- [22] RODRIGUES G C, PAREDES P, GONÇALVES J M, et al. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 126: 85–96
- [23] ENCISO J M, UNRUH B L, COLAIZZI P D, et al. Cotton response to subsurface drip irrigation frequency under deficit irrigation[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2003, 19(5): 555–558
- [24] CHENG H F, HU Y N, ZHAO J F. Meeting China's water shortage crisis: Current practices and challenges[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(2): 240–244
- [25] LI J. Water shortages loom as northern China's aquifers are sucked dry[J]. *Science*, 2010, 328(5985): 1462–1463
- [26] FANG Q, MA L, YU Q, et al. Irrigation strategies to improve the water use efficiency of wheat-maize double cropping systems in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1165–1174
- [27] JENSEN C R, ØRUM J E, PEDERSEN S M, et al. A short overview of measures for securing water resources for irrigated crop production[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, 200(5): 333–343
- [28] ZHANG X Y, QIN W L, XIE J N. Improving water use efficiency in grain production of winter wheat and summer maize in the North China Plain: A review[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2016, 3(1): 25–33
- [29] 张喜英, 裴冬, 由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 280–283
- ZHANG X Y, PEI D, YOU M Z. Response of leaf water potential, photosynthesis and stomatal conductance to varying soil moisture in four crops, winter wheat, corn, sorghum and millet[J]. *Acta Phytocological Sinica*, 2000, 24(3): 280–283
- [30] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain[J]. *Industrial Crops and Products*, 2007, 25(3): 239–247
- [31] ZHANG X Y, PEI D, CHEN S Y, et al. Performance of double-cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(6): 1620–1626
- [32] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Performance of a double cropping system under a continuous minimum irrigation strategy[J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(1): 281–289
- [33] GEERTS S, RAES D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(9): 1275–1284
- [34] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 80–87
- ZHANG X Y. Regulation mechanisms of improving farmland water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 80–87