

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2023.21034

综述

## 华北平原冬小麦-夏玉米种植体系周年水分高效利用研究进展

张金鑫<sup>1,2</sup> 葛均筑<sup>2</sup> 马 玮<sup>1</sup> 丁在松<sup>1</sup> 王新兵<sup>1</sup> 李从锋<sup>1</sup> 周宝元<sup>1,\*</sup>  
赵 明<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 中国农业科学院作物科学研究所 / 农业农村部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081; <sup>2</sup> 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384

**摘 要:** 在保证周年较高产量的同时, 进一步提高水分利用效率是促进华北平原冬小麦-夏玉米一年两熟种植体系可持续发展的关键。从 20 世纪中晚期开始国内学者便从节水灌溉技术创新、灌溉制度优化、替代节水种植制度构建和节水抗旱新品种选育等方面开展了以冬小麦-夏玉米两熟种植体系为核心的周年水分高效利用途径的探索, 取得了重要进展, 显著提高了作物水分利用效率(WUE)。本文综述了华北平原冬小麦-夏玉米种植体系水分高效利用的研究进展, 并提出了通过耕作或播/收期调控冬小麦-夏玉米周年降水与地下水平衡利用, 促进周年水分(灌溉水和降水)高效利用的技术途径, 以充分挖掘华北平原水分生产潜力, 为该区冬小麦-夏玉米种植体系节水高产栽培及节水种植制度建立提供思路和依据。

**关键词:** 冬小麦-夏玉米; 节水灌溉; 节水种植; 节水品种; 平衡利用

## Research advance on annual water use efficiency of winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain

ZHANG Jin-Xin<sup>1,2</sup>, GE Jun-Zhu<sup>2</sup>, MA Wei<sup>1</sup>, DING Zai-Song<sup>1</sup>, WANG Xin-Bing<sup>1</sup>, LI Cong-Feng<sup>1</sup>, ZHOU Bao-Yuan<sup>1,\*</sup>, and ZHAO Ming<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Crop Physiology and Production, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; <sup>2</sup> College of Agronomy & Resource and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China

**Abstract:** Improving water use efficiency without reducing the annual grain yield is the key to promoting the sustainable development of the winter wheat-summer maize cropping system in the North China Plain. Since the middle and late 20th century, many researches have explored ways to improve the annual water use efficiency of winter wheat-summer maize, including development of water-saving irrigation technology, optimizing of irrigation system, establishment of alternative water-saving cropping system, and breeding new variety of water-saving and drought resistant, which significantly improved the crop water use efficiency (WUE). Here, we summarized the research advance on efficient annual water utilization of winter wheat-summer maize cropping system in North China Plain, and proposed a way regulating the annual water balance through using appropriate tillage or sowing/harvest date to improve water use efficiency of winter wheat-summer maize cropping system. It could provide theory and technical support for the establishment of water-saving and high-yield cultivation cropping system of winter wheat-summer maize in the North China Plain.

**Keywords:** winter wheat-summer maize; water-saving irrigation; water-saving cropping; water-saving varieties; balanced use

本研究由国家自然科学基金项目(32071957), 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-02-12)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S2022ZD05)资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (32071957), the China Agriculture Research System of MOF and MARA, and the Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (S2022ZD05).

\* 通信作者(Corresponding authors): 周宝元, E-mail: zhoubaoyuan@caas.cn; 赵明, E-mail: zhaoming@caas.cn

第一作者联系方式: E-mail: jinxxx.zhang@qq.com

Received (收稿日期): 2022-05-09; Accepted (接受日期): 2022-10-10; Published online (网络出版日期): 2022-10-18.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20221017.1425.006.html>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

华北平原是我国重要的粮食产区,冬小麦-夏玉米一年两熟是该区主要种植模式,其中小麦、玉米产量分别占全国总产的75%和35%左右<sup>[1]</sup>,促进该区小麦和玉米持续增产对保障国家粮食安全和农民增收具有重要意义。然而,华北平原水资源不足,特别是近年来受气候变化影响,该区水资源紧缺与粮食持续增产需求的矛盾日益突出,已成为冬小麦-夏玉米种植体系可持续发展的第一限制性因素<sup>[2]</sup>。因此,保证高产的同时,最大限度的提高水分利用效率(WUE)一直以来是华北平原冬小麦-夏玉米种植体系面临的重要挑战之一。从20世纪80年代开始,我国农业工作者便在农田水平上开展了作物需/耗水量与作物WUE的研究,虽然在作物缺水生长机制和新型灌溉技术等方面取得了一定的研究进展,但涉及作物品类较少,大都围绕单一环境因素如何影响作物WUE,缺乏从内外因素上系统性地分析作物WUE机制。随着近年来气候变化的加剧和人们对粮食需求的增强,冬小麦-夏玉米体系水分高效利用已不是单一作物层面的研究,而是自然与人工等多因素互作的研究。近年来,研究人员从节水灌溉技术及设备研发、种植制度替代与优化、节水高产品种选育等角度开展了大量研究,取得了一系列成果,在一定程度上提高了华北平原冬小麦-夏玉米种植体系水分利用效率。本文总结了华北平原冬小麦-夏玉米水分高效利用方面的研究进展和研究成果,并从两季水资源(降雨和灌水)分配及周年水分供应与消耗平衡角度,提出了通过耕作或播/收期调控实现冬小麦-夏玉米周年高产和水分高效利用的技术途径,以期为推动该区粮食生产可持续发展提供理论依据。

## 1 冬小麦-夏玉米种植体系水分利用现状

华北平原处于半干旱、半湿润气候带,由于受大陆性季风气候影响,水资源较为紧缺,是我国水资源供需压力最大的区域之一<sup>[3]</sup>。该区年平均降水量为554 mm,年平均蒸发量约为1550 mm<sup>[4]</sup>,降水量年内分布不均且变化较大,特别是近年来受全球气候变化影响,气温逐年上升的同时降雨量却逐年减少。1983—2013年数据表明<sup>[5]</sup>,该区气温整体呈现上升趋势(每10年0.20℃),降水整体呈现减少趋势(每10年-1.75 mm)。另外,华北平原地下水资源也不足。经调查<sup>[4]</sup>,华北平原天然地下水量为每年 $2.274 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,浅层和深层地下水可开采量分别为

每年 $1.683 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $2.42 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,深层地下水水位低于海平面的范围已达 $7.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占平原区总面积的一半。20世纪70年代以来,随着盐碱地改良和农田水利建设等项目的大量开展,农业灌溉导致地下水开采量急剧增加,达到地下水总开采量的79%。由于长期抽取地下水用以灌溉,导致地下水位快速降低,平均每年下降0.5~1.0 m,从而造成了严重的地面沉降和地裂现象<sup>[6]</sup>,地下水漏斗面积和体积逐年扩大加深并呈复合连片趋势,总面积由2005年的0.97万公顷增大至2019年的1.4万公顷<sup>[7]</sup>。华北平原成为全世界最大的“地下水漏斗”和水环境最为脆弱的地区。

当前,华北平原农作物轮作方式主要为冬小麦和夏玉米一年两熟,其种植面积超过总耕地面积的80%<sup>[4]</sup>。冬小麦-夏玉米的需水量与自然降雨量之间的较大差异,及降雨季节间不均衡分布,是造成该体系降雨利用效率低、过度消耗地下水的主要原因<sup>[8-9]</sup>。华北平原年降雨量在500~800 mm左右,而每年冬小麦-夏玉米体系的水分消耗在870 mm左右,且降雨大部分集中在6月至8月(夏玉米季),平均只有20%~30%的降雨(174~261 mm)在冬小麦季<sup>[9]</sup>。然而,小麦季每年水分消耗在450 mm以上<sup>[10]</sup>,仅凭自然降雨无法满足生长需求,冬小麦灌溉主要依靠抽取地下水,其灌溉用水占华北平原灌溉用水总量的70%左右。对此,近年有报道<sup>[11]</sup>表明,在小麦季浇水2次(每次75 mm),即可取得较高水分生产力,有望缓解灌溉水短缺问题。

除地下水资源本身紧缺外,灌溉方式落后与用水管理不当也导致了水资源的严重浪费,降低了水资源的利用效率。2021年我国农田灌溉水有效利用系数为0.568,这也意味着约有2/5的水分没有被作物充分利用<sup>[12-13]</sup>,较节水发达国家0.7~0.8还有一定差距。小麦、玉米和水稻的水分利用效率平均分别为1.19、2.04和0.80 kg m<sup>-3</sup>,仅相当于美国的96%、70%和57%,同时,我国农业用水占总用水量的62.3%,而发达国家这一比例多低于50%<sup>[14]</sup>。

总体上,目前华北平原水资源不足但需水量大的现状没有改变。虽然经过持续数年的南水北调工程和地下水超采治理,在一定程度上遏制了地下水位的下降,使该区浅层地下水增加32.4亿立方米,但深层地下水仍减少15.3亿立方米<sup>[15]</sup>。因此,在气温逐年升高、降水逐年减少、深层地下水仍然匮乏、产量需求不断升高等多重因素的影响下,华北平原

的农业用水形势仍然十分严峻。

2 冬小麦-夏玉米种植体系水分高效利用研究成果

从20世纪中晚期开始，国内大量学者便从节水灌溉技术和灌溉制度创新、替代节水种植制度构建和节水抗旱新品种选育等方面开展了冬小麦-夏玉米周年水分高效利用途径的探索，取得了一批有代表性的成果，在一定程度上提高了该区水分利用效率。

表 1 冬小麦-夏玉米节水灌溉技术  
Table 1 Water-saving irrigation techniques of winter wheat-summer maize

节水灌溉方式	对照	作物	用水量	水分利用效率	产量	参考文献
Water-saving irrigation	CK	Crop	Water consumption (%)	WUE (%)	Yield (%)	Reference
根层干湿交替灌溉	均匀灌溉	玉米	34.4–46.8↓	19.57–28.77↑	6–11↓	Kang et al. [17]
Controlled alternate partial root-zone irrigation	Uniform irrigation	Maize				
亏缺灌溉	充分灌溉	小麦	75↓	24–30↑	15↓	Zhang et al. [18]
Deficit irrigation	Full irrigation	Wheat				
滴灌	漫灌	小麦	29↓	92.2↑	37↑	程莲等[26]
Drip irrigation	Flood irrigation	Wheat				Cheng et al. [26]
微喷灌	漫灌	小麦	21.0–54.2↓	5.3–27.8↑	5.3–18.9↑	张英华等[28]
Micro-sprinkler irrigation	Flood irrigation	Wheat				Zhang et al. [28]

↑表示节水技术效果指标与对照比提高；↓表示节水技术效果指标与对照比下降。  
↑ indicates the increasing of water saving technology indexes compared with control; ↓ indicates the decreasing of water saving technology indexes compared with control.

Li等<sup>[20]</sup>和Sun等<sup>[21]</sup>研究表明，适度灌溉有利于减少小麦整个生育期的耗水量，从而提高水分利用效率。王东<sup>[22]</sup>发现高产冬小麦全生育期高水分利用效率的最佳灌水量为101.8 mm，且采用按需补灌方式不仅能保持高产优势，还能节约灌溉用水20%~32%。闫丽霞等<sup>[23]</sup>研究表明，依据小麦不同生育阶段的需水规律，拔节期、开花期依据测定的0~40 cm土层土壤相对含水量补灌至65%土壤相对含水量，是同步实现高产与节水的有效措施。Kang等<sup>[17]</sup>对盆栽玉米进行了灌溉试验，发现利用CAPRI技术使作物部分根系暴露在干燥的土壤中，并以一定频率交替灌溉根系湿润侧与干燥侧，一方面诱导作物持续产生干燥信号，促进部分气孔关闭以减少水分散失，另一方面通过湿润侧根系持续吸收水分，促使次生根的形成，加强对水分的吸收利用，且两侧交替灌溉后易诱发生长补偿效应。通过试验发现，半根区交替灌溉减少了34.4%~36.8%的用水量，总生物量仅减少了6%~11%，WUE提高了19.57%~28.77%。目前该技术多用于须根系作物，主要应用在温室及盆栽种植中，为实际大田生产应用提供了技术基础与

2.1 冬小麦-夏玉米节水灌溉技术

在水资源紧缺的条件下，有效管理灌溉用水是解决水资源短缺的主要对策之一。Chen等<sup>[16]</sup>运用多种分析方法研究发现，对于单位面积灌溉用水量，华北地区主要受灌溉技术、用水结构和种植规模的影响。近年来研究实践表明，根层干湿交替灌溉<sup>[17]</sup>、亏缺灌溉<sup>[18]</sup>、限制性灌溉<sup>[19]</sup>和滴灌<sup>[13]</sup>等发展迅速的节水灌溉技术可以减少灌水量的同时提高水分利用效率(表1)。

良好思路。Zhang等<sup>[18]</sup>对冬小麦和玉米的研究表明，亏缺灌溉(或限制性灌溉)通过对作物不同生育时期的需水量进行灌溉定额，在不严重影响产量的条件下尽量减少灌水，以达到最大经济效益。该技术通过诱发作物根系深层扎根，使作物能够吸收深层水分。与完全灌溉相比，仅浇一水条件下WUE提高了24%~30%，产量仅损失15%，显著改善了作物对水分的吸收与利用能力。该技术于20世纪80年代在美国中部平原地区进行了广泛应用，国内Kang等<sup>[24]</sup>学者也对其机理进行了相关研究，该技术在华北平原等水资源紧缺地区具有良好的发展意义与前景。

滴灌或微喷灌等节水灌溉新技术，近年来逐渐在华北平原冬小麦生产中应用<sup>[25]</sup>。滴灌通过精确控制灌水量，按照作物生长需求，定量、定时供给水分并输送到作物根系附近，使得根系可以持续不断地吸收水分，能够显著提高作物产量和水分利用率并减少径流等无效水分消耗。程莲<sup>[26]</sup>对不同灌溉模式下的 wheat 进行了试验，发现与漫灌相比，滴灌用水量减少29%，产量却增加了37%，水分利用效率增加了92.2%，经济效益明显。美国水管理研究实验室也

进行了跨度15年的地下滴灌试验<sup>[27]</sup>,数据表明在地下滴灌(SDI)条件下,甜玉米等多种作物的产量和用水效率均有显著提高。杨明达<sup>[13]</sup>研究发现,与地表滴灌相比,在水分亏缺条件下使用地下滴灌方式使得冬小麦的产量增加约5.8%~12.5%,夏玉米产量增加约3.4%~19.9%,灌水量分别平均降低7.0%~13.9%和1.6%~11.4%,水分利用效率提高4.9%~8.6%,同时能有效减少土面蒸发,提高灌溉均匀度,具备节水和增产双潜力。滴灌技术目前在以色列等中东国家和地区发展较快,应用面积较广,且已在我国西北、东北等地区应用多年,在棉花等经济作物上取得了良好的经济和生态效益,也为华北地区未来浇灌模式探索提供了参考。微喷带灌溉是在喷灌和滴灌基础上发展起来的一种新型灌溉方式,利用微喷带将水均匀地喷洒在田间,设施相对简单、廉价。张英华等<sup>[28]</sup>研究表明,小麦拔节期和开花期进行微喷补灌具有按需补给、精确灌溉优势,微喷补灌后产量提高了5.3%~18.9%,水分利用效率提高了5.3%~27.8%,灌溉水分布均匀系数87.9%~97.0%,减少灌水21.0%~54.2%。Man等<sup>[29]</sup>也发现采用微喷管补灌的方式能改变0~40 cm土壤水分的分布,有助于小麦WUE和干物质产量的提升。董志强等<sup>[30]</sup>进行的微喷灌试验表明,在同等产量水平下,微喷灌较传统畦灌模式在平水年与枯水年的年节水潜力分别为20~50 mm和70~110 mm,可在我国华北水资源匮乏地区因地制宜推广应用。

然而,虽然根层干湿交替灌溉、亏缺灌溉、限制性灌溉、滴喷灌和按需补灌等方式,能够较大幅度提高水资源利用效率<sup>[2]</sup>,但为保证小麦高产仍需250 mm以上的灌溉水,不可避免地导致地下水过度消耗,最终还是会在一定程度上导致地下水位的下降<sup>[8]</sup>。

## 2.2 冬小麦-夏玉米节水灌溉制度

除应用节水灌溉技术外,通过减少灌水量、精准调控灌溉时期与灌水量、浇灌微咸水等优化灌溉制度也是重要的节水途径。张喜英等<sup>[31-32]</sup>研究发现,冬小麦在水分不足时可以通过优化灌溉制度提高生物量,在产量损失不大时能够有效节约灌溉水。与充分灌溉模式相比,最小灌溉模式总产量在仅减少28%的同时节约69%的灌溉水,作物WUE提高13%。此外,非充分灌溉可使冬小麦早熟,夏玉米早播,进而增加玉米季产量,且有利于机械化脱粒收获<sup>[31,33]</sup>。Zhou等<sup>[34]</sup>进一步研究表明,非充分灌溉结合秸秆

覆盖或地膜覆盖垄和秸秆覆盖沟在6年里节约了约350 mm灌溉水,产量也取得了提高。Wang等<sup>[35]</sup>发现采用冬小麦播种后不灌溉,夏玉米播种后减少灌水量的方法可以显著节约水资源并且取得相近的产量。王慧军等<sup>[32]</sup>探索了冬小麦的雨养旱作模式,结果表明其产量相比于充足灌溉降低34%,耗水降低了45%;Zhang等<sup>[31,36]</sup>研究结果也与其相近,完全雨养模式产量降低50%以上。Han等<sup>[37]</sup>发现在冬小麦拔节和抽穗期进行灌溉,使得前茬冬小麦与后茬夏玉米均取得较优的WUE和籽粒产量。Yang等<sup>[38]</sup>进一步明确了在冬小麦期和夏玉米期分别浇灌2次和1次(单次灌水量75 mm)的灌溉制度,有效提高了作物WUE并缓解了地下水位的下降。王志敏等<sup>[39]</sup>通过调整灌溉次数,利用晚播、增苗、缩行、减灌、精种、调肥等技术的实施增加下层土壤水分吸收速率并提高周年水分利用率,建立了小麦高产、高效、低耗和简化“四统一”技术。河北农业大学探明了海河平原高产小麦玉米农田耗水特征,明确了节水灌溉技术原理,建立了麦田墒情监测指标,创新了小麦、玉米两熟“减灌降耗提效”水分高效利用综合技术,小麦减灌1~2次,每公顷节水750 m<sup>3</sup>以上,形成了“海河平原小麦玉米两熟丰产高效关键技术创新与应用”成果,获2011年度国家科技进步二等奖。还有报道表明<sup>[40-41]</sup>,使用微咸水在冬小麦拔节期浇灌一次即可取得与淡水类似的效果,有效利用了华北平原丰富的地表浅层微咸水。Soothar等<sup>[42]</sup>进行的咸淡交替灌溉也表明其适用于华北地区冬小麦浇灌,是未来较有前途的选择之一。

不同灌溉制度虽然能在一定程度上节约灌水,稳定产量,但实际应用中也存在一定的制约因素。最小灌溉模式能够在水资源短缺地区取得较优收益,但目前关于长期少灌是否影响土壤物理、化学与生物特性,从而逐步造成地力下降的报道较少,是需要未来重点关注的问题。雨养旱作模式对气象条件和旱作技术要求较高,实际使用中受不可控因素影响较大,一旦出现重大天气因素影响,易导致大量减产。以“减灌降耗提效”为例,通过调整灌溉次数与灌溉时期,精确评估作物不同时期需水量而进行定额浇灌的灌溉制度是目前的研究热点,该制度能够确保经济与生态效益兼得,发展此类灌溉制度,对华北平原地区乃至全国部分粮食主产区具有重要的现实意义与发展前景。

综上,目前华北平原地区农业节水技术已研究

并推广多年,但地下水资源持续恶化的现实问题并没有得到有效解决。另外,实际应用中,不同节水灌溉技术与灌溉制度也存在一些缺点,如地形环境因素制约、经济成本和技术要求高、应用费效比低等问题,导致实际推广应用程度较低。总而言之,未来我国农业节水灌溉技术的发展应根据当地经济现状,发展普及性输灌节水技术,明确灌水量和灌水时期的匹配,加强节水灌溉技术与节水灌溉制度的结合,实现精准灌溉是未来对于冬小麦-夏玉米体系周年水分高效利用的切实道路。

### 2.3 冬小麦-夏玉米替代节水种植制度

我国农业用水利用效率不高的主要原因是灌溉用水缺乏科学调配与控制分配,其次是种植结构不合理<sup>[14]</sup>。国外发达国家注重灌溉农业结构调整,由灌溉用水资源紧缺的地区转移到水资源丰富的地区。例如,在20世纪80年代之前美国有85%的灌溉面积在西部,15%在东部;而在90年代有77%的灌溉面积在西部,23%在东部。目前,冬小麦-夏玉米一年两熟是华北平原主要粮食作物的种植制度,虽然该种植制度有效解决了该区粮食短缺的问题,但也造成了严重的生态环境问题<sup>[43]</sup>。当前华北地区地下水超采与高产农业种植制度密切相关,这种条件下即使采用最小灌溉策略也会导致地下水位的不断下降<sup>[44]</sup>。大量研究表明,作物WUE随着作物结构调整与气候变化而变化,通过改变种植制度从而降低耗水量也是重要节水策略<sup>[45-46]</sup>。随着黄淮海地区近50年来降水的不断减少,迫切需要寻找合适的种植制度替代传统冬小麦-夏玉米两熟种植制度,有效减缓或停止地下水水位进一步下降<sup>[47]</sup>。

Gao等<sup>[48]</sup>通过对冬小麦-夏玉米常规种植制度及4种替代种植制度研究,发现两年三熟(W/M-M)制度能在保证产量的前提下缓解地下水水位迅速下降的窘迫状况。但一些研究认为,采用一年一熟春玉米单作和冬小麦-夏玉米→春玉米两年三熟等冬小麦-夏玉米一年两熟的替代种植制度能起到很好的节水效果<sup>[8]</sup>,但年均产量却低于冬小麦-夏玉米种植体系<sup>[49]</sup>。郑媛媛等<sup>[50]</sup>在河北景县进行了不同种植制度条件下的节水试验,试验表明春玉米-冬小麦-夏玉米两年三熟,春玉米-夏玉米一年两熟和单季玉米等种植制度能减少452~753 mm耗水量,提高作物WUE,但经济总产量降低约20%~50%。周宝元等<sup>[51]</sup>和李立娟等<sup>[52]</sup>研究均表明,与冬小麦-夏玉米模式相比,双季玉米体系具有较高的周年辐射及降水生产效率,

籽粒光能利用效率及总生物量,可作为黄淮海区种植模式优化布局和农业生产可持续发展的重要支撑;Wang等<sup>[53]</sup>通过分析不同积温需求的双季玉米品种,进一步优化确定了华北平原双季玉米系统的最佳组合。

以上不少学者通过分析对比不同替代节水种植模式的优劣性,探讨华北平原替代种植制度可能性,发现替代种植制度受环境因素影响大,未来发展潜力较为有限。同时,考虑到小麦作为口粮对于保障国家粮食安全的重要性,冬小麦-夏玉米一年两熟种植体系仍是华北平原主要种植模式,其他替代节水种植模式可作为有益补充,降低种植模式单一导致小麦及玉米易受水分短缺等因素影响而减产的风险。因此,未来华北平原节水研究应仍以冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式为主,以最大化利用周年降水资源为核心,开展周年降水资源优化配置及高效利用研究。

### 2.4 冬小麦-夏玉米节水高产品种选育与应用

作物的品种很大程度上决定着产量的多少和水分利用效率的高低<sup>[54]</sup>。随着华北平原水分短缺危机的加剧,节水高产品种的选育显得愈发重要,作物抗旱耐旱育种转向水分高效利用育种势在必行。董宝娣等<sup>[55]</sup>选用石家庄8号、晋麦47等19个黄淮海冬麦区大面积推广的品种进行试验,发现不同冬小麦品种的耗水量、产量和水分利用效率之间存在一定差异,产量相差最大达44.86%,水分利用效率相差可达42.18%。高繁等<sup>[56]</sup>对郑单958、屯玉808等10个玉米品种进行试验,研究发现产量越高的品种水分利用效率越高,选用以郑单958为例的耐密型高产品种是玉米实现节水高产的有效途径。李源方等<sup>[57]</sup>研究表明,综合产量和水分利用效率,泰科麦30+郑单958为黄淮海地区最优麦玉品种组合。

除遴选现有节水高产品种外,通过作物遗传改良选育新品种也是研究热点<sup>[58]</sup>。据报道<sup>[59]</sup>,科研人员已经克隆了数百个在干旱条件下被诱导产生的基因,得到了不少耐旱的转基因植株,使得人类在分子水平上对干旱过程有了初步的理解。孙蕊等<sup>[54]</sup>认为应根据生长气候环境来筛选适宜环境的冬小麦基因型,筛选分蘖能力强、水分利用效率高和抗逆性强的冬小麦品种,且目前已从小麦上分离得到7个关于水分胁迫信息传递和调节气孔反应的化学信使ABA的应答基因和克隆了150多个受ABA调控的基因。赵小强等<sup>[60]</sup>在8种水旱环境下进行了相关QTL

定位,分析QTL×E及上位性互作位点,检测到了6个相应叶面积sQTL,于此区间挖掘到了12个调控玉米叶发育相关候选基因,为选育节水抗旱玉米品种提供了参考。张娟等<sup>[61]</sup>从生理机制、生理遗传两方面综述了节水抗旱小麦遗传育种研究进展,表明应当以产量为目标,综合多种生理指标为依据进行品种选育,同时运用基因定位技术辅助研究,从而培育优良品种。

如前所述,当今麦玉一年两熟模式中受水分因素影响最大的作物是小麦,相关学者也对此进行了多年的研究与改良。目前,不少节水高产品种已经投入生产实践。肖永贵等<sup>[62]</sup>研究表明,高产优质节水小麦新品种“中麦1062”在春季只浇一水条件下,即可取得8397.0 kg hm<sup>-2</sup>产量。石家庄市农林科学研究院育成的石麦15、石麦22等石麦系列品种具备较强的节水抗旱能力,在河北省不同时期发挥了重要作用<sup>[63]</sup>。山西农业科学院小麦研究所<sup>[64]</sup>育成的金麦919在2016—2018年度生产试验中表现出抗旱节水、适应性强、稳定性高等特点,在浇一水条件下年产量可达6000~7500 kg hm<sup>-2</sup>。

自20世纪80年代以来,我国小麦节水抗旱品种的选育已经由早期抗旱性指标的鉴定与选择工作转向为近年来的热点“高WUE”育种。综上所述,虽然目前相关学者取得了一些成果,但选育和应用优质节水高产品种仍是我国未来节水农业的重要途径和研究方向。由于华北平原自然条件限制,未来高WUE型小麦选育应当以产量为最高目标,以WUE为重要导向,以光合作用、渗透调节、激素水平等生理指标为依据进行品种选育。与此同时,品种选育中还存在一些问题亟待解决,如常规育种占据重要地位而分子设计育种仍处在辅助阶段;控制小麦节水与高产的多基因互作问题仍需深入研究;节水性与抗病性/丰产性间往往存在矛盾,需要取舍;作物优良基因库和种质库仍需扩大补充;抗旱/节水基因效应与其作用机理仍需进一步探明;创建并积累基因数据库,为未来育种工作提供技术基础与潜在途径。

### 3 冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用途径探索

前人关于华北平原冬小麦-夏玉米种植体系节水灌溉技术、替代节水种植制度和节水抗旱新品种选育等方面进行了大量的研究探索,取得了重要进展,在一定程度上大大提高了作物水分利用效率。

然而,这些研究大都围绕单一作物开展水分高效利用机制及节水技术研究,由于气候变化加剧了降水的不均衡分布,使得单一作物进一步节水的潜力有限。近年来一些研究证明,从品种搭配、播/收期及耕作措施等方面优化种植系统实现周年水分平衡利用是促进冬小麦-夏玉米种植体系可持续发展的有效途径。为此,笔者在总结前人和本课题组前期研究结果基础上,提出了通过耕作或播/收期调控冬小麦-夏玉米周年水分平衡,促进周年水分(灌溉水和降水)高效利用的技术途径,以充分挖掘华北平原水分生产潜力,为该区冬小麦-夏玉米种植体系节水高产栽培及节水种植制度建立提供思路和依据。

#### 3.1 冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用机制

如前所述,冬小麦-夏玉米需水量与降雨量之间的差异,及降雨季节间的不均衡分布,是造成该体系大量消耗地下水的主要原因<sup>[8-9]</sup>。因此,如何协调周年降雨量与需水量平衡,及周年降雨在两季作物间的平衡是缓解冬小麦-夏玉米体系过度消耗地下水的核心。关于冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用机制前人已经进行了一些探索,并取得了一定的研究进展。Sun等<sup>[9]</sup>分别从冬小麦季和夏玉米季水分需求与降水及灌水平衡角度探讨了周年水资源高效利用机制,提出了根据周年降水量及降水季节间分布确定两季最佳灌水量的技术途径,利用河北栾城8年定位试验确定了在枯水年、平水年和丰水年实现周年水分平衡条件下小麦季优化灌水量分别为186、161和99 mm,玉米季分别为134、88和0 mm,最大限度利用降水资源,减少无效灌溉,但在该灌溉条件下周年产量受到严重影响,丰水年的最高产量也仅为12,214 kg hm<sup>-2</sup>。秦欣等<sup>[65]</sup>从两季水分平衡利用角度对周年节水机制进行了探讨,认为减少冬小麦季灌水量,可显著降低小麦总耗水量,并增加土壤贮水而增大土壤水分库容,提高土体接纳汛期(夏玉米季)降雨能力,有效利用降雨回补地下水,同时也使玉米季蒸散量显著降低,进而实现周年水分平衡和水资源高效利用,并保证较高的周年产量。减少冬小麦季灌水量,可增加小麦对土壤贮水的消耗而增大土壤水分库容,而小麦生长发育前期需要适量灌溉以促进根系快速生长及向深层土壤下扎以吸收利用深层土壤水分(图1)。

可见,上述研究提供了两条促进周年水分平衡利用,提高周年水分利用效率的途径:一是根据不同季节作物需水量和降水量确定最佳灌水量,最大



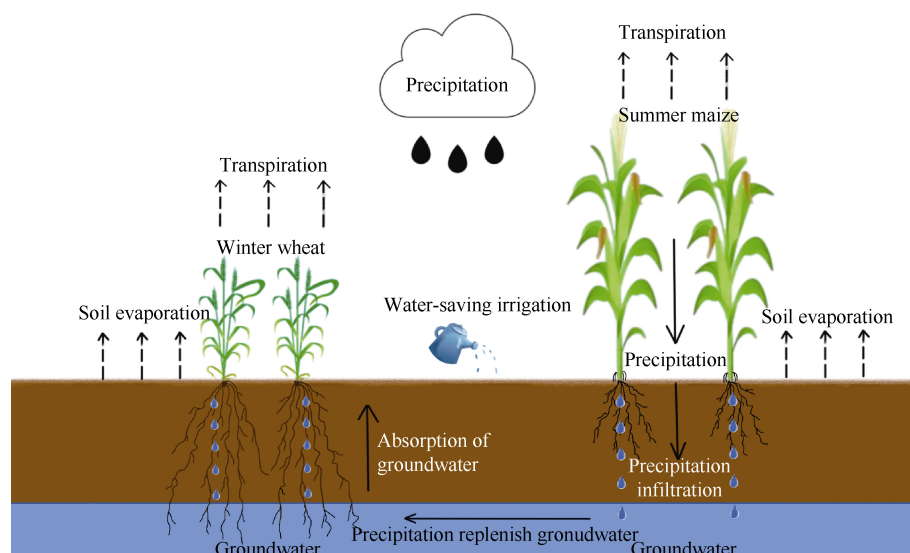


图1 冬小麦-夏玉米种植体系周年水分平衡利用示意图

Fig. 1 Balance use of annual water for winter wheat-summer maize cropping system

限度利用降水,减少无效灌溉;二是从地下水利用与回补平衡的角度,干旱季高效利用地下水,雨季促进降水充分回补地下水,使周年地下水利用与回补趋于平衡。以上两种途径均在一定程度上促进了周年水分平衡和水资源高效利用,但是根据两季降水特点和作物水分需求单独进行优化灌溉无法获得较高周年产量,且进一步节水潜力有限。相对来说,通过协调周年降水与灌水平衡利用(地下水利用与回补平衡)更有利于实现周年高产和水资源可持续利用。然而,目前关于冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用标准多以周年产量和水分利用效率作为评价指标,尚缺乏直观的、定量的评价指标体系,且关于冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用机制,及水分平衡利用的判断标准还有待进一步研究确定。

### 3.2 耕作措施调控冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用

目前已有研究表明<sup>[66]</sup>,耕作措施是影响周年水分平衡利用的重要因素,合理的耕作措施可以调整土壤结构,改善作物对水分的利用效率,为作物提供优良的生长环境。Kan等<sup>[67]</sup>研究表明,长期免耕的土壤0~20 cm土层紧实度高,可以减少土壤水分蒸发损失,但也限制了水分向深层下渗和根系下扎,影响作物对深层土壤水分的吸收利用。He等<sup>[68]</sup>也发现免耕通过减少土壤耗水量从而显著提高水分利用效率达5.5%~36.4%。深耕或深松耕作可以有效缓解土壤紧实,降低20~40 cm土层的土壤容重和渗透阻力,增加土壤孔隙率、水导率和入渗率<sup>[69]</sup>,提高深层

土壤蓄水能力<sup>[70]</sup>,但深耕或深松耕作会导致土壤水分蒸发损失增加,而降低水分利用效率<sup>[67]</sup>。有报道称,深松结合秸秆覆盖可改善土壤蓄水能力,并减少水分蒸发,从而提高水分利用效率<sup>[71-72]</sup>。张凯等<sup>[73]</sup>研究表明,深松+秸秆还田处理显著提高了夏玉米产量及水分利用效率,而对当季冬小麦耗水量影响不大。深松结合秸秆还田同时辅以合理灌溉是较为理想的耕作模式,有利于创造良好的土壤耕层环境,促进作物WUE的提高。Ding等<sup>[74]</sup>发现秸秆覆盖有利于提高小麦返青期前的土壤温度,降低随后小麦生长季和整个玉米生长季的土壤温度,对我国中东部半水成土地区水资源利用有积极的影响。

Kan等<sup>[67]</sup>对冬小麦不同耕作方式进行了研究,发现虽然免耕和旋耕均显著提高了作物WUE,但连续免耕增加了土壤紧实度,反而降低了产量;旋耕是提高华北平原冬小麦产量和WUE的有效方式。本课题组经多年研究,发明了一种条带立式旋耕深松的保护性耕作方式,仅在10~15 cm宽的玉米播种带进行深旋耕,而播种行间由小麦秸秆覆盖,第2年播种带与非播种带交替。田间试验证明,与常规耕作方式比,条带深松可以显著降低播种带20~30 cm土层的土壤容重,增加20~50 cm土层含水量,并促进根系下扎,提高玉米对土壤深层水分的吸收利用<sup>[75]</sup>。已有不少研究表明<sup>[75-76]</sup>,秸秆覆盖在对夏玉米有明显增产效果的同时还使冬小麦保持较高的作物WUE。目前,对于耕作措施影响耕层结构和促进作物增产方面研究报道较多,一般认为,深松+秸秆覆

盖能够提高作物生物量。但也有研究认为<sup>[77]</sup>,因小麦/玉米秸秆具有较高的C/N比,所以腐解过程中往往可能出现微生物与作物争夺氮素的现象,从而造成作物不同程度的减产。

综上所述,冬小麦季采用节水灌溉措施调控根系分布并进一步减少灌水消耗,增加对深层土壤贮水利用而增大土壤水分库容,夏玉米季采用条带深松耕作方式调控土壤物理特性,提升土壤接纳储存降雨能力,可进一步促进周年水分平衡和水资源高效利用(图2)。然而,因为土壤耕作方式对土壤结构性质和作物生长特性影响不同,目前没有所有类型土壤普遍适用的耕作方式。所以如何合理利用耕作与灌溉管理措施,精确稳定调节作物周年水分平衡利用和产量关系,是华北平原冬小麦-夏玉米模式长期需要关注和解决的问题。

### 3.3 播/收期调控冬小麦-夏玉米周年水分平衡利用

除耕作措施调控外,通过调节冬小麦-夏玉米体系播/收期,优化配置两季气候资源也是提高周年产量和资源利用效率的有效途径<sup>[78-79]</sup>。Sun等<sup>[9]</sup>和Xu等<sup>[80]</sup>分别在华北平原中部资源相对充足区和北部资源紧缺区研究“双晚技术”形成机制时发现,将小麦播期和玉米收获期比传统种植方式均推迟5~20 d,在周年产量不降低的前提下可显著减少冬小麦季的水分消耗,从而提高周年水分利用效率。周宝元等<sup>[78]</sup>在位于华北平原中部的河南新乡开展的大跨度推迟冬小麦-夏玉米播/收期试验也发现,随着小麦播期和玉米收获期推迟,小麦季耗水量和产量均降低,玉米季耗水量和产量均增加,但周年总耗水量减少,从而在保证周年较高产量的前提下显著提高了水分生产效率。当冬小麦播期和夏玉米收获期均推迟15 d时,周年产量和水分生产效率比传统种植方式分别提高6.7%和5.1%;推迟60 d时,与传统种植方式比周年产量不变但水分生产效率提高17.3%~29.3%。

播/收期变化必然会影响周年水资源(降雨和灌

溉)分配和作物耗水特性。本团队前期研究表明,随着播/收期推迟,小麦季灌水量和降雨量逐渐减少,玉米季降水量增加而灌水量无明显变化。当冬小麦播期和夏玉米收获期均推迟15 d时,周年总降水量在两季间的分配比例为37%和63%,小麦季24 mm降雨量让给玉米季,两季灌水量不变;推迟60 d时,周年总降水量在两季间的分配比例为34%和66%,小麦季降水量和灌水量分别减少53 mm和150 mm,玉米季降水量增加54 mm而灌水量不变。随小麦播期推迟,花前生育期缩短,尤其是出苗至拔节持续期显著缩短,导致干物质积累和单株分蘖数减少,从而显著降低耗水量<sup>[80]</sup>;而随玉米收获期推迟,花后生育期延长,籽粒灌浆和成熟后脱水时间显著增加,导致耗水比例增加,但由于玉米收获期延迟缩短了两季空田时间而减少了土壤水分蒸发,保证土壤墒情,从而使得对冬小麦播前少灌甚至不灌<sup>[81]</sup>。此外,玉米季所增加的耗水量来自水分蒸发损失还是土壤入渗储存问题还有待进一步研究验证。

综上可以推测,通过调节冬小麦-夏玉米播/收期,有利于改变周年水资源分配和作物耗水特性,最大限度减少冬小麦季灌水消耗并增加对土壤贮水利用,增加夏玉米季对降雨利用并减少水分蒸发损失(图2)。但是关于播/收期调节冬小麦-夏玉米周年高产和水资源(降水和灌水)高效利用协同的作用机制尚不明确,未来可以从两季间降水和灌水分配上进行深入研究,从而有望提高周年产量和水分生产效率。

## 4 冬小麦-夏玉米周年水分高效利用研究展望

通过长期的系统研究和生产试验,研究人员已于华北平原地区建立了一系列适宜该区生态条件和生产条件的节水灌溉技术和节水替代种植制度,培育和筛选了一批抗旱节水高产品种,并且在实际生

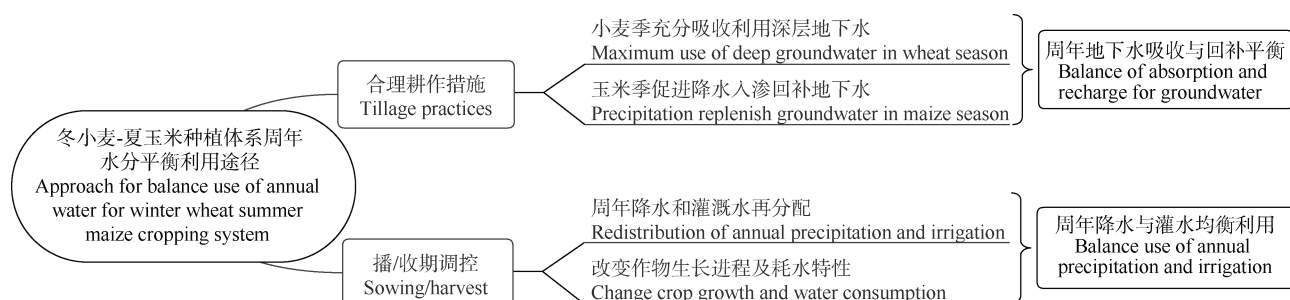


图2 冬小麦-夏玉米种植体系周年水分平衡利用途径

Fig. 2 Approach for balance use of annual water for winter wheat-summer maize cropping system



产中取得了较好的经济效益和生态效益。笔者基于前人研究基础和本课题组前期研究结果,提出了通过合理耕作措施或播/收期调控冬小麦-夏玉米周年水分平衡,促进周年水分(灌溉水和降水)高效利用的技术途径,为华北平原冬小麦-夏玉米种植体系节水高产栽培及节水种植制度的建立提供了思路。然而,在全球气候变化大背景下,且随着未来生产条件和生产目标的不断变化,华北平原冬小麦-夏玉米种植体系水资源紧缺与持续稳定增产需求的矛盾将进一步加剧,还需要结合现代农业技术手段,进一步深化和发展节水种植制度、精准灌溉及生物节水等措施,促进该区农业水资源的可持续利用。

#### 4.1 优化种植制度

虽然前人对相关节水替代种植制度已有不少研究,但由于受环境因素影响较大,发展替代种植制度的增产潜力有限,考虑到小麦作为口粮作物对保障国家粮食安全具有不可替代的作用,未来研究重点应放在优化现有冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式上。当前,学者们对麦玉两熟种植制度周年水分平衡分配利用及土壤水分运移的研究较少,在全球环境剧烈变化的大背景下,更应注重土壤水分周年运移规律与两季作物水分平衡分配的结合。已有学者<sup>[51,82]</sup>通过积温分配率与积温比值等气候资源指标,明确了季节间光温资源合理配置的定量标准。因此,借鉴上述气候资源指标应用于当前华北平原地区冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式周年水分平衡利用,明确包含土壤理化、作物生理等指标在内的定量标准,并利用该标准评价改进现有种植模式,对今后挖掘华北平原周年产量潜力与农业可持续发展均具有重要意义。

#### 4.2 精准灌溉

以精准定量灌溉为核心的灌溉技术不仅是提高水分利用效率,减少水资源浪费,提高种植效益的重要环节,还是未来农业发展的必然趋势。如今,实际生产中冬小麦种植期间多存在大水漫灌、超次灌溉等不合理的现象,不仅造成了水资源的严重浪费,也限制了冬小麦水分利用效率的提高<sup>[83]</sup>。针对部分地区这种不合理灌溉的现象,目前首要限制性因素是专业化灌溉设备的发展与普及问题。经过半个多世纪的发展,我国灌水设备规模基本满足当前发展需要,但在产品质量、可靠性、产品丰富度及智能化等方面距离发达国家还有一定差距<sup>[84]</sup>,进一步加强专业化灌溉设备研发与推广对于农业精准灌溉具

有重要的现实意义。另外,在水资源亏缺的条件下,水分如何在作物组织中迁移,如何在土壤结构中转运等问题目前知之甚少,理想化精准灌溉很难在大田生产中实现。作物具体耗水途径仍需深入研究,需要通过大量研究分析,掌握详细可靠的作物需/耗水规律资料,利用遥感/遥测等先进技术,参考智慧农业发展模式,建立包含吸/耗水率、水分运移速度等作物水分亏缺指标在内的数据库,灌溉后利用大数据分析软件精准评估灌溉效果,再结合使用新型灌溉设备进行定量灌溉是未来较有潜力的发展方向。除精准灌溉外,精准灌水结合精准施肥技术(或水肥一体化技术)也是目前及未来的研究热点<sup>[85]</sup>。

#### 4.3 生物节水

随着分子生物学和生物技术的发展,生物节水也逐渐占据了较为重要的位置。生物节水技术效果与可持续性较好<sup>[86-87]</sup>,但技术要求高,推广较难。生物节水的途径可以简单归纳为遗传改良、生理调控和群体适应三个方面<sup>[88]</sup>。在遗传改良方面,由于种质资源是作物遗传改良的基础<sup>[89]</sup>,未来关于节水抗旱新品种改良选育的首要工作是挖掘并筛选节水抗旱种质资源。优良抗旱种质通过调控避旱性、耐旱性与御旱性3个方面<sup>[90-91]</sup>改善作物对水分与养分的吸收状况,对育成节水抗旱型品种具有重大意义。国内学者景蕊莲等<sup>[92]</sup>与刘成等<sup>[93]</sup>开展了小麦与玉米种质资源抗旱性的鉴定与评价工作,并已经鉴定筛选出部分抗旱节水的珍贵种质资源,对作物节水抗旱遗传改良工作具有重要推动作用,且未来可能通过生物技术突破培育出抗旱商业品种。同时,在遴选节水抗旱种质资源的基础上,有必要围绕多个抗旱基因的互作进行研究分析,进一步探究分子水平上作物本身节水抗旱机制。加强对土壤细菌、微生物等以往研究较少的因素对作物WUE的研究,并将生物节水和工程、农艺节水结合起来,充分发挥多学科协作互补的优势。另外,除遗传改良与生理调控外,作物群体生物适应性也是需要重点考虑的因素。例如,通过适宜调控措施使作物在适度水分亏缺的情况下产生适应性,且复水后能在生理生长与产量水平上具有补偿效应,即作物抗旱锻炼。然而,在气候变化背景下环境因素的快速变化导致作物生物适应性的改变还待深入研究。

总之,经过数十年的发展,我国粮食生产已从单纯追求产量的粗放型向产量与效益并重及环境友好的质量型发展,在增加粮食产量及促进农民增收

的同时,提高资源利用效率和降低环境代价成为未来粮食生产的重要任务之一。因此,笔者认为未来华北平原冬小麦-夏玉米种植体系发展的总体方向和根本目标是高产节水并重的智慧型可持续发展农业。节水是该区未来农业发展的首要考虑因素,可持续性发展也符合全国农业发展规划。其次,紧跟信息化潮流,将大数据分析等先进技术融入农业发展,将农业产业“智能化”。总的来说,是经济效益、生态效益和资源效率的协调统一,即在不显著降低产量和经济效益的前提下,进一步深化发展节水种植制度、精准灌溉及生物节水等措施,提高周年水分(降水和灌溉)平衡与高效利用,对促进华北平原冬小麦-夏玉米种植体系水资源高效利用的可持续发展具有重要现实意义。

## References

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2021.  
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2021 (in Chinese).
- [2] Fang Q X, Ma L, Green T R, Yu Q, Wang T D, Ahuja L R. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: current status and agronomic management options. *Agric Water Manag*, 2010, 97: 1102–1116.
- [3] Cao G L, Zheng C M, Scanlon B R, Liu J, Li W P. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain. *Water Resour Res*, 2013, 49: 159–175.
- [4] 赖冬蓉, 陈益平, 秦欢欢, 高柏, 孙占学. 变化环境对华北平原地下水可持续利用的影响研究. 水资源与水工程学报, 2021, 32(5): 48–55.  
Lai D R, Chen Y P, Qin H H, Gao B, Sun Z X. Impacts of changing environment on sustainable utilization of groundwater in the North China Plain. *J Water Resour Water Eng*, 2021, 32(5): 48–55 (in Chinese with English abstract).
- [5] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981–2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2017, 37: 576–592.  
A D, Zhao W J, Gong Z N, Zhang M, Fan Y B. Temporal analysis of climate change and its relationship with vegetation cover on the north China plain from 1981 to 2013. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 576–592 (in Chinese with English abstract).
- [6] 王学, 李秀彬, 辛良杰, 谈明洪, 李升发, 王仁靖. 华北地下水超采区冬小麦退耕的生态补偿问题探讨. 地理学报, 2016, 71: 829–839.  
Wang X, Li X B, Xin L J, Tan M H, Li S F, Wang R J. Discussion on ecological compensation for returning winter wheat to farmland in groundwater overexploitation area of North China. *Acta Geogr Sin*, 2016, 71: 829–839 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李文鹏, 王龙凤, 杨会峰, 郑跃军, 曹文庚, 刘可. 华北平原地下水超采状况与治理对策建议. 中国水利, 2020, 57(13): 26–30.  
Li W P, Wang L F, Yang H F, Zheng Y J, Cao W G, Liu K. The groundwater overexploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain. *China Water Resour*, 2020, 57(13): 26–30 (in Chinese with English abstract).
- [8] Meng Q F, Sun Q P, Chen X P, Cui Z L, Yue S H, Zhang F S, Römhild V. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain. *Agric Ecosys Environ*, 2012, 146: 93–102.
- [9] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, Flerchinger G N, Zhang Y Q, Liu C M, Zhang X Y. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2010, 97: 1139–1145.
- [10] Liu C, Zhang X, Zhang Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agric For Meteorol*, 2002, 111: 109–120.
- [11] 陈宗培. 河北平原小麦-玉米不同灌溉制度下产量和水分生产力潜力及差距研究. 河北农业大学硕士学位论文, 河北保定, 2020. p 51.  
Chen Z P. Potential and Gap of Yield and Water Productivity of Wheat-maize under Different Irrigation Systems in Hebei Plain. MS Thesis of Graduate School of Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei, China, 2020. p 51 (in Chinese with English abstract).
- [12] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2021. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Chinese Water Resources Bulletin 2021. Beijing: China Water Power Press, 2021 (in Chinese).
- [13] 杨明达. 冬小麦-夏玉米地下滴灌节水增产机理及适宜模式研究. 河南农业大学博士学位论文, 河南郑州, 2021. pp 1–2.  
Yang M D. Study on Water-saving and Yield-increasing Mechanism and Appropriate Model of Winter Wheat and Summer Maize Under Subsurface Drip Irrigation. PhD Dissertation of Graduate School of Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan, China, 2021. pp 1–2 (in Chinese with English abstract).
- [14] 康绍忠. 贯彻落实国家节水行动方案, 推动农业节水发展与绿色高效节水. 中国水利, 2019, 54(13): 1–6.  
Kang S Z. National water conservation initiative for promoting water-adapted and green agriculture and highly-efficient water use. *China Water Resour*, 2019, 54(13): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [15] 高慧丽. 全国地下水储量评价首次完成. 中国自然资源报, 2022-01-21 (001).  
Gao H L. The assessment of national groundwater storage was completed for the first time. *China Nat Resour News*, 2022-01-21 (001) (in Chinese).
- [16] Chen M T, Luo Y F, Shen Y Y, Han Z Z, Cui Y L. Driving force analysis of irrigation water consumption using principal component regression analysis. *Agric Water Manag*, 2020, 234: 106089.
- [17] Kang S Z, Zhang J H. Controlled alternate partial root-zone irrigation: its physiological consequences and impact on water use efficiency. *J Exp Bot*, 2004, 55: 2437–2446.
- [18] Zhang J H, Sui X Z, Li B, Su B L, Li J M, Zhou D X. An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation. *Field Crops Res*, 1998, 59: 91–98.
- [19] 王志强, 梁威威, 徐心志, 辛泽毓, 林同保. 氮肥对限制灌溉

- 下冬小麦旗叶氮同化及水氮利用效率的影响. 灌溉排水学报, 2015, 34(8): 12–16.
- Wang Z Q, Liang W W, Xu X Z, Xin Z Y, Lin T B. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen assimilation and water and nitrogen use efficiency of winter wheat flag leaves under limited irrigation. *J Irrig Drainag*, 2015, 34(8): 12–16 (in Chinese with English abstract).
- [20] Li F M, Liu X L, Li S Q. Effects of early soil water distribution on the dry matter partition between roots and shoots of winter wheat. *Agric Water Manag*, 2001, 49: 163–171.
- [21] 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. *Agric Water Manag*, 2006, 85: 211–218.
- [22] 王东. 黄淮流域冬小麦按需补灌方法及其应用. 水土保持学报, 2017, 31(6): 220–228.
- Wang D. A method of supplemental irrigation on-demand for winter wheat and its application in the Huang-Huai Plain. *J Soil Water Conserv*, 2017, 31(6): 220–228 (in Chinese with English abstract).
- [23] 闫丽霞, 石玉, 于振文. 测墒补灌对不同小麦品种光合特性及产量的影响. 麦类作物学报, 2015, 35: 372–378.
- Yan L X, Shi Y, Yu Z W. Effects of soil-moisture monitoring supplemental irrigation on photosynthetic characteristics and yield in different wheat cultivars. *J Triticeae Crops*, 2015, 35: 372–378 (in Chinese with English abstract).
- [24] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 梁银丽. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响. 农业工程学报, 1998, 14(4): 82–87.
- Kang S Z, Shi W J, Hu X T, Liang Y L. Effects of Regulated Deficit Irrigation on physiological indexes and water use efficiency of maize. *Trans CSAE*, 1998, 14(4): 82–87 (in Chinese with English abstract).
- [25] Si Z Y, Zain M, Mehmood F, Wang G S, Gao Y, Duan A W. Effects of nitrogen application rate and irrigation regime on growth, yield, and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated winter wheat in the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2020, 231: 106002.
- [26] 程莲. 滴灌与漫灌对小麦生长的影响及经济效益比较. 大麦与谷类科学, 2016, 33(3): 61–63.
- Cheng L. Effects of drip irrigation and flood irrigation on wheat growth and comparison of economic benefits. *Barl Cereal Sci*, 2016, 33(3): 61–63 (in Chinese with English abstract).
- [27] Ayars J E, Phene C J, Hutmacher R B, Davis K R, Schoneman R A, Vail S S, Mead R M. Subsurface drip irrigation of row crops: a review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory. *Agric Water Manag*, 1999, 42: 1–27.
- [28] 张英华, 张琪, 徐学欣, 李金鹏, 王彬, 周顺利, 刘立均, 王志敏. 适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率. 农业工程学报, 2016, 32(5): 88–95.
- Zhang Y H, Zhang Q, Xu X X, Li J P, Wang B, Zhou S L, Liu L J, Wang Z M. Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition. *Trans CSAE*, 2016, 32(5): 88–95 (in Chinese with English abstract).
- [29] Man J G, Yu J S, Philip J W, Gu S B, Zhang Y L, Guo Q F, Shi Y, Wang D. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat. *Field Crops Res*, 2014, 161: 26–37.
- [30] 董志强, 张丽华, 李谦, 吕丽华, 申海平, 崔永增, 梁双波, 贾秀领. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性. 作物学报, 2016, 42: 725–733.
- Dong Z Q, Zhang L H, Li Q, Lyu L H, Shen H P, Cui Y Z, Liang S B, Jia X L. Grain yield and water use characteristics of winter wheat under micro-sprinkler irrigation. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 725–733 (in Chinese with English abstract).
- [31] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究. 中国生态农业学报, 2018, 26: 1454–1464.
- Zhang X Y. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain. *Chin J Eco-Agric*, 2018, 26: 1454–1464 (in Chinese with English abstract).
- [32] 王慧军, 张喜英. 华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效应探讨. 中国生态农业学报, 2020, 28: 724–733.
- Wang H J, Zhang X Y. Evaluating the comprehensive effects of planting winter wheat in the groundwater depletion regions in the North China Plain. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28(5): 724–733 (in Chinese with English abstract).
- [33] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, Pei D, Wang Y M. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. *Irrig Sci*, 2008, 27: 1–10.
- [34] Zhou J B, Wang C Y, Zhang H, Dong F, Zheng X F, Gale W, Li S X. Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat–summer maize cropping system. *Field Crops Res*, 2011, 122: 157–163.
- [35] Wang Y Q, Zhang Y H, Zhang R, Li J P, Zhang M, Zhou S L, Wang Z M. Reduced irrigation increases the water use efficiency and productivity of winter wheat–summer maize rotation on the North China Plain. *Sci Total Environ*, 2018, 618: 112–120.
- [36] Zhang X Y, Wang Y Z, Sun H Y, Chen S Y, Shao L W. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply. *Irrig Sci*, 2012, 31: 1103–1112.
- [37] Han H F, Shen J Y, Zhao D D, Li Q Q. Effect of irrigation frequency during the growing season of winter wheat on the water use efficiency of summer maize in a double cropping system. *Maydica*, 2011, 56: 107–112.
- [38] Yang X L, Wang G Y, Chen Y Q, Sui P, Pacenka S, Steenhuis T S, Siddique K H M. Reduced groundwater use and increased grain production by optimized irrigation scheduling in winter wheat–summer maize double cropping system: a 16-year field study in North China Plain. *Field Crops Res*, 2022, 275: 108364.
- [39] 王志敏, 王璞, 李建民, 李绪厚, 鲁来清, 王树安, 兰林旺, 周殿玺. 冬小麦“四统一”栽培关键技术. 中国科技奖励, 2008, 16(8): 40.
- Wang Z M, Wang P, Li J M, Li Z H, Lu L Q, Wang S A, Lan L W, Zhou D X. “Four-in-one” cultivation key technology of winter wheat. *China Awards Sci Technol*, 2008, 16(8): 40 (in Chinese).
- [40] Liu X W, Feike T, Chen S Y, Shao L W, Sun H Y, Zhang X Y. Effects of saline irrigation on soil salt accumulation and grain yield in the winter wheat–summer maize double cropping system in the low plain of North China. *J Integr Agric*, 2016, 15: 2886–2898.
- [41] Chauhan C P S, Singh R B, Gupta S K. Supplemental irrigation of wheat with saline water. *Agric Water Manag*, 2008, 95:

- 253–258.
- [42] Soothar R K, Zhang W Y, Liu B H, Tankari M, Wang C, Li L, Xing H L, Gong D Z, Wang Y S. Sustaining yield of winter wheat under alternate irrigation using saline water at different growth stages: a case study in the North China Plain. *Sustainability* (Basel), 2019, 11: 4564.
- [43] Van Oort P A J, Wang G, Vos J, Meinke H, Li B G, Huang J K, van der Werf W. Towards groundwater neutral cropping systems in the Alluvial Fans of the North China Plain. *Agric Water Manag*, 2016, 165: 131–140.
- [44] Sun H Y, Zhang X Y, Wang E L, Chen S Y, Shao L W. Quantifying the impact of irrigation on groundwater reserve and crop production: a case study in the North China Plain. *Eur J Agron*, 2015, 70: 48–56.
- [45] Liu Y Q, Song W. Modelling crop yield, water consumption, and water use efficiency for sustainable agroecosystem management. *J Clean Prod*, 2020, 253: 119940.
- [46] Levidow L, Zaccaria D, Maia R, Vivas E, Todorovic M, Scardigno A. Improving water-efficient irrigation: prospects and difficulties of innovative practices. *Agric Water Manag*, 2014, 146: 84–94.
- [47] Kendy E, Gerard-Marchant P, Walter M T, Zhang Y Q, Liu C M, Steenhuis T S. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain. *Hydrol Process*, 2003, 17: 2011–2031.
- [48] Gao B, Ju X T, Meng Q F, Cui Z L, Christie P, Chen X P, Zhang F S. The impact of alternative cropping systems on global warming potential, grain yield and groundwater use. *Agric Ecosys Environ*, 2015, 203: 46–54.
- [49] Sun Q P, Kröbel R, Müller T, Römhild V, Cui Z L, Zhang F S, Chen X P. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in North China Plain. *Agric Water Manag*, 2011, 98: 808–814.
- [50] 郑媛媛, 陈宗培, 王贵彦. 海河平原小麦-玉米不同种植制度节水特性分析. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 9–15.  
Zheng Y Y, Chen Z P, Wang G Y. Analysis on the water-saving characteristics of winter wheat and summer maize cropping system on Haihe Plain. *Agric Res Arid Areas*, 2019, 37(5): 9–15 (in Chinese with English abstract)
- [51] 周宝元, 葛均筑, 侯海鹏, 孙雪芳, 丁在松, 李从锋, 马玮, 赵明. 黄淮海平原南部不同种植体系周年气候资源分配与利用特征研究. *作物学报*, 2020, 46: 937–949.  
Zhou B Y, Ge J Z, Hou H P, Sun X F, Ding Z S, Li C F, Ma W, Zhao M. Characteristics of annual climate resource distribution and utilization for different cropping systems in the south of Yellow-Huaihe-Haihe Rivers plain. *Acta Agron Sin*, 2020, 46: 937–949 (in Chinese with English abstract).
- [52] 李立娟, 王美云, 薛庆林, 崔彦宏, 侯海鹏, 葛均筑, 赵明. 黄淮海双季玉米产量性能与资源效率的研究. *作物学报*, 2011, 37: 1229–1234.  
Li L J, Wang M Y, Xue Q L, Cui Y H, Hou H P, Ge J Z, Zhao M. Yield performance and resource efficiency of double-cropping maize in the Yellow, Huai and Hai River Valleys Region. *Acta Agron Sin*, 2011, 37: 1229–1234 (in Chinese with English abstract).
- [53] Wang D, Li G R, Zhou B Y, Zhan M, Cao C G, Meng Q F, Xia F, Ma W, Zhao M. Innovation of the double-maize cropping system based on cultivar growing degree days for adapting to changing weather conditions in the North China Plain. *J Integr Agric*, 2020, 19: 2997–3012.
- [54] 孙蕊, 董心亮, 赵长龙, 苏寒, 王金涛, 刘小京, 孙宏勇. 气候×基因型×水分管理对河北平原冬小麦产量和WUE的影响. *中国生态农业学报*, 2020, 28: 200–210.  
Sun R, Dong X L, Zhao C L, Su H, Wang J T, Liu X J, Sun H Y. Effect of climate, genotype, and water management on winter wheat yield and water use efficiency in Hebei Plain. *Chin J Eco-Agric*, 2020, 28: 200–210 (in Chinese with English abstract).
- [55] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 张依章, 李全起, 石磊, 周永田. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 27–33.  
Dong B D, Zhang Z B, Liu M Y, Zhang Y Z, Li Q Q, Shi L, Zhou Y T. Water use characteristics of different wheat varieties and their response to irrigation schedule. *Trans CSAE*, 2007, 23(9): 27–33 (in Chinese).
- [56] 高繁, 胡田田, 姚德龙, 刘杰. 密度和品种对夏玉米产量及水分利用效率的影响. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(6): 21–25.  
Gao F, Hu T T, Yao D L, Liu J. Effects of planting density and cultivar on grain yield and water use efficiency of summer maize, *Agric Res Arid Areas*, 2018, 36(6): 21–25 (in Chinese with English abstract).
- [57] 李源方, 李宗新, 张慧, 薛艳芳, 钱欣, 肖蓉, 刘仲秋, 高英波. 优化品种匹配和灌水量提高冬小麦-夏玉米产量及水分利用效率研究. *山东农业科学*, 2020, 52(10): 18–24.  
Li Y F, Li Z X, Zhang H, Xue Y F, Qian X, Xiao R, Liu Z Q, Gao Y B. Study on improving yield and water use efficiency of winter wheat and summer maize by optimizing variety matching and irrigation amount. *Shandong Agric Sci*, 2020, 52(10): 18–24 (in Chinese with English abstract).
- [58] Cattivelli L, Fulvia R, Franz-W B, Elisabetta M, Anna M M, Enrico F, Caterina M, Alessandro T A M S. Drought tolerance improvement in crop plants: an integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Res*, 2007, 105: 1–14.
- [59] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant: review. *Funct Plant Biol*, 2003, 30: 239–264.
- [60] 赵小强, 钟源, 周文期. 不同水分环境下玉米叶面积 QTL 定位及候选基因分析. *草业学报*, 2021, 30(5): 103–120.  
Zhao X Q, Zhong Y, Zhou W Q. QTL mapping and candidate gene analysis of leaf area in maize (*Zea mays*) under different watering environments. *Acta Pratac Sin*, 2021, 30(5): 103–120 (in Chinese with English abstract).
- [61] 张娟, 谢惠民, 张正斌, 徐萍. 小麦抗旱节水生理遗传育种研究进展. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(3): 231–238.  
Zhang J, Xie H M, Zhang Z B, Xu P. Research progress on physiological genetics and breeding of drought resistance and water saving in wheat. *Agric Res Arid Areas*, 2005, 23(3): 231–238 (in Chinese with English abstract).
- [62] 肖永贵, 陈新民, 夏先春, 王德森, 张艳, 李思敏, 张文祥, 张运宏, 王忠伟, 何中虎. 高产优质节水小麦新品种——中麦 1062. *麦类作物学报*, 2016, 36: 1266.  
Xiao Y G, Chen X M, Xia X C, Wang D S, Zhang Y, Li S M, Zhang W X, Zhang Y H, Wang Z W, He Z H. Zhongmai 1062: a

- new wheat variety with high yield, high quality and water saving. *J Triticeae Crops*, 2016, 36: 1266 (in Chinese with English abstract).
- [63] 高振贤, 曹巧, 傅晓艺, 单子龙, 郭进考, 史占良, 何明琦, 张娟, 韩然. 基于‘洛夫林10号’种质的石麦系列节水高产小麦品种改良. *分子植物育种*, 2020, 18: 4483–4491.  
Gao Z X, Cao Q, Fu X Y, Shan Z L, Guo J K, Shi Z L, He M Q, Zhang J, Han R. Improvement of Shimai series wheat varieties originated from ‘Lovelin 10’ germplasm for water-saving and high-yielding. *Mol Plant Breed*, 2020, 18: 4483–4491 (in Chinese with English abstract).
- [64] 郑军, 赵佳佳, 葛川, 郑兴卫, 乔玲, 乔麟轶, 张树伟, 杨三维, 撒晓东. 节水高产、高抗白粉病小麦新品种——金麦 919. *麦类作物学报*, 2020, 40: 387.  
Zheng J, Zhao J J, Ge C, Zheng X W, Qiao L, Qiao L Y, Zhang S W, Yang S W, Han X D. Jinmai 919, a new wheat variety with water saving, high yield and high resistance to powdery mildew. *J Triticeae Crops*, 2020, 40: 387 (in Chinese with English abstract).
- [65] 秦欣, 刘克, 周丽丽, 周顺利, 鲁来清, 王润政. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作节水体系周年水分利用特征. *中国农业科学*, 2012, 45: 4014–4024.  
Qin X, Liu K, Zhou L L, Zhou S L, Lu L Q, Wang R Z. Characteristics of annual water utilization in winter wheat-summer maize rotation system in North China Plain. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 4014–4024 (in Chinese with English abstract).
- [66] 杨永辉, 武继承, 张玉亭, 潘晓莹, 丁晋利, 张洁梅, 何方, 王越. 耕作与保墒措施对小麦不同生育阶段水分利用及产量的影响. *华北农学报*, 2016, 31(3): 184–190.  
Yang Y H, Wu J C, Zhang Y T, Pan X Y, Ding J L, Zhang J M, He F, Wang Y. Effects of tillage, moisture conservation on water use and yield in wheat at different growth stages. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2016, 31(3): 184–190 (in Chinese with English abstract).
- [67] Zheng R K, Liu Q Y, He C, Jing Z H, Virk A L, Qi J Y, Zhao X, Zhang H L. Responses of grain yield and water use efficiency of winter wheat to tillage in the North China Plain. *Field Crops Res*, 2020, 249: 107760.
- [68] He C, Wang Y Q, Yu W B, Kou Y H, Yves B N, Zhao X, Zhang H L. Comprehensive analysis of resource utilization efficiency under different tillage systems in North China Plain. *J Clean Prod*, 2022, 347: 131289.
- [69] 赵亚丽, 郭海斌, 薛志伟, 穆心愿, 李潮海. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统中干物质生产和水分利用效率的影响. *作物学报*, 2014, 40: 1797–1807.  
Zhao Y L, Guo H B, Xue Z W, Mu X Y, Li C H. Effects of tillage and straw returning on biomass and water use efficiency in a winter wheat and summer maize rotation system. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1797–1807 (in Chinese with English abstract).
- [70] Zhai L C, Xu P, Zhang Z B, Li S K, Xie R Z, Zhai L F, Wei B H. Effects of deep vertical rotary tillage on dry matter accumulation and grain yield of summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain of China. *Soil Tillage Res*, 2017, 170: 167–174.
- [71] 付国占, 李潮海, 王俊忠, 王振林, 曹鸿鸣. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 52–56.  
Fu G Z, Li C H, Wang J Z, Wang Z L, Cao H M. Effects of stubble mulching and tillage methods on soil properties and water use efficiency of summer maize. *Trans CSAE*, 2005, 21(1): 52–56 (in Chinese with English abstract).
- [72] Jin K, Cornelis W M, Schiettecatte W, Lu J J, Yao Y Q, Wu H J, Gabriels D, De Neve S, Cai D, Jin J, Hartmann R. Effects of different management practices on the soil-water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau. *Soil Tillage Res*, 2007, 96: 131–144.
- [73] 张凯, 刘战东, 强小嫚, 米兆荣, 冯荣成, 马岩川, 余轩, 孙景生. 耕作方式和灌水处理对冬小麦-夏玉米水分利用及产量的影响. *农业工程学报*, 2019, 35(17): 102–109.  
Zhang K, Liu Z D, Qiang X M, Mi Z R, Feng R C, Ma Y C. Effects of tillage methods and irrigation treatments on water use and yield of winter wheat summer maize. *Trans CSAE*, 2019, 35(17): 102–109 (in Chinese with English abstract).
- [74] Ding J L, Wu J C, Ding D Y, Yang Y H, Gao C M, Hu W. Effects of tillage and straw mulching on the crop productivity and hydrothermal resource utilization in a winter wheat-summer maize rotation system. *Agric Water Manag*, 2021, 254: 106933.
- [75] Sun X F, Ding Z S, Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, Yang Y, Ma W, Ge J Z, Wang Z M, Zhao M. Subsoiling practices change root distribution and increase post-anthesis dry matter accumulation and yield in summer maize. *PLoS One*, 2017, 12: e0174952.
- [76] 于舜章, 陈雨海, 周勋波, 李全起, 罗毅, 于强. 冬小麦期覆盖秸秆对夏玉米土壤水分动态变化及产量的影响. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 175–178.  
Yu S Z, Chen Y H, Zhou X B, Li Q Q, Luo Y, Yu Q. Effect of straw-mulch during wheat stage on soil water dynamic changes and yield of summer maize. *J Soil Water Conserv*, 2004, 18(6): 175–178 (in Chinese with English abstract).
- [77] Singh B, Rengel Z. Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. pp 183–214.
- [78] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 高卓晗, 丁在松, 李从锋, 赵明. 播/收期对冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源分配与利用特征的影响. *中国农业科学*, 2019, 52: 1501–1517.  
Zhou B Y, Ma W, Sun X F, Gao Z H, Ding Z S, Li C F, Zhao M. Effects of different sowing and harvest dates of winter wheat-summer maize under double cropping system on the annual climate resource distribution and utilization. *Sci Agric Sin*, 2019, 52: 1501–1517 (in Chinese with English abstract).
- [79] Sun H Y, Zhang X Y, Chen S Y, Pei D, Liu C M. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain. *Ind Crop Prod*, 2007, 25: 239–247.
- [80] Xu C L, Zhao H X, Zhang P, Wang Y Y, Huang S B, Meng Q F, Wang P. Delaying wheat seeding time and maize harvest improved water use efficiency in a warm temperature continental monsoon climate. *Agron J*, 2018, 110: 1420–1429.
- [81] 郭霄, 韩茁, 徐建新. 洛阳地区冬小麦保护性耕作节水效应研究. *安徽农业科学*, 2012, 40: 7694–7695.  
Guo X, Han Z, Xu J X. Research on the water use efficiency of conservation tillage of winter wheat in Luoyang area. *Anhui Agric Sci*, 2012, 40: 7694–7695 (in Chinese with English abstract).
- [82] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 丁在松, 李从锋, 赵明. 冬小麦-夏玉米高产模式周年气候资源分配与利用特征研究. *作物学报*, 2019, 45: 589–600.  
Zhou B Y, Ma W, Sun X F, Ding Z S, Li C F, Zhao M.



- Characteristics of annual climate resource distribution and utilization in high-yielding winter wheat-summer maize double cropping system. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 589–600 (in Chinese with English abstract).
- [83] Xie Y, Zhang H, Zhu Y, Zhao L, Yang J, Cha F, Liu C, Wang C, Guo T. Grain yield and water use of winter wheat as affected by water and sulfur supply in the North China Plain. *J Integr Agric*, 2017, 16: 614–625.
- [84] 袁寿其, 李红, 王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议. 排灌机械工程学报, 2015, 33: 78–92.  
Yuan S Q, Li H, Wang X K. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China. *J Drain Irrig Mach Eng*, 2015, 33: 78–92 (in Chinese with English abstract).
- [85] 高祥照, 杜森, 钟永红, 吴勇, 张赓. 水肥一体化发展现状与展望. 中国农业信息, 2015, 27(4): 14–19.  
Gao X Z, Du S, Zhong Y H, Wu Y, Zhang G. Present situation and prospect of water and fertilizer integration. *China Agric Inform*, 2015, 27(4): 14–19 (in Chinese).
- [86] 石元春. 开拓中的蹊径: 生物性节水. 科技导报, 1999, 17: 3–5.  
Shi Y C. A path in development: biological water-saving. *Sci & Tech Rev*, 1999, 17: 3–5 (in Chinese).
- [87] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础. 应用生态学报, 1991, 2: 70–76.  
Shan L, Xu M. Water-saving agriculture and its physio-ecological bases. *Chin J Appl Ecol*, 1991, 2: 70–76 (in Chinese with English abstract).
- [88] 山仑, 邓西平, 张岁岐. 生物节水研究现状及展望. 中国科学基金, 2006, 20: 66–71.  
Shan L, Deng X P, Zhang S Q. Advances in biological water-saving research: challenge and perspectives. *Bull Nation Nat Sci Found China*, 2006, 20: 66–71 (in Chinese with English abstract).
- [89] 杨培珠, 钟国祥, 谢虹, 陈少方, 苏立生, 刘惠雯, 张旭. 玉米种质资源的背景与利用现状. 中国农学通报, 2011, 27(5): 25–28.  
Yang P Z, Zhong G X, Xie H, Chen S F, Su L S, Liu H L, Zhang X. Background and utilization of germplasm resources in maize. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27(5): 25–28 (in Chinese with English abstract).
- [90] 邵艳军, 山仑. 植物耐旱机制研究进展. 中国生态农业学报, 2006, 14: 16–20.  
Shao Y J, Shan L. Advances in the studies on drought tolerance mechanism of plants. *Chin J Eco-Agric*, 2006, 14: 16–20 (in Chinese with English abstract).
- [91] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理. 北京林业大学学报, 1991, 13: 92–100.  
Li J Y. Mechanisms of drought tolerance in plants. *J Beijing For Univ*, 1991, 13: 92–100 (in Chinese with English abstract).
- [92] 景蕊莲, 昌小平. 小麦抗旱种质资源的遗传多样性. 西北植物学报, 2003, 23: 410–416.  
Jing R L, Chang X P. Genetic diversity in wheat germplasm resources with drought resistance. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2003, 23: 410–416 (in Chinese with English abstract).
- [93] 刘成, 石云素, 宋燕春, 王天宇, 黎裕. 玉米种质资源抗旱性的田间鉴定与评价. 新疆农业科学, 2007, 44: 545–548.  
Liu C, Shi Y S, Song Y C, Wang T Y, Li Y. Determination and evaluation of drought resistance of germplasm resources of maize in field. *Xinjiang Agric Sci*, 2007, 44: 545–548 (in Chinese with English abstract).