

郭建平, 栾青, 王婧瑄, 等. 玉米冠层对降水的截留模型构建. 应用气象学报, 2020, 31(4): 397-404.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200402

# 玉米冠层对降水的截留模型构建

郭建平<sup>1)2)\*</sup> 栾青<sup>3)</sup> 王婧瑄<sup>1)</sup> 张丽敏<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>(中国气象科学研究院, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(南京信息工程大学气象灾害预警预报与评估协同创新中心, 南京 210044)

<sup>3)</sup>(山西省气候中心, 太原 030006)

<sup>4)</sup>(辽宁省葫芦岛市气象局, 葫芦岛 125000)

## 摘 要

降水资源是农作物的主要水分来源,农作物通过吸收土壤中的水分维持正常的生长发育,但由于未考虑农作物冠层对降水截留作用,在水资源评估和农田水分平衡研究中往往高估降水作用。该文通过 2018 年玉米生长季在辽宁锦州农业气象试验站开展的降水模拟试验系统分析了玉米冠层对降水的截留效应,结果表明:在降水量一定条件下,玉米冠层截留量与叶面积指数的二次多项式拟合相关最佳;在叶面积指数一定条件下,玉米冠层截留量与降水量的幂函数拟合相关最佳。综合叶面积指数和降水量分析表明:玉米冠层截留量与叶面积指数平方及降水量对数函数拟合呈正相关。根据我国玉米传统种植方式,高产玉米的叶面积指数最大一般为 5~6,因此,对一次降水的最大截留量通常约为 1.5~2.3 mm,当叶面积指数小于 1 时,对降水的截留可忽略不计。

**关键词:** 玉米冠层; 降水截留; 拟合模型

## 引 言

农作物通过吸收土壤中水分维持正常的生长发育,因此,通常认为只有被保存在土壤中的水分才对农作物有效。一次降水过程中部分降水会被农作物冠层截留,并通过叶面蒸发散失到空气中,无法保存到土壤中,这部分降水对农作物生长无效,特别是在降水量较小时,无效降水比例高,导致降水作用被高估。在农业干旱的指标构建<sup>[1-4]</sup>、监测评估<sup>[5-9]</sup>和风险评估<sup>[10]</sup>中,由于未考虑降水的截留,往往使干旱评估结果偏轻;而在农业气候资源评估中,如果不考虑降水的截留,往往使降水适宜度和气候适宜度评估结果偏高<sup>[11-14]</sup>。但在实际工作中很难定量计算降水的截留量,严重制约降水对农作物的影响评估。因此,如何准确估算农作物冠层对降水的截留对于降水有效性评估和农田水分平衡计算有重要理论意

义和实用价值。

农作物对降水的截留与农作物冠层和降水量关系显著,但目前关于降水的截留作用研究报道多为树木,如贵州喀斯特地区针叶林、阔叶林及马尾松林冠降水截留分配特征<sup>[15-17]</sup>,祁连山西水林区灌木林降水截留特征<sup>[18]</sup>,井冈山国家级自然保护区杉木林冠层截留模型<sup>[19]</sup>,辽河源自然保护区油松林、山杨林和华北落叶松林的穿透雨、树干茎流和林冠截留及对降水再分配的影响<sup>[20]</sup>。刘春霞等<sup>[21]</sup>以位于西南亚热带的天然混交林为研究对象,利用 2009 年 4—10 月的 60 场林冠截留观测资料,对降水再分配特征进行综合分析,并应用修正的 Gash 模型对 6—8 月的 17 场林冠截留量进行模拟。杨文强等<sup>[22]</sup>以黄土高原沟壑区的典型代表长武塬为研究区,基于对 45 场降水的观测资料,分析苹果林的林冠截留特征,量化林冠对降水的分配比例。Rutter 等<sup>[23]</sup>和 Gash 等<sup>[24]</sup>建立的林冠截留模型因物理意义明确、涵

2020-03-19 收到, 2020-04-30 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院科技发展基金(2019KJ006)

\* 邮箱: gjp@cma.gov.cn

盖面广、误差小而被广泛应用。农作物对降水的截留研究报道相对较少,刘战东等<sup>[25]</sup>建立了基于叶面积指数、降水强度和降水历时 3 个参数的夏玉米降雨冠层截留特征量估算方程。也有研究采用室内模拟降雨法测定不同降水强度、不同叶面积指数下玉米冠层下穿透雨和茎秆流,采用喷雾法测定玉米不同生长阶段的冠层截留,明确三者与玉米叶面积指数及降水强度关系<sup>[26]</sup>,探讨模拟降水条件下谷子和冬小麦植株对降水再分配过程的影响<sup>[27]</sup>。韩雪等<sup>[28]</sup>则利用自然降水分析夏玉米的降水截留特征。上述研究主要明确了农作物不同时期的饱和截留量,未能系统分析不同降水量和生长时期(叶面积)下农作物的截留作用。农作物冠层截留量估算方法不同,结果也不尽相同, Van Dijk 等<sup>[29]</sup>采用直接测定的方法,测定了印度尼西亚西瓜哇高地木薯、玉米和水稻两个生长季节和连作季节的混合农业种植系统中的截留损失分别为 18% 和 8%; Lamm 等<sup>[30]</sup>、Steiner 等<sup>[31]</sup>、王迪等<sup>[32]</sup>和郝芝建等<sup>[33]</sup>运用水量平衡法得出玉米冠层的截留量从 0.8 mm 到 3.6 mm 不等; Haynes<sup>[34]</sup>通过实测认为玉米和大豆冠层截留量分别约占总降水量的 6.9% 和 14.6%。由此可见,对于农作物冠层截水能力的观测研究,成果存在较大差异,这可能是农作物种类、品种、叶型、种植密度以及喷灌或降水等试验条件不同所致<sup>[35]</sup>。

农田水分平衡和有效降水量评估是农业气象业务服务的重要内容,通过对农作物截留的研究,建立农作物不同时期对不同降水量的截留模型,可以提高对降水有效性的评估精度,为农业气象业务服务提供技术方法。因此,本研究以我国东北地区春玉米为研究对象,通过人工控制降水量试验,明确玉米不同生长时期(叶面积)和不同降水量对降水的截留作用及饱和截留阈值,并建立玉米对降水截留量的计算模型,为定量评估降水资源的有效性及其农田水分平衡研究等工作提供理论依据。

## 1 试验设计

### 1.1 分期播种

试验于 2018 年玉米生长季在辽宁省锦州农业气象试验站进行。供试玉米品种为丹玉 405,晚熟品种。

试验目的是获取不同的叶面积指数,因此,为减少试验时间和模拟降水量差异,采取分期播种方式:

从适宜播种期(5 月上旬)开始,每间隔 10 d 左右播种 1 期,最终获得 8 个播期,即在同一时间可以获得从小到大 8 个不同叶面积指数的玉米植株,代表 8 个不同的玉米生长时期。降水量模拟试验在第 1 个播期玉米抽雄(叶面积最大)以后,同时,第 8 个播期玉米三叶期以后进行。叶面积指数范围为 0.038~5.39。

### 1.2 降水模拟器简介

试验采用的降水模拟器为锦州青帝源科技发展有限公司生产的 QDY-JY103 型人工模拟降雨系统。系统主要由喷嘴、喷淋架、分水器、供水管路、阀门、流量计、压力传感器以及控制、测量子系统组成,理论降水强度为 1~200 mm/h 可调,降水控制面积为 45 m<sup>2</sup> (15×3 m<sup>2</sup>)。采用预设降水参数、多闭环控制降水过程等自控技术,所模拟雨滴粒径、降水动能与天然降水十分接近。设备关键部分喷嘴采用美国 Spaying Systems 公司生产的 Fulljet 旋转下喷式喷嘴。

为减少试验过程中其他环境因素的影响,试验在水分试验场的大棚内进行。大棚高度为 4 m,降水模拟器悬挂于大棚的顶部,出水口离地面高度大于 3 m。

### 1.3 降水量控制试验

#### 1.3.1 植株处理

为保证玉米体内水分不流失,同时为保证试验时降水不进入植株体内,试验开始前,将玉米植株齐根剪下,并迅速用溶化的石蜡进行封口。植株封口后,按照大田种植密度直立固定在降水模拟器下方,每个降水量处理不同发育期的玉米共 8 株,玉米植株顶端离降水模拟器出水口大于 1 m。

#### 1.3.2 降水量设计

降水量采用降水模拟器通过控制降水强度和降水时间组合方式控制 1 次总降水量。

试验分 2 组进行,先进行饱和截留量模拟试验,然后进行截留量与叶面积关系模拟试验。

饱和截留量模拟试验:以 1 mm·min<sup>-1</sup> 降水强度,致整株玉米完全湿润,玉米叶尖开始滴水,茎秆出现明显径流为止,此时降水量约为 20.0 mm。

截留量与叶面积关系模拟试验:降水强度控制在 0.15 mm·min<sup>-1</sup>,降水量通过降水时间控制,因降水模拟器控制的降水强度会出现漂移,雨量计同步记录真实降水量,故以雨量计显示降水量为实际降水量进行分析。试验共进行 9 个降水量处理,分

别为 0.3 mm, 0.7 mm, 1.2 mm, 2.1 mm, 2.7 mm, 3.0 mm, 7.8 mm, 1.4 mm 和 2.0 mm, 其中前 7 个降水量用于模型的建立, 后 2 个降水量用于模型检验。

### 1.4 截留量测定

截留量采用称重法直接测定。

#### 1.4.1 称重时间

模拟降水开始前, 首先称取每株玉米植株的质量, 试验结束后再次称取包括截留水分在内的植株质量。

#### 1.4.2 称重方式

称重采用感量为 0.001 g, 量程为 10 kg 的电子天平。为保证玉米植株上的水分不掉落, 且称重时不受风等环境因素的影响, 称重区设在距降水模拟试验点 2 m 附近, 四周用塑料薄膜围挡。称重时首先在天平上放置 1 个雨量筒外筒, 并用砖固定, 玉米植株直立放置于筒内, 保持与自然状态基本一致。

#### 1.4.3 截留量换算

模拟降水前后质量差即为玉米降水截留量(单位: g)。由于降水量通常用降水深度(单位: mm)表示, 因此, 需将以质量(单位: g)表示的截留量换算成以降水深度(单位: mm)表示的截留量:

$$Y = 0.01 \times \frac{X \times M}{10000} \quad (1)$$

式(1)中,  $Y$  为以降水深度表示的截留量(单位: mm),  $X$  为以质量表示的截留量(单位: g/株),  $M$  为种植密度(单位: 株 · hm<sup>-2</sup>), 本研究种植密度按照 30 cm × 50 cm 计算, 约 70000 株 · hm<sup>-2</sup>。

#### 1.4.4 叶面积测定

称重结束, 待植株上水分完全晾干后, 利用 LI-3700 叶面积仪测定每株玉米叶面积, 并根据种植密度换算成叶面积指数。

## 1.5 模型建立

试验结束后, 首先将称重获得的质量截留量(单位: g)转换成以降水深度表示的截留量(单位: mm), 单株玉米叶面积转换成叶面积指数, 采用 Microsoft Excel 2007 软件处理数据和制图, 并利用独立样本验证所建模型精度。

## 2 结果与分析

### 2.1 玉米降水饱和和截留量模型

农作物对降水的饱和和截留量(即最大截留量)主要与冠层叶面积大小有关。试验结果表明: 当降水量达到 20 mm 时, 玉米对降水的截留量达到饱和。叶面积指数越大, 降水截留量越多, 随叶面积指数增加, 截留量快速增加(图 1)。拟合结果表明: 玉米饱和截留量与叶面积指数的关系符合二次多项式、指数函数和幂函数关系, 均达到 0.01 显著性水平, 其中二次多项式拟合的解解释率最高, 超过 96%(表 1)。

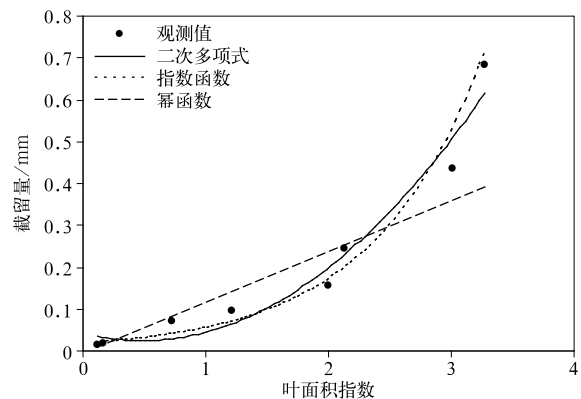


图 1 玉米降水饱和和截留量与叶面积指数关系  
Fig. 1 The relationship between saturated interception and leaf area index

表 1 玉米降水饱和和截留量与叶面积指数的拟合模型

Table 1 The fitting model for saturated interception and leaf area index			
类型	拟合模型	决定系数	样本量
二次多项式模型	$y = 0.0744x^2 - 0.0701x + 0.0416$	0.9609 **	8
指数函数模型	$y = 0.0188e^{1.1107x}$	0.9531 **	8
幂函数模型	$y = 0.1134x^{1.0511}$	0.9463 **	8

注:  $y$  表示饱和和截留量, 单位: mm;  $x$  表示叶面积指数。 \*\* 表示拟合模型达到 0.01 显著性水平。

由表 1 中二次多项式拟合模型可以看到, 玉米对降水的饱和截留量并不是很大, 当玉米叶面积指数为 1, 2, 3, 4, 5, 6 时, 玉米的饱和和截留量分别为 0.0459 mm, 0.1990 mm, 0.5009 mm, 0.9516 mm,

1.5511 mm, 2.2994 mm, 截留率分别为 0.23%, 1.00%, 2.50%, 4.76%, 7.76%, 11.50%。由此推算, 当降水量大于 20 mm 时, 截留量不再增加, 而截留率将下降。

根据我国玉米传统种植方式,高产玉米的叶面积指数最大,一般为 5~6,因此,对一次降水过程的最大截留量通常为 1.5~2.3 mm,前期(叶面积指数小于 4)不足 1 mm。

由图 1 和表 1 可知,饱和截留量与叶面积指数并非线性关系,在叶面积指数较小时,单位叶面积截留量较小且增加缓慢,而当叶面积指数较大时,单位叶面积的饱和截留量增加迅速。分析认为,这种现象与玉米叶片结构变化有关,苗期叶片薄且外表光滑,对水分吸附能力弱,而随着叶片生长,叶片逐渐变厚,表面粗糙度增加,对水分吸附能力不断增强,

由此造成在玉米不同生长时期单位叶面积的饱和截留量差异显著。

### 2.2 玉米降水截留量与叶面积指数关系

一次降水过程后,农作物对降水截留量主要与当时冠层叶面积大小有关,玉米冠层叶面积越大,降水截留量就越多。拟合结果表明:在不同等级降水量条件下,玉米对降水的截留量与叶面积指数的关系均符合二次多项式、指数函数和幂函数关系模型(图 2),均达到 0.01 显著性水平,其中二次多项式模型解释率最高,均超过 95%,而指数函数模型的解释率最低,但也均超过 74%(表 2)。

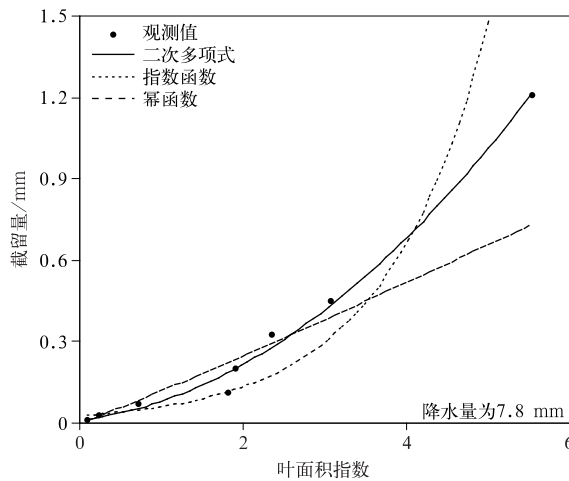
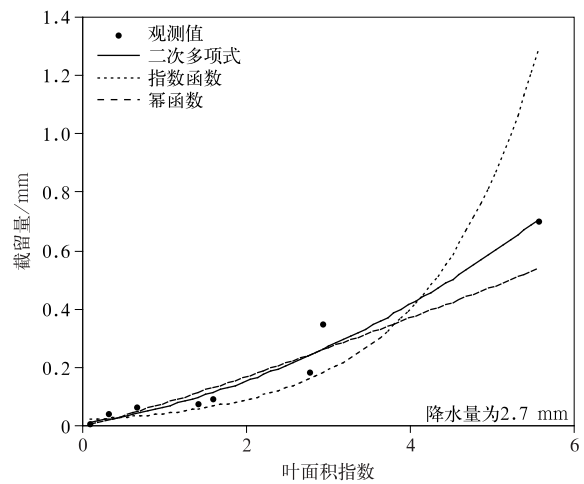
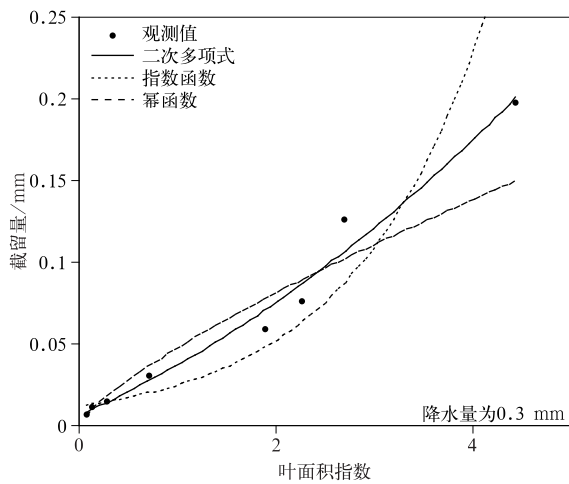


图 2 不同等级降水量条件下玉米降水截留量与叶面积指数的关系

Fig. 2 The relationship between interception and leaf area index under different rainfall levels

表 2 玉米降水截留量与叶面积指数的拟合模型  
Table 2 The fitting model for interception and leaf area index

降水量/mm	拟合模型	样本量	决定系数
0.3	$y=0.0038x^2+0.027x+0.0064$	8	0.9794 **
	$y=0.0119e^{0.7383x}$	8	0.8983 **
	$y=0.0475x^{0.7716}$	8	0.9699 **
0.7	$y=0.0045x^2+0.0407x+0.004$	8	0.9934 **
	$y=0.0125e^{0.7393x}$	8	0.7900 **
	$y=0.0555x^{1.0226}$	8	0.9481 **

续表 2

降水量/mm	拟合模型	样本量	决定系数
1.2	$y=0.0197x^2+0.0144x+0.0096$	8	0.9809 **
	$y=0.0147e^{0.895x}$	8	0.9286 **
	$y=0.0637x^{1.0568}$	8	0.9479 **
2.1	$y=0.0455x^2-0.0631x+0.0324$	8	0.9534 **
	$y=0.0162e^{0.8868x}$	8	0.9486 **
	$y=0.0911x^{0.8753}$	8	0.9384 **
2.7	$y=0.0147x^2+0.0436x+0.0072$	8	0.966 **
	$y=0.0203e^{0.7453x}$	8	0.7447 **
	$y=0.0771x^{1.1306}$	8	0.9357 **
3.0	$y=0.0306x^2+0.0003x+0.0207$	8	0.9648 **
	$y=0.0166e^{0.9196x}$	8	0.9148 **
	$y=0.1017x^{0.8736}$	8	0.9636 **
7.8	$y=0.0322x^2+0.0391x+0.0097$	8	0.9921 **
	$y=0.0272e^{0.7986x}$	8	0.8618 **
	$y=0.119x^{1.0613}$	8	0.9450 **

注:  $y$  表示截留量, 单位: mm;  $x$  表示叶面积指数。 \*\* 表示拟合模型达到 0.01 显著性水平。

2.3 玉米降水截留量与降水量关系

由理论分析可知, 在截留达到饱和之前, 降水量越大, 截留的降水越多。但在实际中, 难以获得相同叶面积的玉米植株, 因此, 可通过表 1 中多项式反推出各叶面积指数下的截留量进行分析。结果表明: 在各叶面积指数下, 玉米对降水的截留量与降水量的

关系均符合二次多项式、指数函数、幂函数和对数函数关系, 大多数达到 0.05 显著性水平。在苗期叶面积指数较小时(叶面积指数小于 2)相关性不如中后期高, 其原因可能是叶片覆盖不均匀, 使截留的随机性增大。而当叶面积指数大于 3 时, 幂函数的解释率最高, 超过 87%, 而指数函数的解释率最低(表 3)。

表 3 玉米降水截留量与降水量的拟合模型

Table 3 The fitting model for interception and rainfall

叶面积指数	拟合模型	样本量	决定系数
1	$y=0.0005x^2+0.0017x+0.0389$	7	0.4967
	$y=0.0338e^{0.1046x}$	7	0.2349
	$y=0.0405x^{0.1716}$	7	0.1124
	$y=0.0107\ln x+0.0436$	7	0.2944
2	$y=-0.0007x^2+0.0235x+0.077$	7	0.8623 **
	$y=0.0887e^{0.1229x}$	7	0.7496 *
	$y=0.1047x^{0.2927}$	7	0.7567 **
	$y=0.0387\ln x+0.1089$	7	0.7403 *
3	$y=-0.0046x^2+0.0744x+0.1168$	7	0.9738 **
	$y=0.1657e^{0.1371x}$	7	0.7489 *
	$y=0.1948x^{0.373}$	7	0.9864 **
	$y=0.0873\ln x+0.207$	7	0.9557 **
4	$y=-0.0113x^2+0.1553x+0.1542$	7	0.9196 **
	$y=0.2595e^{0.1495x}$	7	0.6399 *
	$y=0.306x^{0.4298}$	7	0.9405 **
	$y=0.157\ln x+0.3355$	7	0.9345 **
5	$y=-0.0206x^2+0.2635x+0.201$	7	0.836 **
	$y=0.3764e^{0.157x}$	7	0.554
	$y=0.4436x^{0.4685}$	7	0.8779 **
	$y=0.2458\ln x+0.5018$	7	0.8668 **

注:  $y$  表示截留量, 单位: mm;  $x$  表示降水量, 单位: mm。 \* 和 \*\* 分别表示拟合模型达到 0.05 和 0.01 显著性水平。

2.4 玉米降水截留量与叶面积指数和降水量的综合关系

农作物对降水的截留不仅与叶面积大小有关,

也与降水量多少有关, 由叶面积指数和降水量共同决定。通过前述分析可知, 玉米冠层对降水的截留量与叶面积指数的二次多项式、指数函数和幂函数

拟合模型有较好的相关关系,也与降水量的二次多项式、指数函数、幂函数和对数函数拟合模型有较好的相关关系。因此,分别将叶面积指数和降水量按上述函数进行膨化处理,并采用逐步回归方法建立玉米截留量与叶面积指数和降水量的综合拟合公式为

$$y = 0.025x_1^2 + 0.044\ln x_2 - 0.002. \quad (2)$$

式(2)中, $y$ 为玉米冠层的截留量(单位:mm), $x_1$ 为叶面积指数, $x_2$ 为降水量(单位:mm)。样本量 $n=64$ ,决定系数为0.791,拟合公式达到0.01显著性水平。

当降水量达到一定程度时,玉米叶面的截留会饱和,之后,随降水量继续增加,而叶面截留不变。因此,式(2)的使用还需结合表1中的饱和截留量公式,在叶面积指数一定时,当式(2)计算的截留量超过表1计算的饱和截留量时,以饱和截留量为最大截留量,之后无论降水是否增加,截留量不再增加。

由式(2)可见,玉米冠层对降水的截留量与叶面积指数的二次方呈正相关关系,叶面积指数越大,截留量越大;与降水量的自然对数呈正相关关系,降水量越大,截留量越大,拟合模型的解释率接近80%。各等级降水量下不同叶面积的截留率见表4。由表4可见,随叶面积指数增加,玉米对降水的截留率增加,而随降水量增加,玉米对降水的截留率下降。尤其在降水量较小而叶面积指数较大时,玉米对降水的截留不可忽视。

表4 各等级降水量下不同叶面积的截留率(单位:%)

Table 4 Interception rate of different leaf areas under some rainfall levels(unit:%)

叶面积指数	降水量			
	2 mm	5 mm	10 mm	20 mm
1	2.7	1.8	1.3	0.8
2	6.4	3.4	2.0	1.2
3	12.7	5.7	3.3	1.8
4	21.4	9.4	5.0	2.7
5	32.7	13.9	7.3	3.8
6	46.4	19.4	10.0	5.2

## 2.5 模型检验

为了验证截留模型(式(2))的精度,利用未参加建模的2个降水量模拟试验数据分析实测截留量与模拟降水截留量的误差(表5)。由表5可以看到,当叶面积指数较小(叶面积指数小于1)且截留量较小(不足0.1 mm)时,误差较大,当叶面积指数大于1时,模拟误差大幅下降。分析认为,在气象观测

中,降水量精度为0.1 mm,也就是说,当降水量小于0.1 mm时,降水量记为0,因此,当截留量小于0.1 mm时,同样可以看作0。因此,结合表4可知,当叶面积指数小于1时,玉米对降水的截留可以忽略不计。由此可见,本研究建立的降水截留量拟合模型有较高的精度,可应用于降水有效性评估和农田水分平衡方程中。

表5 拟合模型的独立样本验证

Table 5 Independent sample verification of fitting model

降水量/mm	叶面积指数	截留量		
		实测/mm	模拟/mm	误差/%
1.4	0.0378	0.0051	0.0128	151.0
	0.1647	0.0140	0.0135	-3.6
	0.2647	0.0260	0.0146	-43.8
	0.7221	0.0307	0.0258	-16.0
	1.6381	0.0674	0.0799	18.5
	1.6928	0.0847	0.0844	-0.3
	2.5363	0.1883	0.1736	-7.8
	4.1837	0.5383	0.4504	-16.3
2.0	0.1349	0.0113	0.0290	156.6
	0.1586	0.0133	0.0291	118.8
	0.8439	0.0420	0.0463	10.2
	1.3391	0.0567	0.0733	29.3
	1.9770	0.1107	0.1262	14.0
	2.1979	0.1427	0.1493	4.5
	2.6974	0.2701	0.2104	-22.1
	3.1516	0.3449	0.2768	-19.7

## 3 结论与讨论

降水资源是农作物主要的水分来源,但由于未考虑农作物冠层的截留作用,在水资源评估和农田水分平衡研究中往往高估降水作用。本研究通过降水模拟试验研究玉米冠层对降水的截留效益,得出结论如下:

1) 在降水量一定条件下,冠层截留量与叶面积指数的二次多项式拟合模型相关性最佳。

2) 在叶面积指数一定条件下,冠层降水截留量与降水量的幂函数拟合模型相关性最佳。

3) 综合叶面积指数和降水量分析表明:玉米冠层降水截留量与叶面积指数平方及降水量对数呈正相关关系,并构建了玉米冠层的降水截流量拟合模型,研究结果对降水资源的有效性评估和农田水分平衡研究有较好的实用价值。

植被冠层截留的研究方法通常采用水分平衡计算方法和模拟试验直接测定方法两种。水分平衡计算方法是根据测定自然降水到达农田的不同分项

(穿透雨、茎秆流等)计算冠层截留量,但这类研究需要大量观测样本,由于农作物叶面积在空间的分布不均匀性,使研究结果有较大不确定性;直接测定方法则是通过直接测定农作物冠层的截留水量计算截留量,同样,直接测定方法需要称取农作物截留的水量,在称重过程中(特别是移动过程中)很难避免水分掉落。因此,不论采取何种方法,研究结果仍存在一定缺陷。此外,自然降水过程的持续时间一般较长,在降水过程中,叶片截留的水分同时产生蒸发,因此,利用水分平衡方法计算获得的农作物冠层截留通常比直接测定法获得的截留量偏大<sup>[28,30-31,36]</sup>,本研究的降水截留量也小于水分平衡方法测定的截留量,与多数文献一致。此外,水分截留模拟是一个十分复杂的问题,由于每株玉米的个体大小、叶面积、株型、叶片的空间分布均有差异,使试验无法重复进行,只有通过增加试验样本量实现。因此,要获取更精确的截留量数据还需开展大量试验。

### 参考文献

- [1] 杨国庆,王佳真,孙萌萌.基于标准化降水指数的沧州干旱时空特征.干旱气象,2019,37(2):218-225.
- [2] 慕臣英,梁红,纪瑞鹏,等.沈阳春玉米不同生育阶段需水量及缺水变化特征.干旱气象,2019,37(1):127-133.
- [3] 谢五三,王胜,唐为安,等.干旱指数在淮河流域的适用性对比.应用气象学报,2014,25(2):176-184.
- [4] 程雪,孙爽,张方亮,等.我国北方地区苹果干旱时空分布特征.应用气象学报,2020,31(1):63-73.
- [5] 王石立,娄秀荣,沙奕卓.华北地区小麦水分亏缺状况初探.应用气象学报,1995,6(增刊D):42-48.
- [6] 宋丽莉,王春林,董永春.水稻干旱动态模拟及干旱损失评估.应用气象学报,2001,12(2):226-233.
- [7] 宋艳玲,蔡雯悦,柳艳菊,等.我国西南地区干旱变化及对贵州水稻产量影响.应用气象学报,2014,25(5):550-558.
- [8] 杨宏毅,霍治国,杨建莹,等.江汉和江南西部春玉米涝渍指标及风险评估.应用气象学报,2017,28(2):237-246.
- [9] 宋艳玲,王建林,田靳峰,等.气象干旱指数在东北春玉米干旱监测中的改进.应用气象学报,2019,30(1):25-34.
- [10] 王永利,侯琼,苗百岭,等.内蒙古马铃薯干旱风险区划.应用气象学报,2017,28(4):504-512.
- [11] 初征,郭建平.未来气候变化对东北玉米品种布局的影响.应用气象学报,2018,29(2):165-176.
- [12] 任玉玉,千怀遂.河南省棉花气候适宜度变化趋势分析.应用气象学报,2006,17(1):87-93.
- [13] 魏瑞江,宋迎波,王鑫.基于气候适宜度的玉米产量动态预报方法.应用气象学报,2009,20(5):622-627.
- [14] 帅细强,陆魁东,黄晚华.不同方法在湖南省早稻产量动态预报中的比较.应用气象学报,2015,26(1):103-111.
- [15] 周秋文,颜红,马龙生,等.喀斯特地区典型针叶林的降雨截留分配效应.生态科学,2016,35(6):140-145.
- [16] 周秋文,马龙生,颜红,等.贵州省喀斯特阔叶林降雨截留分配特征.水土保持通报,2016,36(6):321-325.
- [17] 周秋文,朱红.基于Horton模型的涟江流域马尾松林冠截留模拟.生态科学,2018,37(2):43-49.
- [18] 马剑,刘贤德,金铭,等.祁连山西水林区灌木林降雨截留特征.水土保持研究,2017,24(3):363-368.
- [19] 白云,苏德,李新通,等.井冈山国家级自然保护区林冠降雨截留模拟研究.长江流域资源与环境,2015,24(增刊D):70-77.
- [20] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,等.辽河源3种林分降雨再分配特征及其影响因素.水土保持学报,2018,32(4):145-150.
- [21] 刘春霞,王玉杰,王云琦.西南亚热带天然混交林林冠截留效应.东北林业大学学报,2013,41(7):9-14.
- [22] 杨文强,王艳萍,张青峰.黄土高原沟壑区苹果林冠截留特征.水土保持通报,2013,33(2):93-96.
- [23] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests. 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1972, 9: 367-384.
- [24] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1979, 105(443): 43-55.
- [25] 刘战东,刘祖贵,张寄阳,等.夏玉米降雨冠层截留过程及其模拟.灌溉排水学报,2015,34(7):13-17.
- [26] 马波,李占斌,马璠,等.模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响.生态学报,2015,35(2):497-507.
- [27] 马波,马璠,李占斌,等.模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响.农业工程学报,2014,30(16):136-146.
- [28] 韩雪,王力,王艳萍.自然降雨条件下夏玉米冠层截留特征及影响因素.中国农业科学,2014,47(8):1541-1549.
- [29] Van Dijk A I J, Bruijnzeel A L. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. *J Hydrology*, 2001, 247(3): 239-262.
- [30] Lamm R F, Manges L H. Portioning of sprinkler irrigation water by a corn canopy. *Transactions of the ASABE*, 2000, 43(3): 909-918.
- [31] Steiner L J, Kanemansu T E, Clark N R. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system. *Transactions of the ASABE*, 1983, 26(4): 1128-1134.
- [32] 王迪,李久生,饶敏杰.喷灌冬小麦冠层截留试验研究.中国农业科学,2006,39(9):1859-1864.
- [33] 郝芝建,范兴科,吴普特,等.喷灌条件下夏玉米冠层对水量截留试验研究.灌溉排水学报,2008,27(1):25-27.
- [34] Haynes L J. Ground rainfall under vegetative canopy of crops. *Journal of the American Society of Agronomy*, 1940, 32(3): 176-184.
- [35] 刘海军,康跃虎,王庆改.作物冠层对喷灌水分分布影响的研究进展.干旱地区农业研究,2007,25(2):137-142.
- [36] Seginer I. Net losses in sprinkler irrigation. *Agricultural Meteorology*, 1967, 4: 281-291.

## Model Construction of Rainfall Interception by Maize Canopy

Guo Jianping<sup>1)2)</sup> Luan Qing<sup>3)</sup> Wang Jingxuan<sup>1)</sup> Zhang Limin<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

<sup>2)</sup> (*Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044*)

<sup>3)</sup> (*Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006*)

<sup>4)</sup> (*Huludao Meteorological Bureau of Liaoning Province, Huludao 125000*)

### Abstract

Rainfall is the main water source of crops. Crops maintain their normal growth and development by absorbing water from the soil. However, the role of rainfall is often overestimated in water resource evaluation and farmland water balance research because the rainfall interception effect of crop canopy is not considered. It is difficult to calculate crop interception quantitatively, which seriously restricts the impact assessment of rainfall on crops. Therefore, in order to determine the interception effect in different growth stages of maize under different rainfall, the rainfall interception experiment of maize is carried out at Jinzhou Agricultural Meteorological Experimental Station of Liaoning Province in 2018. A total of 10 rainfall levels (rainfall over 20 mm is designed for the measurement of saturated interception) and 8 leaf area indexes (representing 8 different growth periods) are examined in the experiment. The rainfall interception effect of maize canopy is systematically analyzed by simulation. Results show that under certain rainfall, the relationship between the interception of maize canopy and leaf area index conforms to the relationship of quadratic polynomial, exponential function and power function, among which the quadratic polynomial has the highest explanation rate. Under the assumption of fixed leaf area index, the rainfall interception of maize canopy is in accordance with the quadratic polynomial, exponential function, power function and logarithmic function. When leaf area index is above 3, the explanation rate of power function is the highest, and the relationship between saturated interception of maize and leaf area index is in accordance with the quadratic polynomial, exponential function and power function, among which the explanation rate of quadratic polynomial is the highest. The comprehensive leaf area index and rainfall analysis indicate a positive correlation between canopy interception and the square of leaf area index and the logarithm of rainfall. According to the traditional planting mode of maize in China, the maximum leaf area index of high-yield maize is generally about 5—6. Therefore, the maximum interception of a rainfall process is usually 1.5—2.3 mm. When leaf area index is less than 1, the rainfall interception of maize can be ignored. Results are of practical significance for the evaluation of the effectiveness of rainfall resources and the study of farmland water balance.

**Key words:** maize canopy; rainfall interception; fitting model