文章编号:1000-7601(2023)03-0031-10 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2023.03.06

黄淮海平原灌区节水高效耕作制度构建

刘 振,宁堂原

(山东农业大学,农业农村部作物水分生理与抗旱种质改良重点实验室, 山东 泰安 271018)

摘 要:黄淮海地区是我国重要的粮食产区,平均复种指数为 150%,小麦-玉米一年两熟加春播作物组成的两年三熟制为该区域的主要种植制度。受水资源限制,部分地区复种指数呈现下降趋势,严重影响了区域粮食安全。发展节水高效耕作制度成为解决区域粮食安全和生态安全的重大科技问题。介绍了山东农业大学在小麦-玉米周年节水高效耕作制度和春播作物覆盖节水耕作制度两个方面的最新进展:前者重点介绍秸秆还田与高效耕作、高杆喷灌水肥一体化、肥水耦合、测墒补灌等生物节水与农艺节水的技术创新与集成;后者重点介绍多功能生物降解地膜的研制与花生、马铃薯等覆盖节水增产技术体系。在此基础上,提出黄淮海地区耕作制度的发展方向与技术需求(采取深松与秸秆还田技术相结合、深松与高杆喷灌结合、废弃物还田、合理灌水与施用氮肥相结合、地膜覆盖技术等),以期为黄淮海平原灌区粮食安全和生态安全提供战略支撑与技术支持。

关键词:粮食产量;节水灌溉;耕作制度;水分利用效率;气候智慧型农业;黄淮海平原

中图分类号:S343 **文献标志码**:A

Construction of water-saving and efficient farming system in irrigation area of the Huang-Huai-Hai Plain

LIU Zhen, NING Tangyuan

(*Key Laboratory of Crop Water Physiology and Drought-tolerance Germplasm Improvement*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Shandong Agricultural University*, *Tai' an*, *Shandong*, 271018)

Abstract: The Huang-Huai-Hai plain is an important region for grain production in China. The average multiple cropping index in Huang-Huai-Hai region is 150%. The two-year triple cropping system includes two crops a year of wheat and maize plus spring sowing crops, which is the main planting system in this region. Limited by water resources, the multiple cropping index in some areas has a downward trend, which has seriously affected regional food security. Developing water-saving and efficient farming system is a major scientific and technological problem to solve regional food security and ecological security. This report focuses on two aspects, one is the water-saving and efficient farming system for wheat and maize as well as spring sowing crops. The former focuses on the technical innovation and integration of biological and agronomic water conservation, such as straw return and efficient farming, high sprinkler irrigation, water and fertilizer integration, fertilizer and water coupling, and soil moisture measurement and supplementary irrigation, etc. The latter focuses on the development of multi-functional biodegradable mulching film and the technical system of covering crops such as peanut and potato and saving water and increasing production. On this basis, this study puts forward the development direction and technical needs of the farming system in the water shortage irrigation area of the Huang-Huai-Hai Plain including adopting the combination of subsoiling and straw returning, subsoiling and high sprinkling irrigation, waste returning, reasonable irrigation and nitrogen fertilizer application, and plastic film covering technology in order to provide strategic and technical support for food security and ecological security in the water shortage irrigation area of the Huang-Huai-Hai Plain.

Keywords: grain yield; water-saving irrigation; tillage system; water use efficiency; climate-smart agriculture; Huang-Huai-Hai Plain

---

收稿日期:2022-07-29 **修回日期**:2022-11-15

基金项目:山东省农业科技资金(2019YQ014);山东省重大创新工程(2021CXGC010804)

作者简介:刘振(1986-),男,山东临朐人,副教授,主要从事农业生态学研究。E-mail: liuzhdy@163.com

通信作者:宁堂原(1976-),男,山东日照人,教授,主要从事现代农作制度、农业资源高效利用原理与技术研究。E-mail:ningty@163.com

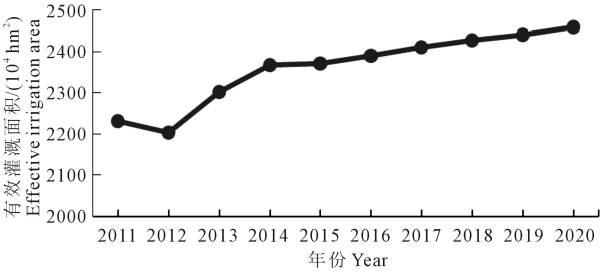
1 黄淮海地区小麦、玉米等粮食生产情况

黄淮海流域包括北京、天津和山东三省(市)全部、河北和河南两省大部,以及江苏和安徽两省淮北地区,这一地区的人口、国内生产总值、工业总值、有效灌溉面积、粮食产量均约占我国的 1/3,是我国重要的经济区和粮棉油主产区,在我国国民经济与社会发展中具有重要的战略地位。该地区土地面积约占全国总土地面积的 6.3%,耕地面积约占全国总耕地面积的 28.8%,粮食总产量约占全国粮食总产量的 29.8%。其中小麦播种面积和总产量分别为 1.7×10^7 hm^2 和 1.1×10^8 t,分别约占全国的 71.3%和 79.1%;玉米播种面积和总产量分别为 1.3×10^7 hm^2 和 7.8×10^7 t[1]。该区是全国粮、棉、油生产大县分布最集中的地区。

总体看,2011—2020 年间,黄淮海地区的有效灌溉面积、粮食播种面积、粮食总产量、农业生产总值均呈现出稳定持续增长趋势。2011 年黄淮海平原有效灌溉面积为 2.2×10^7 hm^2,到 2020 年增加了 10.2%(图 1);2011 年黄淮海平原粮食播种面积占全国的 32.2%,粮食产量占全国的 34.9%,到 2020 年粮食播种面积和粮食产量分别占到了 33.0%和 34.6%(图 2、图 3)。黄淮海平原 2020 年比 2011 年粮食播种面积增加了 5.9%、粮食产量增加了 17.1%,10 年间粮食平均产量为 2.3×10^8 t。2011 年黄淮海平原农业总产值为 1.4×10^{12} 元,占全国的 35.8%,2020 年黄淮海平原农业总产值比 2011 年增加了 51%,且占全国的 30.4%(图 4)。

2 黄淮海地区水资源状况与利用情况

由于农业用水的需求矛盾一直比较突出,尽管黄淮海平原加大了节约用水力度,但仍在过度开发利用地表水、大量超采地下水、不合理占用农业和生态用水以及使用未经处理的污水,造成目前黄河下游断流频繁、淮河流域污染严重,海河流域基本处于“有河皆干”和地下水严重超采的局面[3]。黄淮海平原地区浅层地下水位在近 30 年间下降 10.2 m,深层地下水位下降 30.2 m,形成超过 1.2×10^5 km^2 的世界最大地下水开采漏斗区[4]。地下水超采带来地面沉降、河道干涸、机井报废、海水入侵等一系列生态问题[5]。黄淮海流域目前现状为最小缺水量 2.3×



注:图 1~5 数据来源于中国统计年鉴[2]

Note: Figure 1~5 data from China Statistical Yearbook[2]

图 1 黄淮海平原区有效灌溉面积(2011-2020)

Fig.1 Effective irrigation area in the Huang-Huai-Hai Plain from 2011 to 2020

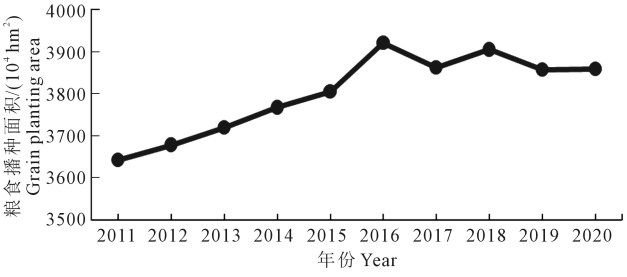


图 2 黄淮海平原区粮食播种面积(2011-2020)

Fig.2 Crop sowing area in the Huang-Huai-Hai Plain from 2011 to 2020

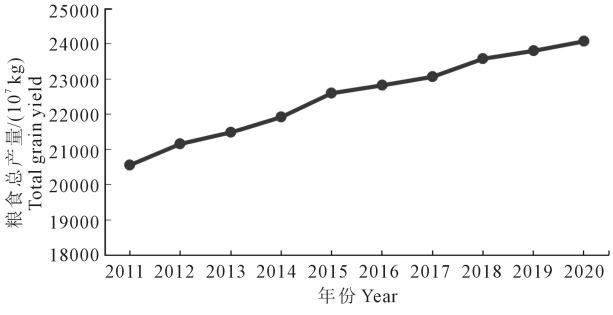


图 3 黄淮海平原区粮食总产量(2011-2020)

Fig.3 Total grain yield in the Huang-Huai-Hai Plain from 2011 to 2020

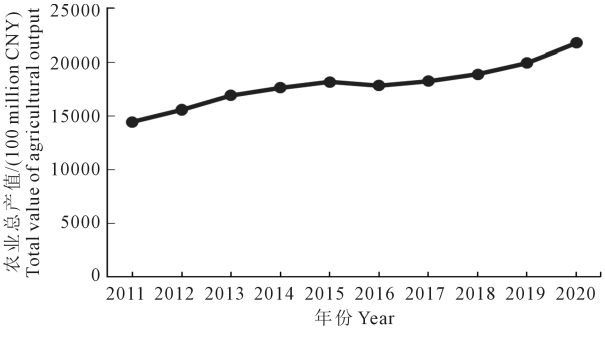


图 4 黄淮海平原区农业总产值(2011-2020)

Fig.4 Gross output value of agriculture in the Huang-Huai-Hai Plain from 2011 to 2020

10^{10} m^3,预计 2030 年为 3.2×10^{10}~3.95×10^{10} m^3。黄河、淮河和海河三大流域的水资源开发利用率已分别高达 67%、60%和>95%。水资源承载能力与经济社会发展和生态环境保护之间的矛盾日趋尖锐,特别是海河流域由于地表水长期过量开发利用,平原河道长期干涸,被迫大量超采地下水,20 年间已累计超采 9.0×10^{10} m^3,造成地下水埋深大面积持续下降。黄淮海流域水资源的过量开发已导致河湖干涸、河口淤积、湿地减少、土地沙化、地面沉陷以及海水入侵等生态环境问题日趋恶化,严重制约经济社会的可持续发展[6]。

黄淮海地区属于温带季风性气候,黄淮海平原区 2011—2020 年 10 年间平均降水量 782.1 mm,降水变化比较显著(图 5a)。降水可以满足小麦-玉米需水的 60%~70%,在山东省冬小麦-夏玉米生产中,全年耗水量 625~750 mm,小麦季需要灌溉 60~180 mm。黄淮海平原 2011—2020 年 10 年间平均水资源总量为 2×10^{11} m^3;2011 年的农业用水为 9.3×10^{10} m^3,占当年水资源总量的 47.2%,到 2020 年农业用水为 7.9×10^{10} m^3,占当年水资源总量的 28.3%,2011—2020 年平均农业用水为 8.5×10^{10} m^3,占平均水资源总量的 41.9%(图 5b、c)。

黄淮海地区灌溉面积占全国的 42%,农业用水约占总用水量的 70%[3],而水资源量不到全国的 8%,水资源严重紧缺。地下水是黄淮海平原农业灌溉的重要来源[7]。除此之外,黄河流域在我国农业发展中占据重要位置,引黄灌溉对稳定黄淮海平原地区粮食生产和保障我国粮食安全均具有重要意义。黄淮海平原是全国最大的自流连片灌区,有效灌溉面积为 1.6×10^6 hm^2[8],但该地区仍存在水资源浪费严重、灌溉效率不高等问题。

3　灌溉节水技术

我国在高效灌溉节水方面起步较晚[9],喷灌、微灌、低压管灌已经在我国农田水利工程中得到了推广和应用[10]。水资源紧缺是黄淮海地区农业、经济、社会发展的主要制约因素。农业是用水最多的产业,作物高效用水是提高水资源利用率的重要突破口。当前农业生产中水资源浪费严重,灌溉水有效利用率仅 40%。每立方米水的粮食生产能力只有 0.85 kg 左右,低于发达国家 2 kg 以上的水平。因此,黄淮海地区节水潜力大,发展节水农业是实现农业可持续发展和缓解水资源供需矛盾的根本措施。

灌溉方式提倡滴灌+深松土。该方法对玉米产量和水分利用效率有一定影响,灌溉水会通过地表径流及深层渗漏而产生损失,深松改善了土壤理化性质,在喷灌条件下,结合深松可以提高深层水分保持能力,从而提高水分利用效率[11]。

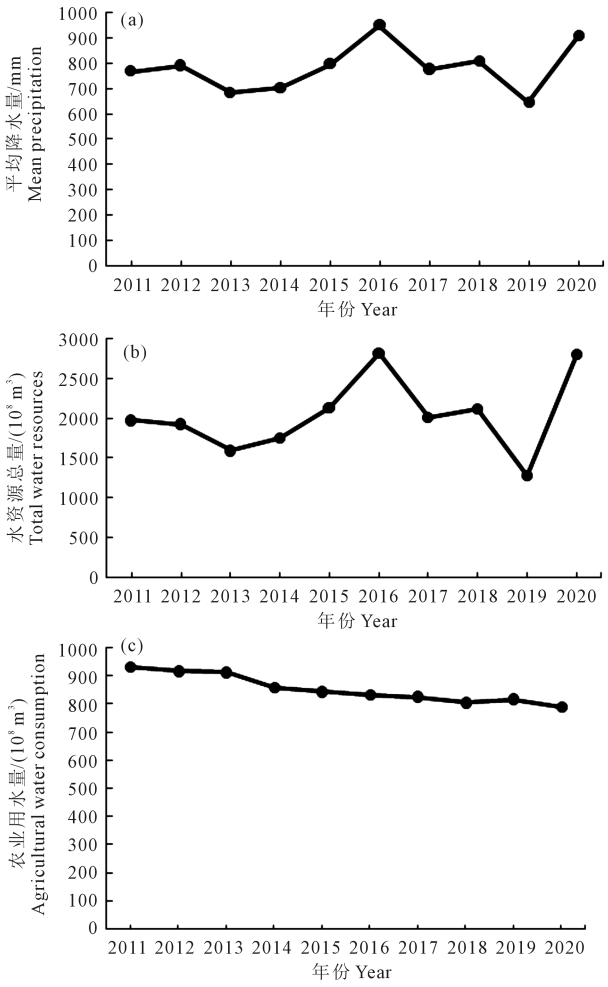


图 5　黄淮海平原 2011—2020 年降水量、水资源总量和农业用水量变化

Fig.5　Changes in precipitation, total water resources and agricultural water consumption in the Huang-Huai-Hai Plain from 2011 to 2020

滴灌是典型的高效节水灌溉模式[12],可以减少灌溉次数、降低土表蒸发,进而提高水分利用效率[13],特别是将滴灌与覆膜技术相结合,可以明显提高作物产量和水分利用效率[14-15]。但是地膜残留阻碍了土壤中空气和水分的运移,对作物生长造成了负面影响[16],同时覆膜也会导致白色污染。浅埋滴灌被广泛使用[17],与传统畦灌相比,浅埋滴灌可显著提高玉米籽粒产量和水分利用效率,是黄淮海地区夏玉米的最佳灌溉方式[18]。另外,定额灌水结合秸秆或地膜覆盖也有利于改善土壤理化性质,促进作物生长[19]。

为响应国家节水行动,促进农业可持续生产,农业农村部大力推广水肥一体化、测墒节灌、喷灌、微灌、低压管道输水,为减少地下水开采,提高灌水利用效率,增加农民收入起到了积极作用。根据流域自然条件,以小麦、玉米、马铃薯等粮食作物为重点,兼顾棉花、蔬菜、水果等经济作物,推广膜下滴灌、微喷灌、集雨补灌水肥一体化模式。加大试验示范力度,优化水肥一体化设施设备配置,建立科学灌溉施肥制度,筛选水溶肥料等配套农资,积极采用墒情监测、自动控制、信息化、物联网等信息技术,实现水肥利用效率双提高。华北地区小麦、玉米一年两季,应用水肥一体化技术可每年节约地下水 1 650 $m^3 \cdot hm^{-2}$,节约化肥(折纯)19 $kg \cdot hm^{-2}$。水肥一体化技术可以节水节肥 20% 以上,可使玉米、马铃薯、冬小麦分别增产约 3 000、2 2500、1 500~2 250 $kg \cdot hm^{-2}$。

4 节水高效耕作制度

4.1 小麦+玉米熟制节水高效耕作制度

4.1.1 *秸秆还田与高效耕作* 试验一:在山东农业大学农学实验站进行,采用沟垄种植方式,秸秆垄行和种植行分开,秸秆处理方式为垄作(R)和平作(F),灌水梯度为田间持水量的 75%~80%(水分充足,CK)、65%~70%(轻度干旱,SD)、55%~60%(干旱,D)。研究不同水分条件下秸秆垄作和秸秆平作 2 种秸秆利用方式对土壤含水量和玉米产量的影响。由图 6 可以看出,不同水分梯度下,在玉米产量表现为 CK>SD>D 基础上,发生干旱情况下垄作较平作均有一定幅度增产,即 RD 产量比 FD 增加 5.7%、RSD 比 FSD 增加 4.6%。

试验二:基于山东农业大学农学实验站长期定位保护性耕作试验,设置常规耕作无秸秆还田(CT0)、常规耕作秸秆还田(CT1)、深松耕作无秸秆还田(ST0)、深松耕作秸秆还田(ST1)、旋耕无秸秆还田(RT0)、旋耕秸秆还田(RT1)6 种处理。结果表明,在 0~10 cm 土层中,旋耕土壤含水量高于其他处理,与常规耕作相比,深松和旋耕土壤含水量分别增加了 4.5% 和 12.3%(图 7)。除 40~50 cm 土层外,深松处理其他土层含水率均高于常规耕作,而旋耕处理 10~60 cm 土层中,含水量均低于其他处理。除 20~40 cm 土层外,其余土层秸秆还田土壤含水量均高于无秸秆还田。0~10 cm 土层中,秸秆还田比无秸秆还田土壤含水量增加 9.0%,0~60 cm 土层中,秸秆还田比无秸秆还田土壤含水量增加 1.4%。

2018—2019 年 2 a 数据表明,CT0 处理玉米产量和水分利用效率均最低,与其相比,ST1 处理玉米产量增加了 16.5%,为最高;ST0 处理的水分利用效率比 CT0 增加了 19.2%,深松处理对于玉米产量和水分利用效率提高效果最好(图 8)。秸秆还田处理下玉米产量和水分利用效率分别比无秸秆还田增加了 7.0% 和 3.8%。

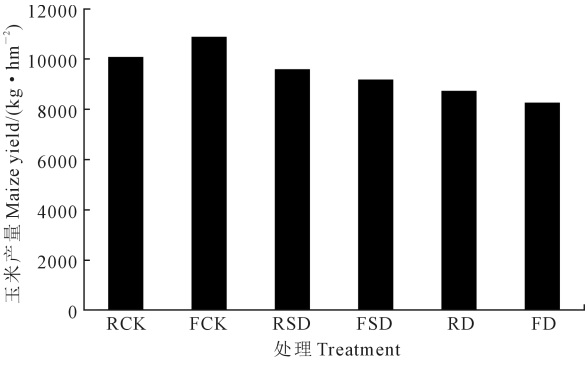


图 6 灌水控制下垄作与平作秸秆还田方式对玉米产量的影响

Fig.6 Effects of irrigation and straw return on maize yield

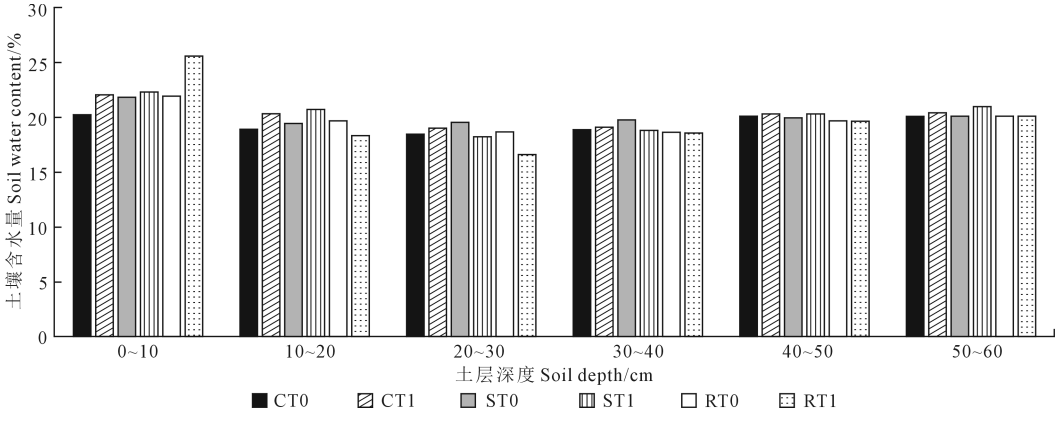


图 7 玉米拔节期和灌浆期耕作方式与秸秆还田下的土壤含水量

Fig.7 Soil water content depending on tillage and straw return during jointing and filling stage of maize

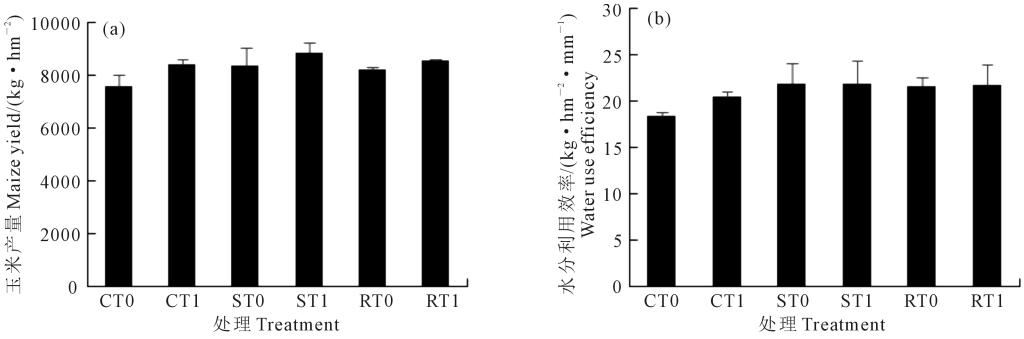


图 8　耕作方式和秸秆还田下的玉米产量和水分利用效率

Fig.8　Maize yield and water use efficiency depending on tillage and straw return practices

针对黄淮海平原缺水地区农田生产效益偏低和地下水严重超采导致的生态环境问题,研究了冬小麦-夏玉米的适宜节水技术,为黄淮海平原轮作与轮耕结合的节水技术体系提供支撑。基于山东农业大学农学实验站长期保护性耕作定位试验,设置耙耕/深松(HT/ST)、旋耕/深松(RT/ST)、免耕/深松(NT/ST)3 种轮耕方式,小麦播种前深松与玉米免耕播种相结合,耙耕、旋耕等方式一般每 2~3 a 要结合一次耕翻,通过合理轮耕实现节水增效。在控制性灌溉条件下结合小麦、玉米季深松,也可以提高水分利用效率,同等条件下小麦、玉米均可增产 10%以上[20]。深松处理较旋耕可以提高玉米产量和水分利用效率[21]。在黄淮海地区,小麦播种前进行深松,冬小麦灌水 2 次,夏玉米视降雨情况灌水 0~2 次,可以实现增产节水的目的[22]。

4.1.2　*高杆喷灌与深松相结合*　为探究耕作方式对土壤水分利用特征及作物产量的影响,明确喷灌条件下的适宜耕作措施,基于山东省龙口市长期保护性耕作定位试验,设置旋耕(RT)、深松(ST)、翻耕(CT)3 种耕作方式,研究不同耕作方式在固定管道式喷管系统下土壤水分、冬小麦产量和水分利用效率的影响。结果表明,CT 和 RT 处理冬小麦生育期内累计灌水量分别比 ST 增加了 6.1%和 4.7%、总耗水量分别比 ST 增加 2.7%和 1.8%(图 9)。各处理产量和水分利用效率表现相同,CT 和 ST 处理比 RT 处理分别增加了 12.9%和 10.6%(图 10)。

冬小麦生育期内,在同一土层中,不同处理 0~40 cm 土层含水量表现为 ST>RT>CT,40~60 cm 土层含水量表现为 CT>ST>RT,ST 和 CT 处理 60~100 cm 土层平均含水量较 RT 处理分别提高 9.9%和 3.7%。深松提高了深层土壤蓄水能力,ST 和 CT 处理由于耕层较深,有利于冬小麦根系下扎,较 RT 处理有较高的土壤耗水量和水分利用效率;相较于 RT 处理,ST 和 CT 处理水分利用效率分别提高 7.4%和

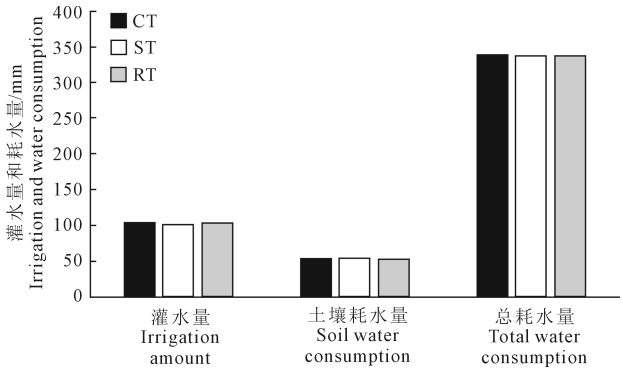


图 9　不同耕作冬小麦生育期内灌水量和耗水量

Fig.9　Cumulative irrigation and water consumption of winter wheat in different tillage practices

9.1%(图 11)。

4.1.3　*肥水耦合*　本试验在山东农业大学农学实验站进行,设置无秸秆还田(M0)、秸秆还田(M1)、秸秆、牛粪混合还田(M2)3 种有机物料沟埋,玉米开花后灌水 450 mm(W1)和 325 mm(W2)2 个水平,研究其对玉米产量和水分利用效率的影响。结果表明,在灌溉量相同时,玉米产量和水分利用效率随有机物料还田(秸秆还田、秸秆+牛粪)的变化趋势一致。灌水量为 450 mm 时,W1M2 比 W1M0 和 W1M1 的水分利用效率均增加了 3.5%。灌溉量为 325 mm 时,W2M2 比 W2M0 和 W2M1 的水分利用效率分别增加了 4.1%和 3.5%。有机物料还田处理下,W2 提高了水分利用效率(图 12)。因此,正常灌溉的玉米产量高于节水灌溉,但是节水灌溉提高了玉米的水分利用效率。

设置玉米生育期无灌水(W0)和灌水 85 mm(W1)2 个灌水水平,并设置不施尿素(N0)、施常规尿素 75 kg·hm^{-2}(N1)、施常规尿素 150 kg·hm^{-2}(N2)、施控释尿素 75 kg·hm^{-2}(CN1)、施控释尿素 150 kg·hm^{-2}(CN2),研究对玉米产量和水分利用效率的影响。结果表明,相同水分条件下,施氮可以提高玉米产量和水分利用效率(图 13)。无灌水

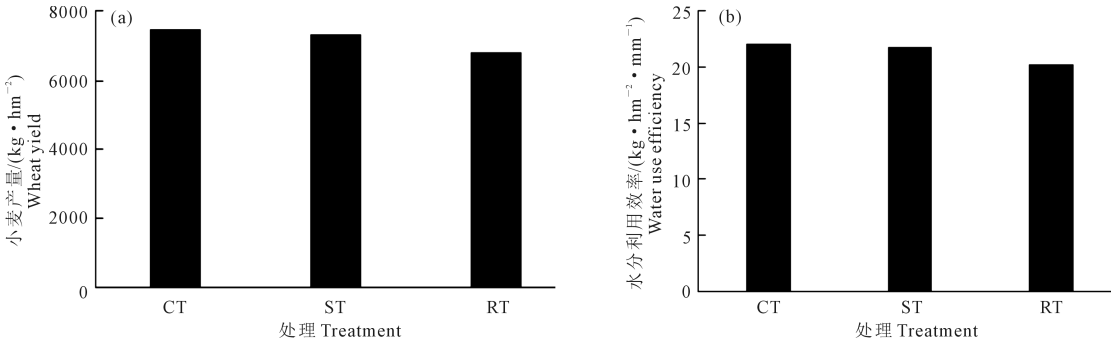


图 10 不同耕作方式下冬小麦产量和水分利用效率

Fig.10 Wheat yield and water use efficiency under different tillage practices

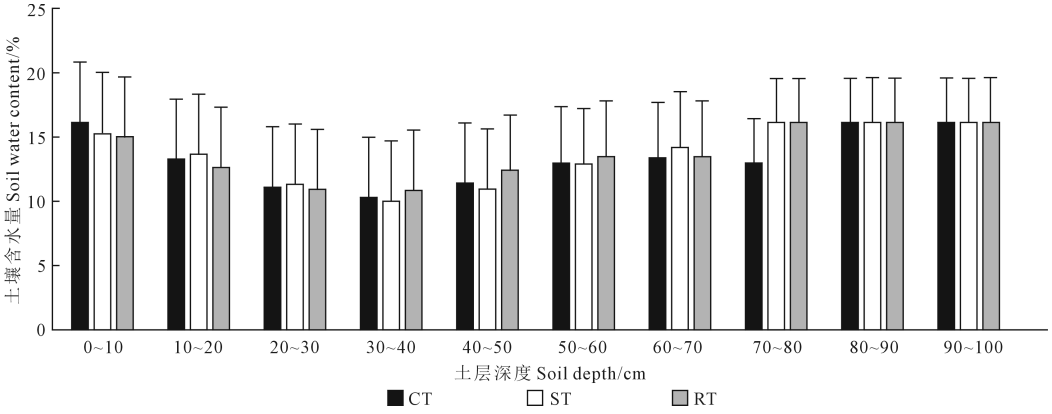


图 11 不同耕作冬小麦生育期内灌水后土壤含水量

Fig.11 Soil water content after irrigation during wheat growth period under different tillage practices

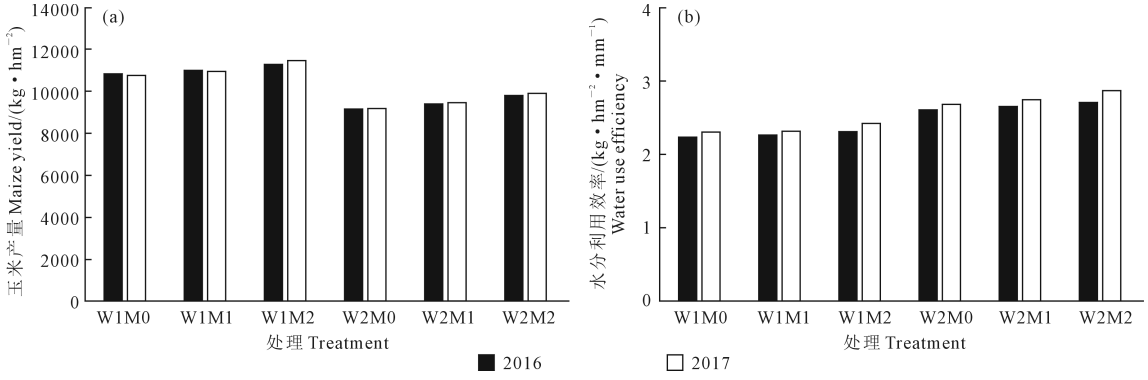


图 12 有机物料还田和灌水量对玉米产量和水分利用效率的影响

Fig.12 Effects of organic materials and irrigation on maize yield and water use efficiency

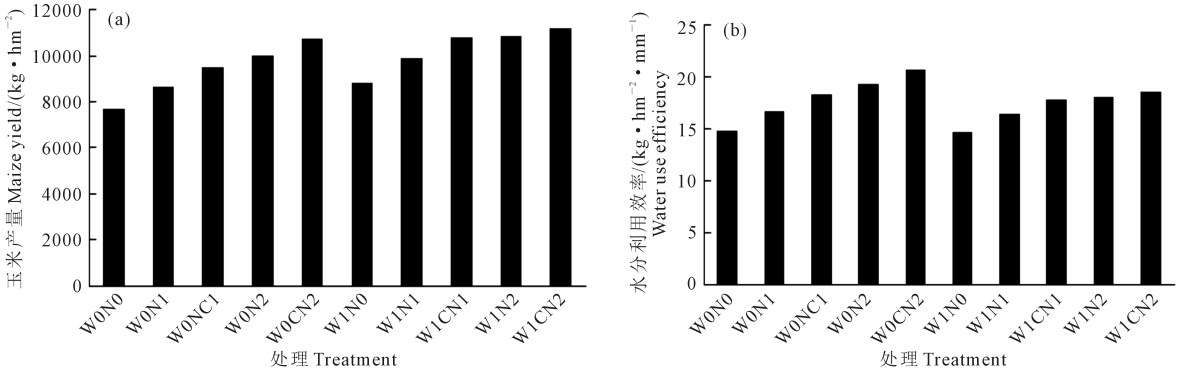


图 13 不同灌水量和尿素施用对玉米产量和水分利用效率的影响

Fig.13 Effects of irrigation and urea application on maize yield and water use efficiency

条件下,玉米产量平均比 W0N0 增加 26.5%,灌水后平均增产21.3%。同一类型施肥,增施氮肥可以提高产量和玉米水分利用效率。施氮量相同时,灌水降低了水分利用效率,控释尿素处理下产量和水分利用效率均要高于常规尿素处理。

4.1.4　测墒补灌　在山东省气候条件下,在作物生长的关键时期,0~40 cm 土层的目标土壤相对含水量为田间持水量的 70%,测墒补灌即根据此进行设置。设置无灌水(W0)、定量灌水 60 mm×2 次(W60)、测墒补灌(Ws)3 种灌水量,结果表明,2011—2012 年间,测墒补灌处理的灌水量比定量灌溉处理降低 57.7 mm、籽粒产量提高 10.7%、水分利用效率提高 19.5%;2013—2014 年间,测墒补灌处理的灌水量比定量灌溉处理降低 43.4 mm、籽粒产量提高 5.9%、水分利用效率提高 13.0%(图 14)。

4.2　春播作物覆盖节水耕作制度:花生、马铃薯等地膜覆盖节水增产技术体系

试验一:在山东农业大学农学实验站进行,以花生('花育 22 号')为研究对象,设置不覆膜(N0)、普通地膜覆盖(CK)、4 种生物降解地膜(T1:100% PBAT、0%淀粉,T2:90% PBAT、10%淀粉,T3:85% PBAT、15%淀粉,T4:80% PBAT、20%淀粉),研究不同地膜覆盖对花生产量的影响。结果表明,2013 年,T1、T2、T4 处理分别比 CK 处理减产 8%、5.8%、9.2%;2014 年分别比 CK 处理减产9.1%、4.6%、8.5%,T3 处理较 CK 处理略有减产,但差异不显著(表 1)。

花生覆膜 20 d 后,覆膜处理 0~40 cm 土层含水量均高于不覆膜处理(图 15)。花生覆盖生物降解地膜在前期能与普通无色地膜一样具有保墒效果。随着时间推移,生物降解地膜开始降解,保水性逐渐下降,在覆膜后 40、60、120 d,生物降解地膜覆盖下土壤含水量均低于普通无色地膜。后期降雨增多,生物降解地膜破裂同样有利于水分入渗,覆膜后 80 d 和 100 d,覆盖生物降解地膜土壤含水量均高于普通无色地膜,此时覆膜处理均低于不覆膜处理。

试验二:2013、2014 和 2015 年设置马铃薯覆膜试验,以普通地膜作为对照(CK),设置黑白配色地膜(BW)、生物降解地膜(BD),对马铃薯不同生长时期 0~10 cm 土层含水量和马铃薯产量进行测定。结果表明,随着薯块初成(PF)、薯块膨大(PB)、淀粉积累(SA)到成熟(PM)的过程,土壤含水量呈现下降趋势,CK 处理土壤含水量相对较高(图 16)。生物降解地膜进入马铃薯淀粉积累期后破损率较高,利于土壤蒸发,土壤含水量明显降低。2013 年和 2015 年降水较多,土壤表层含水量整体均较高。2014 年降水不足,土壤含水量均较低。黑白配色地膜可以维持较高的土壤含水量,在干旱年份保墒效果较好,这对于抗旱更加重要。

2013 和 2014 年覆盖黑白配色地膜的马铃薯产量分别比 CK 增加了 6.2%和 8.2%(图 17),2014 年生物降解地膜马铃薯产量增加了 7.1%,2014 年马铃薯产量明显低于 2013 年和 2015 年,黑白配色地膜是最有利于马铃薯产量提高的地膜覆盖方式。

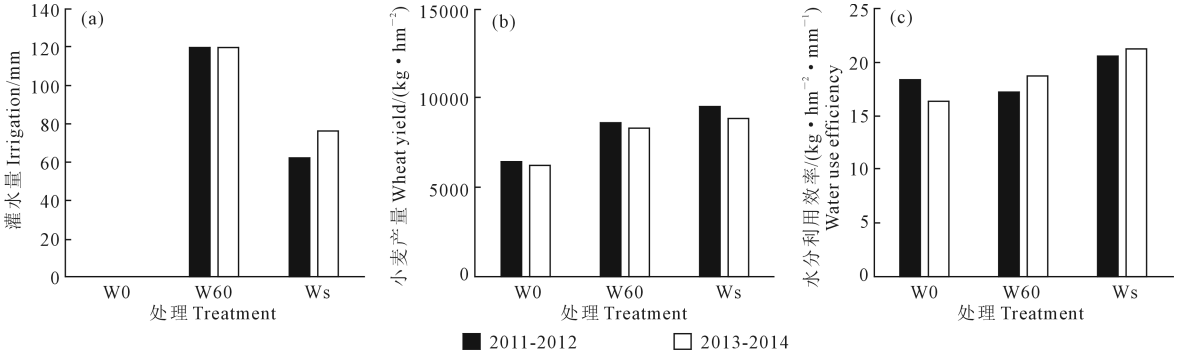


图 14　测墒补灌对小麦产量和水分利用效率的影响

Fig.14　Effects of soil moisture measurement and supplementary irrigation on wheat yield and water use efficiency

表 1　不同生物降解地膜对花生产量的影响

Table 1　Effects of different biodegradable films mulching on yield of peanut

处理 Treatment	花生产量 Peanut yield/(kg·hm⁻²)	
	2013	2014
N0	3964.0d	4764.7d
CK	4568.6a	5303.9a
T1	4115.0c	4823.5c
T2	4303.9b	5058.8b
T3	4421.6ab	5231.3a
T4	4147.1c	4852.9c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: The lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$).

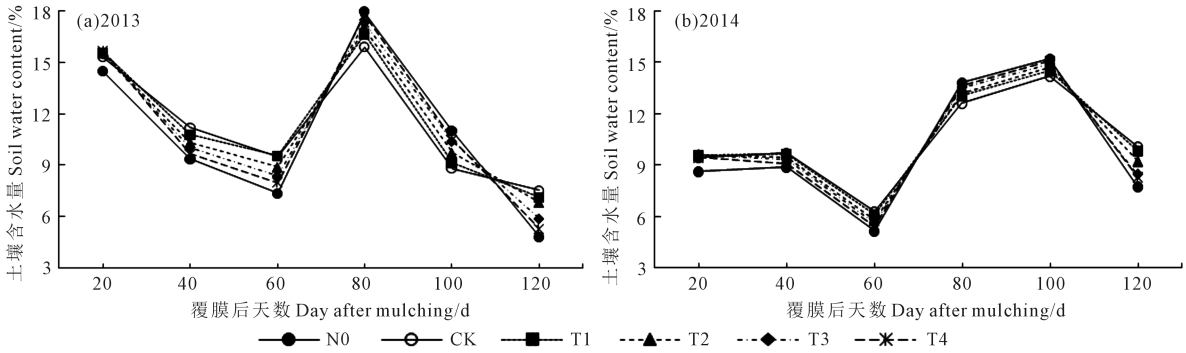


图 15 不同地膜覆盖对花生 0~40 cm 土壤含水量的影响

Fig.15 Effects of plastic films mulching on soil water content at the depth of 0~40 cm

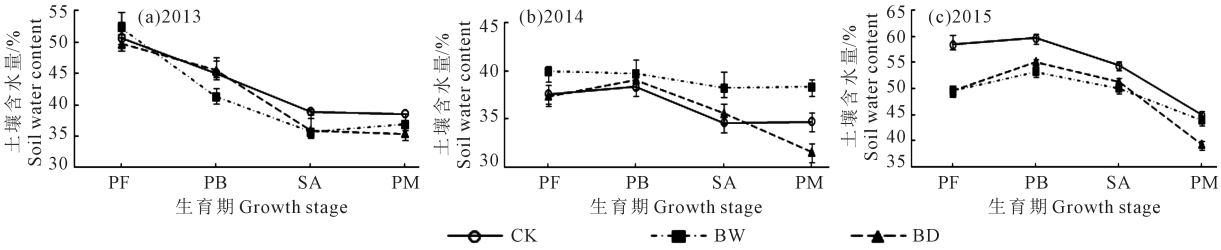


图 16 不同地膜对 0~10 cm 土壤含水量的影响

Fig.16 Effects of different films mulching on soil water content in the 0~10 cm soil layer

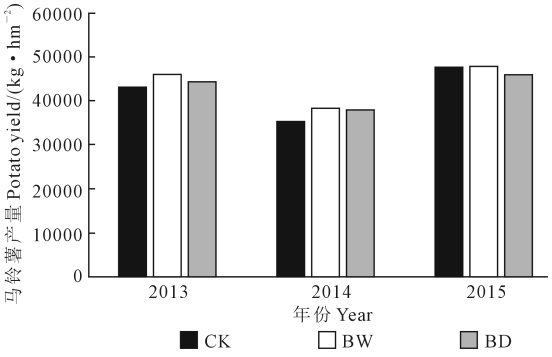


图 17 不同地膜对马铃薯产量的影响

Fig.17 Effects of different films mulching on potato yield

5 黄淮海平原缺水灌区耕作制度发展方向与技术需求

以小麦-玉米两熟用水控量增效为核心目标，生物节水与农艺节水相配合、土壤增蓄与节水灌溉相协调、农艺农机相融合、重点突破与集成创新相结合，最终形成小麦玉米两熟制节水高效耕作制度并标准化，并在农业合作社等新型农业规模化经营主体中建立高标准样板田，在稳产增产的基础上实现农业用水总量控制和可持续利用。

5.1 节水种植制度

建立节水高产的小麦、玉米鉴定或筛选标准，定向培育节水高产品种，筛选耐旱节水丰产高效品种，集成创新麦玉两熟制节水高效耕作制度，形成相应技术规程，提高作物年产量，减少灌溉定额，提高水肥利用效率。对耐旱品种进行节水型保护性耕作，发展节水高效耕作技术，挖掘农业节水潜力。以年周期节水高效为目标，统筹降水与灌溉水利用，建立小麦季以增蓄降耗为目标的深松与秸秆表层还田技术体系，玉米季则建立以增渗降耗为目标局部深松与残茬覆盖的技术体系，充分挖掘降水的利用效率，并实现玉米季蓄水后用。建立不同类型土壤耕作制度，肥沃耕层，提升土壤肥力，增强蓄水保墒能力，降低水资源的消耗。进行耕作制度优化：将节水抗旱作物或品种引入耕作制度（建立轮作节水高效制度）；建立种植制度与养地制度相结合的节水高效耕作制度（轮作、轮耕、秸秆还田、有机培肥、喷灌水肥一体化）；农艺与农机配套；周年统筹；自动化测墒灌溉。

5.2 智慧耕层构建

随着信息技术的飞速发展，智慧耕层构建已经成为农业现代化的重要措施。智慧耕层就是通过耕层构建最大限度地发挥耕层对肥水的动态提供能力与作物需求的同步性，以减少外来资源的投入。智慧耕层构建的主要思路，一是调整有机质含量及其在耕层中的分布，构建“海绵耕层”，提升不同深度土层差异固碳蓄水，满足不同土层作物根系水需求；二是通过有机质作为碳源与外源菌剂、土

壤土著微生物联合调控,实现耕层的动态调控,以满足不同时期水分的蓄积与利用。最近我们提出了物理、化学与生物深松相结合的新深松耕作体系,以减少物理深松、合理化学与生物深松相结合,建立新型的耕作体系,实现土壤结构调控、固碳减排与节水高效的协调[23]。

5.3　作物-环境耦合

作物生长受到外界环境如光、温、水、肥、气、热等因子协调作用。寻求最佳的环境条件控制,对作物生长和产量的提高至关重要。水肥气耦合是一种新型的精细化滴灌技术,能够定时定量补充土壤水肥,可以有效缓解根系通气状况,促进作物吸收水肥,保证高效高产[24]。黄淮海地区水资源紧缺,在节水的前提下,可以将水与肥料配合施用,实现水肥一体化高效利用;另外可以通过对黄淮海平原作物灌溉需水定性估计耕地生产潜力,并制定相应增产措施,评估作物灌溉需水与耕地生产潜力的耦合关系。

在作物与环境耦合方面,一是要尽量调控环境以适宜作物的包括水肥气热光等在内动态的、差异化的环境需求,如创造不同土层不同时期肥水的动态变化,以与作物根系活性吸收深度相匹配;二是在育种方面应选育更加适合当地的作物品种,最终做到作物与环境互适。作物与环境结合可以在现有测墒补灌的基础上再创新,如测墒定位补灌、测苗施肥、动态肥水等等,实现环境与作物信息的准确获得与高精度管理。

5.4　气候智慧型农业

目前,气候变暖和降水异常严重影响着我国的农业发展,而气候智慧型农业就是运用气候适应性技术应对粮食安全、气候变化和温室气体排放三重挑战的综合方法,是一种智慧的全新农业发展模式。气候智慧型农业通过农业系统技术和模式等方面的综合创新,提高应对气候变化的能力,减少农业用品投入和温室气体排放,增加农田碳储量,确保农业增产增收[25]。我国正处于由传统农业向气候智慧型农业过渡的时期,缺乏实践基础和清晰的发展目标。增强农业对气候变化的适应能力是保障国家粮食安全、减缓气候变化、保持农业可持续发展的重要战略,目前有很多新技术和新方法被应用到气候智慧型农业中,比如耕作技术、遥感技术、作物模型,为科学研究提供了一定技术支持。气候智慧型农业的发展应根据不同地区的气候特征进行相应的布局,要增强相应地区的适应能力。我国在主要的水稻生产区域集合了秸秆全量还田、条带旋耕等保护性耕作,化肥定位深施等精准施肥以及浸润灌溉等为一体的稻作新模式,构建了适合我国的气候智慧型发展模式。在黄淮海平原地区,则需要建立气候智慧型农业试点示范区,根据当地具体的气候以及现实条件,选育高产、养分高效利用、抗逆性强的优质种子;使用节水、农药化肥减量提效技术,综合利用农田废弃物(秸秆、农膜、畜禽粪便等),因地制宜发展适应本地区的特色技术模式和产业。

参 考 文 献:

[1] 李春喜. 黄淮海平原粮食生产绿色发展方向与政策建议[J]. 民主与科学, 2021, 3(6): 22-25.
LI C X. Green development direction and policy suggestions of grain production in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Democracy & Science, 2021, 3(6): 22-25.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011-2020.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2011-2020.

[3] 王凌河, 赵志轩, 黄站峰, 等. 黄淮海地区农业水问题及保障性对策[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2094-2101.
WANG L H, ZHAO Z X, HUANG Z F, et al. Agricultural water use in Huang-Huai-Hai region:problems and countermeasures[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10): 2094-2101.

[4] 田益民, 鲍振鑫, 宋晓猛, 等. 黄淮海平原地下水储量与埋深变化特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2021,(12): 115-121.
TIAN Y M, BAO Z X, SONG X M, et al. Analysis of variation characteristics of groundwater reserves and buried depth in Huang-Huai-Hai Plains[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021,(12): 115-121.

[5] 杜森. 黄河流域节水农业现状、问题及建议[J]. 中国农业综合开发, 2020,(1): 24-25.
DU S. Present situation,problems and suggestions of water-saving agriculture in the Yellow River basin[J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2020,(1): 24-25.

[6] 王浩, 秦大庸, 裴源生, 等. 黄淮海流域水资源合理配置研究[Z]. 北京: 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 2006.
WANG H, QIN D Y, PEI Y S, et al. Study on rational allocation of water resources in the Huang-Huai-Hai basin[Z]. Beijing:Institute of Water Resources, China Academy of Water Resources and Hydropower Research, 2006.

[7] 田言亮, 张光辉, 王茜, 等. 黄淮海平原灌溉农业对地下水依赖程度与保障能力[J]. 地球学报, 2016, 37(3): 257-265.
TIAN Y L, ZHANG G H, WANG Q, et al. Groundwater safeguard capacity and dependency degree of agricultural irrigation on groundwater in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(3): 257-265.

[8] 曹婧, 陈怡平, 毋俊华, 等. 黄河流域五大灌区沿河耕地土壤肥力评价与改良措施[J]. 地球环境学报, 2020, 11(2): 204-214.
CAO J, CHEN Y P, WU J H, et al. Soil fertility evaluation and improvement measures in five irrigated areas along the Yellow River basin[J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(2): 204-214.

[9] 谢生亮. 高效节水灌溉项目及其工程效益分析[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(10): 4-5.
XIE S L. High efficiency and water saving irrigation project and its engineering benefit analysis[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2021, 50(10): 4-5.

[10] 马世浩, 杨丞, 王贵兵, 等. 水稻节水灌溉技术模式研究进展[J]. 节水灌溉, 2021,(8): 19-24.
MA S H, YANG C, WANG G B, et al. Research progress of rice water-saving irrigation technology mode[J]. Water Saving Irrigation, 2021,(8): 19-24.

[11] 刘文涛, 安振, 张梦坤, 等. 喷灌条件下耕作方式对土壤水分均匀性与冬小麦水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 282-290.
LIU W T, AN Z, ZHANG M K, et al. Effects of tillage methods on soil moisture uniformity and water use efficiency of winter wheat under sprinkler irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 282-290.

[12] SEZEN S M, YAZAR A, EKER S. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1/2): 115-131.

[13] WHITE S C, RAINES R. Identifying the potential to apply deficit irrigation strategies in cotton using large mobile irrigation machines [C]//Proceedings of the 4th International Crop Science Congress (ICSC 2004), Brisbane, Australia: National Centre for Engineering in Agriculture, 2004: 1-5.

[14] 杨恒山, 薛新伟, 张瑞富, 等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 69-77.
YANG H S, XUE X W, ZHANG R F, et al. Effects of irrigation methods on yield and water use efficiency of maize in the West Liaohe Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 69-77.

[15] 何进宇, 刘飞杨, 马波, 等. 不同旱作节水灌溉条件对土壤理化性质及水稻产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 121-127.
HE J Y, LIU F Y, MA B, et al. Effects of different irrigation conditions on soil physicochemical properties and rice yield [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 121-127.

[16] 李玥, 王春霞, 何新林. 节水灌溉技术下农业种植结构优化模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 104-109.
LI Y, WANG C X, HE X L. Optimization model of agricultural planting structure under water-saving irrigation technology[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 104-109.

[17] 郭晓旭, 杨恒山, 邰继承, 等. 作物浅埋滴灌技术研究进展[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2020, 35(1): 80-84.
GUO X X, YANG H S, TAI J C, et al. Advances in crop shallow buried drip irrigation technology[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities(Natural Sciences), 2020, 35(1): 80-84.

[18] 刘戈, 王凯, 刘延, 等. 不同灌溉模式对黄淮海平原区夏玉米生产性状及水分利用率的影响[J]. 节水灌溉, 2021,(4): 48-54.
LIU G, WANG K, LIU Y, et al. The effects of different irrigation modes on yield traits and water use efficiency of summer maize in Huang-Huai-Hai Plain [J]. Water Saving Irrigation, 2021, (4): 48-54.

[19] 惠施佳, 张金霞. 不同覆盖方式和灌水定额对河西绿洲食葵农田土壤水热、养分和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 212-223.
HUI S J, ZHANG J X. Effects of different mulching patterns and irrigation quotas on soil hydrothermal, nutrients and yield of sunflower farmland in Hexi Oasis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 212-223.

[20] TIAN S Z, NING T Y, WANG Y, et al. Crop yield and soil carbon responses to tillage method changes in North China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 207-213.

[21] 王万宁, 强小嫚, 刘浩, 等. 麦前深松对夏玉米土壤物理性状和生长特性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 229-236.
WANG W N, QIANG X M, LIU H, et al. Effects of subsoiling before sowing of winter wheat on soil physical properties and growth characteristics of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 229-236.

[22] 强小嫚, 张凯, 米兆荣, 等. 黄淮海平原地区深松和灌水次数对冬小麦-夏玉米节水增产的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 491-502.
QIANG X M, ZHANG K, MI Z R, et al. Effects of subsoiling and irrigation frequency on water saving and yield increasing of winter wheat and summer maize in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 491-502.

[23] NING T Y, LIU Z, HU H Y, et al. Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: 105490.

[24] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 163-172.
ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Oxygation improving soil aeration around tomato root zone in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(21): 163-172.

[25] 张卫建. 气候智慧型农业将成为农业发展新方向[J]. 中国农村科技, 2014,(4): 14.
ZHANG W J. Climate smart agriculture will become a new direction of agricultural development[J]. China Rural Science & Technology, 2014,(4): 14.