文章编号:1000-7601(2019)05-0009-07 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.05.02

海河平原小麦-玉米不同种植制度节水特性分析

郑媛媛,陈宗培,王贵彦

(河北农业大学 河北省作物生长调控重点实验室,河北 保定 071000)

摘 要:试验于 2014—2016 年在河北省景县进行。试验处理为冬小麦-夏玉米一年两熟(CK)、春玉米→冬小麦-夏玉米两年三熟(A1)、春玉米-夏玉米一年两熟(A2)、春玉米一年一熟(A3)、夏玉米一年一熟(A4) 5 种种植制度,系统分析了各处理作物产量、周年土壤水分动态和水分利用效率。结果表明:5 种种植制度中,CK 产量最高,2 个种植周期的总产量为 38 574.24 kg·hm^{-2},A1、A2、A3、A4 总产量分别比 CK 减少 23.7%、23.8%、51.2%和 39.6%;CK 的总耗水量最高,为 1 851.45 mm,A1、A2、A3、A4 相对 CK 耗水量分别减少了 504.3、452.3、753.5 mm 和 712.8 mm;各处理间水分利用效率没有显著差异,A1 较高为 21.84 kg·mm^{-1}·hm^{-2}。A1 和 A2 相对 CK 总产量有所降低,但周年总耗水量分别比 CK 减少 504.25 mm 和 452.30 mm,水分利用效率分别提高了 4.8%和 0.8%。这 2 种种植制度可作为当前小麦-玉米两熟的重要补充,加强周年土壤水分管理是本区域粮食生产和水分可持续利用的重要措施。

关键词:小麦-玉米种植制度;产量;水分利用效率;海河平原

中图分类号:S344;Q945.79 **文献标志码**:A

Analysis on the water-saving characteristics of winter wheat and summer maize cropping system on Haihe Plain

ZHENG Yuan-yuan, CHEN Zong-pei, WANG Gui-yan

(*Hebei Agricultural University*, *Key Laboratory of Crop Growth Regulation of Hebei Province*, *Baoding*, *Hebei* 071000, *China*)

Abstract: Water shortage is one of the most important challenges for grain production in Haihe Plain. To design more suitable cropping system and overcome the challenge of water scarcity in the region, the grain yield and water use efficiency(*WUE*) of different cropping systems mainly involving wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.) were investigated, providing a scientific basis for food security and proper agriculture production. The field experiments were conducted from 2014 to 2016 in Jingxian County, Hebei Province. The treatments were set as five cropping systems including winter wheat-summer maize double cropping system (CK), spring maize-winter wheat-summer maize three harvests in two years (A1), spring maize-summer maize double cropping system (A2), spring maize single cropping system (A3), and summer maize single cropping system (A4). The results showed that the total grain yield of CK was the highest at 38 574.24 kg·hm^{-2} during the two growing seasons (2014—2016); the grain yields of A1, A2, A3 and A4 were 23.7%, 23.8%, 51.2% and 39.6% lower than that of CK, respectively. The CK had the highest total water consumption (1851.45 mm), and the total water consumption of A1, A2, A3 and A4 were significantly decreased 504.3, 452.3, 753.5 mm and 712.8 mm, respectively, compared with CK. A1 reached the highest *WUE* (21.84 kg·mm^{-1}·hm^{-2}) but there was no significant difference between treatments. The results also showed that, compared to the CK, A1 and A2 decreased total yield and used less total water consumption, 504.25 mm and 452.30 mm less than CK, respectively, but increased *WUE*, 4.8% and 0.8% over CK, respectively. Our results demonstrated that these two cropping systems, A1 and A2, could be important complements to current wheat-maize cropping systems and essential for promoting food production and sustainable water development in this region.

收稿日期:2018-11-01 **修回日期**:2019-08-28

基金项目:"十三五"国家粮食丰产增效科技创新专项(2018YFD0300504)

作者简介:郑媛媛(1991-),女,河北赤城县人,硕士,研究方向为集约持续农作制度。E-mail: 392450148@qq.com

通信作者:王贵彦(1971-),女,河北行唐县人,教授,主要从事集约持续农作制度研究。E-mail: wangguiyan71@126.com

Keywords: wheat-maize cropping system; yield; water use efficiency; Haihe Plain

华北平原光热资源充足,是我国重要的粮食生产基地,对保证我国粮食安全具有重要作用。20 世纪 70 年代以来,为了增加粮食产量,该区域主要种植制度一年一熟转变为一年两熟或两年三熟,逐渐形成了目前以生产粮食为主的小麦-玉米一年两熟种植制度。随着粮食产量,尤其是主粮小麦产量的进一步提升,对水分的需求逐渐增加,受夏季季风气候影响,该区域 80%的年降水量(450~600 mm)集中在 7—9 月,春季和冬季降水仅占 20%。小麦、玉米两季生育期多年平均耗水量为 800~900 mm[1],而小麦生育期降水仅能满足其需水量的 25%~40%,水分亏缺部分(200~300 mm)主要依靠地下水灌溉维持较高的产量[2-3]。长期超采地下水造成了华北平原地下水位持续下降(年平均下降 1m)和盐水入侵、地面沉降等生态环境问题[4-6],是中国水资源承载能力最不适合的地区[7]。在资源性缺水的同时,由于灌溉管理或缺少水利设施等因素,农田水分利用效率仍偏低[8-10]。

近年来,针对小麦-玉米一年两熟种植制度节水,从节水分子育种[11]、调亏灌溉[10]、覆盖降蒸[12]、时量运筹、种植制度[13]、土壤耕作及群体空间配置、工程节水等方面进行了理论和技术研究。其中调亏灌溉和时量运筹灌溉是生产上尤其是冬小麦生长期间常用的节水农艺措施。尽管这些技术的节水效果明显,但由于长期超采,华北平原地下水位仍持续下降[14]。

小麦-玉米种植制度中,由于小麦生长期间降水较少,地下水灌溉是补充需水量的重要来源。其种植面积占华北平原农作物总播种面积的 29.6%,其中河北平原种植面积所占比例最大,占华北平原小麦种植面积的 54.7%[15]。小麦等夏粮作物灌溉用水量占华北平原农林总灌溉用水量的 43.7%,导致华北平原中部地区由于农作物灌溉用水与当地水资源特征之间处于“严重不适应”状态或“极严重不适应”状态。而小麦等夏粮作物种植面积大是“严重不适应”的主导因素[15]。尽管在过去的几十年中,新品种及各种农艺节水措施的应用,使小麦、玉米的水分利用效率不断提升,但主要贡献是来源于产量不断提高,而 30 a 中无论是小麦还是玉米耗水量都不断增加[1]。此外,受未来气候变化影响,21 世纪 50 年代黄淮海平原农作物蒸散量增幅大于降雨量增幅农业用水亏缺形势将更加严峻[16]。

而 20 世纪 90 年代以来是近 60 a 华北平原气候最为干旱时期,也是小麦玉米种植规模和产量历史性高产期,导致农业开采量显著增加。因此,农业灌溉超采用水是华北平原地下水水位下降的主导因素,与耗水农作物的种植规模和气候持续干旱密切相关[15]。寻找替代传统小麦-玉米两熟的种植制度,进一步减少耗水作物种植,是减缓或停止地下水位进一步下降的有效措施[17]。研究表明,在华北平原黑龙港流域冬小麦-夏玉米→春玉米两年三熟和春玉米一年一熟制度下,冬小麦-夏玉米一年两熟制度的产量和耗水量有所降低,但水分利用效率提高了 7.8%和8.4%[18],春玉米一年一熟每年可减少消耗地下水 161 mm[19]。尽管以往的研究也关注了小麦-玉米替代种植制度的节水效果,但主要集中于作物生长季内的土壤水分消耗和经济产量的获取,当冬小麦减少种植面积或不种植时,土地就会出现一段时间的休闲,这段时间由于地表杂草和蒸发的影响,水分消耗一直在持续。因此,本研究以粮食作物小麦、玉米为主的种植制度为研究对象,以周年土壤水分消耗为时间范围,对不同种植制度的周年作物产量和水分利用效率等进行系统分析,为该区域建立粮食生产和水分可持续利用的种植制度和农业结构调整提供理论依据。

1 材料与方法

试验于 2014 年 10 月—2016 年 11 月在河北景县进行,土壤为潮褐土,多年平均降水量 529.9 mm,主要分布在 6—9 月,小麦生长季(10 月—次年 5 月)年平均降水量 65~100 mm。试验期间(2014-10—2016-11),2014 年 10—12 月降水量 11.9 mm,2015 年降水量 572.2 mm,2016 年 1—11 月降水量 688.6 mm。试验地土壤基础养分状况为 PH 值7.81、有机质 9.3 mg·kg^{-1}、全氮 0.6 mg·kg^{-1}、速效磷 39.0 mg·kg^{-1}、速效钾 188.5 mg·kg^{-1};其土壤水分状况见表 1。

表 1 试验地土壤水分状况

Table 1 Soil moisture status of the experiment site

土层深度/cm Soil depth	田间持水量/% Field capacity	凋萎含水量/% Wilting moisture content	容重/(g·cm^{-3}) Bulk density
0~20	43.42	3.18	1.37
20~40	35.14	7.30	1.47
40~60	37.96	9.00	1.44
60~80	41.06	10.79	1.38
80~100	41.26	5.19	1.43
100~120	45.10	6.11	1.50
120~140	44.48	4.32	1.41
140~160	46.80	7.90	1.41
160~180	44.38	12.53	1.46
180~200	44.66	8.92	1.44

2014—2016 年试验共设 5 个处理,各处理施肥、灌溉等管理措施见表 2。

试验用小麦品种为鑫麦 296,夏玉米为君实 9 号;一年一熟的春玉米品种为金玉 87;一年两熟的春玉米品种为德美亚 1 号,夏玉米为浚单 29。每个处理 3 个重复,完全随机排列,不同处理间设 3 m 隔离区,每个小区面积 20 m×20 m。

在小麦、玉米生长期每 20 cm 为一层次用土钻取土,采用烘干法测定 0~200 cm 各层次土壤含水量。耗水量(mm)= 土壤水消耗量+降水量+灌溉量+地下水补给量-径流量-渗漏量,单位 mm。因本研究区域地势平坦,试验地点的地下水埋深 10 m 以下,灌溉时利用水表控制灌溉量。因此,计算公式中的地下水补给量、渗漏量、径流量均忽略不计。

水分利用效率(WUE,kg · mm^{-1} · hm^{-2})= 籽粒产量(kg · hm^{-2})/周年田间耗水量

2　结果与分析

2.1　不同种植制度作物产量

表 3 为不同种植制度的作物产量、总产量和收获指数。2 a 内,CK 的总产量最高,显著高于其他处理。A1 和 A2 显著高于 A3 和 A4(P<0.05)。A1、A2、A3、A4 相对 CK 总产量分别损失了 23.7%、23.8%、51.2%和 39.6%。各种植制度中,夏玉米表现出了较高的产量,这与夏玉米生长期间充足的光温和降水等密切相关。2 a 间,A2 总产量 2016 年比 2015 年低 36.9 %,这主要是由于 2016 年春玉米开花期到收获期(4 月 19 日—6 月 12 日)降雨量为 360.5 mm,

表 2　各处理施肥灌溉措施

Table 2　The irrigation and fertilization of different treatments

处理 Treatment	年份 Year	施肥量 Fertilization/(kg · hm^{-2})			灌水量 Irrigation amount/mm
		N	P_2O_5	K_2O	
冬小麦-夏玉米(CK)	2014-2015	406	113	116	小麦 Wheat 225 mm,玉米 Maize 150 mm
Winter wheat-summer maize	2015-2016	406	113	116	小麦 Wheat 225 mm
春玉米→冬小麦-夏玉米(A1)	2015	231	113	116	春玉米 Spring maize 75 mm
Spring maize→winter wheat-summer maize	2015-2016	406	113	116	小麦 Wheat 225 mm
春玉米-夏玉米(A2)	2015	323	113	116	春玉米 Spring maize 75 mm
Spring maize-summer maize	2016	323	113	116	春玉米 Spring maize75 mm
春玉米(A3)	2015	231	113	116	75 mm
Spring maize	2016	231	113	116	75 mm
夏玉米(A4)	2015	218	113	116	150 mm
Summer maize	2016	218	113	116	75 mm

表 3　不同种植制度下的产量、生物量和收获指数

Table 3　The yield, biomass and harvest index of different cropping systems

处理 Treatment	年份 Year	作物 Crop	单季产量/(kg · hm^{-2}) Seasonal yield	总产量/(kg · hm^{-1}) Total yield	收获指数 Harvest index
CK	2014—2015	冬小麦 Winter wheat	7786.2	38574.4a	0.48
		夏玉米 Summer maize	11371.6		0.60
	2015—2016	冬小麦 Winter wheat	7890.7		0.48
		夏玉米 Summer maize	11525.7		0.59
A1	2015	春玉米 Spring maize	10773.8	29425.5b	0.58
	2015—2016	冬小麦 Winter wheat	7628.5		0.44
		夏玉米 Summer maize	11023.2		0.58
A2	2015	春玉米 Spring maize	9886.8	29392.2b	0.73
		夏玉米 Summer maize	8129.8		0.63
	2016	春玉米 Spring maize	6648.0		0.36
		夏玉米 Summer maize	4727.6		0.62
A3	2015	春玉米 Spring maize	10617.9	18816.5d	0.58
	2016	春玉米 Spring maize	8198.6		0.47
A4	2015	夏玉米 Summer maize	12483.3	23297.4c	0.66
	2016	夏玉米 Summer maize	10814.1		0.55

注:同列数据后不同字母表示处理间显著差异(P<0.05)。下同。

Note: Values followed by different letter within a column are significantly different at P<0.05. The same below.

连续的低温寡照导致春玉米减产;在夏玉米播种的前 2 d(7 月 20 日)降雨量达到 107.7 mm,播种到拔节期(6 月 12 日—7 月 7 日)降雨量达到 216.9 mm,大量的降雨导致夏玉米减产。A3 处理同样受降雨影响造成其 2016 年产量较低。

综上,某种种植制度的产量是由作物的复种指数决定,复种指数越高,其产量越高。3 种作物中,夏玉米收获指数最高。

2.2 不同种植制度周年土壤水分动态和水分利用效率

2.2.1 不同处理 2 m 土层土壤水分变化动态 图 1 为各处理 2 m 土层 2 a 间土壤水分变化动态,冬小麦-夏玉米(CK)一年两熟中,2015 年小麦收获后(2015 年 6 月 10 日),土壤贮水量相对播种时(2014 年 10 月 13 日)明显降低,尤其是 0~100 cm 的土壤含水量显著下降,为主要耗水层。夏玉米收获后(2015 年 10 月 7 日),土壤接纳了较多的降水,各土层土壤含水量均有所增加。第二季冬小麦收获后(2016 年 6 月 12 日),较上一种植周期夏玉米收获后各土层土壤含水量均有所下降,尤其是 0~140 cm 土层下降最为显著,比该层上一种植周期夏玉米收获后土壤贮水量少 42.9%。2 a 种植周期结束,各层土壤水分含量与初始状态略有增加但增加幅度不大。

春玉米→冬小麦-夏玉米(A1)两年三熟种植制度下,第一年种植春玉米(2015 年 5 月 8 日—2015 年 9 月 10 日),之后在冬小麦(2015 年 10 月 7 日—2016 年 6 月 12 日)播前为休闲期,直至夏玉米收获(2016 年 10 月 5 日)完成 2 a 种植周期。从图中可以看出,春玉米收获后土壤贮水量与播前相比略有增加,增加幅度为 8.5%。冬小麦收获后,0~80 cm 的土壤贮水量仅比该层凋萎含水量高 13.7%,小麦生长期间消耗了较多的土壤水,80cm 以下土层壤水分变化较小。夏玉米收获后,20~40 cm 土层水分含量较低。

春玉米-夏玉米(A2)一年两熟种植制度下,2015 年 3 月 29 日播种春玉米,收获后(2015 年 7 月 15 日),10~80 cm 土层土壤含水量下降 21.0%~34.0%, 80 cm 以下土壤水分变化较小。第二季夏玉米收获后(2015 年 11 月 1 日)即第一年种植周期

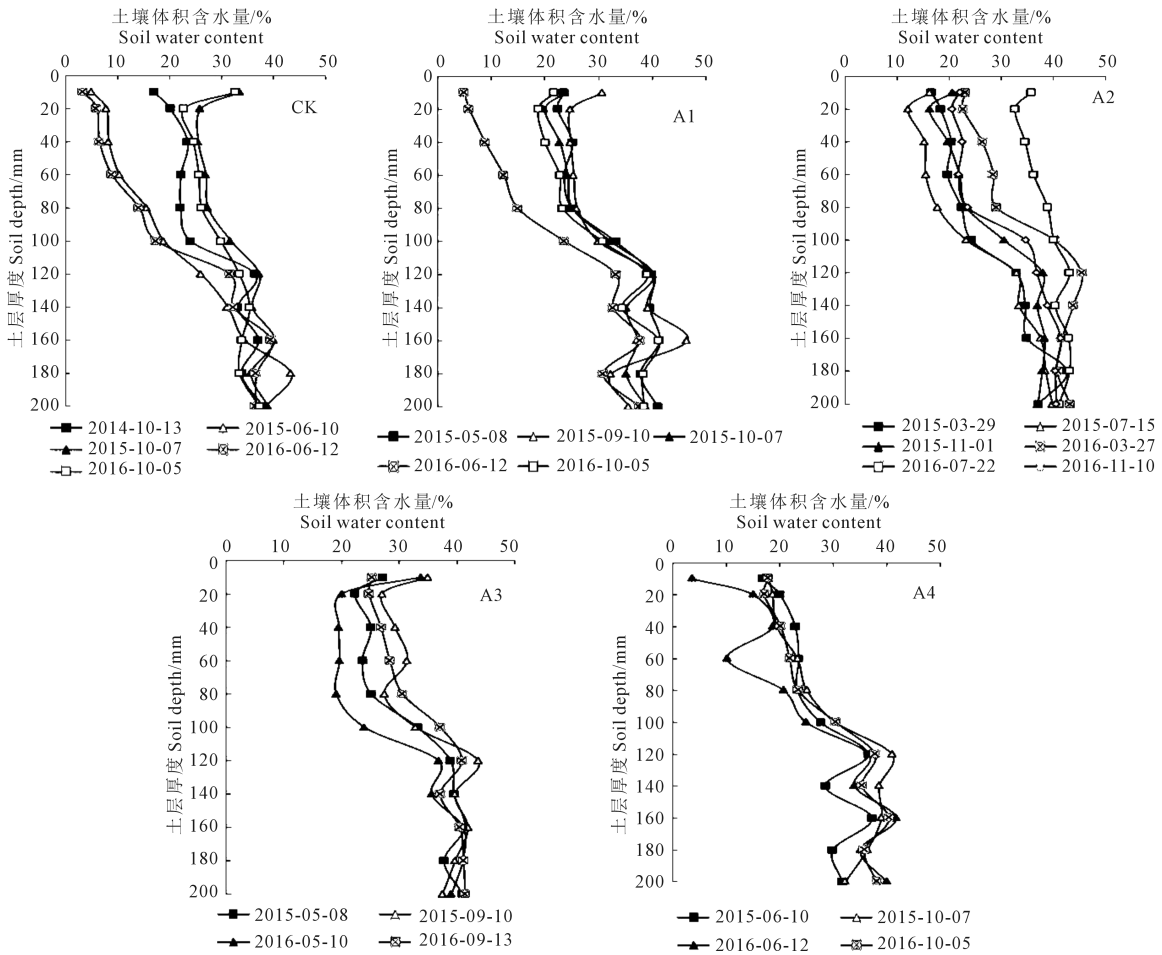


图 1 各处理栽培期 2 m 土层土壤水分含量变化动态/%

Fig.1 Dynamic changes of soil water content in 2 m soil layer during growth period of each treatments

结束,由于夏玉米生长处于雨季,之前消耗的土壤水分得到补充,土壤含水量上升。第二季春玉米播种时间为 2016 年 3 月 27 号,从 2105 年 11 月初收获后到播前,为土地的休闲期,期间降水量为 90.90 mm,与第一季夏玉米收获后相比各层土壤水分含量均有所增加(8.0%~40.0%),0~140 cm 土层土壤水分上升幅度最为显著。2016 年春玉米生育期间(2016 年 3 月 27 日—2016 年 7 月 22 日),降水量为 398.00 mm,尤其是 4 月 19 日—6 月 12 日间降雨量占春玉米全生育期降水量的 90.6%,春玉米收获时土壤贮水量基本接近田间持水量,尤其是 0~80 cm 土层最为明显。第二季夏玉米收获时(2016 年 11 月 10 日),A2 完成第二个种植周期,与第一季初始状态相比,各层土壤水分含量会与初始状态基本持平或略偏高。

春玉米(A3)一年一熟种植制度下,第二季春玉米播前(2016 年 5 月 10 日)与第一季春玉米收获土壤贮水量降低 5.0%,土壤在休闲期由于土壤水分蒸发和杂草等的耗水消耗了土壤水分。第二季春玉米收获后(2016 年 9 月 13 日),由于期间降水 572.00 mm,土壤水分得到了恢复。2 a 种植周期结束后,0~100 cm 土层水分含量与初始状态相比有明显的增加(7.0%~22.0%)。

夏玉米(A4)一年一熟种植制度下,由于夏玉米生长期处于雨季,期间降水较多,2016 年夏玉米收获后的土壤贮水量与 2015 年播前相比基本持平。但 2015 年收获后到 2016 年播前期间为休闲期,由于杂草消耗和土壤水分蒸发等作用,0~80 cm 土层水分含量降低。

2.2.2　不同种植制度下的水分平衡及水分利用效率　表 4 为 2 a 周期内各种植制度耗水组成及水分利用效率。可以看出,2 a 种植周期结束后,2 a 内各处理土壤耗水和总耗水量显著低于 CK,由于灌溉水及降水的共同影响,从周年生产来看,水分利用效率 A1 最大,但各处理之间没有显著差异。从各种植制度作物生育期内的耗水组成和水分利用效率来看(表 5),2015 年为降水较正常的年份,A1 中的春玉米、A2、A3 和 A4 水分利用效率分别比 CK 高 17.7%、49.8%、15.2%和 27.3%。耗水构成中,有冬小麦的种植制度中,小麦季消耗了 110.8~150.2 mm 的土壤水,春玉米和夏玉米基本不消耗土壤水分,从种植制度总耗水量分析,灌溉和降水是耗水的主要部分,尤其是 2016 年夏玉米生长期间,由于降水较多,土壤库容得到恢复。

冬小麦、春玉米、夏玉米生育期间消耗土壤水分的多少主要与降水量有关,冬小麦由于生长期间降水较少,消耗了较多的土壤水;当减少或不种植耗水较多的冬小麦时,春玉米和夏玉米主要消耗了较多的降水,提高了降水的利用效率。

3　讨　论

海河平原由于水资源短缺,主要种植制度为冬小麦-夏玉米一年两熟,因为水分的限制使得该地区粮食安全和水分可持续发展不能受到保障[20],尤其是衡水等深层水严重超采区,作物灌溉用水强度与总水资源承载力之间呈现“极严重不适应”状态,属于自然水资源紧缺地区,不宜大规模发展高耗水作物[15]。因此,在保证粮食供应的前提下,适当减小冬小麦-夏玉米这种种植模式的栽培面积,以减少对该地区地下水的开采,有利于缓解该地区水资源紧缺状况。

本研究结果表明,在相同的农田管理条件下,当冬小麦种植面积减少或不种植时,虽然产量比小麦-玉米一年两熟有所降低,但其他处理比小麦-玉米少耗水 452.3~753.5 mm,与其他相关研究中得出的春玉米→冬小麦-夏玉米两年三熟、春玉米-夏玉米一年两熟比冬小麦-夏玉米一年两熟周年产量有所降低,但耗水量也降低 200 mm 以上的结论一致[21-23]。但对于替代传统的小麦-玉米种植制度来说,从种植制度周年生产考虑时,除作物生长期外都

表 4　不同种植制度下的水分平衡和水分利用效率

Table 4　Water balance and water use efficiency of different cropping systems

处理 Treatment	种植周期 Growing period	灌溉量 Irrigation amount/mm	降水量 Precipitation/mm	土壤耗水量 Soil water consumption/mm	总耗水量 Total water consumption/mm	水分利用效率 *WUE* /(kg·mm^{-1}·hm^{-2})
CK	2014-10—2016-10	600.0	1245.2	6.25a	1851.5a	20.8a
A1	2015-05—2016-10	300.0	1089.1	-41.9b	1347.2b	21.8a
A2	2015-03—2016-11	150.0	1200.9	48.3a	1399.2b	21.0a
A3	2015-05—2016-09	150.0	1088.9	-140.9c	1098.0c	17.1a
A4	2015-06—2016-10	225.0	1021.2	-107.5c	1138.7c	20.5a

表5 各处理单季耗水构成和水分利用效率

Table 5 Water balance and water use efficiency of one-season in different treatments

处理 Treatment	年份 Year	作物 Crop	灌水量 Irrigation amount /mm	占总耗水量 Percentage of the total water consumption/%	降水量 Precipitaion /mm	占总耗水量 Percentage of the total water consumption/%	土壤耗水量 Soil water consumption /mm	占总耗水量 Percentage of the total water consumption/%	总耗水量 Total water consumption /mm	水分利用效率 *WUE* /(kg·mm^{-1}·hm^{-2})
CK	2014–2015	冬小麦 Winter wheat	225.0	45.2	168.2	59.2	110.8	0	829.4	23.1
		夏玉米 Summer maize	150.0		323.1		−148.0			
	2015–2016	冬小麦 Winter wheat	225.0	22.6	179.0	73.1	189.4	4.4	996.7	19.5
		夏玉米 Summer maize	0		549.5		−146.0			
A1	2015	春玉米 Spring maize	75.0	18.9	372.4	94.0	−51.3	0	396.1	27.2
	2015–2016	冬小麦 Winter wheat	225.0	23.4	179.0	75.7	150.2	1.0	554.2	19.4
		夏玉米 Summer maize	0		549.5		−141.0		408.7	
A2	2015	春玉米 Spring maize	75.0	14.4	182.0	91.6	36.2	0	293.2	34.6
		夏玉米 Summer maize	0		295.6		−67.7		228.0	
	2016	春玉米 Spring maize	75.0	9.5	398.0	80.3	−65.5	10.2	407.5	14.5
		夏玉米 Summer maize	0		234.4		145.2		379.6	
A3	2015	春玉米 Spring maize	75.0	15.7	372.4	99.1	−48.2	0	399.2	26.6
	2016	春玉米 Spring maize	75.0		572.0		−92.7		554.3	14.8
A4	2015	夏玉米 Summer maize	150.0	22.7	323.1	88.1	−48.1	0	425.0	29.4
	2016	夏玉米 Summer maize	75.0		549.5		−59.4		565.1	19.1

有一定的休闲期,休闲期间虽然能接纳一定的降水,但由于杂草耗水和土壤水分蒸发的影响,在不同处理,如春玉米→冬小麦-夏玉米两年三熟(A1)、春玉米一年一熟(A3)和夏玉米一年一熟(A4)中,根据本研究测定结果,主要为0~80 cm土层中含水量下降最为显著,各处理土壤贮水在休闲期都有所降低,如果不采取相关措施,会直接影响下季作物播种期的土壤水分含量。因此,对于一年一熟或隔年种植小麦种植制度中的休闲期,应采取秸秆覆盖或其他物覆盖等方式保持土壤水分,提高水分利用效率[24],春季和夏季施用农田覆盖技术减少的无效蒸发量是作物总耗水量的28.0%~46.0%[15]。陈梦楠等[25]在旱地麦田休闲期覆盖也得到了相同结论,休闲期进行覆盖至播种期0~300 cm内的土壤贮水量在丰水年提高47.00 mm、平水年提高55.00 mm和欠水年提高63.00 mm,休闲期耗水量显著降低。因此,加强不同种植制度的周年水分管理是提高系统水分利用效率的重要措施。

另外,随着经济的发展,城镇化水平和人均收入不断提升,人们对蛋奶肉制品需求量不断增加。本研究中春玉米→冬小麦-夏玉米两年三熟、春玉米-夏玉米一年两熟种植制度中玉米的种植频率较高,面积较大,从全株秸秆干物质产量及营养和能量产量看,可以为养殖提供更多的精饲料、粗饲料及解决相应的能量需求[26],而且在生产过程中,可以根据当地的气候条件,在早春和晚夏种植高饲养品质的青贮玉米品种,可以为奶牛等养殖提供高品质青贮饲料,降低精饲料成本,这也为本区域实现“粮改饲”提供了科学依据。

4 结 论

5种种植制度中,2个种植周期内,A1、A2、A3和A4相对CK经济总产量分别损失了23.7%、23.8%、51.2%和39.6%,但耗水量降低了452~753

mm,作物生长期间水分利用效率提高了 0.9% ~ 4.8%。因此,春玉米→冬小麦-夏玉米两年三熟、春玉米-夏玉米一年两熟 2 种种植制度可作为当前小麦-玉米一年两熟种植制度的重要补充,对促进本区域粮食生产和水分可持续发展具有重要意义。

参 考 文 献:

[1] Zhang X, Chen S, Sun H, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades [J].Agricultural Water Management, 2011, 98(6):1097-1104.

[2] Zhang X, Pei D, Chen S, et al. Performance of double cropped winter wheat-summer maize under minimum irrigation in the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(2):1620-1626.

[3] Liu C, Yu J, Kendy E. Groundwater exploitation and its impact on the environment in the North China Plain[J].Water International, 2001, 26(2):265-272.

[4] Chen J Y, Tang C Y, Shen Y J. Use of water balance calculation and tritium to examine the dropdown of groundwater table in the piedmont of the North China Plain (NCP)[J]. Environmental Geology, 2003, 44(5):564-571.

[5] Zheng C, Liu J, Gao G, et al. Can China cope with its water crisis? —perspectives from the North China Plain[J]. Ground Water, 2010, 48(3):350-354.

[6] Fang, Q X, Ma L, Green T R, et al. Water resources and water use efficiency in the North China Plain: current status and agronomic management options[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1102-1116.

[7] 刘昌明.节水优先需水控制开源节流统一观[J].水利发展研究, 2001, 1(1):3-5.

[8] Deng X P, Shan L, Zhang H, et al. Improving agricultural water use efficiency in and semiarid areas of China[J]. Agricultural Water Management, 2006, 80(1-3):23-40.

[9] Wang H X, Liu C M, Zhang L. Water-saving agriculture in China: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2002, 75(75):135-171.

[10] Zhang X, Wang Y, Sun H, et al. Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply[J]. Irrigation Science, 2013, 31(5):1103-1112.

[11] 孟祥海,李丁,孙书娈,等. 抗旱节水型衡麦系列品种的选育方法及系谱分析[J]. 麦类作物学报, 2017,37(7):907-914.

[12] 郑媛媛,王贵彦,张建恒. 海河平原秸秆覆盖和春季灌水对小麦玉米产量和水分利用的影响[J].干旱地区农业研究, 2018,36(2): 27-36.

[13] Van Oort P A J, Wang G, Vos J, et al. Towards groundwater neutral cropping systems in the Alluvial Fans of the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165:131-140.

[14] Chen C, Wang E, Yu Q. Modelling the effects of climate variability and water management on crop water productivity and water balance in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8):1175-1184.

[15] 张光辉,费宇红,王金哲,等. 华北灌溉农业与地下水适应性研究[M]. 北京:科学出版社,2012:55-167.

[16] 胡实,莫兴国,林忠辉,等. 黄淮海平原冬小麦种植的气候变化适应评估[J]. 自然资源学报, 2016,31(11):1892-1905.

[17] Kendy E, Gérard-Marchant P, Walter M T, et al. A soil-water-balance approach to quantify groundwater recharge from irrigated cropland in the North China Plain[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(10):2011-2031.

[18] 郭步庆,陶宏斌,王璞,等. 华北平原不同粮作模式下作物水分利用[J].中国农业大学学报, 2013,18(1):53-60.

[19] Sun Q P, Krobel R, Muller T, et al. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(5):808-814.

[20] 王电龙,张光辉.不同气候条件下华北粮食主产区地下水保障能力时空特征与机制[J]. 地球学报,2017,38(增刊 1):47-50.

[21] 孙宏勇,刘小京,巨兆强,等. 不同种植模式下水资源利用效率的探讨[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(2):45-48.

[22] 吴丹. 双季玉米在河北平原适应性的系统研究[D]. 保定:河北农业大学,2014.

[23] 周文利. 华北平原不同玉米小麦种植体系养分水分利用效率评价[D]. 北京:中国农业大学,2016.

[24] 陈素英,张喜英,裴东,等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响[J]. 农业工程学报, 2005,21(10):171-173.

[25] 陈梦楠,孙敏,高志强,等. 旱地麦田休闲期覆盖对土壤水分积耗的影响及与产量的关系[J]. 中国农业科学,2016, 49(13): 2572-2582.

[26] 石鹏飞,杨东玉,郑媛媛,等. 华北平原粮饲复合种植模式[J]. 草业科学, 2015, 32(12):2107-2113.