

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180687

董宝娣, 刘会灵, 王亚凯, 乔匀周, 张明明, 杨红, 靳乐乐, 刘孟雨. 作物高效用水生理生态调控机制研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1465–1475

DONG B D, LIU H L, WANG Y K, QIAO Y Z, ZHANG M M, YANG H, JIN L L, LIU M Y. Physio-ecological regulating mechanisms for highly efficient water use of crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1465–1475

## 作物高效用水生理生态调控机制研究\*

董宝娣<sup>1</sup>, 刘会灵<sup>2</sup>, 王亚凯<sup>1</sup>, 乔匀周<sup>1</sup>, 张明明<sup>1</sup>, 杨红<sup>1</sup>, 靳乐乐<sup>1</sup>, 刘孟雨<sup>1\*\*</sup>

(1. 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; 2. 石家庄市农产品质量检测中心 石家庄 050051)

**摘要:** 提高作物对水分的高效利用是解决我国农业水资源短缺的根本出路。本文从作物高效用水的品种差异、作物不同生育时期对水分的响应差异、气孔导度对作物叶片奢侈蒸腾的调控、不同抗旱类型作物在应对水分胁迫的生理生态策略差异等 4 个方面, 主要对国内研究进展及发展趋势进行了综述。根据本研究组多年研究结果, 提出了 3 项作物高效用水的配套栽培技术, 主要包括: 1) 调整种植结构, 提高作物周年用水效率技术。利用作物及品种的用水特性、产量差、效率差, 根据地下水压采目标, 构建合理的作物种植结构与轮作方式, 提高作物周年对水资源的利用效率。以太行山前高产区为例, 冬小麦-夏谷子/春甘薯两年 3 熟制是一种产量、水分经济利用效率均较高的种植结构。2) 活化播期, 拓宽播种阈值, 提高作物雨水利用效率技术。通过选用合适品种拓宽播期、等墒、找墒、保墒拓展利用土壤水分的时空范围、播量变量调节等, 提高作物雨水利用效率。通过技术组装与配套, 冬小麦只要在 11 月底之前播种, 产量与常规种植没有显著差异。3) 覆盖保墒, 提高旱地作物高效用水技术。其中, 小麦-玉米土下覆膜一膜两用丰产节水模式通过调节土壤温度、水分、盐分、抑制杂草等多项调控, 显著提高了雨养农田作物产量与水分利用效率。在环渤海低平原沧州地区, 该技术模式在没有任何灌溉条件下的周年产量达 15 910.20~16 965.90 kg·hm<sup>-2</sup>, 比对照增产 10.52%~41.44%。深入探讨作物高效用水的生理生态基础、进一步研发提高作物水分利用的新技术、统一作物高效用水的量化标准和充分利用非常规水将是今后相当长一段时期的重点研究方向。

**关键词:** 雨养农业; 作物; 高效用水; 水分利用效率; 生理生态调控; 配套栽培技术

**中图分类号:** Q945.79; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)10-1465-11

## Physio-ecological regulating mechanisms for highly efficient water use of crops\*

DONG Baodi<sup>1</sup>, LIU Huiling<sup>2</sup>, WANG Yakai<sup>1</sup>, QIAO Yunzhou<sup>1</sup>, ZHANG Mingming<sup>1</sup>,  
YANG Hong<sup>1</sup>, JIN Lele<sup>1</sup>, LIU Mengyu<sup>1\*\*</sup>

(1. 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; 2. Shijiazhuang Center for Agricultural Product Quality Inspection, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** The North China Plain (NCP) is a severe water shortage region and one of the important grain crop production bases in

\* 国家重点研发计划项目(2016YFD0300808)、国家科技支撑计划项目(2013BAD05B02)和河北省重点研发计划项目(18226419D)资助

\*\* 通信作者: 刘孟雨, 主要研究方向为作物高效用水生理生态研究。E-mail: mengyuliu@sjziam.ac.cn

董宝娣, 主要研究方向为作物逆境生理。E-mail: dongbaodi@126.com

收稿日期: 2018-07-21 接受日期: 2018-07-28

\* The study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300808), National Key Technology R&D Program of China (2013BAD05B02) and Hebei Province S&T Project (18226419D).

\*\* Corresponding author, E-mail: mengyuliu@sjziam.ac.cn

Received Jul. 21, 2018; accepted Jul. 28, 2018

China. With the rapid rise of China's national economy, the water shortage of agriculture production has acutely increased. To reduce the exploitation of groundwater and resolves problems in agricultural water resources, a series of water-saving measures have been proposed and developed. However, improving crop water use efficiency has been among the most basic requirements to this goal. This paper therefore reviewed four aspects of research progresses of improving crop water use efficiency. They included the varieties difference in high water use, response difference of crops at different growth stages to water, regulation of stomatal conductance on excessive transpiration of crop leaves, differences in physio-ecological strategies of different drought-resistant crops to water stress. On this base, three integrated cultivation techniques were advanced according to our research results. The first was adjustment of planting structure to improve annual water use efficiency of crops. To gain this goal, it was important to establish rational planting structures and rotation patterns based on difference in water consumption characterizes, yield and economic efficiency of crops/varieties. In the high-yield region of the piedmont of Mountain Taihang, the pattern of three-cropping in two years of winter wheat-summer millet/spring sweet potato was a planting structure with high yield- and economic-water use efficiencies. The second cultivation technique was activation and broadening of sowing date thresholds via increase seeding rate and mulching to increase rainwater use efficiency. In our research, grain yield of winter wheat was not significantly different regarding sowing date — before December or in early October under intensive seeding and soil-coated film mulching in the Bohai Lowland Plain. The third aspect was improving crop water use efficiency in rain-fed fields by coating soils with film mulch. The pattern of subsoil plastic film mulch dual used by winter wheat and summer maize significantly inhibited soil evaporation and salt accumulation, increased seed emergence rate, promoted aboveground biomass and increased grain yield and water use efficiency of two crops in dry lands. In the Bohai Lowland Plain, this cropping pattern made use of rainwater and slight saline water. Grain yield of winter wheat-summer maize was up to 15 910–16 966 kg·hm<sup>-2</sup>, which represented an increase of 10.52%–41.44% over that under no mulching. In the future, disruptive innovations such as new quantitative standards for high crop water use efficiency and utilization of unconventional water resources can lead to significant breakthroughs in agricultural water saving.

**Keywords:** Rain-fed agriculture; Crop; Highly efficient water use; Water use efficiency; Physio-ecological regulating; Integrated culture techniques

随着我国人口增加和工农业的发展,水资源日益短缺,农业可用水量逐渐减少。提高农业高效用水成为解决水资源不足和粮食安全的重要途径<sup>[1-2]</sup>。农业高效用水既包括雨养旱作农业,也包括依靠地下水的灌溉农业,农业高效用水是以自然科学、经济科学、社会科学等多学科交叉的复杂系统工程<sup>[3]</sup>,提高水资源利用效率是农业高效用水的核心。作物高效用水和农业高效用水内涵不同,作物高效用水是指作物通过充分调动自身的抗旱遗传潜力,积极响应变动环境,通过一系列生理生态调控,减少奢侈蒸腾耗水,在有限水资源约束下实现生产效益的极大化<sup>[4]</sup>。

水分利用效率(WUE)是目前评价作物高效用水的惟一和有效指标。许多研究者从不同的层次对水分利用效率进行了介绍并概括了水分利用效率的内涵。水分利用效率有不同尺度和范畴的研究,包括生物产量水平的水分利用效率、生理水平的水分利用效率和价值水平的水分利用效率 3 个方面。对于作物来说,生物产量水平水分利用效率主要包括个体、群体、生物量和产量水平水分利用效率等,是指作物每消耗单位量的水所获得的产量,产量可表示为净生产量或经济产量。生理水平的水分利用效率是作物内在水分利用效率,主

要是叶片水平瞬时水分利用效率,指作物内部微观行为如由气孔行为引起的光合/蒸腾之比。而价值水平水分利用效率主要包括生态水分利用效率、价值水分利用效率、水分经济利用效率等,指作物消耗单位量的水所产生的价值或对生态环境的影响率<sup>[5-10]</sup>。

目前国内外对作物高效用水的试验研究不断取得进展,许多研究者从不同种角度进行了阐述<sup>[1,11-13]</sup>。下面从作者多年从事研究的区域特点及重点开展的研究方向,主要从 3 个方面进行归纳论述,期望为推动作物高效用水的生理生态研究的进一步深入而抛砖引玉,为建立作物高效用水技术体系奠定基础。

## 1 作物高效用水生理生态学基础的几个方面

### 1.1 作物高效用水的品种差异

作物本身的遗传特性对作物高效用水有显著影响<sup>[2]</sup>。不同作物的WUE存在较大差异。但由于不同作物的生长季节、产品功能等有较大区别,如小麦(*Triticum aestivum*)收获的是籽粒,棉花(*Gossypium* spp.)收获的是纤维,甘薯(*Dioscorea esculenta*)收获的是鲜食块状根<sup>[13]</sup>,比较不同作物高效用水差异时需将不同作物种类的有关特性与数值统一规划处理,如把不同作物统一换算成食物当量<sup>[14]</sup>。对于大田粮

食作物, 小麦、玉米(*Zea mays*)、谷子(*Setaria italica*)等, 不同作物品种由于受本身遗传特性、生长环境和田间管理条件等的影响, 产量和WUE存在显著差异。图1显示在中国科学院栾城农业生态系统试验站和中国科学院南皮生态农业试验站进行的冬小麦、夏玉米和夏杂谷的品种对比试验, 品种间产量差小麦可达37.84%, 玉米为12.91%, 谷子为32.27%。不同灌溉和施肥条件也对作物产量和WUE有显著影响<sup>[15-16]</sup>。因此, 许多研究者归纳总结了品种间产量和WUE的差异, 希望通过分析作物品种WUE的农艺性状和生理指标, 鉴定出真正高效用水的作物品种。董宝娣等<sup>[17]</sup>根据小麦品种WUE、耗水量和产量等将小麦品种分为高产高WUE型、高产中WUE型、中产中WUE型和低产低WUE型。崔震海等<sup>[18]</sup>将6个

高粱(*Sorghum bicolor*)品种分为高产低耗型、高产中耗型、中产中耗型、高产高耗型、低产低耗型和低产高耗型6个类型。杨涛等<sup>[19]</sup>划分玉米品种为高WUE、高产、耗水型品种, 高WUE、中产、中等耗水型品种, 高WUE、中产、节水型品种, 中等WUE、生物产量表现一般、节水型品种, 低WUE、生物学产量较低、节水型品种。但是, 高WUE品种的主效鉴定指标并非只与产量有关, 与WUE密切相关的鉴定指标较多, 目前并没有统一的标准。因此, 需要结合其他生理生态指标, 找出主效调控因子, 建立统一可靠的量化标准或指标, 培育或鉴定适应性强, 产量稳定, 高产高WUE类型作物品种, 才能充分挖掘作物本身用水特性, 为提高农业高效用水打下坚实基础。

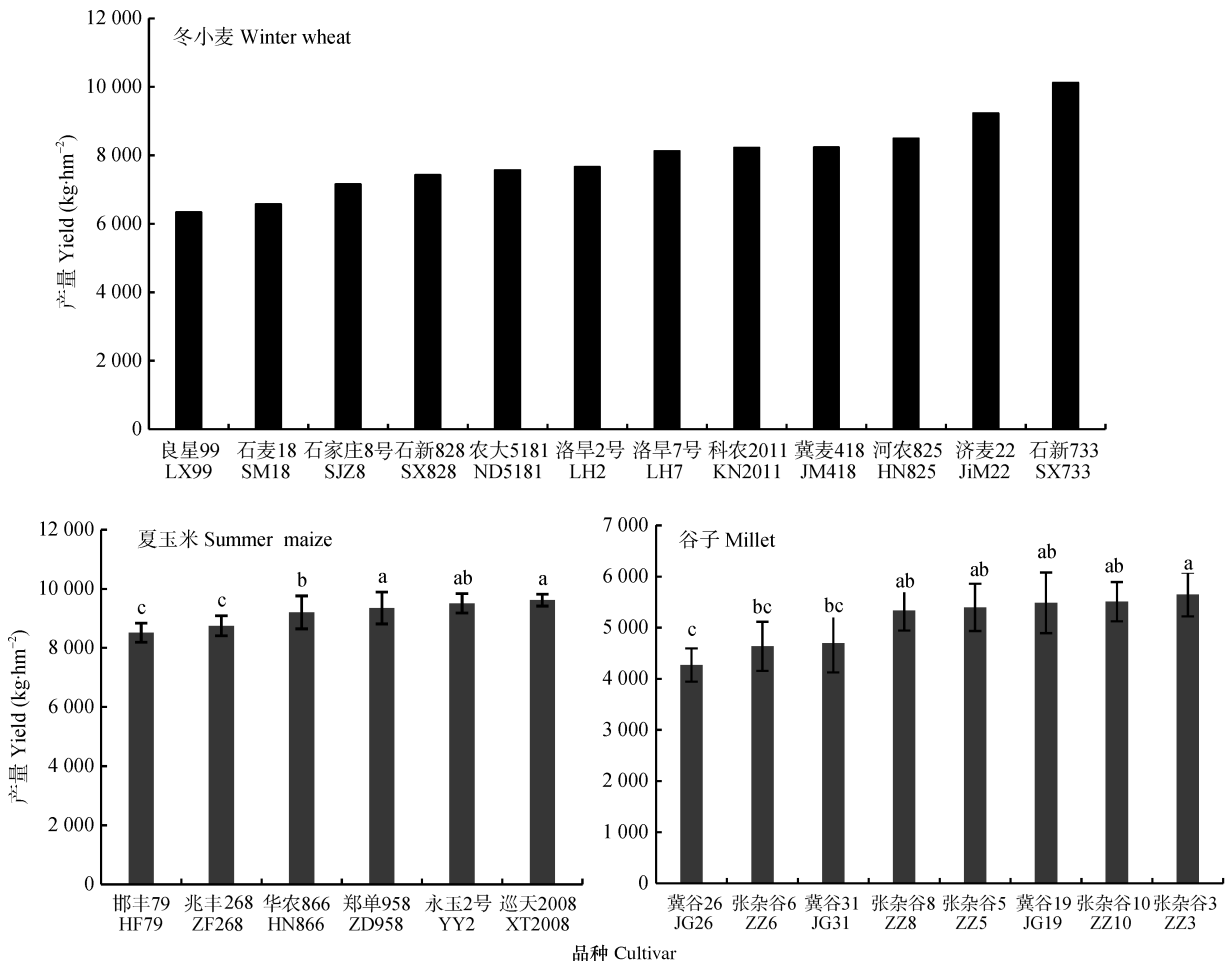


图 1 小麦(2016—2017年)、夏玉米(2017年)和谷子(2014年)不同品种在相同种植条件下的产量(试验地点为中国科学院栾城农业生态系统试验站和中国科学院南皮生态农业试验站)

Fig. 1 Yields of different cultivars of winter wheat (in 2016–2017), summer maize (in 2017) and millet (in 2014) under the same planting measures in Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station, Chinese Academy of Sciences and Nanpi Eco-Agriculture Experimental Station, Chinese Academy of Sciences

不同小写字母表示品种间差异显著( $P < 0.05$ )。Different lowercase letters indicate significant differences among different cultivars at  $P < 0.05$ .

### 1.2 作物不同生育期需水特性

作物高效用水特性与作物品种特性息息相关,

不同生育阶段的耗水特性、逆境响应和应对策略对作物高效用水特性起着至关重要的作用<sup>[20-21]</sup>。近年

的研究表明,水分不敏感时期适度水分亏缺不一定造成作物减产,作物对于适度缺水具有一定的适应性和抵抗效应,甚至有超补偿机制<sup>[12,15]</sup>。一般说来,作物生长早期需水量较小,水分胁迫对生殖器官分化的影响比对营养生长的影响更大<sup>[22]</sup>。作物在不同生育阶段对水分的敏感程度存在差异。张喜英等<sup>[23]</sup>指出小麦和玉米不同生育期的田间栽培灌溉下限存在差别,小麦越冬前、返青起身、拔节、孕穗开花、灌浆前和成熟期的灌溉下限分别为土壤田间持水量的 60%、55%、65%、60%、60%和 55%,玉米苗期、拔节、抽穗吐丝、灌浆和成熟灌溉下限分别为占田间持水量的 55%、65%~70%、65%和 60%。Turner<sup>[24]</sup>的禾谷类作物试验表明,拔节前中、轻度水分亏缺后复水,作物 WUE 显著提高。杜尧东等<sup>[3]</sup>也表明,高粱只在拔节前进行轻度或中度水分胁迫,与一直充足供水相比,产量和 WUE 分别提高

15.0%和 25.8%。我们的研究发现,在极端干旱玉米没有任何产量的条件下,谷子特别是杂谷系列品种,能够调整作物株高,缩短生育时间,完成生命周期,并获得一定经济产量。那么作物生长发育阶段水分胁迫主要影响作物产量的哪几个关键因素呢?由图 2 可以看出,在作物生殖生长阶段水分状况主要影响产量构成三要素的穗粒数和千粒重。前人的研究主要集中在花后胁迫对作物的灌浆和籽粒大小或者千粒重的影响,但是很少关注花前水分胁迫对籽粒数的影响。事实上,穗粒数对作物产量的影响远远大于千粒重<sup>[25-27]</sup>。有研究发现,在小麦开花前 15 d,尤其是花粉发育的小孢子发育时期,如果水分不足,会显著降低小麦单株穗粒数<sup>[21,25,28]</sup>。上述结果表明,在作物水分迟钝期——营养生长早期进行一定程度的水分亏缺可节约水分,而产量没有明显降低。

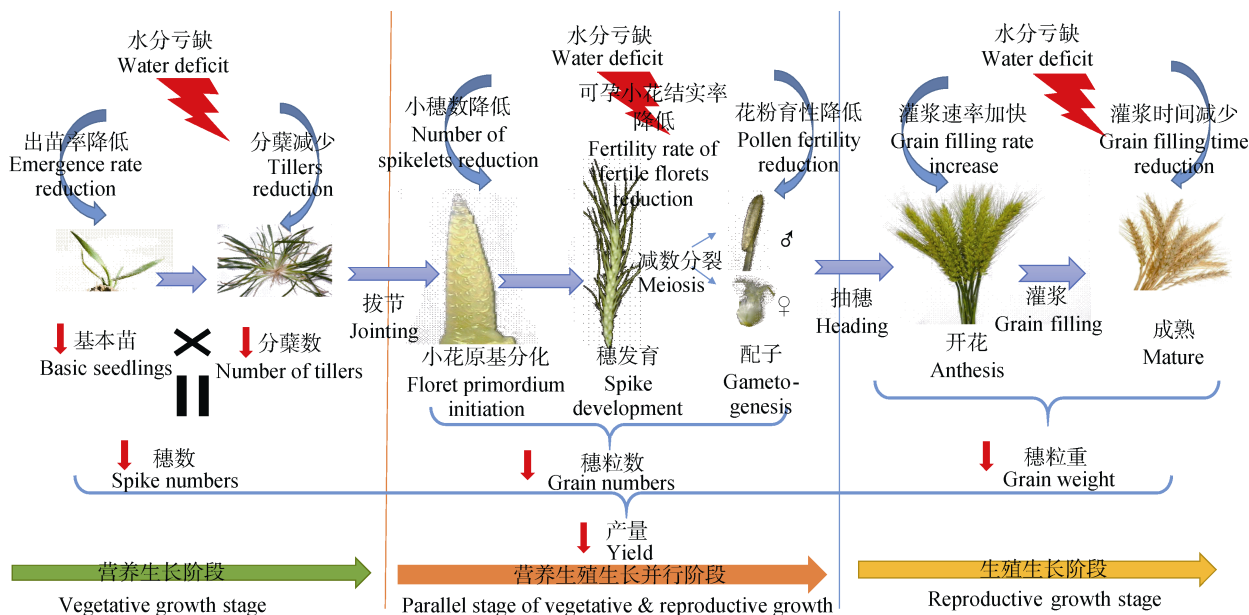


图 2 冬小麦生长发育过程水分胁迫与产量组成因素的关系图解

Fig. 2 Schematic overview of relationship between water stress at different growth stages and growth and development cycle of winter wheat

### 1.3 叶片奢侈蒸腾及调控

奢侈蒸腾早几年就已经由专家提出,但是并没有明确的定义和如何区别奢侈蒸腾和蒸腾。近年来有研究者对此进行了描述性定义。王会肖等<sup>[29]</sup>和杨文文等<sup>[30]</sup>通过光合与蒸腾的关系研究认为超过光合速率最高的蒸腾速率的蒸腾为奢侈蒸腾。李茂松<sup>[31]</sup>在此基础上进行了扩充,认为超过作物生理生化、营养物质转移、光合作用以及产量形成等所必需的蒸腾为奢侈蒸腾。由此可见奢侈蒸腾与作物的光合/蒸腾息息相关。早在 1976 年, Jones<sup>[32]</sup>在试验研究中

就发现,叶片的光合速率和蒸腾速率对气孔导度的敏感性不同,光合速率和蒸腾速率均随着气孔导度的增大而增加,但当达到最优气孔导度时,光合速率不再随着气孔导度的增大而增加,而蒸腾速率继续随着气孔增大而增加,那么超过此时的蒸腾就是奢侈蒸腾。在某些情况下,降低气孔导度可以减少蒸腾但不影响光合,因此气孔导度与奢侈蒸腾紧密相关。干旱和盐碱等环境胁迫可导致保卫细胞内  $H_2O_2$  的积累和气孔的关闭。Schroeder 等<sup>[33]</sup>提出  $H_2O_2$  可能作为 ABA 途径和非 ABA 途径的胁迫信号的交

叉点, 通过改变细胞氧化还原状态调节气孔<sup>[34]</sup>, 进而影响光合和蒸腾。另外, 国内研究者也发现光合速率和蒸腾速率两者呈非线性关系, 水平较低时, 光合速率随蒸腾速率先线性增加, 然后缓慢增加; 而增加到一定程度后, 光合速率不再随蒸腾增加, 且不同土壤含水量条件下, 变化趋势却基本一致。奢侈蒸腾与光合有效辐射也存在一定关系。一定条件下, 当光合有效辐射大于  $1\ 000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 光合速率随光合有效辐射的增加而下降, 蒸腾速率依然线性增加, 这时就会产生奢侈蒸腾<sup>[29-30]</sup>。

作物奢侈蒸腾的发生与土壤水分状况关系密切。但因产生奢侈蒸腾的生长环境不同, 研究者得出的结论也存在一定差异。孙景生等<sup>[35]</sup>认为在土壤含水率 65%~80%时, 光合速率达到最大值, 超过光合速率最大值的蒸腾耗水是一种水资源浪费。张喜英<sup>[36]</sup>的研究表明, 在华北平原小麦整个生长季节, 小麦土壤含水量为田间持水量的 50%~65%时, 可以有效抑制无效蒸发蒸腾, 达到高效利用水分的目的。吴海卿等<sup>[37]</sup>研究发现当土壤水分逐渐升高时冬小麦的光合速率先增大而后维持在一个较稳定的水平, 土壤水分大于田间持水量的 65%时, 冬小麦会有奢侈蒸腾的发生。也有研究者表明, 作物不同, 发生奢侈蒸腾的土壤条件存在差异, 葡萄 (*Vitis vinifera*) 叶片在土壤含水量为  $0.21\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$  时出现奢侈蒸腾, 玉米叶片在土壤含水量为  $0.24\ \text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$  时出现奢侈蒸腾<sup>[38]</sup>。康绍忠等<sup>[39]</sup>提出的分根交替灌溉理论, 可以显著降低作物奢侈蒸腾, 而光合速率和生物产量基本保持不变, WUE 明显增加。

以上说明奢侈蒸腾的发生只有在土壤水分和环境光合有效辐射都比较高时才会出现奢侈蒸腾。目前关于作物奢侈蒸腾的研究仅限于定性, 尚缺少对作物产生奢侈蒸腾的土壤环境条件、不同抗旱性品种奢侈蒸腾的差异、作物不同部位(叶片和非叶器官)奢侈蒸腾的响应以及抑制奢侈蒸腾的措施等深入系统的研究。如何明确奢侈蒸腾的调控机理以及如何量化表征和评价需要进一步深入分析。为挖掘作物高效用水的潜力, 必须了解作物耗水过程、需水特性、生理调控、品种特性, 尽可能地降低作物的奢侈蒸腾, 增加作物高效用水特性。

#### 1.4 作物应对水分胁迫的生理生态策略

随着水资源的日益减少, 作物生长过程中都会遇到不同程度的水分胁迫。其实, 作物也像人一样是非常智慧机敏的, 会通过根系感知干旱信号, 通过生理或形态特性变化如气孔、水势、开花期等的改变进行调整, 形成一整套紧密相关的性状应对策

略。不同作物或者同一作物不同品种在水分胁迫条件下会形成不同的应对策略<sup>[40-41]</sup>。

从形态学来说, 不同类型的作物品种适应干旱的策略差异明显。抗旱性较强的小麦品种在雨养旱作条件下, 具有早发性, 株高较高, 分蘖力较强, 生长迅速的特性, 一旦有部分降雨, 会快速生长, 具有较强的速生性。但是随着土壤水分的降低, 许多分蘖会随之死亡, 例如‘晋麦 47’。这是在长期适应环境的进化过程中逐渐形成的, 并遗传下来, 是一种作物适应波动环境的生态对策, 可以减少不利的外界环境对其繁殖的影响<sup>[42]</sup>。而抗旱性较差的品种, 或者喜水肥品种, 在雨养旱作条件下, 分蘖数较少, 生长速度远低于抗旱性较强的品种, 花后生物量对产量的贡献率高于花前生物量, 属于高效无冗余的小麦品种<sup>[43]</sup>。野生植物在逆境中尤其是水分胁迫条件下, 为了具有繁衍后代的能力, 一般都会减少分蘖数和花粉数量, 保证以极少数的大粒种子繁衍后代。

气孔作为光合  $\text{CO}_2$  和蒸腾失水的入口和出口, 对作物生长发育和需水特性影响明显。不同作物品种气孔对水分敏感性差异明显, 因此, 作物在干旱环境采取的应对策略也会有显著不同。等水调节行为作物的气孔对环境变化较为敏感, 当干旱胁迫发生时, 气孔立刻关闭, 土壤水势下降或大气水汽压亏缺时, 最小叶水势维持相对恒定, 导水率低, 水力安全阈值大, 生长策略属于保守型。非等水调节行为作物的气孔对环境水分变化不太敏感, 当干旱胁迫发生时, 气孔不会立刻关闭, 叶水势随着土壤水势下降而下降, 最小叶水势低, 导水率高, 水力安全阈值小, 生长策略属于冒险型<sup>[44-46]</sup>。一般来说耐旱性强的作物属于非等水调节, 耐旱性弱的作物属于等水调节<sup>[40]</sup>。

作物内源激素脱落酸(ABA)是植物应对环境胁迫所采取的水分调节中的重要植物激素。不同作物或者不同品种对 ABA 的敏感性不同<sup>[28,47-48]</sup>。耐旱性较强的作物(品种)在水分胁迫下根系 ABA 合成速度、茎叶中 ABA 浓度保持相对稳定, 因而气孔对水分亏缺响应较慢。而不耐旱作物(品种)在水分胁迫下根系 ABA 合成加速, 叶片中 ABA 浓度也相应增加, 迅速关闭气孔维持作物叶片水势<sup>[41]</sup>。张凤莲等<sup>[49]</sup>研究发现, 作物应对水分胁迫时不单纯是 ABA 的作用, 生长素类激素吲哚乙酸(IAA)和赤霉素(GA)也起着重要的调节作用。另外, 植物可以通过产生干旱诱导蛋白等特殊物质来应对水分胁迫。例如胚胎发育晚期的丰富蛋白(late embryogenesis abundant protein,

Lea), 干旱诱导蛋白具有高度的亲水性, 保护细胞结构, 减轻干旱造成的伤害<sup>[50]</sup>。作物对水分胁迫应对策略与水力、形态、结构、功能等性状之间的关联性研究对揭示作物对水分胁迫的响应和适应机制有重要意义。

## 2 提高作物高效用水的几套栽培技术

### 2.1 调整种植结构, 提高作物周年用水效率技术

调整种植结构, 优化轮作制度, 根据气候特性和降雨时间, 适当安排上下茬口, 实现作物雨热同期, 可减少作物高产对地下水的依赖, 提高周年作物整体用水效率。当前华北平原以小麦-玉米为主的一年2熟种植制度, 尽管具有产量优势, 但从经济和水资源消耗综合来看, 小麦-玉米属于高耗水轮作模式<sup>[51-52]</sup>。早在20世纪90年代刘孟雨等<sup>[53]</sup>就意识到种植结构调整对缓解地下水下降的有效作用。调整种植结构的目的是在实现地下水采补平衡的同时, 不降低作物产量或经济效益。有研究指出通过调整作物布局, 建立抗旱性轮作或种植结构, 可提高农田整体作物WUE 0.15~0.26 kg·m<sup>-3</sup>, 增产15%~30%<sup>[54]</sup>。一般情况下, 复种指数降低, 势必降低作物的产量,

但是选择经济效益高的作物如甘薯、谷子等杂粮作物, 会显著提高周年作物的水分经济利用效率。王大鹏等<sup>[55]</sup>的研究指出, 用两年3熟代替一年1熟后, 作物耗水降低了24%~31%, 灌溉水利用效率提高58%~172%, 但周年产量却下降16%~27%。我们也在以谷子代替玉米的研究中发现, 小麦-谷子轮作制度总耗水量比小麦-玉米轮作制度减少167 mm, 经济效益平均增加750~3 200元·hm<sup>-2</sup>。秋季节省的雨水可以为次年小麦生长提供良好的水分条件, 真正做到“秋水春用”。另外, 深根作物和浅根系作物间种套种, 利用深根作物的水力提升, 也可提高相邻浅根作物的产量, 增强浅根系作物的WUE<sup>[56-57]</sup>。我们在对以小麦、玉米、大豆(*Glycine max*)、谷子、甘薯等大田作物构建的不同轮作制度(一年2熟、一年1熟和两年3熟)的产量、WUE、水分经济利用效率、成本以及地下水补给量的综合模拟和多年试验的评价中发现, 一年1熟的甘薯WUE最高, 两年3熟的小麦-谷子-甘薯是一种整体WUE、水分经济利用效率较高的种植结构(图3)。因此, 在满足国家粮食需求下, 合理优化作物配置, 调整种植结构, 也是提高作物周年WUE的一种有效途径。

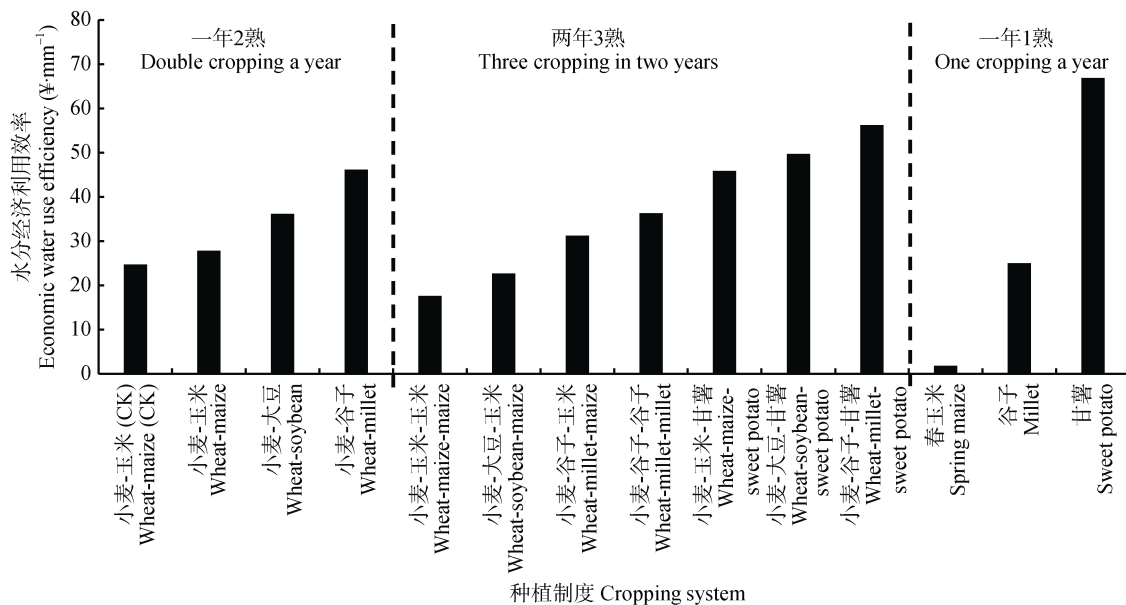


图3 不同轮作制度下的作物水分经济利用效率  
Fig. 3 Economic water use efficiencies of different cropping systems

### 2.2 活化播期, 拓宽播种阈值, 提高作物雨水利用效率技术

适宜播期对作物生长发育、产量多少有重要的影响。提早或推迟播期一般会降低作物产量<sup>[58-59]</sup>。晚播由于有效积温和日照时数减少导致花后干物质积累减少、千粒重下降造成产量降低<sup>[60-61]</sup>。但也有

研究发现, 随着播期的推迟, 产量呈先上升后下降的趋势<sup>[62-63]</sup>。然而许多播期研究主要关注光温变化对产量的影响<sup>[64-66]</sup>, 很少涉及“水”的问题。实际上, 在我国雨养旱作区, 降水和作物需水不同步, 水分不足才是导致作物产量降低的主要原因。雨养旱作农田如何通过播期调整实现降水的时空调控, 促进

降水与作物播种需水同期的研究相对较少。路海东等<sup>[61]</sup>研究发现，在以常规播期为中心的较大范围内，只要不显著影响玉米后期籽粒灌浆，就可以根据降雨后土壤墒情确定播期，通过提高作物成苗率进而提高玉米产量和WUE。在陕西渭北旱塬5月4日以前适墒播种是玉米高产的有效避旱播期。张明明等<sup>[67]</sup>研究表明，在一定时间范围内，通过增加播量，可以获得与适期播种相近的产量。我们的研究也发现，通过适雨播种、沟播、深播、土下覆膜等方式和措

施，等墒、找墒、保墒拓展利用土壤水分的时空范围，在增加播量条件下，可以活化播期，拓宽播期阈值。从图4可以看出，在环渤海低平原区，通过播量增加等技术组装与配套栽培下，冬小麦只要在11月15日之前播种就可以获得较高的产量和WUE。如果再结合土下覆膜方式增加地温，在11月底之前播种，产量与正常播期的小麦产量没有显著差异。播期的确定可以为雨养旱作区小麦适雨播种提供理论和技术依据。

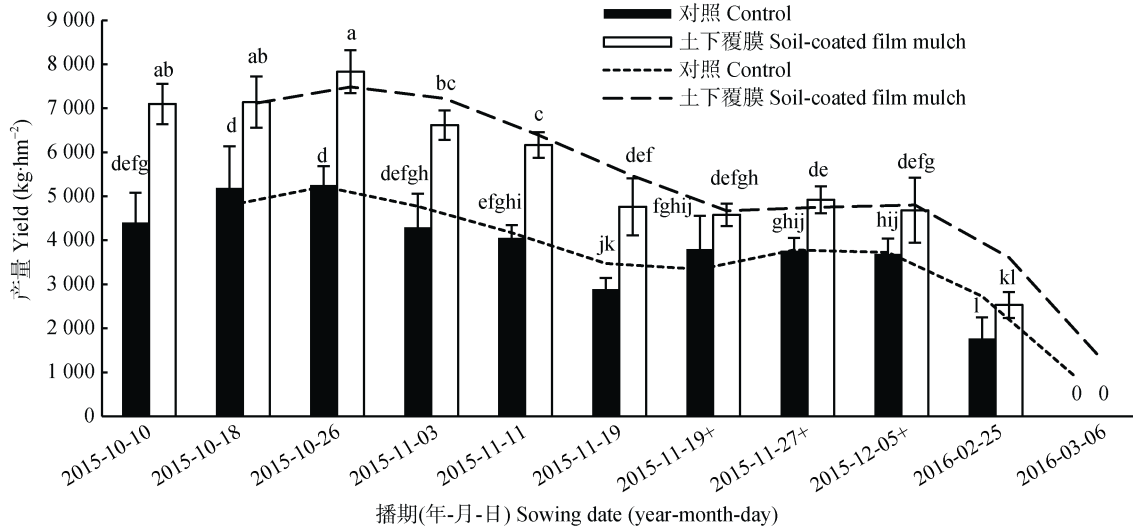


图 4 不同播期和覆盖对冬小麦产量的影响(“+”表示增加播种量)

Fig. 4 Yields of winter wheat sowed in different dates and soil-coated film mulch (“+” indicates seed amount increase). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments at  $P < 0.05$ .

### 2.3 覆盖保墒，提高旱地作物高效用水技术

提高旱作条件下作物对雨水或非正规水的利用也是作物高效用水的一种重要途径。在雨养条件下，保持适宜的根区土壤水分是小麦产量增加的必要条件。地膜覆盖是降低作物裸间蒸发，保持作物最佳土壤水热条件，提高作物 WUE 及获得高产的有效途径之一<sup>[68-69]</sup>。也有研究认为，旱地农业中采用覆膜栽培种植，作物产量的增加是建立在消耗土壤潜在水分的基础上的<sup>[70]</sup>；覆膜尽管可以明显改善小麦生长早期土壤浅层水分状况，但中后期深层(40 cm 以下)土壤水分含量要低于未覆膜处理。地膜覆盖在中后期不再具有保墒作用<sup>[71]</sup>。但土壤水分是一个整体，土壤水分可以沿毛细管向上运行，覆膜处理可以提升作物对深层土壤水分利用<sup>[70]</sup>。旱作条件下小麦-玉米土下覆膜技术是针对环渤海低平原区不能及时播种造成处于休耕或绝产状态的问题提出来的新型覆盖方式。该技术模式对冬小麦季产量和 WUE 增加效果尤其显著。土下覆膜可以改善表层土壤墒情，0~20 cm 土层土壤含水量较不覆膜处理最大可提高 33.1%。在

近滨海盐碱低平原区，土下覆膜技术，蒸发冷凝贴近土壤的膜面上淡水水滴不断落入膜下土壤中，形成了膜下水分循环，且滴落在播种后的小麦籽粒上，使膜下

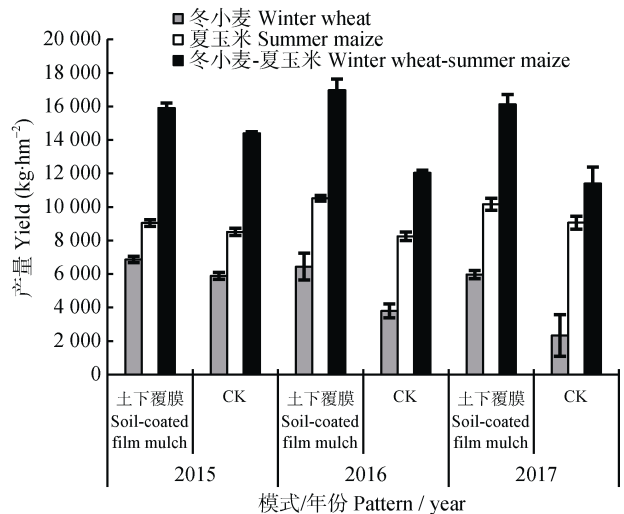


图 5 2015—2017 年小麦-玉米土下覆膜周年产量  
Fig. 5 Annual yields of winter wheat-summer maize under soil-coated film mulch from 2015 to 2017

0~20 耕层盐分含量降低 73.7%。0~15 cm 土层温度提高, 小麦的出苗率、产量和 WUE 也显著增加<sup>[72]</sup>。在我们的试验研究中证实, 在河北省沧州市南大港管理区, 小麦-玉米土下覆膜-膜两用模式, 2015—2017 年小麦玉米周年产量为 15 910.20~16 965 kg·hm<sup>-2</sup>, 比对照增产 10.52%~41.44%。因此, 覆盖保墒在利用微咸水, 不抽提淡水的条件下, 提高了小麦-玉米周年产量和 WUE。

### 3 作物高效用水生理生态研究的瓶颈和思考

随着我国人口增加, 工农业的发展, 农业可用的水资源量将越来越少, 农业高效用水势在必行。作物高效用水是农业高效用水的关键所在。因此, 如何创新和集成各种技术和方法, 提高作物 WUE 是农业高效用水的重中之重。经过大量的调查研究, 笔者认为作物高效用水的未来研究需要在以下 3 个方面实现突破。

#### 3.1 挖掘作物高效用水的新思路

当前对作物高效用水的研究虽然较多, 但是, 不同的研究者只从一个或几个方面出发, 缺乏作物整体高效用水概念。有的研究结果甚至是互相矛盾。未来应该主要从作物本身出发, 探索研究从遗传信息到形态性状不同尺度的作物需水耗水信息、作物健康需水的形态和生理特性、奢侈蒸腾发生的条件和调控机理。阐明作物对变化环境的响应及应对策略。形成作物健康成长的最小水分需求, 实现作物不降低产量下的高效用水技术<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 统一作物高效用水的量化标准

WUE 是作物高效用水的评判指标。但是 WUE 是一个复杂的综合性状, 确定控制作物 WUE 的主要形态和生理指标较多, 不同的研究者不同的试验条件, 得出的结论存在一定的差异。基本上关键农业性状和关键生理指标都可以作为 WUE 的评价指标, 但每个生理或形态指标之间缺乏权威的权重之分。因此, 作物 WUE 的评价方法和指标一直处于自说自话的状态。如何选育出高产和高 WUE 紧密结合的品种是今后遗传改良的一项重要任务。确定的可量化、通用的评价标准和简便可靠的评价方法至关重要, 只有这样才能制定出培育高 WUE 的可行技术路线。

#### 3.3 深入开展作物利用非常规水的研究

作物的耗水特性和作物生长环境是密不可分的。作物生长发育离不开地下淡水、雨水、地表水、咸水和微咸水、再生水等水资源。目前多数研究主要集中在地下水对作物生长发育的影响, 而作物利用非常规水的研究较少。随着水资源短缺, 充分利

用多水源, 构建微咸水灌溉制度和技术, 再生水的灌溉指标等。节约地下淡水, 也是今后作物高效用水的重要方向。

### 参考文献 References

- [1] 山仑. 节水农业与作物高效用水[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2003, 33(1): 1-5  
SHAN L. Water-saving agriculture and of crop high efficient use of water[J]. Journal of Henan University: Natural Science, 2003, 33(1): 1-5
- [2] 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. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 80-87
- [3] 杜尧东, 宋丽莉, 刘作新. 农业高效用水理论研究综述[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 808-812  
DU Y D, SONG L L, LIU Z X. An overview on theoretic research of high efficient water use in agriculture[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 808-812
- [4] 许迪, 龚时宏. 现代农业高效用水技术研究发展趋势与重点[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(5): 554-558  
XU D, GONG S H. Trends and priorities in study of modern agricultural efficient water use technologies[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(5): 554-558
- [5] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. 应用生态学报, 1991, 2(1): 70-76  
SHAN L, XU M. Water-saving agriculture and its physio-ecological bases[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1991, 2(1): 70-76
- [6] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5  
ZHANG S Q, SHAN L. Research progress on water use efficiency of plant[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 1-5
- [7] 张正斌. 《作物抗旱节水的生理遗传育种基础》出版[J]. 西北植物学报, 2004, 24(13): 2340  
ZHANG Z B. Introduction of Physiological Genetic Breeding Basis for Crop Drought Resistance and Water Conservation[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(13): 2340
- [8] 孙昌禹, 董文琦, 刘孟雨, 等. 作物不同品种间水分利用效率差异机理的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 117-121  
SUN C Y, DONG W Q, LIU M Y, et al. Research progression on water use efficiency and its difference mechanism of different crop varieties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(12): 117-121
- [9] MEI X R, ZHONG X L, VINCENT V, et al. Improving water use efficiency of wheat crop varieties in the North China Plain: Review and analysis[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(7): 1243-1250
- [10] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99-104



- WANG H X, LIU C M. Advances in crop water use efficiency research[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 99–104
- [11] 康绍忠, 霍再林, 李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. *中国科学基金*, 2016, 30(3): 208–212
- KANG S Z, HUO Z L, LI W H. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: Advance and future strategies[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2016, 30(3): 208–212
- [12] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 等. 水分亏缺下作物的补偿效应研究进展[J]. *西北农业学报*, 2004, 13(3): 31–34
- DONG B D, ZHANG Z B, LIU M Y, et al. Research progress on compensation effect of crops under water deficit[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2004, 13(3): 31–34
- [13] 段爱旺. 水分利用效率的内涵及使用中需要注意的问题[J]. *灌溉排水学报*, 2005, 24(1): 8–11
- DUAN A W. Connotation of water use efficiency and its application in water-saving practice[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2005, 24(1): 8–11
- [14] 任继周, 侯扶江. 改变传统粮食观, 试行食物当量[J]. *草业学报*, 1999, 8(S1): 55–75
- REN J Z, HOU F J. Change traditional thinking about food grain production and use food equivalent in yield measurement[J]. *Acta Pratacultural Science*, 1999, 8(S1): 55–75
- [15] DONG B D, SHI L, SHI C H, et al. Grain yield and water use efficiency of two types of winter wheat cultivars under different water regimes[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 99(1): 103–110
- [16] ZHANG M M, DONG B D, QIAO Y Z, et al. Yield and water use responses of winter wheat to irrigation and nitrogen application in the North China Plain[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(5): 1194–1206
- [17] 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
- [18] 崔震海, 张立军, 马兴林, 等. 不同高粱品种水分利用效率的研究[J]. *作物杂志*, 2004, (6): 17–20
- CUI Z H, ZHANG L J, MA X L, et al. Study on water use efficiency of different sorghum varieties[J]. *Crops*, 2004, (6): 17–20
- [19] 杨涛, 杨明超, 梁宗锁, 等. 不同玉米品种耗水特性及其水分利用效率的差异研究[J]. *种子*, 2005, 24(2): 3–6
- YANG T, YANG M C, LIANG Z S, et al. Characteristic of consuming water of different maize varieties and diversity of water use efficiency[J]. *Seed*, 2005, 24(2): 3–6
- [20] SHEARMAN V J, SYLVESTER-BRADLEY R, SCOTT R K, et al. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK[J]. *Crop Science*, 2005, 45(1): 175–185
- [21] JI X, SHIRAN B, WAN J, et al. Importance of pre-anthesis anther sink strength for maintenance of grain number during reproductive stage water stress in wheat[J]. *Plant Cell Environment*, 2010, 33: 926–942
- [22] 黄占斌, 山仑. 水分利用效率及其生理生态机理研究进展[J]. *生态农业研究*, 1998, 6(4): 19–23
- HUANG Z B, SHAN L. Research progression on water use efficiency and its physio-ecological mechanism[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1998, 6(4): 19–23
- [23] 张喜英, 裴冬, 胡春胜. 太行山山前平原冬小麦和夏玉米灌溉指标研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 36–41
- ZHANG X Y, PEI D, HU C S. Index system for irrigation scheduling of winter wheat and maize in the piedmont of Mountain Taihang[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(6): 36–41
- [24] TURNER N C. Crop water deficits: A decade of progress[J]. *Advances in Agronomy*, 1986, 39: 1–51
- [25] DOLFERUS R, JI X M, RICHARDS R A. Abiotic stress and control of grain number in cereals[J]. *Plant Science*, 2011, 181(4): 331–341
- [26] YANG J C, ZHANG J H. Grain filling of cereals under soil drying[J]. *New Phytologist*, 2006, 169(2): 223–236
- [27] SINCLAIR T R, JAMIESON P D. Grain number, wheat yield, and bottling beer: An analysis[J]. *Field Crops Research*, 2006, 98(1): 60–67
- [28] DONG B D, ZHENG X, LIU H P, et al. Effects of drought stress on pollen sterility, grain yield, abscisic acid and protective enzymes in two winter wheat cultivars[J]. *Frontier in Plant Science*, 2017, 8: 1008
- [29] 王会肖, 刘昌明. 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1632–1636
- WANG H X, LIU C M. Experimental study on crop photosynthesis, transpiration and high efficient water use[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1632–1636
- [30] 杨文文, 张学培, 王洪英. 晋西黄土区刺槐蒸腾、光合与水分利用的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 72–75
- YANG W W, ZHANG X P, WANG H Y. Study on *Robinia pseudoscacia* L. transpiration, photosynthesis and water use efficiency[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 72–75
- [31] 李茂松. 作物奢侈蒸腾及其调控基础研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
- LI S M. Research on luxury transpiration and its modification[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010
- [32] JONES H G. Crop characteristics and the ratio between assimilation and transpiration[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1976, 13(2): 605–622
- [33] SCHROEDER J I, KWAK J M, ALLEN G J. Guard cell abscisic acid signalling and engineering drought hardiness in plants[J]. *Nature*, 2001, 410(6826): 327–330
- [34] DUTILLEUL C, GARMIER M, NOCTOR G, et al. Leaf mitochondria modulate whole cell redox homeostasis, set antioxidant capacity, and determine stress resistance through altered signaling and diurnal regulation[J]. *Plant Cell*, 2003, 15(5): 1212–1226

- [35] 孙景生, 刘祖贵, 肖俊夫, 等. 冬小麦节水灌溉的适宜土壤水分上、下限指标研究[J]. 中国农村水利水电, 1998, (9): 10–12  
SUN J S, LIU Z G, XIAO J F, et al. Study on suitable soil moisture and lower and upper limit indexes of winter wheat water saving irrigation[J]. China Rural Water and Hydropower, 1998, (9): 10–12
- [36] 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
- [37] 吴海卿, 段爱旺, 杨传福. 冬小麦对不同土壤水分的生理和形态响应[J]. 华北农学报, 2000, 15(1): 92–96  
WU H Q, DUAN A W, YANG C F. Physiological and morphological responses of winter wheat to soil moisture[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2000, 15(1): 92–96
- [38] 纪莎莎. 基于作物叶片尺度水分高效利用的气孔最优调控机理研究与应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017  
JI S S. Research and application of the optimal stomatal regulation mechanism based on the crop efficient water use at leaf scale[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017
- [39] 康绍忠, 张建华, 梁宗锁, 等. 控制性交替灌溉——一种新的农田节水调控思路[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 1–6  
KANG S Z, ZHANG J H, LIANG Z S, et al. The controlled alternative irrigation — A new approach for water saving regulation in farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(1): 1–6
- [40] 罗丹丹, 王传宽, 金鹰. 植物水分调节对策: 等水与非等水行为[J]. 植物生态学报, 2017, 41(9): 1020–1032  
LUO D D, WANG C K, JIN Y. Plant water-regulation strategies: Isohydry versus anisohyric behavior[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(9): 1020–1032
- [41] GALLÉ Á, CSISZÁR J, BENYÓ D, et al. Isohydry and anisohyric strategies of wheat genotypes under osmotic stress: Biosynthesis and function of ABA in stress responses[J]. Journal of Plant Physiology, 2013, 170(16): 1389–1399
- [42] 王建永, 李朴芳, 程正国, 等. 旱地小麦理想株型与生长冗余[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2428–2437  
WANG J Y, LI P F, CHENG Z G, et al. Plant ideotype and growth redundancy in dryland wheats[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2428–2437
- [43] 盛承发. 生长的冗余——作物对于虫害超越补偿作用的一种解释[J]. 应用生态学报, 1990, 1(1): 26–30  
SHENG C F. Growth tediousness as an explanation over-compensation of crops for insect feeding[J]. Journal of Applied Ecology, 1990, 1(1): 26–30
- [44] TARDIEU F, SIMONNEAU T. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: Modelling isohyric and anisohyric behaviours[J]. Journal of Experimental Botany, 1998, 49(S1): 419–432
- [45] 张彦群, 王传宽. 北方和温带森林生态系统的蒸腾耗水[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(6): 838–845  
ZHANG Y Q, WANG C K. Transpiration of boreal and temperate forests[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2008, 14(6): 838–845
- [46] KLEIN T. The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohyric and anisohyric behaviours[J]. Functional Ecology, 2014, 28(6): 1313–1320
- [47] LOVISOLO C, HARTUNG W, SCHUBERT A. Whole-plant hydraulic conductance and root-to-shoot flow of abscisic acid are independently affected by water stress in grapevines[J]. Functional Plant Biology, 2002, 29(11): 1349–1356
- [48] JI X M, DONG B D, SHIRAN B, et al. Control of abscisic acid catabolism and abscisic acid homeostasis is important for reproductive stage stress tolerance in cereals[J]. Plant Physiology, 2011, 156(2): 647–662
- [49] 张凤莲, 董文琦, 岳增良, 等. 内源激素对作物高效用水的调控机理研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 6–10  
ZHANG F L, DONG W Q, YUE Z L, et al. Progress on the regulation mechanism of endogenous hormone in efficient water use of crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(7): 6–10
- [50] 张宏一, 朱志华. 植物干旱诱导蛋白研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2004, 5(3): 268–270  
ZHANG H Y, ZHU Z H. Research progress in drought-induced proteins in plants[J]. Journal of Plant Genetics Resources, 2004, 5(3): 268–270
- [51] 陈素英, 张喜英, 邵立威, 等. 华北平原旱地不同熟制作物产量、效益和水分利用比较[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 535–543  
CHEN S Y, ZHANG X Y, SHAO L W, et al. A comparative study of yield, cost-benefit and water use efficiency between monoculture of spring maize and double crops of wheat-maize under rain-fed condition in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 535–543
- [52] YANG X L, CHEN Y Q, PACENKA S, et al. Effect of diversified crop rotations on groundwater levels and crop water productivity in the North China Plain[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522: 428–438
- [53] 刘孟雨, 王新元. 黑龙江地区的地下水资源采补平衡与作物种植制度[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(3): 79–84  
LIU M Y, WANG X Y. Balance between exploitation and supply of underground water resources and plantin system in Heilonggang region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1994, 12(3): 79–84
- [54] 贾大林, 姜文来. 试论提高农业用水效率[J]. 节水灌溉, 2000, (5): 18–21  
JIA D L, JIANG W L. A discusses on increasing the efficiency of agricultural water using[J]. Water Saving Irrigation, 2000, (5): 18–21
- [55] 王大鹏, 吴文良, 顾松东, 等. 华北高产粮区基于种植制度

- 调整和水氮优化的节水效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(2): 1-8
- WANG D P, WU W L, GU S D, et al. Water-saving effect under adjustment of cropping systems and optimization of water and nitrogen in high yield regions of North China[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(2): 1-8
- [56] 邵立威, 孙宏勇, 陈素英, 等. 根土系统中的根系水力提升研究综述[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1080-1085
- SHAO L W, SUN H Y, CHEN S Y, et al. An overview of root hydraulic lift in root-soil systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1080-1085
- [57] SEKIYA N, ARAKI H, YANO K. Applying hydraulic lift in an agroecosystem: Forage plants with shoots removed supply water to neighboring vegetable crops[J]. Plant & Soil, 2011, 341(1-2): 39-50
- [58] BAKHTAVAR M A, AFZAL I, BASRA S M A, et al. Physiological strategies to improve the performance of spring maize (*Zea mays* L.) planted under early and optimum sowing conditions[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0124441
- [59] FERRISE R, TRIOSI A, STRATONOVITCH P, et al. Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study[J]. Field Crops Research, 2010, 117(2/3): 245-257
- [60] 李建国, 韩勇, 解文孝, 等. 播期及环境因子对水稻产量和品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(8): 3160-3162
- LI J G, HAN Y, XIE W X, et al. Effects of the temperature and humidity in filling and fruiting stages on the yield and quality of rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(8): 3160-3162
- [61] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 播期对雨养旱地春玉米生长发育及水分利用的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(12): 1906-1914
- LU H D, XUE J Q, HAO Y C, et al. Effects of sowing time on spring maize (*Zea mays* L.) growth and water use efficiency in rainfed dryland[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(12): 1906-1914
- [62] 刘万代, 陈现勇, 尹钧, 等. 播期和密度对冬小麦豫麦 49-198 群体性状和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 464-469
- LIU W D, CHEN X Y, YIN J, et al. Effect of sowing date and planting density on population trait and grain yield of winter wheat cultivar Yumai 49-198[J]. Journal of Triticeae Crops, 2009, 29(3): 464-469
- [63] BASSU S, ASSENG S, MOTZO R, et al. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1): 109-118
- [64] 李向岭, 李从锋, 侯玉虹, 等. 不同播期夏玉米产量性能动态指标及其生态效应[J]. 中国农业科学, 2012, 45(6): 1074-1083
- LI X L, LI C F, HOU Y H, et al. Dynamic characteristics of summer maize yield performance in different planting dates and its effect of ecological factors[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(6): 1074-1083
- [65] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 等. 播种时期与密度对关中灌区夏玉米群体生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1247-1253
- MA G S, XUE J Q, LU H D, et al. Effects of planting date and density on population physiological indices of summer corn (*Zea mays* L.) in central Shaanxi irrigation area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(6): 1247-1253
- [66] 张宁, 杜雄, 江东岭, 等. 播期对夏玉米生长发育及产量影响的研究[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(5): 7-11
- ZHANG N, DU X, JIANG D L, et al. Effect of sowing date on growth and yield of summer corn (*Zea mays* L.)[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2009, 32(5): 7-11
- [67] 张明明, 董宝娣, 乔匀周, 等. 播期、播量对旱作小麦‘小偃 60’生长发育、产量及水分利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(8): 1095-1102
- ZHANG M M, DONG B D, QIAO Y Z, et al. Effects of sowing date and seeding density on growth, yield and water use efficiency of ‘Xiaoyan 60’ wheat under rainfed condition[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(8): 1095-1102
- [68] CHAKRABORTY D, NAGARAJAN S, AGGARWAL P, et al. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(12): 1323-1334
- [69] 张德奇, 廖允成, 贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 208-213
- ZHANG D Q, LIAO Y C, JIA Z K. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 208-213
- [70] 张淑芳, 柴守玺, 简艳春, 等. 冬小麦地膜覆盖的水分效应[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(2): 45-52
- ZHANG S F, CHAI S X, LIN Y C, et al. Effects of plastic film mulching on soil moisture in winter wheat field[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(2): 45-52
- [71] 王俊, 李凤民, 宋秋华, 等. 地膜覆盖对土壤水温和春小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 205-210
- WANG J, LI F M, SONG Q H, et al. Effects of plastic film mulching on soil temperature and moisture and on yield formation of spring wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(2): 205-210
- [72] ZHANG M M, DONG B D, QIAO Y Z, et al. Effects of sub-soil plastic film mulch on soil water and salt content and water utilization by winter wheat under different soil salinities[J]. Field Crops Research, 2018, 225: 130-140