

夏玉米产量与光温生产效率差异分析——以山东省为例

王洪章, 刘鹏, 董树亭, 张吉旺, 赵斌, 任佰朝

(山东农业大学农学院/作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要:【目的】研究夏玉米各产量层次之间的物质生产及资源利用能力, 量化山东省夏玉米籽粒产量与光、温资源利用效率的差异, 明确农业生产条件和栽培措施对产量差及效率差的贡献率, 探讨产量差、效率差协同缩减的可能性, 为缩小夏玉米产量差距、提升资源利用效率提供理论依据。【方法】本试验于 2017—2018 年在山东省泰安、淄博和烟台 3 市进行, 针对山东夏玉米生产调研出的问题, 在同一地块采用综合管理模式, 从合理密植、优化肥水、增产增效的角度设计了 4 种管理模式, 模拟超高产水平 (SH)、高产高效水平 (HH)、农户水平 (FP) 和基础产量水平 (CK) 4 个产量层次, 定量分析不同产量层次之间的产量差及光温资源生产效率差。结合光温生产潜力分析和作物产量性能分析, 探究产量差和效率差的影响因素及缩差增效途径。【结果】当前山东省夏玉米光温潜力与超高产水平、超高产水平与高产高效水平、高产高效水平与农户生产水平、农户生产水平与基础产量水平之间的产量差分别为 5.85、0.82、1.90、1.35 t·hm⁻², 光能生产效率差分别为 1.74、0.15、0.28、0.45 g·MJ⁻¹, 温度生产效率差分别为 1.09、0.10、0.17、0.28 kg·hm⁻²·℃⁻¹; 当前不可控因素对产量差和光、温生产效率差的贡献率分别为 58.49% 和 66.09%, 可控因素对产量差和光、温生产效率差的贡献率分别为 41.51% 和 33.91%, 地域差异因素对产量差、光能生产效率差和温度生产效率差的贡献率分别为 1.98%、2.49% 和 3.24%; 产量差与光温资源生产效率差之间有显著相关性; SH 和 HH 处理较 FP 处理和 CK 有较高的地上部生物量、生育期平均叶面积指数 (MLAI) 和冠层光能截获率。【结论】当前山东省夏玉米农户生产水平与光温潜力水平之间的产量差、光能生产效率差、温度生产效率差分别为 8.56 t·hm⁻²、2.17 g·MJ⁻¹、1.35 kg·hm⁻²·℃⁻¹, 产量与光、温资源利用效率仍有较大的提升空间。玉米籽粒产量差和光、温资源利用效率差显著相关, 在现有农户管理措施的基础上, 应用高产高效管理模式 (种植密度增加 1.5×10^4 株·hm⁻², 适当增加施肥量, 将一次性施肥改为于播种期、大喇叭口期、开花期和乳熟期采用水肥一体化方式分次施肥) 能够缩小产量差距 1.90 t·hm⁻², 提高光、温资源生产效率 14.74% 和 14.41%, 是协同缩差增效的有效技术途径。

关键词: 夏玉米; 产量; 光温生产效率; 差距

Analysis of Gap Between Yield and Radiation Production Efficiency and Temperature Production Efficiency in Summer Maize: Taking Shandong Province as an Example

WANG HongZhang, LIU Peng, DONG ShuTing, ZHANG JiWang, ZHAO Bin, REN BaiZhao

(College of Agronomy, Shandong Agricultural University/State Key Laboratory of Crop Biology, Taian 271018, Shandong)

Abstract: 【Objective】 In the present study, the biomass production and resource availability among yield levels were studied to quantify the gap of yield, radiation production efficiency and temperature production efficiency of summer maize in Shandong province. This study aimed to clarify the contribution rate of agricultural production conditions and cultivation measures to yield gap and efficiency gap, and to explore the possibility of synergistic narrow the yield gap and efficiency gap,

收稿日期: 2018-12-11; 接受日期: 2019-01-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0300106)、国家自然科学基金 (31071358, 31301274)、山东省现代农业产业技术体系项目 (SDAIT02-08)

联系方式: 王洪章, E-mail: whz3707@163.com. 通信作者刘鹏, E-mail: liupengsdau@126.com

so as to provide a theoretical basis for closing yield gap and improving resource utilization efficiency. 【Method】 The experiment was conducted in Taian, Zibo and Yantai in Shandong province from 2017 to 2018. Based on the investigation of summer maize production in Shandong province, four management models were designed in consideration of appropriate increase of plant density, optimization of fertilizer and water, increase of yield and efficiency with the same integrated management. The four yield levels, including super high yield (SH), high yield and high efficiency (HH), farmer level (FP) and basic production level (CK), were simulated. And the gap of yield, radiation production efficiency and temperature production efficiency of different yield levels were analyzed. With the integrative analysis of radiation-temperature production potential and crop yield performance, the factors affecting gap of yield and efficiency and the way closing yield gap and increasing efficiency were explored in the present study. 【Result】 At present, the yield gap between radiation temperature potential level and super high yield level, super high yield level and high yield high efficiency level, high yield and high efficiency level and farmer production level, farmer production level and basic production level of summer maize in Shandong province were 5.85, 0.82, 1.90 and 1.35 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively; The radiation production efficiency gap were 1.74, 0.15, 0.28 and 0.45 $\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$, respectively; and the temperature production efficiency gap were 1.09, 0.10, 0.17 and 0.28 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectively. The current uncontrollable factors contributed 58.49% to yield gap, and contributed 66.09% to light and temperature production efficiency. And geographical difference factors contributed 1.98% to yield gap, contributed 2.49% to radiation production efficiency, and contributed 3.24% to temperature production efficiency. There was a significant correlation between the yield gap and the production efficiency gap. SH and HH had higher biomass, mean leaf area index (MLAI) and canopy light energy interception rate than FP and CK.

【Conclusion】 At present, the gap of yield, the radiation production efficiency, and the temperature production efficiency between the farmer production level and the radiation temperature potential level of summer maize in Shandong province were 8.56 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 2.17 $\text{g}\cdot\text{MJ}^{-1}$, and 1.35 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectively, so there was room for improvement in yield and utilization efficiency of radiation and temperature resources. There was a significant correlation between the yield gap and the production efficiency gap, on the basis of existing farmer management measures, the application of high-yield and high-efficiency management mode (increase the plant density of 15 000 $\text{plant}\cdot\text{hm}^{-2}$, and increasing the amount of fertilization appropriately, changing the one-time fertilization into the sub-fertilization mode with water and fertilizer integration during the stage of sowing, spike formation, flowering, and milking) could narrow the yield gap by 1.90 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ and increase the production efficiency of radiation and temperature resources by 14.74% and 14.41%, respectively, which was an effective technical way to synergistic close yield gap and increase efficiency.

Key words: summer maize; yield; radiation and temperature production efficiency; gap

0 引言

【研究意义】“产量差”的研究工作自 1974 年由国际水稻研究所 (IRRI) 开展后, 逐渐成为作物研究的重要领域^[1-2]。黄淮海区域作为我国玉米的优势产区, 种植面积和总产量分别占全国玉米的 32.7% 和 35.0%, 在保证国家粮食安全上具有重要意义。该区域光温资源丰富, 夏玉米光温生产潜力产量达到了 $31.15 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 远高于其他夏玉米产区^[3]。2005 年, 李登海曾创造了 $21.10 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的中国夏玉米高产纪录; 2015 年德州大面积高产田也达到了 $12.03 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量水平。而 2016 年山东省夏玉米平均产量只有 $6.44 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 与光温潜力产量、高产纪录产量、大面积高产高效产量仍有 24.71、14.66、5.59 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的产量差距。【前人研究进展】由于当前众多不合理的因素, 黄淮海夏玉米区存在较大产量差的同时, 资源利用效率差距也较大。光、温生产效率是衡量产量及资源利用率的重要

标准, 当前实际生产中光能利用率只有 1%—2%, 远低于作物理论最大光能利用率 5%—6%^[4]。在目前作物叶面积指数和收获指数难以继续增加的情况下, 若想进一步提高作物产量就必须提高生物量, 提升作物光能利用率成为关键^[5]。产量差、资源利用效率差的研究为探寻产量限制因子, 缩小产量差、资源利用效率差, 进而提高农户产量提供了很好的技术支持^[6]。如何确认差距限制因素, 有效降低限制程度成为人们的关注点^[7]。当前根据研究目标和尺度大致可将限制因素分为气候因素、品种和栽培措施因素、土壤因素、社会因素等几个方面。其中光照和温度通过影响作物的生长环境进而影响作物的物质生产^[8]。气象因子对产量差的贡献率约为 8%, 在农业生产上属于不可控因素^[9]。但可以通过选择优良品种、确定合理密度、优化施肥等栽培措施来构建高光效群体, 进而缩减产量差距和效率差距^[10]。【本研究切入点】前人从选用优良品种^[11]、增加种植密度^[12]、优化肥水管理措施^[13]、

完熟期收获^[14]和生态环境^[15]等多方面探明了上述因素提高夏玉米产量和资源利用效率 3%—40%，但在实际生产中尚有 47% 的增产潜力有待进一步挖掘^[6]。此外，当前产量差、效率差协同缩减的可行性缺乏理论支持，不同因素对于产量差、效率差的贡献率鲜有定量。因此，通过量化夏玉米不同产量层次之间的产量差、效率差，及明确二者之间的关系，探明产量差、效率差的缩减途径，对于提高产量与资源利用效率具有重大意义。【拟解决的关键问题】本研究在同一地块根据国际常用的综合管理模式，在当前常见的农户生产和超高产生产模式以外，针对黄淮海夏玉米生产调研出的问题，从合理密植、优化肥水、增产增效的角度设计了高产高效综合管理方案，利用作物产量性能分析方法，结合光温生产潜力分析，量化山东省夏玉米产量与资源利用效率的差异，明确农业生产条件和栽培方式对产量差及效率差的贡献率，探讨产量差、效率差协同缩减的可能性，以期为缩小夏玉米产量差距、提升资源利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2017—2018 年在山东省泰安市岱岳区马庄镇（35°58'41"N，116°58'22"E，海拔 85 m）、淄博

市桓台县果里镇（36°24'15"N，118°0'7"E，海拔 24 m）和烟台市莱州市西由镇（37°21'10"N，119°57'5"E，海拔 6 m）进行。3 处试验点均地处温带大陆性季风气候区，试验期间具体温度、辐射及降雨量详见图 1。作物种植体系为冬小麦/夏玉米一年两熟，于小麦收获后深耕（25 cm）灭茬，耙耱整平，播种。室内试验在山东农业大学作物生物学国家重点实验室进行。

1.2 试验设计

本试验供试品种为登海 605，在同一地块结合密度和肥水管理设置超高产、高产高效、农户和基础产量 4 种管理模式，分别模拟超高产水平（SH）、高产高效水平（HH）、农户水平（FP）和基础产量水平（CK）4 个产量层次，试验具体种植密度和肥料运筹详见表 1。所用氮肥为包膜缓控尿素（PU，含 N 42%）和普通尿素（U，含 N 46%），磷肥为过磷酸钙（含 P₂O₅ 12%），钾肥为硫酸钾（含 K₂O 51%），有机肥料为山东友邦肥业科技有限公司生产的商品有机肥（含有机碳（干基）304 g·kg⁻¹、P₂O₅31.2 g·kg⁻¹、K₂O30.4 g·kg⁻¹、C/N 为 11.2），具体用量依其含量计算。试验为随机区组设计，小区面积 300 m²，3 次重复。各试验区之间设立 1.5 m 的缓冲区。生长期根据土壤墒情采用微喷带统一灌溉，遇涝及时排水。按正常田间管理进行良好的病虫害防治。试验期间具体生育进程详见表 2。

表 1 各处理种植密度及肥料运筹

Table 1 The plant density and application of fertilizer

| 处理 Treatment | 种植密度 Plant density (plant/hm) | 目标产量 Target yield (kg·hm ⁻²) | 肥料种类 Fertilizers | 用量 Rate (kg·hm ⁻²) | 比例 Percentage | | | |
|-----------------|-------------------------------------|--|--|--------------------------------------|---------------|--------------|-----------|-----------|
| | | | | | 播种 Seeding | 大喇叭口期 V12 | 开花期 VT | 乳熟期 R3 |
| SH | 82500 | 18000 | 有机肥 Organic fertilizer | 7500 | 100% | | | |
| | | | N | 540 | 30%PU+10%U | 30%U | 20%U | 10%U |
| | | | P ₂ O ₅ | 180 | 100% | | | |
| | | | K ₂ O | 360 | 75% | | 25% | |
| HH | 82500 | 15000 | 有机肥 Organic fertilizer | 7500 | 100% | | | |
| | | | N | 375 | 30%PU+10%U | 30%U | 20%U | 10%U |
| | | | P ₂ O ₅ | 150 | 100% | | | |
| | | | K ₂ O | 300 | 75% | | 25% | |
| FP | 67500 | | NPK 三元复合肥 Ternary compound fertilizer (N-P ₂ O ₅ -K ₂ O=14-16-15) | 750 | 100% | | | |
| CK | 67500 | | | 0 | | | | |

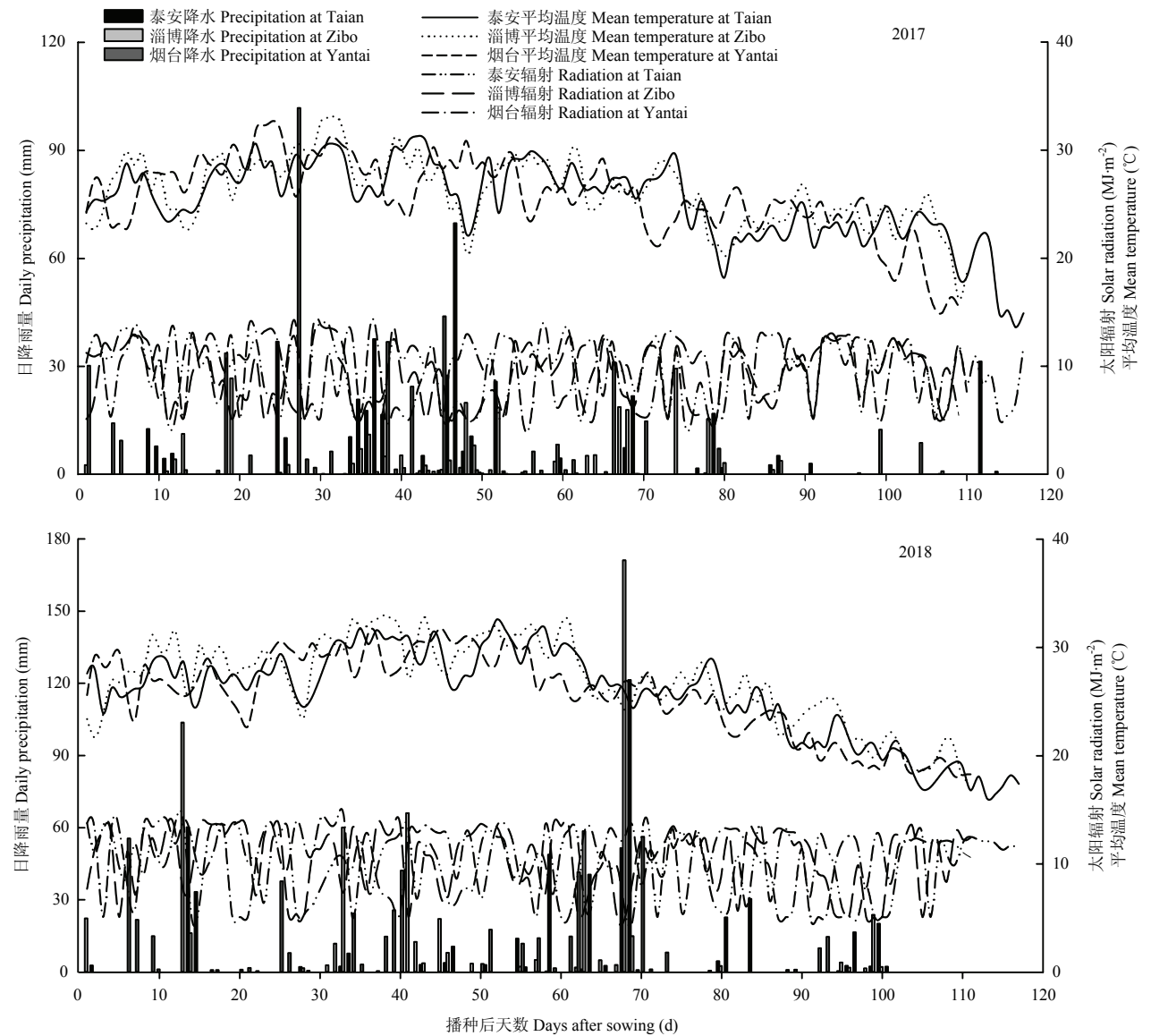


图 1 试验期间泰安、淄博和烟台的降水量、平均温度和太阳辐射

Fig. 1 Daily precipitation, mean temperature and solar radiation at Taian, Zibo and Yantai in the growth period of summer maize

表 2 试验点夏玉米生育进程

Table 2 Growth process of summer maize at experimental place

| 地点 Site | 年份 Year | 播种 Sowing (M-D) | 生育期 Growth stage (M-D) | | | | | 生育期天数 Total days (d) |
|--------------|------------|--------------------|------------------------|-----------------|---------------|---------------|---------|-------------------------|
| | | | 大喇叭口期 | 开花期 | 灌浆期 | 乳熟期 | 收获期 | |
| | | | Bell stage | Flowering stage | Filling stage | Milking stage | Harvest | |
| 泰安 Taian | 2017 | 6-12 | 7-27 | 8-04 | 8-23 | 9-03 | 10-06 | 116 |
| | 2018 | 6-12 | 7-25 | 8-02 | 8-22 | 9-01 | 10-06 | 116 |
| 淄博 Zibo | 2017 | 6-12 | 7-25 | 8-07 | 8-22 | 9-03 | 9-29 | 109 |
| | 2018 | 6-13 | 7-26 | 8-06 | 8-21 | 9-01 | 10-01 | 110 |
| 烟台 Yantai | 2017 | 6-20 | 7-29 | 8-15 | 8-30 | 9-15 | 10-06 | 108 |
| | 2018 | 6-20 | 8-03 | 8-16 | 9-03 | 9-13 | 10-08 | 110 |

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生态资源测定与计算 气象数据取自当地气象局, 根据生育阶段的光照时数和平均温度计算辐射量和活动积温。总辐射由日照时数数据根据 Ångström-Prescott 公式^[16]计算; 参考严定春等^[17]的方法计算 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的有效积温。

1.3.2 光合有效辐射强度 (PAR) 的测定 采用 SUNSCAN 冠层分析仪 (Delta-T, 英国) 分别于大喇叭口期 (V12)、开花期 (VT)、灌浆期 (R2)、乳熟期 (R3)、蜡熟期 (R5) 选择晴朗无云的天气, 于 10:00—13:00 测定冠层内的 PAR。为消除时间误差, 每次均采用往返测定法, 分别测定冠层上方 20 cm 处的入射 PAR (I_0) 和冠层底部 (地表处) 的 PAR (I)。光能截获率 (RIE) 按照 $\text{RIE}=(I_0-I)/I_0 \times 100\%$ 计算。生育期平均光能截获率 RIE_{ave} 取上述测定时期的平均值。某一阶段的截获量 (IPRA) 按照 $\text{IPRA}=\text{PAR} \times \text{RIE}_{\text{ave}}$ 计算。

1.3.3 地上部生物量的测定 每个处理在 VT 和成熟期 (R6) 期选取长势一致的植株 5 株, 按茎秆、叶片、籽粒、雄穗、苞叶、穗轴器官分开, 于烘箱 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘至恒重, 称量各部分干重, 并计算群体干物质积累量。

1.3.4 各产量层次产量的测定及产量差的计算 光温生产潜力产量 (Y_{RT}) 和光温生产潜力生物量 (B_{RT}) 根据经验模型, 参照赖荣生等^[18]提出的修订参数计算得到。

于成熟期每个处理内随机选取 3 个 9 m^2 ($5 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$) 小区果穗全部收获, 进行考种, 并计算产量。分别得到超高产水平产量 (Y_{SH})、高产高效水平产量 (Y_{HH})、农户水平产量 (Y_{FP}) 和基础产量水平产量 (Y_{CK}) 用于产量差 (YG) 的计算。

试验点产量差 (YG_s) = $Y_{\text{FPmax}} - Y_{\text{FP}}$;

产量差 I (YG_I) = $Y_{\text{RT}} - Y_{\text{SH}}$;

产量差 II (YG_{II}) = $Y_{\text{SH}} - Y_{\text{HH}}$;

产量差 III (YG_{III}) = $Y_{\text{HH}} - Y_{\text{FP}}$;

产量差 IV (YG_{IV}) = $Y_{\text{FP}} - Y_{\text{CK}}$;

总产量差 (YG_t) = $Y_{\text{RT}} - Y_{\text{CK}}$ 。

1.3.5 各产量层次光、温生产效率及效率差的计算 根据光能生产效率 ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$) = 生育期地上部生物产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) / 单位面积的太阳辐射截获总量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$) $\times 10^2$; 温度生产效率 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$) = 单位面积地上部生物产量 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$) / 生育期间有效积温 ($^{\circ}\text{C}$) $\times 10^3$ 计算, 分别得到潜在光能生产效率 (RE_{RT})、超高产水

平光能生产效率 (RE_{SH})、高产高效光能生产效率 (RE_{HH})、农户水平光能生产效率 (RE_{FP})、基础产量水平光能生产效率 (RE_{CK}) 和潜在温度生产效率 (TE_{RT})、超高产水平温度生产效率 (TE_{SH})、高产高效温度生产效率 (TE_{HH})、农户水平温度生产效率 (TE_{FP})、基础产量水平温度生产效率 (TE_{CK}), 用于光能生产效率差和温度生产效率差的计算。

试验点光能生产效率差 (REG_s) = $\text{RE}_{\text{FPmax}} - \text{RE}_{\text{FP}}$;

光能生产效率差 I (REG_I) = $\text{RE}_{\text{RT}} - \text{RE}_{\text{SH}}$;

光能生产效率差 II (REG_{II}) = $\text{RE}_{\text{SH}} - \text{RE}_{\text{HH}}$;

光能生产效率差 III (REG_{III}) = $\text{RE}_{\text{HH}} - \text{RE}_{\text{FP}}$;

光能生产效率差 IV (REG_{IV}) = $\text{RE}_{\text{FP}} - \text{RE}_{\text{CK}}$;

光能生产总效率差 (REG_t) = $\text{RE}_{\text{RT}} - \text{RE}_{\text{CK}}$ 。

试验点温度生产效率差 (TEG_s) = $\text{TE}_{\text{FPmax}} - \text{TE}_{\text{FP}}$;

温度生产效率差 I (TEG_I) = $\text{TE}_{\text{RT}} - \text{TE}_{\text{SH}}$;

温度生产效率差 II (TEG_{II}) = $\text{TE}_{\text{SH}} - \text{TE}_{\text{HH}}$;

温度生产效率差 III (TEG_{III}) = $\text{TE}_{\text{HH}} - \text{TE}_{\text{FP}}$;

温度生产效率差 IV (TEG_{IV}) = $\text{TE}_{\text{FP}} - \text{TE}_{\text{CK}}$;

温度生产总效率差 (TEG_t) = $\text{TE}_{\text{RT}} - \text{TE}_{\text{CK}}$ 。

1.3.6 各因素对产量差及光温资源生产效率差贡献率的计算 本研究中, 当前不可控因素包括积温、辐射、降雨等生态资源因素和高温、干旱、阴雨寡照等环境逆境等人为不可改变的气象因子; 可控因素包括能够改变土壤结构和群体特征, 进而影响夏玉米生产性能的措施, 包括肥料投入、田间管理、农艺水平等。

地域差异因素对产量差的贡献率 (%) = $\text{YG}_s / \text{YG}_t \times 100$;

当前不可控因素对产量差的贡献率 (%) = $\text{YG}_I / \text{YG}_t \times 100$;

大量资源投入对产量差的贡献率 (%) = $\text{YG}_{II} / \text{YG}_t \times 100$;

优化栽培措施对产量差的贡献率 (%) = $\text{YG}_{III} / \text{YG}_t \times 100$;

当前农艺水平对产量差的贡献率 (%) = $\text{YG}_{IV} / \text{YG}_t \times 100$ 。

地域差异因素对效率差的贡献率 (%) = $\text{EG}_s / \text{EG}_t \times 100$;

当前不可控因素对效率差的贡献率 (%) = $\text{EG}_I / \text{EG}_t \times 100$;

大量资源投入对效率差的贡献率 (%) = $\text{EG}_{II} / \text{EG}_t \times 100$;

优化栽培措施对效率差的贡献率 (%) = $\text{EG}_{III} / \text{EG}_t \times 100$ 。

100;

当前农艺水平对效率差的贡献率 (%) = $EG_{IV}/EG_I \times 100$ 。

1.3.7 作物产量性能分析 分别于 V12、VT、R2、R3 和 R5 期选取长势一致的 5 株植株, 定株测定 5 次叶面积, 并参照张宾等^[19]方法计算产量性能, 求出玉米的全生育期平均叶面积系数 (MLAI) 和平均净同化率 (MNAR)。Y=MLAI×D×MNAR×HI, 式中, MLAI 为全生育期平均叶面积系数, D 为生育期天数, MNAR 为平均净同化率, HI 为收获指数, Y 为产量。

1.4 数据分析与作图

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理; 采用 DPS 16.05 进行数据统计分析, 以 LSD 法检验差异显著性 ($\alpha=0.05$); 采用 Sigmaplot 14.0 作图。

2 结果

2.1 不同产量层次夏玉米群体生物量的差异

不同产量层次夏玉米地上部生物积累量差异显

著, 总体趋势为 SH>HH>FP>CK (图 2)。2017 年, 三试验点 SH、HH、FP 处理的花前干物质积累量较 CK 分别提高了 39.69%、35.88%、28.40% (泰安), 46.74%、42.64%、27.92% (淄博) 和 45.84%、42.51%、25.26% (烟台); 花后干物质积累量较 CK 分别提高了 83.77%、60.69%、39.54% (泰安), 64.90%、54.02%、28.28% (淄博) 和 75.00%、61.10%、36.93% (烟台); 总干物质积累量较 CK 分别提高了 64.90%、50.07%、34.77% (泰安), 57.61%、49.45%、28.14% (淄博) 和 63.14%、53.54%、32.18% (烟台)。2018 年, 三试验点 SH、HH、FP 处理的花前干物质积累量较 CK 分别提高了 43.32%、40.67%、30.26% (泰安), 34.35%、24.93%、17.59% (淄博) 和 27.07%、18.13%、13.01% (烟台); 花后干物质积累量较 CK 分别提高了 74.02%、64.80%、33.60% (泰安), 76.72%、63.61%、36.50% (淄博) 和 82.97%、66.51%、42.92% (烟台); 总干物质积累量较 CK 分别提高了 61.38%、54.86%、32.22% (泰安), 58.03%、46.55%、28.16% (淄博) 和 56.87%、43.93%、28.96% (烟台)。

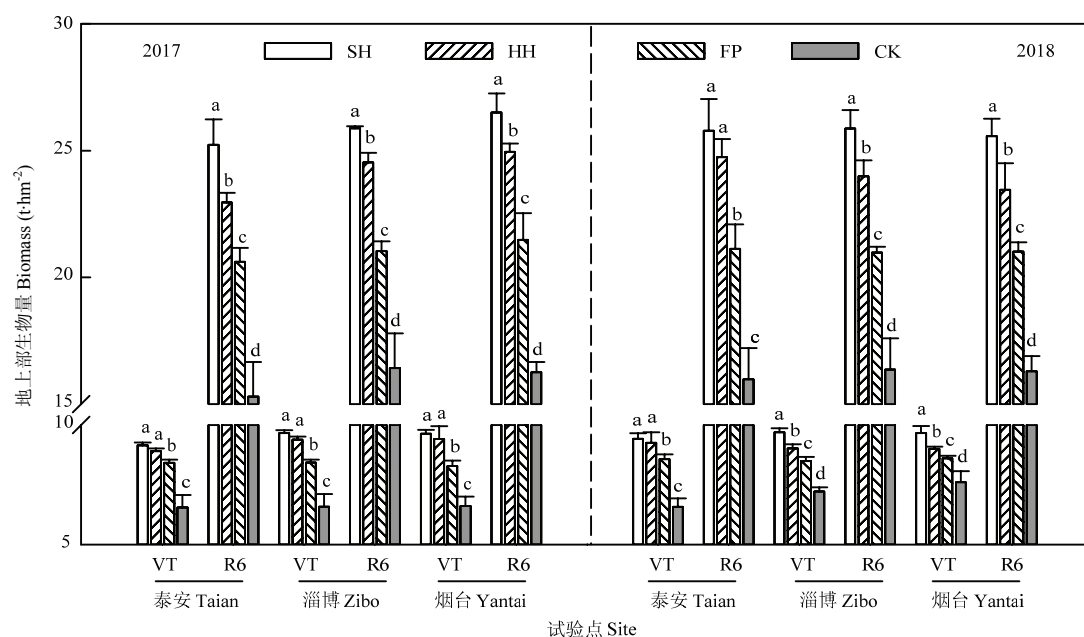


图 2 不同产量层次夏玉米地上部生物量的差异

Fig. 2 Differences in biomass of summer maize under different yield levels

随产量水平的提升, 花后干物质积累量占总干物质积累量的比例逐渐增大。2017 年, 三试验点 SH、HH、FP 处理的花后干物质积累量占总干物质积累量的比例较 CK 分别提高了 11.44%、7.08%、3.54% (泰

安), 4.63%、3.06%、0.11% (淄博) 和 7.27%、4.92%、3.59% (烟台); 2018 年分别提高了 7.83%、6.42%、1.04% (泰安), 11.83%、11.64%、6.51% (淄博) 和 16.64%、15.69%、10.83% (烟台)。

2.2 不同产量层次夏玉米产量及产量差的定量

山东省平均光温生产潜力为 18.12 t·hm⁻²，SH、HH、FP 处理和 CK 分别实现了 Y_{RT} 的 67.72%、63.19%、52.76% 和 45.31%，Y_{CK} 与 Y_{RT} 之间产量差距达到了 9.91 t·hm⁻²，是 Y_{RT} 的 54.69%（表 3）。5 个产量层次之间的产量差分别为 5.86、0.82、1.90 和 1.35 t·hm⁻²，表现为 YG_I>YG_{III}>YG_{IV}>YG_{II}。2017 年淄博和烟台的 FP 处理较泰安分别存在 0.17 t·hm⁻² 和 0.12 t·hm⁻² 的产量差距，2018 年，泰安和淄博的 FP 处理较烟台分

别存在 0.81 t·hm⁻² 和 0.15 t·hm⁻² 的产量差距，说明地域之间同样存在产量差。

2.3 不同产量层次夏玉米光合性能参数的差异

4 个产量层次的 MLAI 差异显著（*P*<0.05），均表现为 SH>HH>FP>CK（表 4）。2017 年三试验点 SH、HH、FP 处理的 MLAI 较 CK 分别提高了 48.79%、41.53%、20.97%（泰安），54.22%、48.59%、20.48%（淄博）和 39.86%、24.56%、17.79%（烟台）；2018 年分别提高了 41.06%、33.33%、22.36%（泰

表 3 不同产量层次夏玉米籽粒产量及各级产量差

Table 3 Grain yield and yield gap under different yield levels

| 年份 Year | 地点 Site | 籽粒产量 Grain yield (t·hm ⁻²) | | | | | 产量差距 Yield gap (t·hm ⁻²) | | | | | |
|------------|------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| | | Y _{RT} | Y _{SH} | Y _{HH} | Y _{FP} | Y _{CK} | YG _I | YG _{II} | YG _{III} | YG _{IV} | YG _V | YG _S |
| 2017 | 泰安 Taian | 17.71 | 12.30 | 11.30 | 9.97 | 8.78 | 8.93 | 5.41 | 1.00 | 1.33 | 1.19 | — |
| | 淄博 Zibo | 16.78 | 12.07 | 11.42 | 9.80 | 8.60 | 8.18 | 4.71 | 0.65 | 1.62 | 1.2 | 0.17 |
| | 烟台 Yantai | 15.84 | 11.99 | 11.91 | 9.85 | 8.27 | 7.57 | 3.85 | 0.08 | 2.06 | 1.58 | 0.12 |
| 2018 | 泰安 Taian | 19.06 | 12.53 | 11.33 | 8.75 | 7.51 | 11.55 | 6.53 | 1.20 | 2.58 | 1.24 | 0.81 |
| | 淄博 Zibo | 20.25 | 12.34 | 11.29 | 9.41 | 8.01 | 12.24 | 7.91 | 1.05 | 1.88 | 1.40 | 0.15 |
| | 烟台 Yantai | 19.09 | 12.41 | 11.46 | 9.56 | 8.10 | 10.99 | 6.68 | 0.95 | 1.90 | 1.46 | — |
| 平均 Average | | 18.12 | 12.27 | 11.45 | 9.56 | 8.21 | 9.91 | 5.85 | 0.82 | 1.90 | 1.35 | 0.21 |

表 4 不同产量层次夏玉米光合性能参数的差异

Table 4 Differences in photosynthetic performance parameters of summer maize under different yield levels

| 地点 Site | 处理 Treatments | 2017 | | | | 2018 | | | |
|--------------|------------------|-------|--|-------|-------|-------|--|-------|-------|
| | | MLAI | MNAR (g·m ⁻² ·d ⁻¹) | D (d) | HI | MLAI | MNAR (g·m ⁻² ·d ⁻¹) | D (d) | HI |
| 泰安 Taian | SH | 3.69a | 6.69b | 116 | 0.51a | 3.47a | 6.87b | 116 | 0.53a |
| | HH | 3.51b | 6.77b | 116 | 0.51a | 3.28b | 6.92b | 116 | 0.53a |
| | FP | 3.00c | 8.38a | 116 | 0.50a | 3.01c | 7.82a | 116 | 0.53a |
| | CK | 2.48d | 8.44a | 116 | 0.50a | 2.46d | 7.56a | 116 | 0.51a |
| 淄博 Zibo | SH | 3.84a | 5.84c | 109 | 0.53a | 3.76a | 5.72b | 110 | 0.53a |
| | HH | 3.70b | 5.77c | 109 | 0.51a | 3.53b | 5.72b | 110 | 0.52a |
| | FP | 3.00c | 6.00b | 109 | 0.51a | 2.99c | 5.84a | 110 | 0.52a |
| | CK | 2.49d | 6.61a | 109 | 0.50a | 2.48d | 6.04a | 110 | 0.50a |
| 烟台 Yantai | SH | 3.93a | 5.93b | 108 | 0.51a | 3.44a | 8.46c | 109 | 0.51a |
| | HH | 3.50b | 6.21b | 108 | 0.50a | 3.19b | 8.51c | 109 | 0.50a |
| | FP | 3.31c | 7.07a | 108 | 0.50a | 2.86c | 10.28a | 109 | 0.48a |
| | CK | 2.81d | 7.76a | 108 | 0.49a | 2.31d | 9.23b | 109 | 0.47a |

MLAI：平均叶面积指数；MNAR：平均净同化率；D：生育期天数；HI：收获指数。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平
MLAI: Mean leaf area index; MNAR: Mean net assimilation rate; D: Total days; HI: Harvest index. Values followed by different letters in a column are significantly different between treatments at 0.05 level

安), 51.61%、42.34%、20.56% (淄博) 和 48.92%、38.10%、23.81% (烟台)。与 MLAI 表现不同, SH 和 HH 处理的 MNAR 显著低于 FP 和 CK 处理 ($P < 0.05$)。2017 年泰安、淄博和烟台试验点 SH、HH 处理的 MLAI 较 FP 处理分别降低了 20.17%、19.12%、2.67%、3.83%和 16.12%、12.16%; 2018 年分别降低了 12.15%、11.51%, 2.05%、2.05%和 17.70%、17.22%。较 CK 在 2017 年分别降低了 20.73%、19.79%, 11.65%、12.71%和 23.58%、19.97%; 在 2018 年分别降低了 9.13%、8.47%, 5.30%、5.30%和 8.34%、7.80%。HI 在各产量层次之间无明显差异 ($P > 0.05$)。由此可见, SH 和 HH 处理具有较高籽粒产量的主要原因在于其生育期具有较大的 MLAI, 而 FP 和 CK 处理虽然具有较高

的 MNAR, 但仍无法抵消其 MLAI 大幅降低带来的损失。

2.4 不同产量层次夏玉米冠层光能截获的差异

由图 3 可见, 随着生育进程的推进, 夏玉米群体的光能截获率表现出先升高后降低的趋势, 在 VT 期达到峰值。全生育期中, SH、HH 和 FP 处理的光能截获率较 CK 分别提高 16.18%、15.01%和 5.31%。且自乳熟期差异进一步增大, R5 期 CK 的光能截获率只有 SH、HH 和 FP 处理的 63.08%、67.34%和 82.75%, 导致生育后期 4 个产量层次之间平均光能截获率差异显著 ($P < 0.05$)。表明 SH 和 HH 栽培模式能够在全生育期, 尤其是生育后期保持较高的光合有效辐射截获率, 进而使得夏玉米群体获得更高的光能截获量。

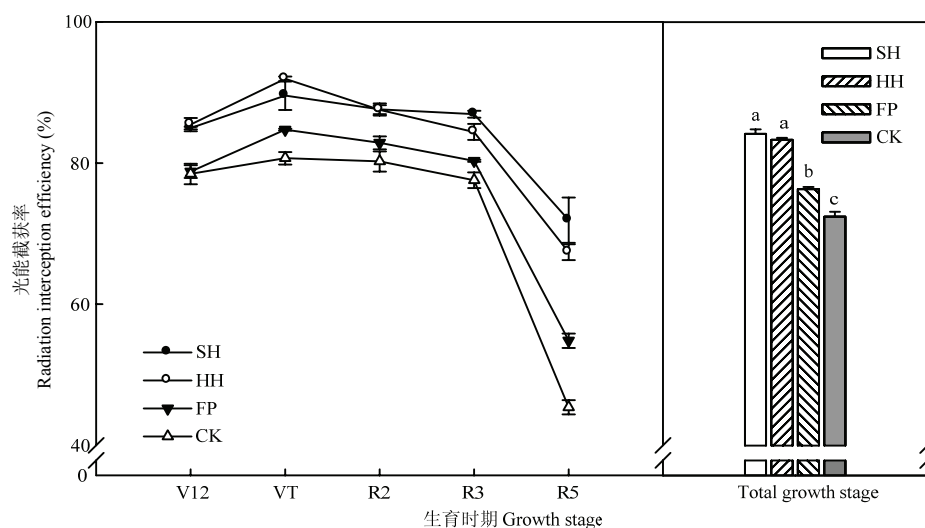


图 3 不同产量层次夏玉米光能截获率的差异

Fig. 3 Radiation interception efficiency of summer maize under different yield levels

2.5 不同产量层次夏玉米光温资源生产效率及效率差定量

不同产量层次的光、温生产效率之间差异显著, 山东省夏玉米理论光照和温度生产效率分别为 $4.07 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 和 $2.53 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, SH、HH、FP、CK 分别实现了潜在光能生产效率和潜在温度生产效率的 57.23%、53.47%、46.66%、35.70%和 57.07%、53.31%、46.54%、35.61% (表 5—6)。各级效率差之间表现为 $\text{EG}_I > \text{EG}_{IV} > \text{EG}_{III} > \text{EG}_{II}$ 。淄博光能生产效率高于泰安和烟台试验点, 烟台温度生产效率高于泰安和淄博试验点, 说明地域之间存在效率差距。

2.6 各因素对产量差的贡献率

3 个试验点各因素贡献率差异趋势一致, 总体表现为当前不可控因素 > 可控因素 > 地域差异因素, 贡献率分别为 58.49%、41.51%和 1.98%。当前各可控因素贡献率表现为优化栽培措施 > 当前农艺水平 > 大量资源投入, 贡献率分别占当前可控因素的 46.94%、33.86%和 19.20% (表 7)。

2.7 各因素对效率差的贡献率

当前不可控因素、可控因素和地域差异因素对于光、温资源利用效率差异的贡献率与对产量差的贡献率趋势一致, 三因素贡献率分别为 66.09%、33.91%和

表 5 不同产量层次夏玉米光能生产效率和效率差距

Table 5 Production efficiency of light and efficiency gap under different yield levels (g·MJ⁻¹)

| 年份 Year | 地点 Site | 光能生产效率 Production efficiency of radiation | | | | | 效率差距 Efficiency gap | | | | | |
|------------|------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | | RE _{RT} | RE _{SH} | RE _{HH} | RE _{FP} | RE _{CK} | REG _t | REG _I | REG _{II} | REG _{III} | REG _{IV} | REG _s |
| 2017 | 泰安 Taian | 4.01 | 2.29 | 2.08 | 1.87 | 1.39 | 2.63 | 1.73 | 0.21 | 0.21 | 0.48 | 0.25 |
| | 淄博 Zibo | 4.23 | 2.61 | 2.48 | 2.12 | 1.66 | 2.57 | 1.62 | 0.14 | 0.35 | 0.47 | — |
| | 烟台 Yantai | 3.71 | 2.48 | 2.34 | 2.01 | 1.52 | 2.19 | 1.23 | 0.15 | 0.33 | 0.49 | 0.11 |
| 2018 | 泰安 Taian | 4.05 | 2.19 | 2.10 | 1.80 | 1.36 | 2.69 | 1.86 | 0.09 | 0.31 | 0.44 | — |
| | 淄博 Zibo | 4.34 | 2.22 | 2.06 | 1.80 | 1.40 | 2.94 | 2.12 | 0.16 | 0.26 | 0.40 | — |
| | 烟台 Yantai | 4.05 | 2.17 | 1.99 | 1.79 | 1.38 | 2.67 | 1.88 | 0.18 | 0.21 | 0.40 | 0.01 |
| 平均 Average | | 4.07 | 2.33 | 2.18 | 1.90 | 1.45 | 2.62 | 1.74 | 0.15 | 0.28 | 0.45 | 0.06 |

表 6 不同产量层次夏玉米温度生产效率和效率差距

Table 6 Production efficiency of temperature and efficiency gap under different yield levels (kg·hm⁻²·°C⁻¹)

| 年份 Year | 地点 Site | 温度生产效率 Production efficiency of temperature | | | | | 效率差距 Efficiency gap | | | | | |
|------------|------------|---|------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|
| | | TE _{RT} | TE _{SH} | TE _{HH} | TE _{FP} | TE _{CK} | TEG _t | TEG _I | TEG _{II} | TEG _{III} | TEG _{IV} | TEG _s |
| 2017 | 泰安 Taian | 2.48 | 1.41 | 1.28 | 1.15 | 0.86 | 1.62 | 1.06 | 0.13 | 0.13 | 0.30 | 0.10 |
| | 淄博 Zibo | 2.36 | 1.45 | 1.38 | 1.18 | 0.92 | 1.44 | 0.90 | 0.08 | 0.20 | 0.26 | 0.07 |
| | 烟台 Yantai | 2.30 | 1.54 | 1.45 | 1.25 | 0.94 | 1.36 | 0.76 | 0.09 | 0.20 | 0.30 | - |
| 2018 | 泰安 Taian | 2.60 | 1.41 | 1.35 | 1.15 | 0.87 | 1.73 | 1.19 | 0.06 | 0.20 | 0.28 | 0.06 |
| | 淄博 Zibo | 2.70 | 1.38 | 1.28 | 1.12 | 0.87 | 1.83 | 1.32 | 0.10 | 0.16 | 0.25 | 0.09 |
| | 烟台 Yantai | 2.74 | 1.47 | 1.35 | 1.21 | 0.94 | 1.80 | 1.27 | 0.12 | 0.14 | 0.27 | - |
| 平均 Average | | 2.53 | 1.44 | 1.35 | 1.18 | 0.90 | 1.63 | 1.09 | 0.10 | 0.17 | 0.28 | 0.05 |

表 7 各因素对于产量差的贡献率

Table 7 Contribution rate of each factor to the yield gap

| 年份 Year | 地点 Site | 贡献率 Contribution rate (%) | | | | |
|------------|------------|-------------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|
| | | 当前不可控因素 Non-controllable factors | 可控因素 Controllable factors | | | 地域差异因素 Location factors |
| | | | 大量资源投入 Excess nutrients input | 优化栽培措施 Optimized cultivation measures | 当前农艺水平 Current crop management | |
| 2017 | 泰安 Taian | 60.58 | 11.20 | 14.89 | 13.33 | — |
| | 淄博 Zibo | 57.58 | 7.95 | 19.80 | 14.67 | 2.08 |
| | 烟台 Yantai | 50.86 | 1.06 | 27.21 | 20.87 | 1.59 |
| 2018 | 泰安 Taian | 56.54 | 10.39 | 22.34 | 10.74 | 7.01 |
| | 淄博 Zibo | 54.62 | 8.58 | 15.36 | 11.44 | 1.23 |
| | 烟台 Yantai | 60.78 | 8.64 | 17.29 | 13.28 | — |
| 平均 Average | | 58.49 | 7.97 | 19.48 | 14.05 | 1.98 |

2.49%、3.24%。在可控因素当中，大量资源投入、优化栽培措施和当前农艺水平对效率差的贡献率与对产量差的贡献率趋势有所不同，表现为当前农艺水平>优化栽培措施>大量资源投入，分别占当前可控因素的 50.91%、31.76%、17.33%（表 8）。

2.8 夏玉米产量差与效率差相关性分析

由图 4 可见，当前夏玉米不同产量层次之间产量差与光、温资源生产效率差均呈正相关关系，符合一元线性方程，随着产量差的缩减，光、温资源生产效率差同样会进一步缩减。

表 8 各因素对于光、温资源生产效率差的贡献率

Table 8 Contribution rate of each factor to the efficiency gap

| 年份 Year | 地点 Site | 贡献率 Contribution rate (%) | | | | | |
|------------|------------|--|-------------------------------------|---|--------------------------------------|--|---|
| | | 当前不可控因素 Non-controllable factors | 可控因素 Controllable factors | | | 地域差异因素 Location factors | |
| | | | 大量资源投入 Excess nutrients input | 优化栽培措施 Optimized cultivation measures | 当前农艺水平 Current crop management | 光能生产效率 Production efficiency of light energy | 温度生产效率 Production efficiency of temperature |
| | | | | | | | |
| 2017 | 泰安 Taian | 65.73 | 7.83 | 8.08 | 18.36 | 9.51 | 6.17 |
| | 淄博 Zibo | 62.95 | 5.25 | 13.71 | 18.10 | — | 4.88 |
| | 烟台 Yantai | 56.06 | 6.68 | 14.86 | 22.40 | 5.03 | — |
| 2018 | 泰安 Taian | 69.03 | 3.29 | 11.42 | 16.26 | — | 3.47 |
| | 淄博 Zibo | 72.27 | 5.49 | 8.79 | 13.46 | — | 4.93 |
| | 烟台 Yantai | 70.50 | 6.71 | 7.76 | 15.02 | 0.37 | — |
| 平均 Average | | 66.09 | 5.88 | 10.77 | 17.27 | 2.49 | 3.24 |

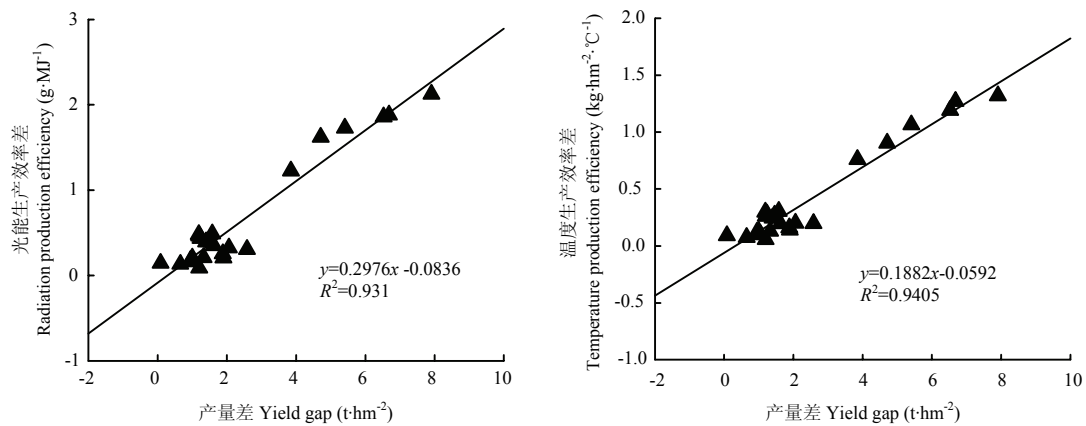


图 4 山东省夏玉米产量差与光温资源生产效率差的关系

Fig. 4 Relationship between yield gap and efficiency gap of summer maize in Shandong province

3 讨论

在农业用地日益紧张、国际竞争形势严峻的大背景下，为保证未来的粮食安全，作物产量的提高取决于缩小产量差的能力^[6]。光能和温度是作物生产的原始驱动力^[20]，如何高效利用是当前作物产量差研究的重点。当前产量差缩减的限制因素并不是光、温资源不足，而是利用效率低^[5]。前人研究认为，当前农户生产水平与区域试验之间的产量差为 4.5 t·hm⁻²，实现了潜力产量的 48.2%，仍有 45%—70%的提升空间^[21-23]。现有产量差是由多方面原因造成的，气候因素对于产量差的贡献率为 31.5%，光照、气温是造成产量差异的主要因子^[24-25]；优良品种及栽培措施对于

产量差的贡献率为 48%—72%^[26]。在实际生产中，短时间内难以消除现有产量与模拟潜在产量之间的产量差距，但消除农户与区域试验之间的产量差距则是现实可行的^[27]。本试验研究发现，当前山东省农户生产水平与超高产水平之间的产量差、光能、温度利用效率差分别为 2.72 t·hm⁻²、0.43 g·MJ⁻¹、0.27 kg·hm⁻²·°C⁻¹；与高产高效水平之间的产量差、光能、温度利用效率差为 1.90 t·hm⁻²、0.28 g·MJ⁻¹、0.17 kg·hm⁻²·°C⁻¹。当前可控因素对于产量差和光、温资源生产效率差的贡献率分别达到了 41.51%和 33.91%，这部分产量差距可通过现有条件的改善进一步缩减。其中优化栽培措施对产量差的贡献率为 19.48%，居当前可控因素的首位；对光、温资源生产效率差的贡献率为 10.77%，占

当前可控因素的第二位。由此可见,通过适度增加种植密度和合理肥料运筹结合,来优化现有的栽培措施,是大幅缩减产量差距跟效率差距的正确方向。按当前山东省夏玉米种植面积计算,消除 FP 与 HH 之间的这部分差距可提升光、温生产效率 10%以上,全省可增加玉米产量 6.3×10^6 t。

小农户种植作为我国的主要农业经营模式^[28],农户当前的农艺水平受其文化水平、收入水平等的影响,同时粮食价格、生产成本及农技推广都影响农户生产上的成本投入及生产效率高低^[29]。本研究发现,当前农艺水平对产量差的贡献率为 14.05%,对光、温资源生产效率差的贡献率为 17.27%。这部分差距主要是当前从事玉米生产的农户管理水平决定的。运用国家宏观调控及农业技术推广提升当前农户生产水平可缩减 $0.45 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 的光能生产效率差距和 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 的温度生产效率差距,缩小产量差距 $1.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。通过不计成本的资源投入可进一步缩小产量差距 $0.82 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,但伴随着过量的肥料施用,成本以及环境代价必定随之升高,这在当前可控因素中占比最低,实现效益也会最差。除此以外,区域环境差异对于产量差的贡献率为 1.98%,对光、温生产效率差的贡献率为 2.49%和 3.24%,消除这部分差距对区域尺度上全面增产增效具有重要意义。而当前生产中不可控因素对于产量差、光能和温度生产效率差的贡献率分别为 58.49%和 66.09%,由此形成了 $5.85 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的产量差距、 $1.74 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 的光能生产效率差距和 $1.09 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 的温度生产效率差距。这以现有的品种和技术无法对其产生影响,消除这部分差距是未来社会各界共同努力的方向。

作物产量的形成有上述众多的影响因素,光能利用是关键^[30]。作物光能利用率是由群体对光能的截获量和截获光能的转化率两方面决定的^[31]。夏玉米本身就具有高光效的特点^[32],因此提升玉米群体的光能截获量是提高玉米光能利用率进而增加产量的根本途径^[33]。当前高产田多是高投入、高产量、低效率的生产模式,高产夏玉米群体为提高光温利用率,往往通过大量的肥水投入,争取更大的群体叶面积,以此获取更大的光能截获^[34-35]。本试验研究发现,产量差与光温资源利用效率差呈显著正相关,说明两者之间有较强的关联性,在缩小产量差的同时可以实现产量与光温资源利用效率协同提升。本研究中通过优化栽培模式构建的高产高效(HH)夏玉米群体全生育期的 MLAI 较 FP 处理增加了 21.9%,这使得 HH 较 FP 处

理的光能截获率增加 9.3%,温度利用效率提高 14.4%。这是 HH 模式能够缩减产量差距 19.48%,光、温生产效率差距缩减 10.77%的根本原因。同时 HH 模式相对于超高产(SH)模式降低化肥施用量 30%,减轻环境压力的同时节约了生产成本,是一种绿色高效的高产农业生产模式,是实现协同缩差增效的合理生产方式。

4 结论

当前山东省夏玉米农户生产水平与光温潜力水平之间的产量差、光能生产效率差、温度生产效率差分别为 $8.56 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $2.17 \text{ g} \cdot \text{MJ}^{-1}$ 、 $1.35 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,产量与光、温资源利用效率仍有较大的提升空间。玉米籽粒产量差和光、温资源利用效率差显著相关,在现有农户管理措施的基础上,应用高产高效管理模式(种植密度增加 1.5×10^4 株/ hm^2 ,适当增加施肥量,将一次性施肥改为于播种期、大喇叭口期、开花期和乳熟期采用水肥一体化方式分次施肥)能够缩小产量差距 $1.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,提高光、温资源生产效率 14.74%和 14.41%,是协同缩差增效的有效技术途径。

References

- [1] LOBELL D B, CASSMAN K G, FIELD C B. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. *Annual Review of Environment & Resources*, 2009, 34(1): 179-204.
- [2] 杨晓光, 刘志娟. 作物产量差研究进展. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2731-2741.
YANG X G, LIU Z J. Advances in research on crop yield gaps. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(14): 2731-2741. (in Chinese)
- [3] 李少昆, 王崇桃. 玉米高产潜力·途径. 北京: 科学出版社, 2010.
LI S K, WANG C T. *Potential and Ways to High Yield in Maize*. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [4] LOOMIS R S, WILLIAMS W A. Maximum crop productivity: An estimate. *Crop Science*, 1963, 3(1): 67-72.
- [5] 程建峰, 沈允钢. 作物高光效之管见. *作物学报*, 2010, 36(8): 1235-1247.
CHENG J F, SHEN Y G. My humble opinions on high photosynthetic efficiency of crop. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(8): 1235-1247. (in Chinese)
- [6] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 孟庆锋, 赵明. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展. *中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 525-534.
LIU B H, CHEN X P, CUI Z L, MENG Q F, ZHAO M. Research

- advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 525-534. (in Chinese)
- [7] 王晓煜, 杨晓光, 吕硕, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅻ. 气候变暖对黑龙江寒地水稻安全种植区域和冷害风险的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1859-1871.
- WANG X Y, YANG X G, LÜ S, CHEN F. The possible effects of global warming on cropping systems in China XII. The possible effects of climate warming on geographical shift in safe planting area of rice in cold areas and the risk analysis of chilling damage. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1859-1871. (in Chinese)
- [8] RAMANKUTTY N, FOLEY J A, NORMAN J, MCSWENEY K. The global distribution of cultivable lands: Current patterns and sensitivity to possible climate change. *Global Ecology & Biogeography*, 2002, 11(5): 377-392.
- [9] LIU Z J, YANG X G, LIN X M, HUBBARD K G, LV S, WANG J. Maize yield gaps caused by non-controllable, agronomic, and socioeconomic factors in a changing climate of Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 756-764.
- [10] FOLEY J A, RAMANKUTTY N, BRAUMAN K A, CASSIDY E S, GERBER G S, JOHNSTON M, MUELLER N D, O'CONNELL C, RAY D K, WEST P C, BALZER C, BENNETT E M, CARPENTER S R, HILL J, MONFREDA C, POLASKY S, ROCKSTRÖM J, SHEEHAN J, SIEBERT S, TILMAN D, ZAKS D P M. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 2011, 478(7369): 337-342.
- [11] 刘志娟, 杨晓光, 吕硕, 王静, LIN X M. 东北三省春玉米产量差时空分布特征. *中国农业科学*, 2017, 50(9): 1606-1616.
- LIU Z J, YANG X G, LÜ S, WANG J, LIN X M. Spatial-temporal variations of yield gaps of spring maize in northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(9): 1606-1616. (in Chinese)
- [12] 徐宗贵, 孙磊, 王浩, 王淑兰, 王小利, 李军. 种植密度对旱地不同株型春玉米品种光合特性与产量的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(13): 2463-2475.
- XU Z G, SUN L, WANG H, WANG S L, WANG X L, LI J. Effects of different planting densities on photosynthetic characteristics and yield of different variety types of spring maize on dryland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(13): 2463-2475. (in Chinese)
- [13] 刘恩科, 赵秉强, 胡昌浩, 李秀英, 李燕婷. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 789-794.
- LIU E K, ZHAO B Q, HU C H, LI X Y, LI Y T. Effects of long-term nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer applications on maize yield and soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5): 789-794. (in Chinese)
- [14] 张万旭, 明博, 王克如, 刘朝巍, 侯鹏, 陈江鲁, 张国强, 杨京京, 车淑玲, 谢瑞芝, 李少昆. 基于品种熟期和籽粒脱水特性的机收粒玉米适宜播期与收获期分析. *中国农业科学*, 2018, 51(10): 1890-1898.
- ZHANG W X, MING B, WANG K R, LIU C W, HOU P, CHEN J L, ZHANG G Q, YANG J J, CHE S L, XIE R Z, LI S K. Analysis of sowing and harvesting allocation of maize based on cultivar maturity and grain dehydration characteristics. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(10): 1890-1898. (in Chinese)
- [15] 郑洪建, 董树亭, 王空军, 郭玉秋, 胡昌浩, 张吉旺. 生态因素对玉米品种产量影响及调控的研究. *作物学报*, 2001, 27(6): 862-868.
- ZHENG H J, DONG S T, WANG K J, GUO Y Q, HU C H, ZHANG J W. Effects of ecological factors on maize (*Zea mays* L.) yield of different varieties and corresponding regulative measure. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 862-868. (in Chinese)
- [16] ÅNGSTRÖM A. Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1924, 50: 121-125.
- [17] YAN D, ZHU Y, CAO W. A knowledge model for selection of suitable variety in rice production. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(4): 20-25.
- [18] 赖荣生, 余海龙, 黄菊莹. 作物气候生产潜力计算模型研究述评. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 11-14.
- LAI R S, YU H L, HUANG J Y. Review on the calculation model of crop climate production potential. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 11-14. (in Chinese)
- [19] 张宾, 赵明, 董志强, 陈传永, 孙锐. 作物产量“三合结构”定量表达及高产分析. *作物学报*, 2007, 33(10): 1674-1681.
- ZHANG B, ZHAO M, DONG Z Q, CHEN C Y, SUN R. “Three Combination Structure” quantitative expression and high yield analysis in crops. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(10): 1674-1681. (in Chinese)
- [20] 许大全. 光合速率, 光合效率与作物产量. *生物学通报*, 1999(8): 8-10.
- XU D Q. Photosynthetic rate, photosynthetic efficiency with crop yield. *Bulletin of Biology*, 1999(8): 8-10. (in Chinese)
- [21] MENG Q F, HOU P, WU L, CHEN X P, CUI Z L, ZHANG F S. Understanding production potentials and yield gaps in intensive maize production in China. *Field Crops Research*, 2013, 143(S): 91-97.
- [22] MUELLER N D, GERBER J S, JOHNSTON M, RAY D K, RAMANKUTTY N, FOLEY J A. Corrigendum: Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 2013, 494(7437): 390-390.

- [23] 范兰, 吕昌河, 于伯华, 王涛. 华北平原小麦-玉米两作生产潜力与产量差. 中国农学通报, 2016, 32(9): 33-40.
- FAN L, LÜ C H, YU B H, WANG T. Yield potential and yield gap of wheat-maize cropping system in the North China Plain. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(9): 33-40. (in Chinese)
- [24] 孙宏勇, 张喜英, 陈素英, 王彦梅, 邵立威, 高丽娜. 气象因子变化对华北平原夏玉米产量的影响. 中国农业气象, 2009, 30(2): 215-218.
- SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, WANG Y M, SHAO L W, GAO L N. Effect of meteorological factors on grain yield of summer maize in the North China Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2): 215-218. (in Chinese)
- [25] 刘淑云, 董树亭, 胡昌浩, 白萍, 吕新. 玉米产量和品质与生态环境的关系. 作物学报, 2005, 31(5): 571-576.
- LIU S Y, DONG S T, HU C H, BAI P, LÜ X. Relationship between ecological environment and maize yield and quality. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(5): 571-576. (in Chinese)
- [26] 刘伟, 吕鹏, 苏凯, 杨今胜, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 孙庆泉. 种植密度对夏玉米产量和源库特性的影响. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1737-1743.
- LIU W, LÜ P, SU K, YANG J S, ZHANG J W, DONG S T, LIU P, SUN Q Q. Effects of planting density on the grain yield and source-sink characteristics of summer maize. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(7): 1737-1743. (in Chinese)
- [27] 赵鹏飞. 小麦/玉米轮作体系农户产量差定量及其缩减途径[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- ZHAO P F. Quantifying and closing yield gaps for winter wheat and summer maize rotation in smallholder farming system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [28] ZHANG W, CAO G, LI X, ZHANG H Y, WANG C, LIU Q Q, CHEN X P, CUI Z L, SHEN J B, JIANG R F, MI G H, MIAO Y X, ZHANG F S, DOU Z X. Closing yield gaps in China by empowering smallholder farmers. *Nature*, 2016, 537(7622): 671-674.
- [29] SHEN J B, CUI Z L, MIAO Y X, MI G H, ZHANG H Y, FAN M S, ZHANG C C, JIANG R F, ZHANG W F, LI H G, CHEN X P, LI X L, ZHANG F S. Transforming agriculture in China: From solely high yield to both high yield and high resource use efficiency. *Global Food Security*, 2013, 2(1): 1-8.
- [30] 崔晓朋, 郭家选, 刘秀位, 张喜英, 孙宏勇. 不同种植模式对夏玉米光能利用率和产量的影响. 华北农学报, 2013, 28(5): 231-238.
- CUI X P, GUO J X, LIU X W, ZHANG X Y, SUN H Y. Effect of different planting patterns on radiation use efficiency and yield of summer maize. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(5): 231-238. (in Chinese)
- [31] 卢其尧. 我国水稻生产光温潜力的探讨. 农业气象, 1980(1): 1-12.
- LU Q Y. Discussion on the potential of light and temperature in rice production in China. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1980(1): 1-12. (in Chinese)
- [32] 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 & Products*, 2007, 25(3): 239-247.
- [33] TOLLENAAR R A E M, LEE E. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research*, 2002, 75(2): 161-169.
- [34] 许靖, 刘淑萍, 孙志梅, 靳小利, 彭正萍, 张阔, 沙晓晴. 不同产量水平的玉米田养分利用效应比较. 中国土壤与肥料, 2011(4): 30-34.
- XU J, LIU S P, SUN Z M, JIN X L, PENG Z P, ZHANG K, SHA X Q. Comparison of nutrient use efficiency in maize field of different yields levels. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(4): 30-34. (in Chinese)
- [35] 谢瑞芝, 李潮海, 周苏玫, 张根峰. 超高产夏玉米生长机制研究. 河南农业大学学报, 1999, 33(1): 11-16.
- XIE R Z, LI C H, ZHOU S M, ZHANG G F. Study on growth mechanism of super-high yield summer maize. *Journal of Henan Agricultural University*, 1999, 33(1): 11-16. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)