

# 年际气象差异对西南丘陵区玉米物质积累与产量的影响

李强<sup>1</sup> 孔凡磊<sup>2</sup> 袁继超<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>重庆文理学院特色植物研究院/重庆市特种植物协调创新中心/重庆经济植物生物技术重点实验室, 402160, 重庆永川;

<sup>2</sup>四川农业大学农学院/农业农村部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 611130, 四川成都)

**摘要** 基于2011-2016年大田试验和气象数据资料,研究了年际气象差异对西南丘陵区玉米物质积累与产量的影响,以期对西南丘陵区玉米生产的高产稳产提供理论支持。结果表明:西南丘陵地区雨热资源丰富,但气象因素存在明显的年际波动,降水量波动最大,积温波动最小,且玉米各生育阶段降水、积温和光照配置也有所不同。积温是该区玉米生育前期形态建成的主要限制因子,花前积温、花后日照和降水共同调控玉米的干物质积累与转运,而后期产量形成是各气象因子综合作用的结果。花后日照直接影响玉米穗部性状(穗长、穗粗)和产量构成(穗粒数、千粒重),从而调控玉米的产量;花后积温和降水则通过影响玉米的穗粒数和千粒重对最终产量产生影响。因此,西南丘陵地区玉米在生产过程中可以通过调整播期,适当提高生育前期积温,促进植株生长发育,提高源器官的形态建成,为花后光合生产奠定良好的基础;减少花后降水量,提高花后日照时数,改善籽粒灌浆,提高籽粒充实度,从而实现高产。

**关键词** 西南丘陵区; 玉米; 气象因子; 干物质积累; 产量

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



西南丘陵区地处我国四川腹地,位于东经97°21'~108°33'和北纬26°03'~34°19',属亚热带湿润气候<sup>[1]</sup>。西南丘陵区年均温16℃~18℃,10℃以上活动积温5 500℃~6 000℃,无霜期280~350d,年降水量900~1 000mm<sup>[2-3]</sup>。西南丘陵区热量丰富,年降水充沛,是我国西南地区重要的玉米生产基地,年产量占我国西南地区玉米总产的40%以上<sup>[4]</sup>。

玉米是重要的粮食、饲料和工业原料作物,是我国第一大粮食作物,在保障国家粮食安全方面作用巨大<sup>[5-6]</sup>。玉米是C<sub>4</sub>植物,其植株90%以上是靠光合作用制造有机物,光合作用是植物获得能量和赖以生存的基础,光合同化能力的高低直接影响玉米的产量。因此玉米的生长发育、物质积累及产量除受基因型<sup>[7-8]</sup>、栽培措施<sup>[9-10]</sup>和病虫害等因素影响外,还与气象条件密切相关<sup>[11-12]</sup>。刘淑云等<sup>[13]</sup>研究表明,生育期内积温、花后日照时数和花后日均光照是引起不同生态区玉米干物质积累、籽粒产量和蛋白质含量的主要因子。刘永红等<sup>[14]</sup>研究花

期水分对玉米籽粒发育的影响表明,与正常降水相比,花期缺水使得最大灌浆速率下降且推迟出现,干物质线性增加期缩短,粒重降低,并影响产量。刘素玲<sup>[15]</sup>研究同一玉米品种不同生态条件下的产量差异,发现不同生态区玉米产量差异达极显著水平,主要是玉米花后日照时数不足,光合作用减弱,籽粒灌浆速率减慢,籽粒灌浆期缩短且不能正常成熟,导致产量下降。温度、降水与日照均对玉米产量有重要影响,要使玉米高产稳产,除了良种与良法相结合,还要充分利用气候生态资源<sup>[16-18]</sup>。

西南丘陵地区雨热资源丰富,但时空分布不均,年际差异大,气象因子的年际波动成为限制该区玉米高产稳产的重要因素之一<sup>[1,3-4]</sup>。国内外关于玉米产量与气象因子关系的研究多是对产量和气象因素进行综合评价或是根据统计数据对玉米产量和气象因子进行一般性总结<sup>[19-22]</sup>,而缺乏结合玉米生育阶段深入分析气象因子对玉米物质积累与产量影响的报道。因此,本研究以西南丘陵地区大面积推

作者简介:李强,主要从事作物生理生态研究, E-mail: liqiangxj@163.com

袁继超为通信作者,主要从事作物高产优质高效栽培技术研究, E-mail: yuanjichao5@163.com

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费(201503127);国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD04B13);四川省科技支撑计划(2014NZ0040)和四川省玉米产业技术体系岗位专家项目

收稿日期:2019-11-22;修回日期:2019-11-28;网络出版日期:2020-07-24

广种植的玉米杂交种正红 311 和先玉 508 为试验材料, 在典型的西南丘陵区四川省简阳市进行连续 6 年的田间试验, 研究了年际气象因子差异及其对玉米物质积累与产量的影响, 以期对西南丘陵区玉米生产的高产稳产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2011–2016 年在四川省简阳市芦葭镇英明村 (104.53°E, 30.38°N, 海拔 429m) 进行。土壤基础肥力: pH 值 8.61, 有机质 20.93g/kg, 全氮 1.82g/kg, 全磷 2.74g/kg, 全钾 3.11g/kg, 速效氮 228.23mg/kg, 速效磷 55.32mg/kg, 速效钾 55.34mg/kg。

### 1.2 试验设计

选用西南丘陵地区大面积推广种植的玉米品种正红 311 和先玉 508。3 月下旬直播, 行穴距为 (1.5m+0.5m)×0.2m, 种植密度 50 000 株/hm<sup>2</sup>, 每小区面积 20m<sup>2</sup> (4m×5m), 每小区种植 4 行, 每行种 25 株, 重复 3 次。施肥量为纯氮 225kg/hm<sup>2</sup>, 底肥: 苗肥: 穗肥 = 4: 1: 5, 另施过磷酸钙 600kg/hm<sup>2</sup> 和氯化钾 150kg/hm<sup>2</sup> 作底肥。播前灌水覆膜, 其他栽培管理措施同当地高产田。

### 1.3 取样与测定

株高: 于吐丝期每小区测定长势一致的 10 株玉米的株高, 取其平均值。

叶面积指数: 于吐丝期每小区取代表性植株 4 株, 按长宽系数法测定叶面积, 并计算叶面积指数。

干物质积累: 分别于吐丝期和成熟期每小区取代表性植株 4 株, 按器官 (茎鞘、叶、苞叶 + 穗轴和籽粒) 分样, 于 105℃ 下杀青 30min, 然后 80℃ 烘干至恒重后称重。干物质相关指标计算公式<sup>[23-25]</sup>: 花前干物质 = 吐丝期营养器官干重 - 成熟期营养器官干重, 花后干物质同化 = 成熟期籽粒干重 - 花前干物质转运量, 花前干物质转运率 = (花期干物质转运 × 100) / 吐丝期营养器官干重, 花前干物质转运贡献率 = (花前干物质转运量 × 100) / 成熟期籽粒干重, 花后干物质同化贡献率 = (花后干物质同化量 × 100) / 成熟期籽粒干重。

产量: 收获前统计每小区有效穗数, 各小区选

取连续 20 株玉米植株进行考种, 考察穗行数、行粒数、穗粒数和千粒重等, 然后分小区实收计产。

气象数据由四川省气象局气象信息中心气象资料室提供。

### 1.4 资料整理

以 2 个品种各指标平均数为基础数据与各阶段气象因子进行相关分析, 采用 Excel 2007 和 SPSS 21.0 数据分析软件进行数据统计分析。

## 2 结果与分析

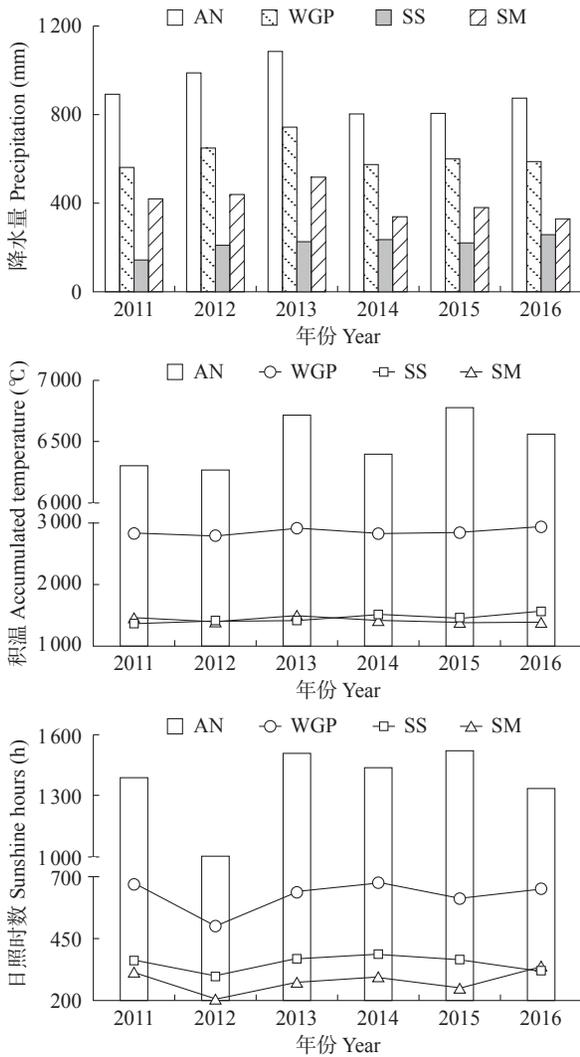
### 2.1 试验地年际气象因子差异

试验所在地气象因子在年际间和玉米生育期间均存在明显的差异 (图 1)。从年际间气象因子平均状况来看, 2013 年年积温、年降水量和年日照时数均高于其他年份, 平均较其他各年分别高 3.28%、19.52% 和 10.27%。玉米全生育期内, 2013 年降水量最高 (743.0mm), 2016 年积温最高 (2 945.8℃), 2014 年日照时数最高 (677.4h); 2011 年降水量最低, 而积温和日照时数均在 2012 年最低。

玉米播种—吐丝与吐丝—成熟 2 个时期气象因子在年际间也存在明显差异。2016 年播种—吐丝期降水量与积温及吐丝—成熟期日照时数在各年中均最高分别达 258.9mm、1 563.2℃ 和 334.0h, 而吐丝—成熟期降水量和积温在各年中最低分别为 329.5mm 和 1 382.6℃。2011 年播种—吐丝期降水量与积温均在各年中最低, 分别为 143.7mm 和 1 369.3℃, 尤其是降水量较各年平均低 33.52%。2012 年花前、花后日照时数均在各年中最低, 尤其是花后日照时数仅 202h, 较平均值低 26.90%。

### 2.2 玉米株高与叶面积指数的年际变化

玉米株高和叶面积指数年际间差异显著 (图 2), 正红 311 年际间变异系数达 2.82% 和 5.77%, 先玉 508 分别为 6.85% 和 5.93%。2 个品种株高和叶面积指数年际变化趋势一致, 表明年际气象因子差异是引起玉米株高和叶面积指数年际变化的主要因素。2 个品种株高和叶面积指数均在 2016 年最高, 2012 年最低。2016 年正红 311 和先玉 508 株高较各年株高平均值分别高出 4.55% 和 5.57%, 叶面积指数分别高出 6.60% 和 6.15%。2012 年正红 311 和先玉 508 株高较各年株高平均值分别低 3.75% 和 13.20%, 叶面积指数分别低 8.08% 和 10.40%。

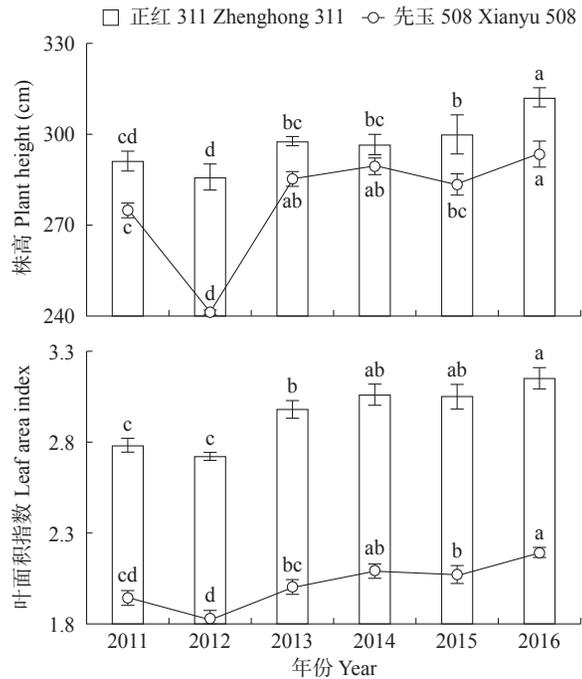


AN: 年际; WGP: 全生育期; SS: 播种 - 吐丝期; SM: 吐丝 - 成熟期  
AN: annual; WGP: whole growth stage; SS: sowing-silking stage; SM: silking-mature stage

图1 2011-2016年试验地气象资料  
Fig.1 Meteorological data of experimental site from 2011 to 2016

### 2.3 玉米干物质积累与转运的年际变化

玉米花前、花后干物质积累量及生物量在年际间均有显著差异(图3)。2012年2个品种花前和花后干物质积累量均显著低于其他各年,使得其生物量在各年中均最低。正红311花前、花后干物质积累量及生物量较各年平均分别低11.93%、12.21%和12.44%;先玉508分别低27.82%、14.73%和20.16%。2个品种花前干物质积累量均在2013年最高,分别达到6.40和5.55t/hm<sup>2</sup>,而2个品种花后干物质积累量和生物量均在2016年最高;正红311和先玉508花后干物质积累量较各年平均分别高出11.39%和21.21%,生物量分别高出9.39%和



不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同  
Different lowercase letters indicate significant difference  $P < 0.05$ . The same below

图2 不同年份的玉米株高与叶面积指数  
Fig.2 Plant height and leaf area index of maize in different years

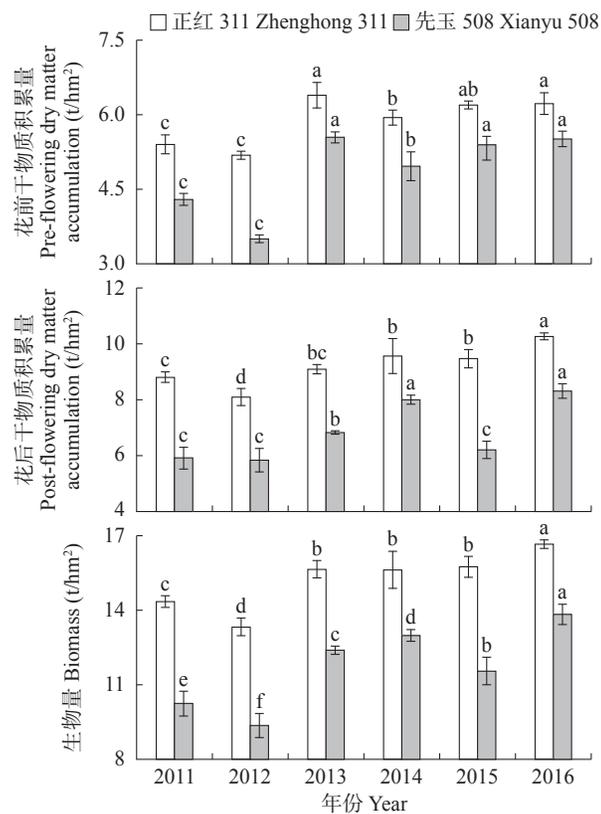


图3 年际间干物质积累差异  
Fig.3 Differences of dry matter accumulation in different years

18.03%。

花前干物质转运和花后干物质同化是作物产量形成的物质基础。表 1 结果表明，品种、播种年份及其互作效应均对玉米花前干物质转运和花后干物质同化有重要影响。正红 311 花前干物质转运量在 2011 年最高，先玉 508 在 2013 年最高，较各年平均值分别高 130.50% 和 36.53%；而 2 个品种花前干物质转运量的最低值均在 2016 年，平均值

分别为 42.34% 和 54.85%。2 个品种花后干物质同化量均在 2016 年最高，2012 年最低，2016 年正红 311 和先玉 508 花后干物质同化量较各年平均值分别高 14.60% 和 23.45%，2012 年则分别低 22.21% 和 25.10%。2 个品种花前干物质转运贡献率各年平均均为 11.60%，最高值达 20.17%；而花后干物质同化贡献率 2 个品种各年平均达 88.40%，最高值达 97.00%，表明花后干物质同化是玉米产量形成的主

表 1 年际间花前干物质转运与花后干物质同化差异

Table 1 Differences of pre-flowering dry matter translocation and post-flowering dry matter assimilation in different years

品种 Cultivar	年份 Year	DMT (t/hm <sup>2</sup> )	PDMT (t/hm <sup>2</sup> )	DMTE (%)	CAG (%)	CPAG (%)
正红 311	2011	1.32a	6.10d	24.31ab	17.73a	82.27d
Zhenghong 311	2012	0.60de	5.32ef	11.63de	10.34bc	89.66bc
	2013	0.50ef	7.26b	7.81efg	6.40cd	93.60ab
	2014	0.47ef	7.35b	7.85efg	5.97cd	94.03ab
	2015	0.30fg	7.16b	4.83fg	3.99d	96.01a
	2016	0.24g	7.84a	3.85g	3.00d	97.00a
先玉 508	2011	1.26a	4.98f	29.24a	20.17a	79.83d
Xianyu 508	2012	0.96b	3.99g	27.27ab	19.48a	80.52d
	2013	1.28a	5.38e	23.17b	19.29a	80.71d
	2014	0.89bc	5.93d	17.86c	13.04b	86.96c
	2015	0.73cd	5.12ef	13.72cd	12.49b	87.51c
	2016	0.52ef	6.58c	9.40def	7.28cd	92.72ab
<i>F</i> 值	品种 Cultivar (C)	51.30**	100.53**	28.29**	23.78**	23.78**
<i>F</i> -value	年份 Year (Y)	25.71**	23.40**	9.92*	7.20*	7.20*
	C×Y	4.75**	2.67*	3.31*	2.78*	2.78*

注：DMT：花前干物质转运量；PDMT：花后干物质同化量；DMTE：花前干物质转运率；CAG：花前同化籽粒贡献率；CPAG：花后同化籽粒贡献率。同列中相同小写字母表示在  $P < 0.05$  水平下差异不显著。“\*”和“\*\*”分别代表在 0.05 和 0.01 水平下差异显著和极显著。下同  
 Note: DMT: pre-flowering dry matter translocation; PDMT: post-flowering dry matter assimilation; DMTE: pre-flowering dry matter translocation efficiency; CAG: contribution of pre-flowering assimilate to grain; CPAG: contribution of post-flowering assimilate to grain. Values followed by the same lowercase letters are no significantly different at 0.05 level. "\*" and "\*\*" indicate significant difference and extremely significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same below

要来源。

#### 2.4 玉米产量及其构成的年际差异

玉米产量及其构成、穗部性状均表现出明显的年际差异（表 2）。2 个品种各指标年际变化规律表现基本一致，2 个品种平均玉米产量年际间表现为 2016>2014>2013>2015>2011>2012。2016 年正红 311 和先玉 508 产量较各年平均值分别高出 13.14% 和 13.65%；2012 年较各年平均值分别低 16.06% 和 21.61%。2 个品种平均穗长和穗粗均表现为 2016 年最高，较各年平均值分别高 7.24% 和 2.03；2012 年最低，较各年平均值分别低 9.84% 和 1.76%。从产量构成因素看，2 个品种穗粒数与千粒重年际变化趋势基本一致，2 个品种平均穗粒数

年际间表现为 2016>2014>2013>2015>2011>2012，年际间差异达极显著水平，2016 年较各年平均高出 7.88%；千粒重年际间变化趋势为 2016>2013>2011>2014>2012>2015，2016 年较各年平均高出 2.58%。年际间产量变化趋势与穗粒数变化趋势一致，表明年际间穗粒数变化是引起产量差异的主要原因。

#### 2.5 气象因子与玉米生长及产量的相关性分析

2 个品种各指标平均值与各阶段气象因子的相关分析结果（表 3）表明，吐丝前各气象因子中积温与玉米物质积累和产量指标间相关性最高，与各指标相关系数绝对值的平均值达 0.748；且与叶面积指数、花前物质积累、生物量、花前物质转运量、

表2 年际间玉米产量和穗部性状变化  
Table 2 Changes of yield and panicle characters of maize in different years

品种 Cultivar	年份 Year	穗长 Ear length (cm)	穗粗 Ear diameter (cm)	穗粒数 Kernel number per ear	千粒重 1000-kernel weight (g)	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )
正红 311	2011	17.76bc	5.58a	470.11de	306.11bc	6 690.78ef
Zhenghong 311	2012	16.58ef	5.25bc	453.99ef	304.13cd	5 853.90g
	2013	17.93b	5.31b	495.51bc	310.26bc	7 194.02bc
	2014	18.18b	5.33b	509.02ab	307.17bc	7 444.27b
	2015	17.29cd	5.21bcd	484.43cd	295.71d	6 768.98de
	2016	19.34a	5.54a	521.31a	312.80abc	7 890.13a
先玉 508	2011	17.18cde	5.04de	414.24i	315.56ab	5 941.49g
Xianyu 508	2012	14.51g	4.97e	369.56j	309.17bc	4 803.90h
	2013	17.08de	5.08cde	433.07gh	312.13bc	6 557.02ef
	2014	17.23cd	5.05de	438.06fg	311.44bc	6 429.93f
	2015	16.21f	5.00e	423.27gh	307.95bc	6 071.88g
	2016	17.65bcd	5.08cde	463.24e	322.30a	6 964.87cd
<i>F</i> 值	品种 Cultivar (C)	27.18**	37.00**	227.93**	19.37**	141.61**
<i>F</i> -value	年份 Year (Y)	12.57**	1.76ns	27.23**	7.06*	68.37**
	C×Y	3.52*	5.49**	1.28ns	1.77ns	1.82ns

注：“ns”代表无显著差异

Note: "ns" indicates no significant difference

花后物质同化量、花前物质转运率、花前物质转运贡献率和穗粒数等指标相关性均达显著水平；而日照时数与各指标间相关性最低，与各指标相关系数绝对值的平均值为 0.258，且与各指标相关性均

未达显著差异水平。吐丝后以日照时数与产量性状最高，与各指标相关系数绝对值的平均值达 0.588，从全生育期看则是积温与玉米物质积累和产量性状相关系数最高，与各指标相关系数绝对值的平均值

表3 气象因子与玉米干物质积累和产量的相关系数  
Table 3 Correlation coefficients of dry matter accumulation and yield of maize with meteorological factors

指标 Index	降水量 Precipitation (mm)			积温 Accumulated temperature (°C)			日照时数 Sunshine hours (h)		
	WGP	SS	SM	WGP	SS	SM	WGP	SS	SM
株高 Plant height (cm)	-0.173	0.494	-	0.774	0.730	-	0.791	0.453	-
叶面积指数 Leaf area index	-0.203	0.705	-	0.677	0.883*	-	0.612	0.331	-
花前物质积累 DMA (t/hm <sup>2</sup> )	0.208	0.590	-	0.782	0.941**	-	0.589	0.466	-
花后物质积累 PDMA (t/hm <sup>2</sup> )	-0.246	0.714	-0.637	0.683	0.587	-0.267	0.617	0.203	0.716
生物量 Biomass (t/hm <sup>2</sup> )	-0.051	0.710	-0.447	0.787	0.848*	-0.114	0.652	0.337	0.668
花前物质转运量 DMT (t/hm <sup>2</sup> )	0.062	-0.901*	0.564	-0.353	-0.828*	0.762	0.125	0.244	-0.002
花后物质同化量 PDMT (t/hm <sup>2</sup> )	-0.145	0.630	-0.493	0.774	0.836*	-0.091	0.729	0.372	0.751
花前物质转运率 DMTE (%)	-0.003	-0.911*	0.508	-0.519	-0.858*	0.579	-0.107	0.017	-0.162
花前转运贡献率 CAG (%)	0.116	-0.895*	0.614	-0.524	-0.919**	0.617	-0.176	0.022	-0.262
花后同化贡献率 CPAG (%)	-0.116	0.895*	-0.614	0.524	0.919**	-0.617	0.176	-0.022	0.262
穗长 Ear length (cm)	-0.239	0.289	-0.392	0.777	0.627	0.169	0.877*	0.374	0.955**
穗粗 Ear diameter (cm)	-0.338	-0.191	-0.218	0.575	0.225	0.284	0.670	0.039	0.908*
穗粒数 Kernel number per ear	-0.148	0.597	-0.478	0.791	0.821*	-0.047	0.755	0.363	0.793
千粒重 1000-kernel weight (g)	-0.026	0.238	-0.769	0.724	0.452	-0.562	0.426	-0.216	0.751
产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	-0.104	0.513	-0.688	0.820*	0.740	-0.779	0.806*	0.409	0.831*
平均绝对值 Average of absolute value	0.145	0.618	0.535	0.672	0.748	0.407	0.541	0.258	0.588

注：WGP：全生育期；SS：播种 - 吐丝期；SM：吐丝 - 成熟期

Note: WGP: whole growth stage; SS: sowing-silking stage; SM: silking-mature stage

为 0.672。

从气象因子与玉米穗部性状、产量及其构成的相关分析来看, 全生育期和花后日照时数对穗长 (0.877、0.955)、穗粗 (0.670、0.908) 和穗粒数 (0.755、0.793) 均有重要影响; 而千粒重和产量与花后降水量、花后积温均呈明显的负相关。这主要是由于玉米吐丝前后的日照情况影响玉米穗发育及生长, 进而对穗长、穗粗和穗粒数的形成产生影响; 而花后过多的降水量不利于光合产物的积累, 过高的积温会引起生育后期功能叶早衰, 导致光合能力下降, 影响玉米籽粒灌浆, 进而影响千粒重和产量。玉米产量与各阶段积温和日照时数相关性均较高, 表明积温和日照时数是西南丘陵区玉米产量的主要限制气象因子, 特别是日照时数影响玉米穗粒数和千粒重, 并最终影响产量。

### 3 讨论

玉米生长和产量除受栽培措施影响外, 气象因子也是重要的影响因素<sup>[10-12]</sup>。西南丘陵地区热量充足, 年均温 16℃~18℃, 雨量充沛, 年降水量 900~1 000mm, 为典型的雨养农业区, 春玉米是该区旱地土壤种植的主要春季作物。气象因子时空分布不均, 年际差异大, 是影响西南丘陵区玉米生产的重要因素<sup>[1,4]</sup>。本研究结果表明, 西南丘陵区气象因子年际差异明显, 降水量波动最大, 积温波动最小, 且玉米各生育阶段降水、积温和光照配置也有所不同, 因此, 气象因子是影响西南丘陵区玉米高产稳产的重要原因。

株高和叶面积指数主要取决于品种的遗传和生理生化特性, 同时也受种植方式和环境条件的影响<sup>[26]</sup>。李海燕等<sup>[22]</sup>研究表明, 引起玉米株高年际变化的根本原因是降水, 降水量是影响叶面积指数的重要因子, 积温、日照时数对二者的影响均较小。本试验结果表明, 积温对西南丘陵区玉米株高和叶面积指数均有重要影响, 而降水量与日照时数对二者的影响均相对较小。本研究结果与李海燕等<sup>[22]</sup>不尽一致, 主要是由于在西南丘陵区玉米栽培普遍使用地膜覆盖, 地膜覆盖能有效降低水分蒸发, 提高土壤墒情, 提高水分利用率, 从而减少降水量对玉米形态建成的影响, 因此, 积温是西南丘陵区玉米植株形态建成的主要限制因子。

花前干物质转运和花后干物质同化是作物产

量形成的物质基础, 而气象因子对玉米花前干物质转运和花后干物质同化均有重要影响<sup>[27]</sup>。本试验结果表明, 西南丘陵区玉米干物质积累与转运是各阶段各气象因子综合作用的结果。吐丝前积温与花前干物质积累量、生物量、花前物质转运量、花后物质同化量均达显著水平; 降水量也对干物质积累、花前干物质转运量和花后干物质同化量也有重要影响; 而日照主要影响花后干物质的积累和同化。2012 年花前降水量高、积温低、日照时数少, 使得其花前干物质积累量显著低于其他各年, 而花后日照时数少则影响其花后干物质生产; 使其花后干物质积累量和干物质同化量均显著低于其他年份, 最终生物量显著低于其他各年。吐丝前积温影响玉米株高和叶面积指数, 进而影响其花前干物质积累与转运; 而吐丝后日照时数和降水量影响玉米花后干物质积累与同化, 进而影响玉米产量的形成。可见花前积温、花后日照和降水是影响西南丘陵区玉米干物质积累与分配的主要气象因子, 这与李金建等<sup>[3]</sup>和王明田等<sup>[4]</sup>研究结果一致。

气象因子影响玉米的形态建成, 影响干物质积累与转运, 进而影响玉米的产量及其构成<sup>[11,15]</sup>。刘淑云等<sup>[13]</sup>指出, 日照时数是影响玉米产量的决定性气象因子, 花后日照不足影响干物质积累量及其在籽粒中的分配比例, 籽粒灌浆速率下降, 籽粒体积减小, 导致千粒重下降, 产量显著降低。本试验结果表明, 花后充足的日照能够提高玉米的物质积累, 改善玉米穗部性状 (穗长和穗粗) 和产量构成 (穗粒数和千粒重), 从而提高玉米产量; 花后过多的降水和过高的积温则会影响光合产物的积累, 籽粒灌浆速率降低和灌浆期缩短, 千粒重下降, 导致产量降低。因此, 西南丘陵区玉米产量是各气象因子综合作用的结果, 日照直接影响最终产量的形成; 而积温和降水则通过影响玉米穗粒数和千粒重对最终产量产生影响, 这与杨国庆<sup>[28]</sup>研究结果一致。

### 4 结论

西南丘陵区雨热资源丰富, 但气象因素存在明显的年际波动, 降水量波动最大, 积温波动最小, 且玉米各生育阶段降水、积温和光照配置也有所不同。积温是该地区玉米生育前期形态建成的主要限制因子, 花前积温、花后日照和降水则共同调控玉米的干物质积累与转运, 而后期产量形成是各气象

因子综合作用的结果。花后日照直接影响玉米穗部性状(穗长和穗粗)和产量构成(穗粒数和千粒重),从而调控玉米的产量;花后积温和降水量则通过影响玉米的穗粒数和千粒重最终对产量产生影响。在西南丘陵区玉米生产过程中可以通过调整播期,适当提高生育前期积温,促进植株生长发育,提高源器官的形态建成,为花后光合生产奠定良好的基础;错开雨季,保证充足的日照,改善籽粒灌浆,提高籽粒充实度,从而实现高产。

#### 参考文献

- [1]代姝玮,杨晓光,赵孟,等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化Ⅱ. 西南地区农业气候资源时空变化特征. 应用生态学报, 2011, 22(2): 442-452.
- [2]周长艳,岑思弦,李跃清,等. 四川省近50年降水的变化特征及影响. 地理学报, 2011, 66(5): 619-630.
- [3]李金建,张菡,王锐婷,等. 基于湿润指数的四川盆地农业干旱时空变化特征. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(1): 129-136.
- [4]王明田,张玉芳,马均,等. 四川省盆地玉米干旱灾害风险评估及区划. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2803-2811.
- [5]Ren B Z, Li X, Dong S T, et al. Soil physical properties and maize root growth under different tillage systems in the North China Plain. *The Crop Journal*, 2018(6): 669-676.
- [6]Bian D H, Jia G P, Cai L J, et al. Effects of tillage practices on root characteristics and root lodging resistance of maize. *Field Crops Research*, 2016, 185: 89-96.
- [7]Han J N, Wang L F, Zheng H Y, et al. ZD958 is a low nitrogen-efficient maize hybrid at the seedling stage among five maize and two teosinte lines. *Planta*, 2015, 242: 935-949.
- [8]朱韵哲,马国胜,张仁和,等. 不同产量水平玉米品种光合产物的积累与分配比较. 西北农业学报, 2013, 22(5): 20-24.
- [9]李尚中,樊廷录,王勇,等. 不同覆膜集雨种植方式对旱地玉米叶绿素荧光特性、产量和水分利用效率的影响. 应用生态学报, 2014, 25(2): 458-466.
- [10]宋振伟,郭金瑞,任军,等. 耕作方式对东北雨养区农田水热与玉米光合特性的影响. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1900-1906.
- [11]张镇涛,杨晓光,高继卿,等. 气候变化背景下华北平原夏玉米适宜播期分析. 中国农业科学, 2018, 51(17): 3258-3274.
- [12]张睿昊,刘海军. 气象因子和土壤水分变化对河北省夏玉米产量的影响. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 133-146.
- [13]刘淑云,董树亭,胡昌浩,等. 玉米产量和品质与生态环境的关系. 作物学报, 2005, 31(5): 571-576.
- [14]刘永红,何文铸,杨勤,等. 花期干旱对玉米籽粒发育的影响. 核农学报, 2007, 21(2): 181-185.
- [15]刘素玲. 生态因子对玉米产量构成因素的影响分析. 陕西农业科学, 2007(4): 43-46.
- [16]侯玉虹,陈传永,郭志强,等. 春玉米不同产量群体叶面积指数动态特征与生态因子资源量的分配特点. 应用生态学报, 2009, 20(1): 135-142.
- [17]曹士亮,于芳兰,王成波,等. 降水量与积温对玉米气象产量影响的综合分析. 作物杂志, 2009(3): 62-65.
- [18]李海燕. 年际间气象因子变化对玉米生长发育及产量的影响. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [19]李绍长,白萍,吕新,等. 不同生态区及播期对玉米籽粒灌浆的影响. 作物学报, 2003, 29(5): 775-778.
- [20]肖荷霞,陈建忠,席国成,等. 黑龙江类型区气象生态因子与夏玉米产量性状关系的研究. 华北农学报, 1999, 14(S1): 126-130.
- [21]姚小英,李晓薇,王禹锡,等. 西北干旱区旱地玉米叶面积指数与气象因子及生物量的关系. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1881-1889.
- [22]李海燕,史振声,李凤海,等. 玉米群体结构对年际间气象因子变化的反应. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 50-56.
- [23]Hamzei J. Nitrogen rate applied affects dry matter translocation and performance attributes of wheat under deficit irrigation. *Journal of Plant Nutrition*, 2018, 41(7): 1-11.
- [24]周琦,张富仓,李志军,等. 施氮时期对夏玉米生长、干物质转运与产量的影响. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 76-82.
- [25]Ali S, Xu Y Y, Jia Q M, et al. Cultivation techniques combined with deficit irrigation improves winter wheat photosynthetic characteristics, dry matter translocation and water use efficiency under simulated rainfall conditions. *Agricultural Water Management*, 2018, 142: 75-83.
- [26]Li Q, Kong F L, Zhang J L, et al. Differential responses of maize hybrids for growth and nitrogen utilization to applied nitrogen. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2019, 6: 1147-1158.
- [27]邓飞,王丽,刘丽,等. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响. 作物学报, 2012, 38(10): 1930-1942.
- [28]杨国庆. 我国玉米生产效率差异性研究—基于四个玉米主产区的实证分析. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.

## Effects of Interannual Meteorological Factors on Maize Dry Matter Accumulation and Yield in the Hilly Area of Southwest China

Li Qiang<sup>1</sup>, Kong Fanlei<sup>2</sup>, Yuan Jichao<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup>Institute of Special Plants, Chongqing University of Arts and Sciences/Chongqing Collaborative Innovation Center of Special Plant Industry/Chongqing Key Laboratory of Economic Plant Biotechnology, Yongchuan 402160, Chongqing, China; <sup>(2)</sup>College of Agronomy, Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract** Based on the field experiments and meteorological data from 2011 to 2016, the effects of interannual meteorological factors on dry matter accumulation and yield of maize in the hilly area of Southwest China were studied to provide theoretical support for the high and stable yield of maize production in the hilly area of Southwest

China. The results showed that there were abundant water and heat resources in the hilly area of Southwest China, but there were obvious interannual fluctuations in meteorological factors, with the largest fluctuation in precipitation and the smallest fluctuation in accumulated temperature, the distribution of precipitation, accumulated temperature and sunshine hours at different growth stages of maize were also different. Accumulated temperature was the main limiting factor for maize morphological formation during the early growth stage. The accumulated temperature during pre-flowering and sunshine and precipitation during post-flowering jointly regulated the dry matter accumulation, whereas different meteorological factors affected the yield traits. Therefore, the production of maize in the hilly area of Southwest China can be improved by adjusting the sowing date. High accumulated temperature during the early stage of maize promotes plant growth and development. Reducing precipitation and increasing sunshine hours during post-flowering can improve the grain filling and increase yield.

**Key words** Hilly area of southwest China; Maize; Meteorological factors; Dry matter accumulation; Yield