

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

周宝元, 马伟, 孙雪芳, 高卓晗, 丁在松, 李从锋, 赵明

(中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 【目的】优化冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源配置, 探索两季最佳的资源搭配模式, 进一步挖掘当前气候和生产条件下黄淮海地区周年产量潜力和资源利用效率。【方法】本研究通过 10 月上旬至 12 月上旬设置冬小麦不同播期和夏玉米不同收获期, 建立了 5 种冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源分配方式, 于 2015—2017 年在中国农业科学院河南新乡试验站进行田间试验, 对其产量、光温水等气候资源分配及利用特征进行研究。【结果】随冬小麦播期及夏玉米收获期推迟, 两作物生长季光温水资源分配比例分别由处理 I 的 46% : 54%、60% : 40%、42% : 58% 调整至处理 V 的 34% : 66%、49% : 51%、34% : 66% 范围内, 小麦季生长天数及其分配的光温水资源量逐渐减少, 将更多的资源分配到玉米季, 从而导致小麦产量降低, 但由于处理 V 的 ZM66 小麦品种维持了较高的穗数和穗粒数, 因此与处理 I 比产量降低不显著。然而, 处理 V 玉米季生理生长时间较处理 I 延长约 15 d, 2016 和 2017 年光温水资源分配量分别增加 143.8 和 120.7 MJ·m⁻²、290.5 和 281.6℃、12.4 和 25.7 mm, 粒重分别增加 13.1% 和 15.5%, 周年产量两年分别提高 7.9% 和 6.7%; 籽粒脱水时间增加约 45 d, 光温水资源分配量两年分别增加 322.5 和 336.3 MJ·m⁻²、509.6 和 497.8℃、56.7 和 14.1 mm, 籽粒含水量降至 14.4%—17.3%, 达到机械直接收获标准。同时, 由于处理 V 小麦季光温水资源分配量显著降低, 特别是减少底墒水和越冬水灌溉约 150 mm, 2016 和 2017 年其光能、温度和水分生产效率较处理 I 分别提高 12.5% 和 15.8%、10.9% 和 7.7%、39.6% 和 59.3%, 玉米季虽然光能、温度生产效率有所降低, 但水分生产效率显著提高, 因此周年光能、温度和水分生产效率两年分别提高 7.3% 和 9.1%、5.6% 和 5.1%、17.3% 和 29.3%。【结论】在不增加任何投入的前提下通过播/收期的调整 (小麦 12 月上旬播种, 玉米 11 月中旬收获) 优化冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源配置, 可进一步提升其周年产量和光温水资源利用效率, 对于促进黄淮海冬小麦-夏玉米种植模式可持续发展具有重要意义。

关键词: 冬小麦-夏玉米种植模式; 播/收期; 资源配置; 产量; 资源利用效率

Effects of Different Sowing and Harvest Dates of Winter Wheat-Summer Maize Under Double Cropping System on the Annual Climate Resource Distribution and Utilization

ZHOU BaoYuan, MA Wei, SUN XueFang, GAO ZhuoHan, DING ZaiSong, LI CongFeng, ZHAO Ming

(Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Production, Ministry of Agriculture, Beijing 100081)

Abstract: 【Objective】 The study was carried out to optimize the inter-season climatic resource distribution of traditional winter wheat-summer maize cropping system and explore the optimal two-season climatic resource distribution model, so as to

收稿日期: 2018-12-05; 接受日期: 2019-03-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0300504)

联系方式: 周宝元, E-mail: zhoubaoyuan@caas.cn. 通信作者赵明, E-mail: zhaoming@caas.cn

further increase the annual yield potential and resource utilization efficiency of Huang-Huai-Hai region. 【Method】 In this study, five sowing dates of winter wheat and corresponding harvest dates of summer maize were set from early October to early December, and the field experiment was conducted at Xinxiang county from 2015 to 2017. Based on the field experiments, The annual yield, climate resources distribution and resources use efficiency were studied. 【Result】 With the sowing/harvest dates delayed, days of wheat growth period and amount of radiation, temperature, and precipitation resources gradually reduced, more growth time and resources were transferred to maize season, and the resources distribution rate between two seasons changed from treatment I (46%:54%, 60%:40%, 42%:58%) to treatment V (34%:66%, 49%:51%, 34%:66%), which resulted in decrease of wheat grain yield. However, due to greater number of ears and grains of ZM66, no significant difference was found in wheat yield between treatment I and treatment V. Maize grain weight increased by 13.1% and 15.5% due to 15 d, 143.8 and 120.7 MJ·m⁻², 290.5 and 281.6℃, 12.4 and 25.7 mm increasing in 2016 and 2017, respectively, in maize growth duration, radiation, accumulated temperature, and precipitation, eventually the annual grain yield of treatment V increased by 7.9% and 6.7% compared than that of treatment I, respectively. In addition, the grain water content decreased to 14.4%-17.3% due to 15 d, 322.5 and 336.3 MJ·m⁻², 509.6 and 497.8℃, 56.7 and 14.1 mm increasing in maize growth duration, radiation, accumulated temperature, and precipitation in 2016 and 2017, respectively. At the same time, because of radiation and temperature resources in wheat season of treatment V decreased significantly, especially the irrigation water reduced 150 mm, the radiation, temperature and water production efficiency of wheat for treatment V increased by 12.5% and 15.8%, 10.9% and 7.7%, 39.6% and 59.3% in 2016 and 2017, respectively, compared than treatment I. During maize growth season, radiation and temperature production efficiency under treatment V decreased, but water production efficiency increased significantly than that under treatment I, so the annual radiation, temperature and water production efficiency of treatment V increased by 7.3% and 9.1%, 5.6% and 5.1%, 17.3% and 29.3% in 2016 and 2017, respectively, compared than treatment I, respectively. 【Conclusion】 It is of great significance for promoting the sustainable development of winter wheat-summer maize double cropping system in the Huang-Huai-Hai plain by changing sowing and harvest dates (Wheat was sown in early December and maize was harvested in mid-November) to optimize the distribution of resources between two seasons for winter wheat-summer maize double cropping system without any input.

Key words: winter wheat-summer maize cropping system; sowing/harvest date; resource distribution; grain yield; resources use efficiency

0 引言

【研究意义】黄淮海平原是我国重要的粮食产区,冬小麦-夏玉米一年两熟为该区主要种植模式,其小麦、玉米产量分别占全国总产的 50%和 40%左右^[1],为保障我国粮食安全做出了重要贡献。然而,由于黄淮海资源紧缺,大部分地区光热资源一季有余、两季不足,制约了夏玉米机械粒收技术的发展;同时由于降水不足且分布不均,小麦季耗水严重,地下水过度开采问题日益加剧^[2-3],限制了冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式周年产量、资源利用效率及经济效益的提升。因此,探索周年气候资源高效利用的技术途径对于促进黄淮海平原冬小麦-夏玉米种植模式的可持续发展具有重要意义。【前人研究进展】由于 C₄作物具有较高光合能力,有人提出充分发挥玉米的产量潜力,逐渐压缩小麦的生长时间,以高效利用光热水资源。为此,20 世纪 90 年代开始,许多科学家在冬小麦-夏玉米一年两熟的基础上进行了以强化“C₄玉米”为核心的周年高产及资源高效利用的技术途径探索^[4-8]。

陈阜等^[4]建立了“冬小麦/春玉米/夏玉米”和“冬小麦/春玉米/夏玉米/秋玉米”等集约多熟种植,增加玉米种植比例,实现周年单产 20 000 kg·hm⁻²以上。赵秉强等^[5]和李立娟等^[6]建立了小麦-玉米-玉米和玉米-玉米等集约多熟高产技术模式,实现了全年光温资源高效利用,两种种植模式均可达到 18 000 kg·hm⁻²的高产水平。然而,这些模式均属于高集约和高投入的种植,虽然提高了周年产量和资源利用效率,但增加了人工投入,且难以进行机械化操作,不适当当前的生产发展形势。王树安等^[9-10]通过将冬小麦播种期和夏玉米收获期推迟,对两季气候资源进行再分配,将更多的光温资源分配给更加高光效的玉米,建立了冬小麦-夏玉米“双晚”技术模式,实现周年产量 15 000 kg·hm⁻²以上,光、温资源生产力分别提高 64%和 124%。SUN 等^[11]和付雪丽等^[12]研究也证明,冬小麦晚播通过加大种植密度,提高播种质量,其产量和资源效率变化不明显,而夏玉米晚收产量显著提高,因此周年产量和资源效率显著提高。可见,通过播/收期的调整优化冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气

候资源配置是进一步提高其周年产量及光温水资源利用效率的有效途径。【本研究切入点】随着经济社会发展, 高产、高效及环境友好协同发展已成为当前我国农业生产的主要目标。但是该区小麦季耗水量大^[13-15], 地下水过度开采等问题^[16-18]尚未有效解决; 虽然“双晚”技术延长了夏玉米籽粒灌浆时间, 但籽粒收获时含水量仍在 30%以上, 导致机械直接收获籽粒质量差^[19-20]。同时, 在全球气候变暖的大背景下, 近年来我国黄淮海平原秋、冬季气温持续增加, 日照时数减少, 干旱及洪涝灾害等极端天气频发^[21-22], 导致冬小麦拔节孕穗期遭受冻害、冬旱和春旱^[11], 夏玉米授粉结实期遭遇高温、干旱或阴雨寡照^[23-24]的风险进一步加剧。因此, 探索适应新的生产条件和气候条件的冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源最佳分配方式是进一步提升黄淮海周年产量及资源利用效率的重要途径。【拟解决的关键问题】本研究以充分发挥玉米高光效优势为核心, 通过在较大时间范围内连续设置小麦播种期(10 月上旬至 12 月上旬)和玉米收获期(9 月下旬至 11 月下旬)对周年光温水等资源进行重新分配, 建立 5 种冬小麦与夏玉米生长季资源分配方式, 研究其周年产量、气候资源分配及利用效率特征, 确立冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源最佳分配模式, 以期为促进黄淮海平原粮食作物周年高产高效种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015—2017 年在中国农业科学院新乡试验基地(37°41'02"N, 116°37'23"E)进行。该区属于暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 14℃, 全年≥10℃积温 4 647.2℃, 年降水量 573.4 mm, 多在 7、8 月间, 年日照时数 2 323.9 h, 能够充分满足冬小麦-夏玉米一年两熟模式种植。试验田土壤类型为黏壤土, 耕层含有机质 12.6 g·kg⁻¹、速效氮 61.2 mg·kg⁻¹、速效磷 16.2 mg·kg⁻¹、速效钾 109.9 mg·kg⁻¹, pH 8.21。

1.2 试验设计

小麦播期设置范围 10 月上旬(当地农民习惯播种期)至 12 月上旬(小麦冬前不出苗), 每隔 15 d 左右设置一个播期, 共 5 个播期, 包括当地农民习惯的播种期和能够保证小麦正常成熟且冬前能正常播种的最晚播期, 各处理小麦均达到生理成熟后收获。与小麦播期相对应的玉米收获期设置范围 9 月下旬(当地

农民习惯收获期)至 11 月下旬, 每隔 15 d 设置一个收获期, 共 5 个收获期。以 I、II、III、IV、V 分别代表 5 个冬小麦-夏玉米一年两熟模式播/收期搭配组合, 详见表 1。

选用当地播种面积较大的小麦、玉米品种各 2 个为供试材料, 小麦品种为矮抗 58(AK58)和中麦 66(ZM66), 玉米为杂交种先玉 335(XY335)和郑单 958(ZD958)。小麦采用 17 cm 等行距种植, 第一期播种密度设 3×10⁶株/hm², 10 月 15 日以后播种每推迟 2 d, 相应增加 1×10⁴株基本苗。小麦收获后于 6 月上中旬免耕播种玉米, 密度设 6.75×10⁴株/hm², 60 cm 等行种植。小区面积为 168 m²(4.8 m×35 m), 3 次重复, 随机排列。小麦季 I、II 和 III 处理灌水时期均为播种前、越冬期、拔节期和抽穗期, IV 处理为播种前、拔节期和抽穗期, V 为出苗期和孕穗期; 玉米季各处理灌水时期相同, 2016 年分别为播种期和拔节期, 2017 年为拔节期和大喇叭口期。两季作物均采用大水漫灌方式, 每次灌水量均为 75 mm。其他管理措施同高产田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气象资料收集 气象数据来源于国家气象局网站(<http://www.cma.gov.cn>)。主要包括平均气温、日照时数和降雨量等指标。

1.3.2 作物生长季资源分配率与分配比值 为了定量分析冬小麦-夏玉米一年两熟模式作物生长季资源分配, 提出了资源分配率和资源分配比值等指标, 并建立了相应的计算公式:

积温分配率(TDR) = 单季积温量(T_x) / 周年积温总量(T);

辐射分配率(RDR) = 单季辐射量(R_x) / 周年辐射总量(R);

降雨分配率(PDR) = 单季降雨量(P_x) / 周年降雨总量(P);

积温比值(TR) = 第一季积温量(T₁) / 第二季积温量(T₂);

辐射比值(RR) = 第一季辐射量(R₁) / 第二季辐射量(R₂);

降雨比值(PR) = 第一季降雨量(P₁) / 第二季降雨量(P₂);

太阳总辐射 $Q = Q_0(a + bS/S_0)$ 。

式中, Q 为太阳总辐射, Q₀ 为天文辐射, S 为太阳实测日照时数, S₀ 为太阳可照时数, S/S₀ 为日照百分率, a、b 为待定系数^[25]。

表 1 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米种植方案
Table 1 Scheme for winter wheat-summer maize with different sowing/harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	小麦季 Wheat					玉米季 Maize					
		品种 Variety	播种期 Sowing date (M-D)	成熟期 Maturity date (M-D)	灌水量 Water use (mm)	种植密度 Planting density ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	品种 Variety	播种期 Sowing date (M-D)	成熟期 Maturity date (M-D)	收获期 Harvest date (M-D)	灌水量 Water use (mm)	种植密度 Planting density ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)
2015- 2016	I	AK58	10-11	06-02	300	300	ZD958	06-11	—	09-25	150	6.75
		ZM66	10-11	06-01	300	300	XY335	06-11	—	09-25	150	6.75
	II	AK58	10-26	06-02	300	405	ZD958	06-11	10-10	10-10	150	6.75
		ZM66	10-26	06-01	300	405	XY335	06-11	10-08	10-08	150	6.75
	III	AK58	11-10	06-04	300	510	ZD958	06-11	10-10	10-25	150	6.75
		ZM66	11-10	06-02	300	510	XY335	06-11	10-08	10-23	150	6.75
	IV	AK58	11-24	06-06	225	615	ZD958	06-11	10-10	11-09	150	6.75
		ZM66	11-24	06-04	225	615	XY335	06-11	10-08	11-07	150	6.75
	V	AK58	12-8	06-07	150	720	ZD958	06-11	10-10	11-24	150	6.75
		ZM66	12-8	06-06	150	720	XY335	06-11	10-08	11-22	150	6.75
2016- 2017	I	AK58	10-13	06-05	300	300	ZD958	06-12	—	09-28	150	6.75
		ZM66	10-13	06-04	300	300	XY335	06-12	—	09-28	150	6.75
	II	AK58	10-28	06-05	300	405	ZD958	06-12	10-13	10-13	150	6.75
		ZM66	10-28	06-04	300	405	XY335	06-12	10-10	10-10	150	6.75
	III	AK58	11-11	06-07	300	510	ZD958	06-12	10-13	10-28	150	6.75
		ZM66	11-11	06-05	300	510	XY335	06-12	10-10	10-25	150	6.75
	IV	AK58	11-25	06-09	225	615	ZD958	06-12	10-13	11-12	150	6.75
		ZM66	11-25	06-07	300	615	XY335	06-12	10-10	11-09	150	6.75
	V	AK58	12-10	06-09	150	720	ZD958	06-12	10-13	11-27	150	6.75
		ZM66	12-10	06-08	300	720	XY335	06-12	10-10	11-24	150	6.75

I、II、III、IV、V 分别代表 5 个小麦播种期及对应的玉米收获期处理。下同
I, II, III, IV, V are the different sowing dates of wheat and harvest dates of maize from one to five. The same as below

积温计算过程中，小麦季下限温度取值为 0℃，玉米季下限温度取值为 10℃^[26]。

1.3.3 产量及产量构成 冬小麦收获时，每个小区取有代表性的 3 个点，每个点实收 1 m² 进行测产，每个点取 20 株进行考种，调查穗粒数和千粒重。夏玉米收获时，每小区取中间 4 行穗（48 m²），测定全部收获穗的穗鲜重、穗数，选取样本穗 20 穗（误差小于 0.1 kg）进行考种，另外选取样本穗 20 穗风干后脱粒，称重，测定含水量，换算成 14% 含水量的重量，进而折合成公顷产量。

1.3.4 光、温、水生产效率 光能生产效率（g·MJ⁻¹）= 籽粒产量/单位面积太阳辐射量；积温生产效率（kg·hm⁻²·℃⁻¹）= 单位面积籽粒产量/生长季积温总量；水分生产效率（kg·hm⁻²·mm⁻¹）= 籽粒产量/（单位

面积降水量+单位面积灌水量）。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS16.0 软件进行数据处理和统计分析，采用 Sigma Plot 10.0 软件作图。

2 结果

2.1 不同播/收期搭配下冬小麦-夏玉米一年两熟模式作物生长季天数变化

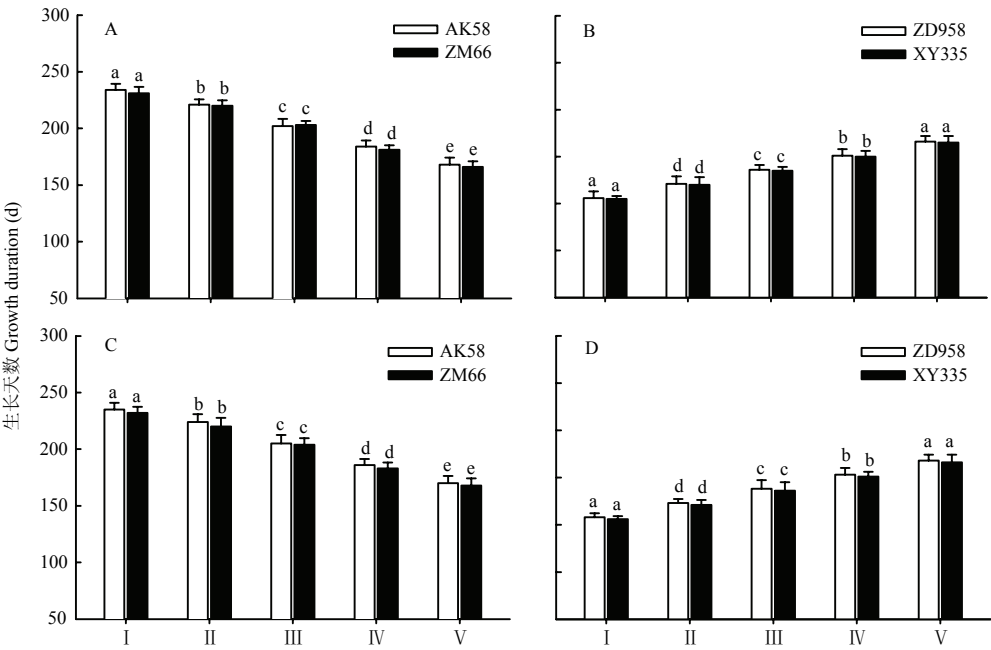
本研究中两作物生长天数的计算依据为小麦季为播种至达到生理成熟的天数，玉米季为播种至收获的天数。由表 1 可知，夏玉米在第二收获期（处理 II）时达到生理成熟，第二至第三、四和五收获期增加的生长天数主要为玉米成熟后籽粒物理脱水时间。

随播期推迟,小麦生理成熟期也相应推迟(表 1),处理 V 两品种成熟期分别较处理 I 推迟 5 d (2016 年)和 4 d (2017 年),但总生育天数均逐渐减少(图 1),品种间差异不显著。2016 年第 II 至 V 播期处理两品种平均生育期天数分别为 221、201、183 和 167 d,较传统播期处理(I, 233 d)分别减少 5.1%、13.7%、21.5%和 28.3%;2017 年第 II 至 V 播期处理两品种平均生育期天数分别为 222、204、185 和 169 d,较传统播期处理(I, 234 d)分别减少 5.1%、12.8%、20.9%和 27.8%。

随收获期推迟,夏玉米生长天数逐渐增加,品种间差异不显著(图 1)。2016 年第 II 至 V 收获期处理两品种平均生长天数分别为 120、135、150 和 165 d,

较传统收获期(I, 105 d)分别增加 14.3%、28.6%、42.9%和 57.1%;2017 年第 II 至 V 收获期处理两品种平均生长天数分别为 121、136、152 和 167 d,较传统收获期处理(I, 107 d)分别增加 13.1%、27.1%、42.1%和 56.1%。在第二收获期(处理 II)时玉米籽粒达生理成熟,III至 V 处理籽粒物理脱水时间分别为 15、30 和 45 d。

冬小麦-夏玉米周年总生长天数随着播收期推迟变化不明显,处理间和品种间差异均不显著。2016 年第 I 至 V 处理周年生长天数分别为 340、342、338、335 和 334 d,2017 年分别为 342、345、343、339 和 338 d。



A 为 2015—2016 年小麦, B 为 2016 年玉米, C 为 2016—2017 年小麦, D 为 2017 年玉米。柱上不同字母表示差异达 5% 显著水平。下同
A is the wheat season in 2015-2016, B is the maize season in 2016, C is the wheat season in 2016-2017, D is the maize season in 2017. Different letters within a column mean significant at 5% level. The same as below

图 1 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米生长季天数

Fig. 1 Total growth duration of winter wheat-summer maize with different sowing/harvest dates

2.2 不同播/收期搭配下冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源分配特征

由表 2 可知,播收期改变导致作物生长季积温量变化较大,但品种间差异不显著。随小麦播期推迟,生长季积温量显著下降,2015—2016 年变化范围 1 877.7—2 457.8℃,II 至 V 处理积温量分别显著低于传统播期(I),降低 7.7%、15.7%、22.2%和 23.6%;2016

—2017 年变化范围 1 853.5—2 392.8℃,II 至 V 处理积温量分别低于 I 处理,降低 6.2%、16.0%、19.9%和 22.5%。

随玉米收获期推迟,生长季分配积温量逐渐增加,2016 年变化范围 2 894.1—3 594.2℃,II 到 V 处理积温量分别显著高于 I 处理,提高 10.0%、16.8%、21.5%和 27.6%;2017 年变化范围 2 862.5—3 541.9℃,II 到

V 处理积温量分别显著高于 I 处理, 提高 9.8%、17.4%、21.4%和 27.2%。另外, 由传统收获期 (I) 至籽粒完全达到生理成熟 (II) 所需积温量两年分别为 290.5 和 281.6℃; 生理成熟后籽粒进入脱水阶段, 2016 年 III、IV、V 处理籽粒脱水期间积温量分别为 196.6、332.8 和 509.6℃, 2017 年分别为 217.4、331.6 和 497.8℃。

周年总积温量在处理间和年际间差异不显著, 2015—2016 年 5 个处理平均为 5 424.1℃, 2016—

2017 年平均为 5 322.3℃。年际间各季积温量占周年总积温量的比例及两季的比值相对固定, I 至 V 处理小麦季积温量占周年总积温量的比例分别为 46%、42%、38%、36%和 34%, 玉米生长季分别为 54%、58%、62%、64%和 66%; 小麦季与玉米季积温量比值分别为 0.8、0.7、0.6、0.6 和 0.5。III、IV、V 处理籽粒脱水期间积温量占生长季积温量的 6.1%、9.5%和 13.7%, 占周年总积温量的比例分别为 3.9%、6.1%和 9.3%。

表 2 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年积温分配

Table 2 Distribution of accumulated temperature between winter wheat and summer maize with different sowing/harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	小麦季 Wheat		玉米季 Maize		周年 Annual	
		积温	分配率	积温	分配率	积温	两季比
		Accumulated temperature (℃)	Distribution rate (%)	Accumulated temperature (℃)	Distribution rate (%)	Accumulated temperature (℃)	Rate between two seasons
2015-2016	I	2457.8a	46a	2894.1d	54d	5351.9a	0.8a
	II	2281.5b	42b	3184.6c	58c	5466.1a	0.7b
	III	2071.3c	38c	3381.2bc	62b	5452.5a	0.6c
	IV	1960.8d	36d	3517.4b	64ab	5478.2a	0.6c
	V	1877.7e	34e	3694.2a	66a	5571.9a	0.5d
2016-2017	I	2392.8a	46a	2862.5d	54d	5255.2b	0.8a
	II	2254.0b	42b	3144.1c	58c	5397.9ab	0.7b
	III	2009.6c	38c	3361.5b	62b	5371.1ab	0.6c
	IV	1916.2d	36d	3475.7b	64ab	5391.9ab	0.6c
	V	1853.5e	34e	3641.9a	66a	5495.4a	0.5d
年份 Year (Y)		0.016	0.696	0.005	0.489	0.002	0.488
处理 Treatment (T)		0.001	0.007	0.001	0.002	0.101	0.001
Y×T		0.575	0.549	0.132	0.521	0.320	0.642

小写字母表示 0.05 水平差异显著。下同

Values within a column followed by different letters mean significantly different at $P<0.05$. The same as below

由表 3 可以看出, 随小麦播期推迟, 生长季总辐射量显著下降, 年际间差异显著。2015—2016 年辐射量变化范围 2 105.7—2 528.5 MJ·m⁻², III至 V 处理辐射量分别显著低于 I 处理, 降低 10.7%、13.3%和 16.7%; 2016—2017 年辐射量变化范围 2 012.0—2 423.3 MJ·m⁻², III至 V 播期处理辐射量分别显著低于 I 处理, 降低 8.9%、13.8%和 17.0%。

随玉米收获期的延迟, 生长季辐射量逐渐增加, 2016 年变化范围 1 727.1—2 193.4 MJ·m⁻², II 至 V 处理辐射量分别显著高于 I 处理, 提高 8.3%、14.5%、19.1%和 27.0%; 2017 年变化范围是 1 628.3—2 085.3 MJ·m⁻²,

II 至 V 处理辐射量分别显著高于 I 处理, 提高 7.4%、13.9%、20.1%和 28.1%。由传统收获期 (I) 至玉米籽粒完全达到生理成熟 (II) 所需辐射量两年分别为 143.8 和 120.7 MJ·m⁻²; 生理成熟后籽粒进入脱水阶段, 2016 年 III、IV、V 处理籽粒脱水期间辐射量分别为 107.1、185.6 和 322.5 MJ·m⁻², 2017 年分别为 105.6、206.2 和 336.3 MJ·m⁻²。

周年总辐射量在品种间、处理间和年际间差异不显著 (表 3), 2015—2016 年 5 个处理平均为 4 280.2 MJ·m⁻², 2016—2017 年平均为 4 066.3 MJ·m⁻²。各季辐射量占周年总辐射量的比例及两季的比值相对固定, 2015—

表 3 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年辐射分配

Table 3 Distribution of radiation between winter wheat and summer maize with different sowing/harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	小麦 Wheat		玉米 Maize		周年 Annual	
		辐射 Radiation (MJ·m ⁻²)	分配率 Distribution rate (%)	辐射 Radiation (MJ·m ⁻²)	分配率 Distribution rate (%)	辐射 Radiation (MJ·m ⁻²)	两季比 Rate between two seasons
2015-2016	I	2528.5a	59a	1727.1d	41c	4285.6a	1.5a
	II	2459.6a	57a	1870.9c	43c	4330.5a	1.3b
	III	2258.3b	53b	1978.0b	47b	4236.3a	1.1c
	IV	2192.9bc	52b	2056.5b	48b	4249.3a	1.1c
	V	2105.7c	49c	2193.4a	51a	4299.1a	1.0d
2016-2017	I	2423.3a	60a	1628.3e	40c	4051.7a	1.5a
	II	2326.8a	57b	1749.0d	43c	4075.8a	1.3b
	III	2208.2b	54c	1854.6c	46b	4062.8a	1.2c
	IV	2088.6c	52c	1955.2b	48b	4043.7a	1.1d
	V	2012.0c	49d	2085.3a	51a	4097.3a	1.0e
年份 Year (Y)		0.006	0.286	0.009	0.589	0.002	0.590
处理 Treatment (T)		0.001	0.007	0.003	0.002	0.192	0.001
Y×T		0.575	0.771	0.925	0.977	0.676	0.874

2016 年，I 至 V 处理小麦季辐射量占周年总辐射量的比例分别为 59%、57%、53%、52%和 49%，玉米季分别为 41%、43%、47%、48%和 51%，小麦季与玉米季辐射量比值分别为 1.5、1.3、1.1、1.1 和 1.0。2016—2017 年，I 至 V 处理小麦季辐射量占周年总辐射量的比例分别为 60%、57%、54%、52%和 49%，玉米季分别为 40%、43%、46%、48%和 51%，两季比值分别为 1.5、1.3、1.2、1.1 和 1.0。III、IV、V 处理籽粒脱水期间辐射量占生长季辐射量的 5.6%、9.8%和 15.4%，占周年总辐射量的比例分别为 2.6%、4.7%和 7.9%。

由表 4 可以看出，播收期的改变造成作物生长季降水量变化较大，年际间差异显著，品种间差异不显著。2015—2016 年，除处理 II 小麦季降水量显著低于处理 I 外，各处理无显著差异，变化范围 168.9—206.6 mm。2016—2017 年，小麦季降水量随播期推迟逐渐降低，变化范围 149.6—192.4 mm，II 到 V 播期处理降水量分别低于 I 处理，降低 12.6%、17.9%、18.9%和 22.2%。

随玉米收获期的延迟，生长季降水量逐渐增加，2016 年变化范围 273.3—342.4 mm，II 至 V 处理降水量分别显著高于 I 处理，提高 8.5%、21.6%、25.7%和 30.1%；2017 年变化范围 253.1—292.9 mm，II 至

V 处理降水量分别显著高于 I 处理，提高 10.2%、14.1%、14.5%和 15.7%。由传统收获期（I）至玉米籽粒达到完全生理成熟（II）所需降水量两年分别为 12.4 和 25.7 mm，生理成熟后籽粒进入脱水阶段，III、IV、V 处理籽粒脱水期间降水量 2016 年分别为 34.6、45.2 和 56.7 mm，2017 年分别为 9.9、11.1 和 14.1 mm。

年际间周年总降水量差异显著（表 4），2015—2016 年各处理变化范围为 443.1—517.6 mm，其中 III 到 V 处理降水量均分别显著高于 I 处理，提高 13.3%、14.1%和 16.8%。2016—2017 年各处理降水量无显著差异，平均为 445.5 mm。2015—2016 年，I 至 V 处理小麦季降水量占周年总降水量的比例分别为 38%、37%、40%、35%和 34%，玉米季分别为 62%、63%、59%、65%和 66%，小麦季与玉米季降水量比值分别为 0.7、0.6、0.6、0.5 和 0.5。2016—2017 年，I 至 V 处理小麦季降水量占周年总降水量的比例分别为 43%、38%、35%、35%和 34%，玉米季分别为 57%、62%、65%、65%和 66%，两季比值分别为 0.8、0.6、0.5、0.5 和 0.5。III、IV、V 处理籽粒脱水期间降水量占生长季降水量的 10.8%、13.7%和 16.6%（2016 年），3.4%、3.8%和 4.8%（2017 年）；占周年总降水量的比例分别为 6.9%、8.9%和 11.0%（2016 年），2.2%、2.5%和 3.2%（2017 年）。

表 4 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年降水分配
Table 4 Distribution of precipitation between winter wheat and summer maize with different sowing/harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	小麦 Wheat		玉米 Maize		周年 Annual	
		降水	分配率	降水	分配率	降水	两季比
		Precipitation (mm)	Distribution rate (%)	Precipitation (mm)	Distribution rate (%)	Precipitation (mm)	Rate between two seasons
2015-2016	I	179.8a	41b	263.3d	59c	443.1b	0.7a
	II	168.9b	37b	285.7c	63b	454.6b	0.6b
	III	181.6a	36a	320.3b	64ab	501.9a	0.6b
	IV	174.5ab	35c	330.9ab	65ab	505.4a	0.5c
	V	175.2ab	34c	342.4a	66a	517.6a	0.5c
2016-2017	I	192.4a	43a	253.1c	57c	445.5a	0.8a
	II	168.2b	38b	278.8b	62b	447.2a	0.6b
	III	157.9c	35c	288.7a	65ab	446.6a	0.5c
	IV	156.1c	35c	289.9a	65ab	446.3a	0.5c
	V	149.6c	34c	292.9a	66a	442.5a	0.5c
年份 Year (Y)		0.001	0.04	0.001	0.286	0.002	0.682
处理 Treatment (T)		0.006	0.001	0.001	0.001	0.001	0.013
Y×T		0.001	0.002	0.046	0.006	0.001	0.043

2.3 不同播/收期搭配下冬小麦-夏玉米一年两熟模式单季及周年产量

由表 5 可以看出,随播期推迟,小麦季产量呈先下降再上升的趋势,处理 I 产量最高,除 V 播期外,品种间无显著差异。2015—2016 年 I 处理 AK58 产量为 8 212.9 kg·hm⁻²,分别高于Ⅲ、Ⅳ和 V 处理 16.5%、25.8%和 9.7%; I 处理 ZM66 产量为 8 011.5 kg·hm⁻²,分别高于Ⅲ和Ⅳ处理 16.1%和 26.2%,与 V 处理差异不显著。2016—2017 年 I 处理 AK58 产量为 9 401.9 kg·hm⁻²,分别高于Ⅲ、Ⅳ和 V 处理 20.9%、27.4%和 8.9%; I 处理 ZM66 产量为 9 278.7 kg·hm⁻²,分别高于Ⅲ和Ⅳ处理 17.1%和 21.6%,与 V 处理差异不显著。年间小麦产量差异较大,2016—2017 年 I 至 V 处理平均产量分别高于 2015—2016 年 15.1%、14.9%、12.6%、16.6%和 15.8%。

产量构成因素中,小麦穗数、穗粒数和千粒重均受播期影响较大。由表 5 可知,随播期推迟,小麦穗数、穗粒数和千粒重均呈先下降后上升的趋势。与处理 I 相比,Ⅲ和Ⅳ播期两品种穗数、穗粒数和千粒重均显著降低,V 处理 AK58 穗粒数和千粒重显著降低。2015—2016 年,Ⅲ处理 AK58 和 ZM66 穗数较处理 I 分别降低 6.1%和 5.9%,穗粒数分别降低 5.8%和 7.4%,

千粒重分别降低 7.1%和 7.0%; Ⅳ处理 AK58 和 ZM66 穗数较处理 I 分别降低 9.3%和 6.5%,穗粒数分别降低 8.3%和 9.5%,千粒重分别降低 11.1%和 8.9%; V 处理 AK58 穗粒数较处理 I 降低 5.8%,千粒重降低 6.8%,但 ZM66 穗数、穗粒数和千粒重与 I 处理无显著差异。2016—2017 年,Ⅲ处理 AK58 和 ZM66 穗数较 I 处理分别降低 7.5%和 6.1%,穗粒数分别降低 4.8%和 6.5%,千粒重分别降低 6.9%和 5.1%; Ⅳ处理 AK58 和 ZM66 穗数较 I 处理分别降低 10.2%和 7.4%,穗粒数分别降低 6.9%和 10.2%,千粒重分别降低 10.4%和 7.9%; V 处理 AK58 穗粒数较 I 处理降低 5.1%,千粒重降低 7.2%,ZM66 穗数、穗粒数和千粒重与处理 I 无显著差异。

由表 6 可以看出,随收获期推迟,玉米季产量逐渐增加,品种间差异不显著,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和 V 处理产量显著高于 I 处理,但Ⅲ、Ⅳ和 V 处理间差异不明显。2016 年Ⅱ至 V 处理 XY335 产量分别较正常收获期处理 (I) 提高 8.6%、14.5%、16.1%和 17.5%,ZD958 产量分别较处理 I 提高 10.0%、19.6%、19.8%和 21.6%。2017 年Ⅱ至 V 处理 XY335 产量分别较处理 I 提高 6.9%、14.6%、16.8%和 15.4%,ZD958 产量分别较处理 I 提高 7.8%、14.5%、18.7%和 16.8%。

表 5 不同播期冬小麦产量及产量构成

Table 5 Yield and yield components of winter wheat with different sowing dates

年份 Year	播期 Sowing date	品种 Variety	产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	穗数 Spikes number (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 Thousand kernel weight (g)
2015-2016	I	AK58	8212.9a	634.5a	32.3ab	42.3a
		ZM66	8011.5ab	637.5a	33.5a	41.2ab
	II	AK58	8141.4ab	645.1a	31.6bc	40.7abc
		ZM66	7830.1bc	625.5ab	32.7ab	39.4cdef
	III	AK58	7099.7d	598.5bc	30.8c	39.5bcdef
		ZM66	6902.5d	601.5bc	31.2bcd	38.5def
	IV	AK58	6528.5e	580.5c	30.1d	38.1ef
		ZM66	6346.4e	598.5bc	30.6cd	37.8f
	V	AK58	7487.4c	634.2a	30.8cd	39.6bcde
		ZM66	7859.7b	627.3ab	32.4ab	39.8bcd
2016-2017	I	AK58	9401.9a	663.2a	32.7bc	44.6a
		ZM66	9278.7a	657.3a	34.5a	43.3abc
	II	AK58	9225.6a	652.5a	32.2bcd	43.8ab
		ZM66	9120.1a	655.4a	33.7ab	43.1abc
	III	AK58	7775.9c	616.5b	31.2cde	41.7cde
		ZM66	7925.1c	619.2b	32.4bcd	41.2de
	IV	AK58	7377.6d	601.5b	30.6e	40.4e
		ZM66	7631.9cd	612.6b	31.3cde	40.1e
	V	AK58	8630.9b	657.2a	31.1de	41.6cde
		ZM66	9139.2a	654.1a	33.9ab	42.5bcd

随收获期推迟，玉米穗数和穗粒数没有显著变化，而千粒重显著增加，III、IV和V处理间没有显著差异，但显著高于I和II处理，且品种间差异不显著(表6—7)。2016年II至V处理XY335和ZD958的千粒重分别比处理I增加6.6%和6.9%、12.1%和14.2%、12.3%和15.0%、11.7%和14.3%；2017年II至V处理XY335和ZD958的千粒重分别比处理I增加9.2%和10.8%、14.1%和13.3%、15.1%和14.1%、14.5%和15.0%。

随玉米收获期推迟，籽粒含水量显著下降，且品种间差异较大(表7)。由表6可知，2016年II至V处理XY335和ZD958的收获籽粒含水量分别比处理I降低20.9%和17.6%、41.0%和35.8%、52.3%和46.1%、61.6%和56.4%，其中V处理XY335和ZD958的籽粒含水量分别为14.9%和17.3%；2017年II至V

处理XY335和ZD958的收获籽粒含水量分别比处理I降低18.3%和16.5%、39.1%和34.8%、51.4%和46.5%、62.9%和58.8%，其中V处理XY335和ZD958的收获籽粒含水量分别为14.4%和16.5%。

如前所述，随着播期的推迟，小麦季产量降低，但相应的玉米季产量显著增加，因此周年产量不降低甚至有所增加。由图2可知，各播收期处理中，处理V周年平均产量最高，两年分别为18 729.1和19 503.4 kg·hm⁻²，与处理II差异不显著，但显著高于I、III和IV处理，2015—2016年增幅分别为7.8%、5.0%和7.9%，2016—2017年增幅分别为5.5%、6.4%和6.7%。

2.4 不同播/收期搭配下冬小麦-夏玉米一年两熟模式气候资源利用效率

由表8可以看出，随播期推迟，小麦季积温生产效率发生显著变化，年际间差异显著。2015—2016年

表 6 不同收获期处理夏玉米产量及产量构成

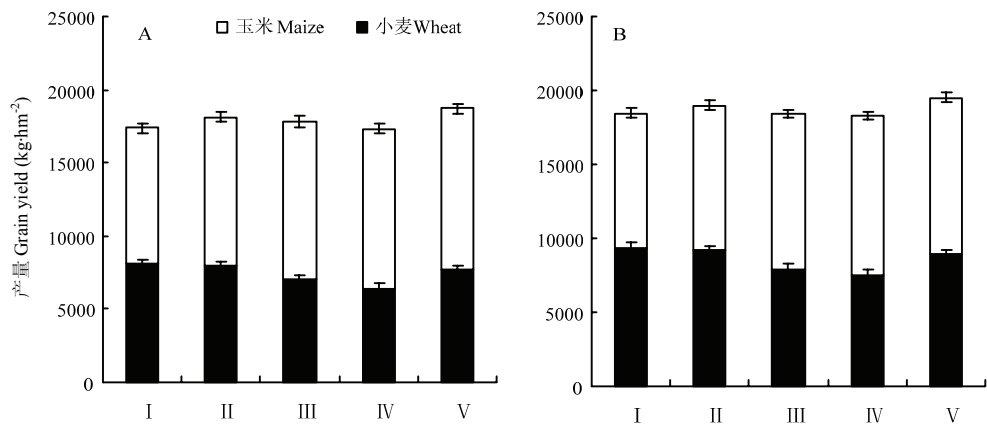
Table 6 Yield and yield components of summer maize with different harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	品种 Variety	产量 Grain yield (kg·hm ⁻²)	穗数 Ears number (×10 ⁴ /hm ²)	穗粒数 Grain number per ear	千粒重 Thousand kernel weight (g)	籽粒含水量 Water content (%)
2016	I	XY335	9524.5d	6.2a	478.1ab	321.3d	38.8a
		ZD958	8979.6e	6.3a	463.9b	315.4d	39.7a
	II	XY335	10340.4bc	6.4a	481.6ab	343.9bc	30.7c
		ZD958	9879.8cd	6.3a	475.9ab	338.7c	32.7b
	III	XY335	10901.2a	6.3a	479.6ab	365.7a	22.9e
		ZD958	10738.8ab	6.3a	475.1ab	356.0abc	25.5d
	IV	XY335	11058.6a	6.4a	483.6ab	366.3a	18.5g
		ZD958	10759.3ab	6.3a	479.9ab	359.4ab	21.4f
	V	XY335	11188.1a	6.3a	486.8a	363.9a	14.9i
		ZD958	10922.9a	6.4a	481.3ab	356.5ab	17.3h
2017	I	XY335	9089.4e	6.5a	422.1b	329.9c	38.9a
		ZD958	9202.9e	6.6a	439.2ab	320.7c	40.0a
	II	XY335	9718.8d	6.5a	429.0ab	352.3b	31.8c
		ZD958	9924.2cd	6.5a	436.6ab	359.5b	33.4b
	III	XY335	10413.1bc	6.6a	425.6b	372.5ab	23.7e
		ZD958	10536.9ab	6.6a	440.8ab	370.1ab	26.1d
	IV	XY335	10617.5ab	6.5a	428.1ab	376.8a	18.9g
		ZD958	10926.9a	6.5a	448.5a	373.5ab	21.4f
	V	XY335	10490.2ab	6.6a	431.6ab	374.2ab	14.4i
		ZD958	10746.5ab	6.4a	442.2ab	377.2a	16.5h

表 7 年际间、处理间和品种间冬小麦-夏玉米产量及产量构成因素方差分析

Table 7 The ANOVA analyses for yield and yield components of winter wheat and summer maize by years, treatment, and variety

	小麦 Wheat				玉米 Maize				
	产量 Grain yield	穗数 Spikes number	穗粒数 Kernel number per spike	千粒重 Thousand kernel weight	产量 Grain yield	穗数 Ears number	穗粒数 Grain number per ear	千粒重 Thousand kernel weight	籽粒含水量 Water content
年份 Year (Y)	0.001	0.011	0.001	0.003	0.002	0.001	0.001	0.001	0.199
处理 Treatment (T)	0.002	0.263	0.003	0.001	0.001	0.984	0.333	0.001	0.003
品种 Variety (V)	0.701	0.817	0.002	0.043	0.169	0.817	0.258	0.033	0.001
Y×T	0.262	0.656	0.988	0.585	0.230	0.713	0.971	0.584	0.172
Y×V	0.060	0.701	0.084	0.539	0.001	0.847	0.003	0.149	0.597
T×V	0.003	0.887	0.063	0.235	0.600	0.864	0.947	0.591	0.093
Y×T×V	0.888	0.979	0.922	0.975	0.762	0.731	0.915	0.672	0.990



A 为 2015—2016 年产量，B 为 2015—2016 年产量 A is grain yield in 2015-2016, B is grain yield in 2016-2017

图 2 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年产量

Fig. 2 Grain yield of winter wheat-summer maize double cropping system with different treatments

表 8 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米光温生产效率

Table 8 Production efficiency of accumulated temperature and radiation for winter wheat and summer maize with different sowing/harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	积温生产效率			光能生产效率		
		Production efficiency of temperature (kg·hm ⁻² ·°C ⁻¹)			Production efficiency of radiation (g·MJ ⁻¹)		
		小麦 Wheat	玉米 Maize	周年 Annual	小麦 Wheat	玉米 Maize	周年 Annual
2015-2016	I	3.30c	3.20ab	3.24b	0.32b	0.54ab	0.41b
	II	3.66b	3.27a	3.43a	0.32b	0.56a	0.43a
	III	3.37c	3.20ab	3.25b	0.31b	0.55ab	0.42ab
	IV	3.28c	3.10b	3.17b	0.29c	0.53b	0.41b
	V	4.09a	3.08b	3.42a	0.36a	0.50c	0.44a
2016-2017	I	3.90c	3.18ab	3.45b	0.38b	0.56ab	0.44b
	II	4.20b	3.24a	3.63a	0.39b	0.58a	0.47a
	III	3.85c	3.18ab	3.44b	0.35c	0.56ab	0.45ab
	IV	3.82c	3.04bc	3.32b	0.35c	0.54b	0.44b
	V	4.79a	3.01c	3.62a	0.44a	0.51c	0.48a
年份 Year (Y)		0.001	0.590	0.017	0.001	0.069	0.002
处理 Treatment (T)		0.001	0.347	0.049	0.002	0.001	0.022
Y×T		0.412	0.899	0.698	0.031	0.977	0.867

V 处理小麦季平均积温生产效率为 4.09 kg·hm⁻²·°C⁻¹，显著高于 I、II、III 和 IV 处理，提高 10.9%、11.7%、21.4% 和 24.7%；2016—2017 年 V 处理平均积温生产效率为 4.79 kg·hm⁻²·°C⁻¹，显著高于 I、II、III 和 IV 处理，提高 7.7%、14.0%、24.4% 和 25.4%。随收获期推迟，玉米季积温生产效率发生显著变化，其中 II 处理显著高于 IV 和 V 处理，与 I 和 III 处理差异不显著。2016

年 II 处理玉米季平均积温生产效率为 3.27 kg·hm⁻²·°C⁻¹，较 IV 和 V 处理分别提高 5.5% 和 6.2%；2017 年 II 处理玉米季平均积温生产效率为 3.24 kg·hm⁻²·°C⁻¹，较 IV 和 V 处理分别提高 6.6% 和 7.6%。因此，II 和 V 周年积温生产效率显著高于 I、III 和 IV，但二者差异不显著。2015—2016 年 II 和 V 周年积温生产效率分别为 3.43 和 3.42 kg·hm⁻²·°C⁻¹，分别高于 I、III

和Ⅳ处理 5.9%和 5.6%、5.5%和 5.2%、8.2%和 7.9%；2016—2017 年Ⅱ和Ⅴ处理周年积温生产效率分别为 3.63 和 3.62 kg·hm⁻²·℃⁻¹，分别高于Ⅰ、Ⅲ和Ⅳ处理 5.2%和 5.1%、5.5%和 5.2%、9.3%和 9.0%。

由表 8 可以看出，随播期推迟，小麦季光能生产效率呈先降低后增加的趋势，年际间差异显著。2015—2016 年Ⅴ处理小麦季光能生产效率平均为 0.36 g·MJ⁻¹，分别高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ处理 12.5%、12.5%、14.1%和 24.1%；2016—2017 年Ⅴ处理小麦季光能生产效率平均为 0.44 g·MJ⁻¹，分别高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ处理 15.8%、12.8%、25.3%和 25.7%。随着收获期推迟，玉米季光能生产效率呈先增加后降低趋势，Ⅱ处理显著高于Ⅳ和Ⅴ处理，与处理Ⅰ和Ⅲ差异不显著。2015—2016 年Ⅱ处理玉米季光能生产效率为 0.56 g·MJ⁻¹，分别高于Ⅳ和Ⅴ处理 5.7%和 12.1%；2016—2017 年Ⅱ处理玉米季光能生产效率为 0.58 g·MJ⁻¹，分别高于Ⅳ和Ⅴ处理 7.4%和 13.7%。因此，Ⅱ和Ⅴ处理周年光能生产效率显著高于处理Ⅰ和Ⅳ，但二者差异不显著。2015—2016 年Ⅱ和Ⅴ处理周年光能生产效率分别为 0.44 和 0.43 g·MJ⁻¹，分别高于Ⅰ和Ⅳ处理 5.0%和 7.3%、5.2%和 7.4%；2016

—2017 年Ⅱ和Ⅴ处理周年光能生产效率分别为 0.48 和 0.47 g·MJ⁻¹，分别高于Ⅰ和Ⅳ处理 6.8%和 9.1%、6.9%和 9.2%。

由表 9 可以看出，随播期推迟，小麦耗水量（降水量与灌水量之和）显著下降，Ⅴ处理耗水量最低，两年分别为 325.5 和 299.6 mm，显著低于其他播期处理。各播期处理中，Ⅴ处理水分生产效率最高，2015—2016 年为 23.6 kg·hm⁻²·mm⁻¹，分别高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ处理 39.6%、38.8%、62.8%和 46.6%；2016—2017 年为 29.7 kg·hm⁻²·mm⁻¹，分别高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ处理 56.3%、51.5%、75.7%和 54.7%。随收获期推迟，玉米耗水量逐渐增加，Ⅴ处理耗水量最高，两年分别为 492.4 和 442.9 mm，但由于产量显著增加，2016 年水分生产效率与处理Ⅰ无显著差异，2017 年高于Ⅰ处理 6.6%。除 2016 年处理Ⅲ玉米水分生产效率显著高于处理Ⅰ外，其他处理间水分生产效率差异不显著。因此，处理Ⅴ周年水分生产效率最高，两年分别为 23.0 和 26.9 kg·hm⁻²·mm⁻¹，2016 年显著高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ处理，提高 17.3%、12.2%、22.9%和 18.6%，2017 年显著高于Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ处理，提高 29.3%、25.1%、32.5%和 24.5%。

表 9 不同播/收期处理冬小麦-夏玉米水分生产效率

Table 9 Production efficiency of water for winter wheat-summer maize with different sowing/harvest dates

年份 Year	处理 Treatment	小麦季 Wheat		玉米季 Maize		周年 Annual	
		耗水量	水分生产效率	耗水量	水分生产效率	耗水量	水分生产效率
		Water use (mm)	Water use efficiency (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	Water use (mm)	Water use efficiency (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	Water use (mm)	Water use efficiency (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2015-2016	Ⅰ	479.8a	16.9b	413.3d	22.4b	593.1b	19.6bc
	Ⅱ	468.9a	17.0b	435.7c	23.9a	604.6b	20.5ab
	Ⅲ	481.6a	14.5d	470.3bc	23.0ab	651.9a	18.7c
	Ⅳ	399.5b	16.1c	480.9ab	22.7b	655.4a	19.4c
	Ⅴ	325.2c	23.6a	492.4a	22.5b	667.6a	23.0a
2016-2017	Ⅰ	492.4a	19.0b	403.1b	22.6b	595.5a	20.8bc
	Ⅱ	468.2b	19.6b	428.8a	23.5ab	597.2a	21.5b
	Ⅲ	457.9b	16.9c	438.7a	23.6ab	596.6a	20.3c
	Ⅳ	381.1c	19.2b	439.9a	24.0a	596.3a	21.6b
	Ⅴ	299.6d	29.7a	442.9a	24.1a	592.5a	26.9a
年份 Year (Y)		0.018	0.002	0.001	0.186	0.001	0.001
处理 Treatment (T)		0.001	0.001	0.004	0.073	0.017	0.003
Y×T		0.007	0.006	0.069	0.226	0.001	0.012

耗水量为生育期总降水量与灌水量的总和

Water use is the amount of precipitation and irrigation

3 讨论

3.1 播/收期改变冬小麦和夏玉米生长季气候资源分配

优化传统冬小麦-夏玉米模式季节间气候资源配置, 探索两季最佳的气候资源搭配模式是进一步挖掘黄淮海地区周年产量潜力和资源利用效率的重要途径。由于 C_4 作物具有较高光合能力, 有人提出充分发挥玉米的产量潜力, 逐渐压缩小麦的生长时间的方法, 以高效利用光热资源^[4-5], 从而建立了冬小麦-夏玉米“双晚”技术模式, 实现了周年产量达到 $15\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以上, 光、温资源生产力分别提高 64% 和 124%^[9-10]。然而, 随着黄淮海地区气候条件 and 生产条件的变化, 冬小麦生长季遭遇冻害、冬旱和春旱及耗水严重等问题日益严峻^[11, 14], 同时由于两季时间限制夏玉米收获籽粒含水量在 30% 以上, 严重影响机械直接收获籽粒质量, 降低玉米生产效益^[19-20]。为进一步探索适应新的气候条件 and 生产条件的冬小麦-夏玉米一年两熟模式作物生长季最佳的气候资源分配方案, 本研究从 10 月上旬 (当地农民习惯播种期) 至 12 月上旬 (种子冬前不萌发出苗), 设置了 5 种冬小麦-夏玉米播收期搭配模式。研究表明, 通过播/收期调整, 小麦生育期天数由正常播期的 236 d 减少至第五播期的 168 d, 相应的玉米晚收生长天数由传统收获的 106 d (I) 增加至 166 d (V), 处理 V 小麦晚播和玉米晚收的时间较“双晚”技术模式延长 50 d 左右^[9-12]。另外, 当处理 II 夏玉米收获时籽粒达到生理成熟, 处理 III、IV 和 V 增加的时间 (15—45 d) 主要用于籽粒物理性脱水。生长时间的改变导致作物生长季内光温水资源量发生显著变化, 随着播/收期推迟, 两作物生长季光温水资源分配比例分别由处理 I 的 60% : 40%、46% : 54%、42% : 58% 调整至处理 V 的 49% : 51%、34% : 66%、34% : 66% 范围内, 小麦季光温水资源量逐渐减少, 玉米季显著增加, 其中处理 III 至 V 玉米籽粒脱水期间的光温资源量分别占周年资源总量的 9.3% 和 7.9%, 降水资源所占比例为 11.0% (2016) 和 3.2% (2017)。虽然各处理年际间光温水资源量差异显著, 但其占周年总资源量的比例相对固定 (降水除外), 与我们前期的研究结果一致^[8], 这也为进一步分析资源分配与产量形成的关系提供了定量标准。可见, 通过播/收期的调整可实现冬小麦-夏玉米一年两熟模式作物生长季气候资源的重新分配, 为进一步建立两季最佳的气候资源搭配模式提供了依据。

3.2 播/收期影响冬小麦和夏玉米产量形成

前人研究表明, 作物产量形成与其所在地区的光温水等生态条件密切相关^[19, 27-30]。本研究通过播/收期调整, 使得冬小麦-夏玉米一年两熟模式作物生长季资源分配发生显著变化, 各处理产量也随之发生了明显改变。冬小麦产量随播期推迟逐渐降低, 降幅为 $1\,866.5—2\,024.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 但处理 II 及处理 V 的 ZM66 品种产量与正常播期无显著差异; 且玉米季产量随收获期推迟显著增加, 增幅为 $1\,528.1—2\,208.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 因此处理 II 和 V 周年产量显著提高, 而处理 III 和 IV 与处理 I 周年产量无显著差异。这与前人关于冬小麦-夏玉米“双晚”试验结果趋势相似^[8, 11-12, 31]。从产量构成因素看, 本研究中小麦晚播导致穗数、穗粒数和千粒重均降低, 但处理 II 和 V 下降不显著, 尤其是 ZM66 品种在处理 II 和 V 具有较高的穗数、穗粒数和千粒重。前人研究表明, 晚播可提高某些小麦品种旗叶叶绿素含量, 维持叶片较高的光合物质生产能力^[32-33], 特别是选择高温条件下具有较高花后光合能力和干物质积累能力的小麦品种 (如济麦 22) 是维持极晚播小麦较高产量的关键^[34]。由此我们推测本研究选用的 ZM66 品种在处理 II 和 V 播期下具有较高的花后光合物质生产能力, 从而维持了小麦较高的有效穗粒数和粒重; 同时由于晚播造成小麦分蘖减少, 特别是处理 V 主要依靠主茎成穗, 通过增加播种量保证了足够的穗数^[11-12], 从而维持了较高的产量。这与前人冬小麦极晚播 (11 月上中旬) 试验结果类似^[34], 通过选用济麦 22 品种和增加播量至 $800—850\text{ 粒}/\text{m}^2$ 在河北吴桥实现了冬小麦最高达 $82\,900\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量水平。然而, 不同地区因其光温水资源禀赋的差异, 种植该模式时应先确定该区小麦适宜的越冬状态、品种、播期及密度等条件, 以保证较高的小麦产量。

另外, 夏玉米晚收显著延长了灌浆期 (15 d), 使植株营养器官积累的内源物质继续向籽粒转移, 导致粒重显著增加^[11-12, 35], 处理 II 至 V 玉米产量显著提高, 但由于处理 II (10 月上旬) 玉米已达到生理成熟, 继续延长收获期粒重和产量不再增加, 因此处理 II 至 V 玉米产量无显著差异。然而, 由于处理 V 玉米生理成熟后至收获约 45 d, 保证了籽粒充分脱水, 因此收获时籽粒含水量降至 14.4%—17.3%。研究表明, 籽粒含水量是影响机械粒收质量的重要因素, 籽粒含水率超过 20% 时收获机械损伤率急剧增加^[36], 且收获后的高温快速干燥使籽粒破碎敏感度进一步增大^[37-38]。柴宗文等^[19]和李璐璐^[20]等研究表明, 夏玉米籽粒含水量

为 25%时机械收获籽粒破碎率为 6.6%，杂质率为 1.1%，而含水量降到 17%时破碎率为 5.8%，杂质率为 0.1%。当收获玉米的籽粒含水率在 25%以上时，每吨玉米烘干的费用为 24 加元，每年加拿大因烘干玉米的费用超过 2 亿加元^[39]；我们前期对我国玉米籽粒机收现状调研结果表明，每吨玉米籽粒由含水量 25%烘干到 14%成本需要 34.4 元左右，而每吨含水量为 17%的籽粒烘干成本仅需 8.9 元左右，而本研究中处理 V 玉米收获时籽粒含水量已降至 17%以下，可通过进一步筛选脱水快的品种达到籽粒机收直入库的含水量标准（14%）。此外，目前的籽粒烘干设备需要消耗大量的电力和煤炭资源，也会造成资源浪费和环境污染。可见，处理 V 是一种既能保证冬小麦-夏玉米一年两熟模式较高周年产量，又能提高夏玉米机械收获籽粒质量和效益的两季作物生长季气候资源分配的最佳方式。

3.3 播/收期影响冬小麦和夏玉米生长季及周年气候资源利用效率

分析播/收期调控对冬小麦-夏玉米模式周年光温水资源生产效率的影响发现，由于处理 V 小麦季光温水资源量显著降低，特别是小麦冬前不出苗其灌水量减少 150 mm（底墒水和越冬水），但其产量下降不显著，因此小麦季光能、温度和水分生产效率分别较处理 I 平均提高 14.2%、9.3%和 47.9%；而玉米季虽然光能、温度生产效率有所降低，但水分生产效率显著提高，因此处理 V 冬小麦-夏玉米周年光能、温度和水分生产效率分别提高 8.2%、5.4%和 23.3%。这主要是因为通过播/收期的调整使小麦季冗余资源转移给更加高效的玉米季，实现了周年生长季与气候资源的优化配置，从而提高了气候资源的利用效率^[8, 11-12]。另外，前人研究表明气候变化导致我国北方温度持续上升，极端天气频发^[21-22]，冬小麦播种过早导致冬前苗期旺长，拔节孕穗提前，易遭受严重冻害和干旱，造成减产^[11]。本研究通过将小麦播期推迟至 12 月上旬，种子冬季不萌发出苗，可避免苗期冻害和干旱影响；且该播期下小麦拔节期（3 月底 4 月初）晚于传统播期小麦（3 月上中旬），可避免倒春寒发生对幼穗发育的影响（3 月中下旬）^[40-41]。可见，通过播/收期调整实现冬小麦-夏玉米一年两熟模式作物生长季气候资源优化配置，特别是处理 V（小麦 12 月上旬播种，玉米 11 月中旬收获）的气候资源搭配模式，可显著提高其周年产量及资源利用效率。然而，作物生长季节内光温水资源的时空分布，及其与作物生长发育

的动态匹配程度也是影响单季作物产量形成及资源利用效率的重要因素^[22, 29, 42]，因此进一步研究生长季节内光温资源变化与小麦生长发育的定量匹配关系对于建立更加完善的冬小麦-夏玉米一年两熟周年资源高效种植模式具有重要意义，这也是我们下一步研究的重点。

小麦是我国主要的口粮作物，玉米主要用作饲料和工业加工，但在特殊时期也可作为口粮。从某种意义上讲，这两大粮食作物因其共同的能量属性，存在相互替代和互补的关系。例如，2010—2011 年由于国内小麦价格低廉，大量小麦用于饲料加工（中国饲料行业信息网，2012）。近年来，华北地区小麦季耗水量大且利用效率低的问题导致该区地下水过度开采，引起一系列的环境问题^[16-18]，且受气候变化影响，冬季冻害、干旱等问题进一步加剧^[11]，限制了该区传统冬小麦-夏玉米模式的可持续发展。本研究建立的小麦冬寄籽-玉米机收粒模式（处理 V）在一定程度上缓解了小麦季耗水严重和冬季干旱、冻害，同时可有效解决玉米籽粒机收的问题。然而，考虑到小麦作为口粮对于保障我国粮食安全的重要性，该模式的建立并不能完全取代整个黄淮海地区传统的冬小麦-夏玉米一年两熟种植模式，而是希望在黄淮海北部光温水资源紧缺区，特别是河北黑龙港流域和环京津的水分亏缺区，在根据当地光温水资源条件进行适宜品种和播收期筛选的前提下种植该模式，以进一步提高该区周年资源利用效率和经济效益。

4 结 论

以充分发挥玉米高光效优势为核心，通过调节小麦播种期和玉米收获期对两季光温水等资源进行优化配置，建立了 5 种冬小麦-夏玉米一年两熟作物生长季气候资源分配模式。随冬小麦播期和夏玉米收获期推迟，小麦生育期天数和生长季光温水资源分配量逐渐减少，从而导致小麦季产量降低，但由于极晚播（12 月上旬）（处理 V）小麦的 ZM66 品种维持了较高的穗数和穗粒数，产量与正常播期无显著差异，同时由于耗水量显著降低，小麦季光温水生产效率显著提高；而玉米生长时间和光温水资源量明显增加，导致粒重显著提高，且籽粒含水量降至 14.4%—17.3%，产量显著提高，虽然光温生产效率有所降低，但水分生产效率显著提高，因此处理 V 周年产量和光温水资源利用效率较正常播收期处理显著提高。然而，在种植该模式时，应首先根据不同地区光温水

资源条件确定小麦适宜的越冬状态, 进而确定品种、播期及密度等措施。综上所述, 在不增加任何投入的前提下通过播/收期调整来优化冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源配置, 减少冬小麦季耗水量, 并提高夏玉米籽粒机械收获质量, 促进黄淮海冬小麦-夏玉米一年两熟模式可持续发展。

References

- [1] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料. 北京: 中国农业出版社, 2015.
Ministry of Agriculture of the Peoples' Republic of China. *China Agriculture Statistical Report*. Beijing: China Agriculture Press, 2015. (in Chinese)
- [2] WANG H X, LIU C M, ZHANG L. Water-saving agriculture in China: An overview. *Advances in Agronomy*, 2002, 75: 135-171.
- [3] 费宇红, 张兆吉, 张凤娥, 王昭, 陈宗宇, 陈京生, 钱永, 李亚松. 气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析. *地球学报*, 2007, 28(6): 567-571.
FEI Y H, ZHANG Z J, ZHANG F E, WANG Z, CHEN Z Y, CHEN J S, QIAN Y, LI Y S. An analysis of the influence of human activity and climate change on water resources of the North China Plain. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(6): 567-571. (in Chinese)
- [4] 陈阜, 逢焕成. 冬小麦/春玉米/夏玉米间套作复合群体的高产机理探讨. *中国农业大学学报*, 2000, 5(5): 12-16.
CHEN F, PANG H C. Research on mechanism for maximum yield of intercropping pattern wheat/corn/corn. *Journal of China Agricultural University*, 2000, 5(5): 12-16. (in Chinese)
- [5] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 李凤超, 劳秀荣, 史春余, 董庆裕, 张骏, 刘嘉军, 杨恩学. 黄淮海农区集约种植制度的超高产特性研究. *中国农业科学*, 2001, 34(6): 649-655.
ZHAO B Q, ZHANG F S, LI Z J, LI F C, LAO X R, SHI C Y, DONG Q Y, ZHANG J, LIU J J, YANG E X. Studies on the super-high yield characteristics of three intensive multiple cropping systems in Huanghuaihai area. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(6): 649-655. (in Chinese)
- [6] 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(7): 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 Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1229-1234. (in Chinese)
- [7] MENG Q F, SUN Q P, CHEN X P, CUI Z L, YUE S C, ZHANG F S, VOLKER R. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 146(1): 93-102.
- [8] 周宝元, 王志敏, 岳阳, 马玮, 赵明. 冬小麦-夏玉米与双季玉米种植模式产量及光温资源利用特征比较. *作物学报*, 2015, 41(9): 1373-1385.
ZHOU B Y, WANG Z M, YUE Y, MA W, ZHAO M. Comparison of yield and light-temperature resource use efficiency between wheat-maize and maize-maize cropping systems. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1373-1385. (in Chinese)
- [9] 王树安. 吨良田技术—小麦-夏玉米两茬平播亩产吨粮的理论与技术体系研究. 北京: 农业出版社, 1991.
WANG S A. *Technology for Grain Production with a Yield of 15 Tons per Hectare. Theory and Technology with a High Yield Output of 15 Tons per Hectare in Winter Wheat and Summer Maize Double-Cropping System*. Beijing: Agriculture Press, 1991. (in Chinese)
- [10] 王树安. 中国吨粮田建设. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
WANG S A. *Construction of the Grain Field with a Yield of 15 Tons per Hectare in China*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994. (in Chinese)
- [11] 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. *Industrial Crops and Products*, 2007, 25(3): 239-247.
- [12] 付雪丽, 张惠, 贾继增, 杜立丰, 付金东, 赵明. 冬小麦-夏玉米“双晚”种植模式的产量形成及资源效率研究. *作物学报*, 2009, 35(9): 1708-1714.
FU X L, ZHANG H, JIA J Z, DU L F, FU J D, ZHAO M. Yield performance and resources use efficiency of winter wheat and summer maize in double late-cropping system. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(9): 1708-1714. (in Chinese)
- [13] 王志敏, 王璞, 兰林旺, 周殿玺. 黄淮海地区优质小麦节水高产栽培研究. *中国农学通报*, 2003, 19(4): 22-43
WANG Z M, WANG P, LAN L W, ZHOU D X. A water-saving and high-yielding cultivation system for bread wheat in Huang-Huai-Hai area of China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(4): 22-43. (in Chinese)
- [14] ZHANG X Y, PEI D, HU C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain. *Irrigation Science*, 2003, 21,11(4) 159-166.
- [15] 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. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1000-1008.

- 1139-1145.
- [16] FOSTER S, GARDUNO H, EVANS R, OLSON D, TIAN Y, ZHANG W Z, HAN Z S. Quaternary aquifer of the North China Plain—assessing and achieving groundwater resource sustainability. *Hydrogeology Journal*, 2004, 12(9): 81-93.
- [17] HU C S, DELGADO J A, ZHANG X Y, MA L. Assessment of groundwater use by wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Luancheng Xian region and potential implications for water conservation in the northwestern North China Plain. *Journal Soil Water Conservation*, 2005, 60(2): 80-88.
- [18] 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 王金哲. 华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应. *水科学进展*, 2006, 17(1): 43-48.
- ZHANG G H, FEI Y H, LIU K Y, WANG J Z. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 43-48. (in Chinese)
- [19] 柴宗文, 王克如, 郭银巧, 谢瑞芝, 李璐璐, 明博, 侯鹏, 刘朝巍, 初振东, 张万旭, 张国强, 刘广周, 李少昆. 玉米机械粒收质量现状及其与含水率的关系. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2036-2043.
- CHAI Z W, WANG K R, GUO Y Q, XIE R Z, LI L L, MING B, HOU P, LIU C W, CHU Z D, ZHANG W X, ZHANG G Q, LIU G Z, LI S K. Current status of maize mechanical grain harvesting and its relationship with grain moisture content. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2036-2043. (in Chinese)
- [20] 李璐璐, 王克如, 谢瑞芝, 明博, 赵磊, 李姗姗, 侯鹏, 李少昆. 玉米生理成熟后田间脱水期间的籽粒重量与含水率变化. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2052-2060.
- LI L L, WANG K R, XIE R Z, MING B, ZHAO L, LI S S, HOU P, LI S K. Corn kernel weight and moisture content after physiological maturity in field. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2052-2060. (in Chinese)
- [21] WANG J, WANG E L, YANG X G, ZHANG F S, YIN H. Increased yield potential of wheat-maize cropping system in the North China Plain by climate change adaptation. *Climatic Change*, 2012, 113(3/4): 825-840.
- [22] 刘志娟, 杨晓光, 王文峰. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 IV. 黄淮海平原半湿润暖温带-玉两熟灌溉农区农业气候资源时空变化特征. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 905-912.
- LIU Z J, YANG X G, WANG W F. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change. IV. Spatiotemporal change characteristics of agricultural climate resources in sub-humid warm-temperate irrigated wheat-maize agricultural area of Huang-Huai-Hai Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 905-912. (in Chinese)
- [23] BORRAS L, GAMBIN B L. Trait dissection of maize kernel weight: Towards integrating hierarchical scales using a plant growth approach. *Field Crops Research*, 2010, 118(1): 1-12.
- [24] CAIRNS J E, SONDER K, ZAIDI P H, VERHULST N, MAHUKU G, BABU R, NAIR S K, DAS B, GOVAERTS B, VINAYAN M T, RASHID Z, NOOR J J, DEVI P, SAN VICENTE F M, PRASANNA B M. Maize production in a changing climate: Impacts, adaptation, and mitigation strategies//SPARKS D. *Advances in Agronomy*. Burlington: Academic Press, 2012, 114: 1-58.
- [25] 杨羨敏, 曾燕, 邱新法, 姜爱军. 1960—2000 年黄河流域太阳总辐射气候变化规律研究. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 243-248.
- YANG X M, ZENG Y, QIU X F, JIANG A J. The climatic change of global solar radiation over the Yellow River basin during 1960-2000. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(2): 243-248. (in Chinese)
- [26] 郑海霞, 封志明, 游松财. 基于 GIS 的甘肃省农业生产潜力研究. *地理科学进展*, 2003, 22(4): 400-408.
- ZHENG H X, FENG Z M, YOU S C. A study on potential land productivity based on GIS technology in Gansu province. *Progress in Geography*, 2003, 22(4): 400-408. (in Chinese)
- [27] BERGAMASCHI H, WHEELER T R, CHALLINOR A J, COMIRAN F, HECKLER B M M. Maize yield and rainfall on different spatial and temporal scales in Southern Brazil. *Pesquisa Agricola Brasil*, 2007, 42: 603-613.
- [28] RATTALINO EDREIRA J I, BUDAKLI CARPICI E, SAMMARRO D, OTEGUI M E. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research*, 2011, 123(2): 62-73.
- [29] ZHOU B Y, YUE Y, SUN X F, WANG X B, WANG Z M, MA W, ZHAO M. Maize grain yield and dry matter production responses to variations in weather conditions. *Agronomy Journal*, 2016, 108(1): 196-204.
- [30] LIU Y, WANG E L, YANG X G, WANG J. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980s. *Global Change Biology*, 2010, 16(8): 2287-2299.
- [31] 高海涛, 王育红, 孟战赢, 席玲玲, 段国辉, 温红霞. 小麦-玉米双晚种植对周年产量和资源利用的影响. *麦类作物学报*, 2012, 32(6): 1102-1106.
- GAO H T, WANG Y H, MENG Z Y, XI L L, DUAN G H, WEN H X. Effects of later sowing of winter wheat and later harvest of summer maize cropping system on yield and resources use efficiency of whole-year. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6): 1102-1106. (in Chinese)

- [32] 裴雪霞, 王娇爱, 党建友, 张定一. 播期对优质小麦籽粒灌浆特性及旗叶光合特性的影响. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 121-128.
- PEI X X, WANG J A, DANG J Y, ZHANG D Y. Characteristics of grain filling and flag leaf photosynthesis of high quality wheat under different planting dates. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(1): 121-128. (in Chinese)
- [33] 张甲元, 周苏玫, 尹钧, 刘万代, 李巧云, 石珊珊, 年力. 适期晚播对弱春性小麦籽粒灌浆期光合性能的影响. *麦类作物学报*, 2011, 31(3): 535-539.
- ZHANG J Y, ZHOU S M, YIN J, LIU W D, LI Q Y, SHI S S, NIAN L. Effect of suitable late sowing on photosynthetic performance of weak spring wheat during grain filling stage. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(3): 535-539. (in Chinese)
- [34] WANG B, ZHANG Y H, HAO B Z, XU X X, ZHAO Z G, WANG Z M, XU Q W. Grain yield and water use efficiency in extremely-late sown winter wheat cultivars under two irrigation regimes in the North China Plain. *PLoS ONE*, 2016, 11(4): e0153695.
- [35] RACZ F, KASA S, HADI G. Daily changes in the water content of early and late maturing grain maize varieties in the later stages of over-ripening. *Cereal Research Communications*, 2008, 36(4): 583-589.
- [36] DUTTA P K. Effects of grain moisture, drying methods, and variety on breakage susceptibility of shelled corns as measured by the Wisconsin Breakage Tester[D]. Ames: Iowa State University, 1986.
- [37] JOHNSON D Q, RUSSELL W A. Genetic variability and relationships of physical grain-quality traits in the BSSS population of maize. *Crop Science*, 1982, 22(4): 805-809.
- [38] BAUER P J, CARTER P R. Effect of seeding date plant density, moisture availability and soil nitrogen fertility on maize kernel breakage susceptibility. *Crop Science*, 1986, 26(6): 1220-1226.
- [39] LACKEY R. Corn energy value-a comparison of harvesting corn as shelled dried corn, high moisture corn, high moisture cob corn (cob meal) and corn silage. Ministry of Agriculture Food & Rural Affairs, 2008[2017-02-09]. <http://www.omafr.gov.on.ca/english/livestock/beef/news/vbn1108a2.htm>.
- [40] 王怡. 黄淮海麦区小麦倒春寒冻害及其防御措施. *农业科技通讯*, 2014(1): 139-140, 211.
- WANG Y. Winter injury on wheat in Huang-huai-hai wheat zone and its prevention measures. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2014(1): 139-140, 211. (in Chinese)
- [41] LI X N, CAI J, LIU F L, DAI T B, CAO W X, JIANG D. Physiological, proteomic and transcriptional responses of wheat to combination of drought or waterlogging with late spring low temperature. *Functional Plant Biology*, 2014, 41: 690-703.
- [42] LIU Y E, XIE R Z, HOU P, LI S K, ZHANG H B, MING B, LONG H L, LIANG S M. Phenological responses of maize to changes in environment when grown at different latitudes in China. *Field Crops Research*, 2013, 144: 192-199.

(责任编辑 杨鑫浩)