

张丽敏,郭建平,庄立伟,等,2021. 中国主产区玉米冠层对降水的截留研究[J]. 气象,47(5):619-626. Zhang L M, Guo J P, Zhuang L W, et al, 2021. Study on canopy interception in main maize producing areas in China[J]. Meteor Mon, 47(5):619-626 (in Chinese).

中国主产区玉米冠层对降水的截留研究^{*}

张丽敏^{1,2} 郭建平^{2,3} 庄立伟⁴ 栾青⁵ 赵宇涵¹

1 葫芦岛市气象局,辽宁葫芦岛 125000

2 中国气象科学研究院,北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

4 国家气象中心,北京 100081

5 山西省气候中心,太原 030006

提 要: 基于 13 个农业气象试验站 2010—2017 年逐日气象观测数据和玉米观测数据,采用针对玉米的截留模型,研究自然降雨条件下中国主产区玉米冠层截留及其变化规律。结果表明:在不同气候条件和生长状况下,玉米全生育期冠层截留差异较大。玉米冠层生长季平均截留量为 4.3~23.5 mm,拔节到成熟期降水量 ≤ 70 mm 时,截留量不足 8 mm,随着降水量增加,截留量先是同时受降水量和最大面积指数制衡,后变为对最大叶面积指数更敏感。平均截留率为 1.9%~11.6%,中国四大玉米主产区中的黄淮海夏播玉米区截留率最稳定,生长季降水量 <120 mm 的地区截留率超过 10%,按玉米主产区和气候干湿度两种分类提供平均截留率范围。依据拔节到成熟期降水量、最大叶面积指数及截留变化规律可以估算不同地区玉米冠层截留量和截留率,为有效降水评估、干旱指标修正、农田水分循环等方面提供科学依据。

关键词: 自然降雨,玉米冠层,降水截留

中图分类号: S16,P49

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.05.010

Study on Canopy Interception in Main Maize Producing Areas in China

ZHANG Limin^{1,2} GUO Jianping^{2,3} ZHUANG Liwei⁴ LUAN Qing⁵ ZHAO Yuhuan¹

1 Huludao Meteorological Office of Liaoning Province, Huludao 125000

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

4 National Meteorological Centre, Beijing 100081

5 Shanxi Climate Centre, Taiyuan 030006

Abstract: Based on the daily meteorological observation data and maize observation data of 13 agrometeorological experimental stations from 2010 to 2017, the canopy rainfall interception and its variation of main maize production areas in China are studied by using the rainfall interception model for maize. The results show that under different climatic conditions and growth conditions, the interception of maize canopy is quite different. The average interception is 4.3—23.5 mm. When the precipitation from jointing to maturity is less than 70 mm, the interception is less than 8 mm. With the increase of precipitation, the interception is first affected by both precipitation and maximum leaf area index (LAI_{max}) and then becomes more

^{*} 中国气象科学研究院科技发展基金项目(2019KJ006)资助

2020 年 8 月 13 日收稿; 2021 年 3 月 23 日收修定稿

第一作者:张丽敏,主要从事农业气象服务、科研工作. E-mail:36667649@qq.com

通讯作者:郭建平,主要从事农业气候资源及农业气象灾害评估研究. E-mail:gjp@cma.gov.cn

sensitive to LAI_{max} . The average interception rate is 1.9%—11.6%, and the interception rate is relatively stable in Huang-Huai-Hai summer maize planting area. The interception rate exceeds 10% in areas with precipitation less than 120 mm in growing season. Furthermore, the average interception rate range is given according to the classification of main maize production area and climatic dryness and wetness. The canopy interception and interception rate in different areas can be estimated according to precipitation from joining to maturity, LAI_{max} and the rule of interception change. The interception research based on the actual growth and natural rainfall provides scientific basis for effective precipitation assessment, drought index correction, and farmland water cycle, and so on.

Key words: natural rainfall, maize canopy, rainfall interception

引 言

气候变化背景下农田生态系统水分供需矛盾日益凸显。中国农业用水占全国平均年用水量的 70%(靳乐乐等, 2019), 以目前平均作物水分利用效率计算, 到 2030 年农业缺水量将达到 900 亿 m^3 (梅旭荣等, 2013)。提高高耗水作物对有效降水的利用率(马青荣等, 2020), 定量评估降水的有效性, 进而制定科学精准的灌溉计划是解决农田水资源供需矛盾的重要手段。冠层截留水量也称冠层截留损失, 指的是被冠层截获, 最终通过蒸发回到大气的那部分降水(刘战东等, 2012)。在农田水文学中有效降水指旱作农业种植条件下, 总降水量中用以满足作物蒸发蒸腾所需的那部分降水量(刘战东等, 2007); 水文学领域则为降水产生的径流量。显然, 无论哪种定义, 在降水经由作物转化为有效降水的过程中, 冠层截留是植被影响降水的首要环节(尹伊和陈海山, 2013)。因此, 明确冠层截留损失是评估降水有效性的必要条件。

玉米截留的试验研究始于 1940 年(Haynes, 1940), 国内近 20 年逐渐兴起。国内外学者对试验方法(直接测定法和水量平衡法)(王文等, 2010)、水分再分配过程(转变为穿透雨、茎秆流、冠层截留损失和冠内蒸散发)(马波等, 2015)、存在饱和截留现象(刘艳丽等, 2015)等方面意见较为一致, 但对玉米冠层截留量和截留率研究结果差异较大。玉米冠层基于逐次(日)截留量较小, 因此黄仲冬等(2014)以日平均最大截留能力代替实际截留量。马波等(2015)研究得到最大截留能力平均值为 0.16 mm, 所占总降雨比例最大仅为 1%; 王迪等(2007)考虑到截留水分蒸发抑制了蒸腾, 计算出喷灌条件下夏

玉米净截留损失变化范围为 1~2 mm, 截留率小于 7%。在基于不同时间长度的定点研究中, Zheng et al(2018a)测定黄土高原玉米生长季 23 次降水事件的冠层截留率为 12.5%; 刘战东等(2015)在中国农业科学院广利灌区灌溉试验基地利用水量平衡原理测定夏玉米拔节、抽雄、完熟期的 15 场降雨事件平均冠层截留率为 10.4%; 郑子成等(2012a)对四川丘陵玉米成熟期的 12 场降雨事件进行冠层截留测定, 结果为 7.5%, 不同发育期和不同降雨强度的冠层截留率平均值分别为 8.42% 和 8.53%(郑子成等, 2012b); 韩雪等(2014)在自然降雨条件下观测黄土高原沟壑区夏玉米的 10 场降雨事件冠层平均截留率为 13.3%。上述结果的差异是由于试验方法不同、玉米属性(熟性、品种、种植密度、高度、叶面积指数等)、属型(春玉米、夏玉米)局限共同造成的。中国玉米栽培地域分布广, 品种繁多, 性状差异大, 全生育期降水时空分布千差万别, 不同地区冠层截留率不应是一个固定值(Zheng et al, 2018b)。以往的研究侧重于点(固定地点、单一属性、某一时间段或发育期)的细致研究, 缺少对基于自然条件下全生育期动态截留的面(中国玉米主产区)的宏观把握。冠层截留影响因素的复杂性、多元性和交互性导致难以开展大范围、长时间序列、多属性对象的试验研究, 截留损失很难被精确计算。应用现有模型计算大范围自然条件下玉米冠层对降水的截留同时解决了试验研究推广难和自然条件下模拟难两个问题。虽然截留模型的局限会对研究结果产生一定的影响, 但仍不失为全面掌握不同产区冠层截留范围的一种方法。本研究目的是计算中国主产区玉米冠层生长季不同累积雨量下的截留率和截留量, 并找出其变化规律, 为有效降水评估和利用、干旱指标修正和水分精准管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 资料来源

叶面积指数(LAI)和降水量是不同植被类型冠层截留研究的关键因子(Kang et al,2005,范世香等,2007;韩雪等,2014;刘艳丽等,2015;朱永杰等,2014)。由于实测 LAI 频次不能满足基于逐日降水的截留量计算的需求,因此需要配合发育期数据和逐日平均气温资料模拟出降水当日 LAI。生长季起始日期为发育期观测中播种到成熟的普遍期。本研究采用玉米主产区 13 个农业气象试验站 2010—2017 年发育期数据、实测 LAI 资料、逐日平均气温和降水量,资料均来源于国家气象信息中心。对异常数据和缺测数据分别做剔除和插值处理。

1.2 研究方法

1.2.1 站点选取

中国气象局农业气象试验站采取直接法测量 LAI,此方法是一种相对成熟、经典、准确的测量方法,经常为其他间接测量法进行验证,但也存在工作量大、取样具有破坏性等缺点,因此有 LAI 观测项目的站点只有 15 个,一年最多观测 5 个发育期(三叶、七叶、拔节、抽雄、乳熟)。在综合考虑站点的代表性和观测资料年限一致性的基础上选择 13 个站点。所选取站点覆盖了我国玉米主产区,分别代表北方春播玉米区(I)、黄淮海平原夏播玉米区(II)、西南山地玉米区(III)以及西北灌溉玉米区(IV)。四大玉米产区播种面积约占全国玉米总面积的 93%。研究站点详细信息见表 1。

表 1 研究站点详细信息

Table 1 Detailed information of study sites

区域类别	站点	纬度/°N	经度/°E	所在省(自治区)	播种/月-日	成熟/月-日	生育期长度/d	属型	玉米熟制	所处气候区	农业用水主要来源
I	白城	45.63	122.83	吉林	5-2	9-23	144	春玉米	早、中、晚	中温带半湿润区	降水
	榆树	44.85	126.51	吉林	5-2	9-21	142		早、中、晚	湿润区	降水
	锦州	41.13	121.12	辽宁	5-7	9-24	140		中、晚	暖温带半湿润区	降水
	临河	40.73	107.36	内蒙古	4-27	9-7	133		中	中温带干旱区	灌溉
	西峰	35.73	107.63	甘肃	4-24	9-11	140		中	暖温带半湿润区	降水
II	咸阳	34.40	108.71	陕西	6-12	10-1	111	夏玉米	中、早	暖温带半湿润区	降水
	泰安	36.17	117.15	山东	6-22	9-27	97		早、中		降水
	郑州	34.72	113.65	河南	6-4	9-16	104		中		降水
	宿州	33.63	116.98	安徽	6-19	10-3	106		中		降水
III	昭通	27.30	103.71	云南	4-6	9-14	161	春玉米	中	中亚热带湿润区	降水
	昆明	25.01	102.41	云南	5-21	9-28	130	夏玉米	中	湿润区	降水
IV	莎车	38.43	77.27	新疆	6-19	9-21	94	夏玉米	早	高原温带干旱区	灌溉
	乌兰乌苏	44.28	85.81	新疆	4-8	8-20	134	春玉米	中	高原温带半干旱区	灌溉

1.2.2 逐日 LAI 模拟方法

修正的 Logistic 方程(王信理,1986)可以用来拟合玉米 LAI 的动态变化(王玲等,2004)。方法是将 LAI、有效积温和生育期长度都换算成相对值,即相对 LAI、相对积温和积温生育期长度,再利用实测 LAI 与观测当日的相对 LAI 模拟出每年最大 LAI,最后用式(1)即可模拟出逐日 LAI:

$$LAI_i = LAI_{max} \times RLAI_i \tag{1}$$

式中: LAI_i 为玉米出苗后第 i 天的 LAI, LAI_{max} 为一年中最大 LAI, $RLAI_i$ 为出苗后第 i 天相对 LAI。春玉米 $RLAI_i$ 模拟选择麻雪艳和周广胜(2013)的基于 2005—2011 年多品种春玉米大田试

验资料建立的 LAI 动态普适模型:

$$RLAI_i = \frac{0.999}{1 + e^{5.216 - 13.831DS_i + 5.648DS_i^2}} \tag{2}$$

夏玉米 $RLAI_i$ 模拟选择张旭东等(2006)通过对连续 4 年夏玉米 LAI 研究建立的归一化模型:

$$RLAI_i = \frac{1.093}{1 + e^{6.4307 - 8.157DS_i + 1.9596DS_i^2}} \tag{3}$$

式中: DS_i 为积温生育期长度,也被称为标准化生育期。有效积温按各自模型的选用标准,春玉米为 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温,夏玉米为 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的积温。

1.2.3 截留模型

采用基于直接测定法建立的针对玉米不同生长

时期 LAI 对不同降水量的统计模型(郭建平等, 2020):

$$y = 0.025x_1^2 + 0.04\ln x_2 - 0.002 \quad (4)$$

$$Y = 0.0744x_1^2 - 0.0701x_1 + 0.0416 \quad (5)$$

式中: y 为截留量(单位:mm), x_1 为 LAI, x_2 为降水量(单位:mm), Y 为饱和截留量(单位:mm),即 y 的上限。该模型认为当 $LAI < 1$ 时,玉米对降水的截留可忽略不计,因此用拔节到成熟期累积截留量作为全生育期截留量,计算公式如下:

$$I_Q = \sum_{i=1}^n y \quad (6)$$

式中: I_Q 为全生育期截留量(以下简称为截留量), n 为拔节到成熟期降水日数。 I_Q 与生长季累积降水量的比值即为生育期截留率(以下简称为截留率), I_Q 与 n 的比值为日均截留量,最大截留能力指研究时段内出现的最大截留量。截留量和截留率的多年平均值下文分别简称为平均截留量和平均截留率。

2 结果与分析

2.1 不同玉米主产区气候条件分析

植被特征对截留量有很大影响(王文等,2010), LAI 是反映品种、种植密度、农业技术措施(王玲等, 2004)、株高(张宏鸣等,2019)等诸多特征的综合参数,控制着植被的蒸发、蒸散、截留等多种过程(朱伟峰等,2018)。不同地区、不同播期、不同气候条件下

LAI 差异很大。LAI 的动态变化与出苗到成熟期有效积温密切相关,生长季降水量影响截留率。图 1 为各玉米主产区热量和水分条件分析,可以看出, I、II 区热量条件好于 III 区; III 区降水量明显高于其他地区,相同的截留率需要更大的截留量;临河、乌兰乌苏和莎车是降水低值区,易出现低截留量、高截留率;莎车是 13 个站中降水条件最差的,属于典型的灌溉农业区。

2.2 玉米冠层平均截留情况

玉米冠层平均截留量为 4.3~23.5 mm, 主要与拔节到成熟期降水量(R_1)和 LAI_{max} 有关;平均截留率为 1.9%~11.6%,受截留量和生长季降水量共同影响。应用表 2 可以为不同需求估算截留量、

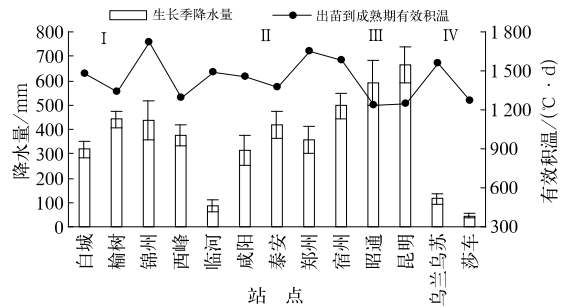


图 1 2010—2017 年各玉米主产区热量和水分条件分析

Fig. 1 Analysis of heat and moisture conditions in main maize producing areas from 2010 to 2017

表 2 2010—2017 年各产区玉米冠层截留指标

Table 2 Canopy interception indexes of maize in each producing areas from 2010 to 2017

区域类别	站点	降水事件/d	LAI_{max} 平均值	R_1 平均值/mm	平均截留量/mm	最大截留能力/(mm·d ⁻¹)	日均截留量/(mm·d ⁻¹)	平均截留率/%
I	白城	236	5.9	227.3	17.4	3.3	0.6	5.6
	榆树	259	4.9	274.1	17.6	1.6	0.5	4.0
	锦州	225	6.1	336.6	23.5	3.8	0.8	5.4
	临河	127	5.5	63.7	9.3	1.9	0.6	11.6
	西峰	242	4.2	255.6	13.0	1.2	0.4	3.5
II	咸阳	197	3.7	244.8	8.1	1.1	0.3	2.6
	泰安	177	4.9	217.5	9.5	1.9	0.4	2.4
	郑州	187	5.0	295.4	13.7	2.2	0.6	4.0
	宿州	205	5.6	286.0	17.0	2.6	0.7	3.5
III	昭通	433	2.8	459.7	11.2	0.5	0.2	1.9
	昆明	394	4.4	468.0	22.9	2.8	0.5	3.6
IV	莎车	85	5.9	24.9	4.3	1.5	0.4	10.1
	乌兰乌苏	158	5.9	58.4	11.7	1.7	0.6	10.6

最大截留能力、日均截留量和平均截留率提供参考。最大截留能力和日均截留量的标准差分别为 0.92 和 0.16,可见,日均截留量比最大截留能力作为日尺度有效降水估算指标误差更小。

2.3 中国不同主产区玉米冠层截留分析

2.3.1 北方春播玉米区

北方春播玉米区冠层截留量为 3.8~39.1 mm,截留率为 1.2%~17.2%(图 2a)。临河截留量最小,但截留率最高,全距最大,四分位差也最大,即年际间波动幅度较大,中位数(12.3%)的代表性不强。原因是生长季降水量小(87.8 mm),截留量的小幅波动会造成截留率大幅升降。榆树和西峰截留率波动较小,中位数代表性较强。东北(榆树、锦州、白城)截留率高于西北(西峰)。

2.3.2 黄淮海夏播玉米区

黄淮海夏播玉米冠层截留量为 2.7~27.1 mm,截留率为 0.6%~5.7%(图 2b),中位数和平均值几乎相同,说明出现极端值的概率较小。最小值(0.6%)出现在泰安(2013 年),原因是生长季降水

量集中在拔节前,拔节到成熟期降水量仅占生长季的 11.9%(53.8 mm),因此截留量少、截留率低。可见,生长季内降水的时间分配也会影响冠层截留。泰安、郑州、咸阳四分位差 $\leq 1.2\%$,中位数代表性强。与北方春播玉米区相比,黄淮海夏播玉米区截留率相对稳定,变化范围小。

2.3.3 西南山地玉米区

西南山地玉米冠层截留量为 8.0~51.0 mm,截留率为 1.2%~8.1%(图 2c)。昭通截留率低于昆明,但稳定性和中位数代表性均好于昆明。昆明截留率最大值远远超过昭通,但从其偏态分布看,存在极大值。在所选站点中,昭通平均截留率最低,原因是 LAI 偏小导致截留量小,同时又地处中亚热带湿润区,生长季平均降水量高(591.2 mm)。

2.3.4 西北灌溉玉米区

西北灌溉玉米区冠层截留量为 1.2~24.6 mm,截留率为 2.3%~18.5%(图 2d)。两站截留率全距超过 12%,莎车呈偏左态分布,即偏小数据较多;乌兰乌苏呈偏右态分布,偏大数据出现概率大。两站对比,莎车截留率高于乌兰乌苏,但乌兰乌苏最小和

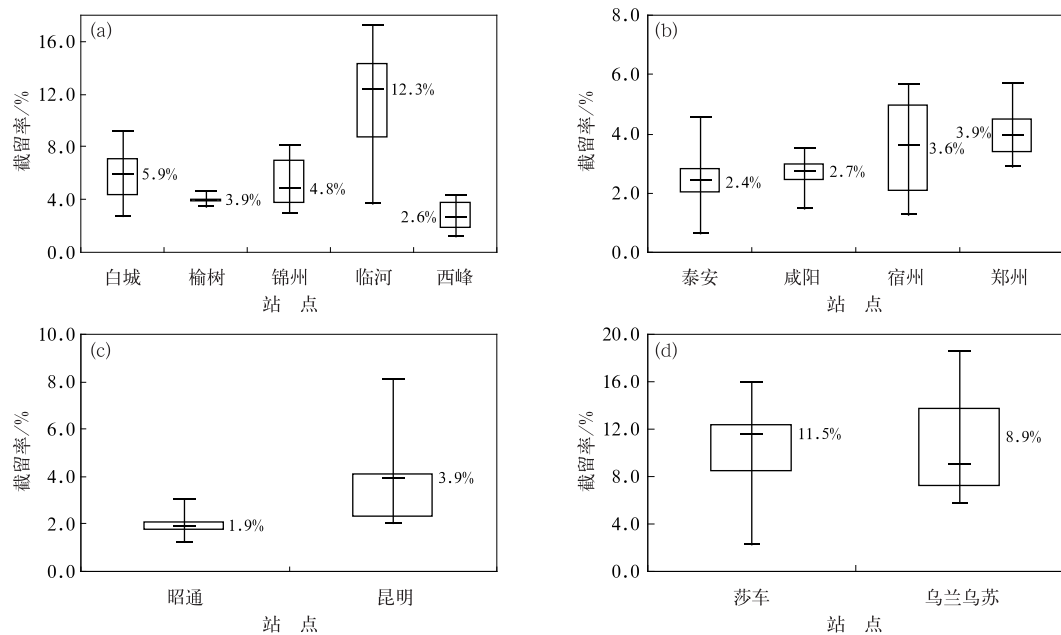


图2 2010—2017年中国四大玉米产区冠层截留率

(a)北方春播玉米区,(b)黄淮海平原夏播玉米区,(c)西南山地玉米区,(d)西北灌溉玉米区
(标注数字为中位数,下同)

Fig. 2 Canopy interception rates of main maize production area in China from 2010 to 2017
(a) spring maize area in Northern China, (b) Huang-Huai-Hai summer maize area in China,
(c) mountainous maize area in Southwest China, (d) irrigated maize area in Northwest China
(The annotated number is the median, the same below)

最大截留率高于莎车,这可能是由于乌兰乌苏生长季降水量比莎车明显偏多。西北灌溉玉米区是四大玉米主产区中截留率波动最大,极端值出现概率最高的地区。

2.4 玉米冠层截留变化规律

为明确截留量、拔节到成熟期降水量(R_1)和 LAI_{max} 三者之间的关系,选取了低截留量(≤ 10 mm)和高截留量(≥ 20 mm)两种情况进行分析(图 3)。可以看出,当 $R_1 \leq 70$ mm 时,无论 LAI_{max} 大小,截留量均在 8 mm 以下。当 70 mm $< R_1 \leq 390$ mm, $LAI_{max} < 5$ 时截留量低, $LAI_{max} > 6.5$ 时截留量高;比较 R_1 相似情况下 a、b、c 的截留量变化可以发现, LAI_{max} 增幅相差不多的情况下, $LAI_{max} > 5$ 后截留量增幅加大;对比 R_1 相差 104 mm 的 c 和 d,可以看出, LAI_{max} 从 6.8 增加到 7.9,截留量并未增加,说明截留量受两个因素互相制衡。当 $R_1 > 390$ mm 时,截留量对 LAI_{max} 敏感性更强,受 R_1 制约程度降低。例如, A、B 两点降水量相差 130 mm,在 LAI_{max} 相差 0.6 的情况下,截留量几乎相同,而 B、C 两点 LAI_{max} 差距仅为 0.5,截留量却相差 11.1 mm。

从截留量、截留率与生长季降水量的平均状况(图 4)进行分析,生长季降水量 < 120 mm 的地区截留率超过 10%,而截留量高的地区(如昆明、锦州)截留率可能很小(分别为 3.6% 和 5.4%)。按气候干湿分区(郑景云等, 2010)来看,半湿润地区冠层截留率为 2.3% ~ 5.4%;湿润地区为 1.9% ~ 3.6%;干旱、半干旱地区可达 10.1% ~ 11.6%。

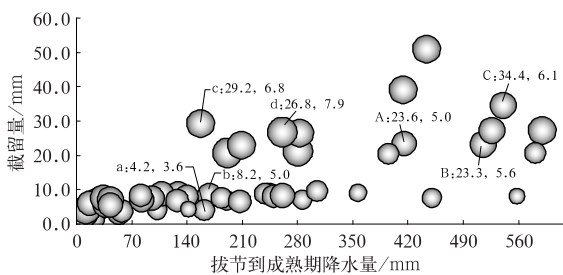


图 3 玉米冠层截留量变化规律气泡图

(气泡面积大小表征 LAI_{max} ; 字母为典型样本点, 第一项数字为截留量, 第二项为 LAI_{max})

Fig. 3 Bubble chart of variation of canopy interception in maize

(The size of bubble area represents the LAI_{max} ; letters are typical sample points, label the first term as the interception and the second term as the LAI_{max})

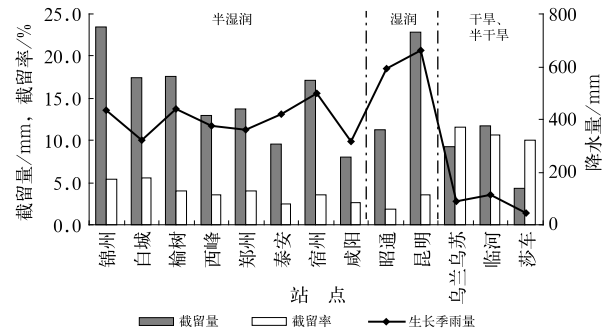


图 4 2010—2017 年四大产区玉米冠层截留量、截留率、生长季降水量之间的关系

Fig. 4 The relationship among maize canopy interception, interception rate and precipitation in growing season of four main maize production area during 2010—2017

3 结论与讨论

3.1 结论

本文采用已有科研成果,研究了中国玉米主产区自然降雨条件下的冠层截留,得到以下主要结论:

(1) 中国主产区玉米冠层平均截留量为 4.3 ~ 23.5 mm,日均截留量为 0.2 ~ 0.8 mm,最大截留能力为 0.5 ~ 3.8 mm · d⁻¹。

(2) 中国主产区玉米冠层平均截留率为 1.9% ~ 11.6%。北方半湿润春播玉米区截留率高于西北半湿润地区和黄淮海夏播玉米区。按玉米主产区和气候干湿度两种分类提供截留率范围。

(3) 明确了不同降水量下,截留量的变化规律。截留率不仅与截留量有关,与降水量及其生育期内的时间分布也有关。降水量小的地区,截留率年际波动大,多年平均值的代表性差。

3.2 讨论

玉米生长旺盛期与全年降水集中时段高度同步,玉米冠层对降水的截留不容忽视。本文所计算截留率低于一些文献(Zheng et al, 2018a; 韩雪等, 2014; 林代杰等, 2011; 刘战东等, 2015; 郑子成等, 2012a)的研究结果,分析原因有三个,一是所选模型基于直接测定方法,该方法计算结果通常比水量平衡方法结果低(郭建平等, 2020);二是本文累积降水量时间长度比其他研究长,因此累积降水量大,

造成截留率低;三是人工模拟降雨试验与自然降雨存在差异。在降水充沛地区冠层截留量主要取决于叶面积,这与孙彩红等(2020)的研究结论一致。虽然目前受限于模型研制、参数选择和站点数量等条件,但总体来说,本文的研究结果更全面、更能代表全生育期降水截留状况,同时也更易于推广。依据各产区冠层截留指标和变化规律可以估算不同地区全生育期冠层平均截留量、日均截留量、最大截留能力、平均截留率,进而为水分精准管理、科学利用水资源以及干旱指标(左冰洁和孙玉军,2019)修正提供科学依据。

影响玉米冠层截留的因素众多,包括雨滴动能、风、湿冠蒸发、雨强及历时、冠层结构参数等,本文只考虑了降水和 LAI,未考虑其他影响因素,对所得结果会产生一定影响。LAI 模拟方法基于不存在水分胁迫的假设,但 LAI 实测值受降水影响很大,而且不同模型模拟结果存在差异。所选站点的代表性和数量以及农业气象试验站 LAI 观测误差都对研究结果有影响。因此,建立物理意义明确、准确度高、易于求解、针对农作物的物理模型并改进参数测量方法是今后进一步细化、深入、完善本研究的关键。

参考文献

- 范世香,高雁,程银才,等,2007. 林冠对降雨截留能力的研究[J]. 地理科学,27(2):200-204. Fan S X, Gao Y, Cheng Y C, et al, 2007. Rainfall-intercepting capability of forest canopy[J]. Sci Geogr Sin, 27(2):200-204(in Chinese).
- 郭建平,栾青,王婧瑄,等,2020. 玉米冠层对降水的截留模型构建[J]. 应用气象学报,31(4):397-404. Guo J P, Luan Q, Wang J X, et al, 2020. Model construction of rainfall interception by maize canopy[J]. J Appl Meteor Sci, 31(4):397-404(in Chinese).
- 韩雪,王力,王艳萍,2014. 自然降雨条件下夏玉米冠层截留特征及影响因素[J]. 中国农业科学,47(8):1541-1549. Han X, Wang L, Wang Y P, 2014. Canopy interception of summer corn and its influencing factors under natural rainfall[J]. Sci Agric Sin, 47(8):1541-1549(in Chinese).
- 黄仲冬,齐学斌,樊向阳,等,2014. 土壤水分有效性及其影响因素定量分析[J]. 水土保持学报,28(5):71-76. Huang Z D, Qi X B, Fan X Y, et al, 2014. Quantitative analysis of soil water availability and its influencing factors[J]. J Soil Water Conserv, 28(5):71-76(in Chinese).
- 靳乐乐,乔匀周,董宝娣,等,2019. 起垄覆膜栽培技术的增产增效作用与发展[J]. 中国生态农业学报,27(9):1364-1374. Jin L L, Qiao Y Z, Dong B D, et al, 2019. Crop yield increasing and efficiency improving effects and development of technology of ridge-furrow cultivation with plastic film mulching[J]. Chin J Eco-Agric, 27(9):1364-1374(in Chinese).
- 林代杰,郑子成,张锡洲,等,2011. 玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. 中国农业科学,44(12):2608-2615. Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, et al, 2011. Study on the effect of maize plants on rainfall redistribution processes[J]. Sci Agric Sin, 44(12):2608-2615(in Chinese).
- 刘艳丽,王全九,杨婷,等,2015. 不同植物截留特征的比较研究[J]. 水土保持学报,29(3):172-177. Liu Y L, Wang Q J, Yang T, et al, 2015. Study on interception characteristics of different plants[J]. J Soil Water Conserv, 29(3):172-177(in Chinese).
- 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等,2007. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报,26(3):27-30, 34. Liu Z D, Duan A W, Xiao J F, et al, 2007. Research progress on calculation methods of effective rainfall in growing period on dry crop[J]. J Irrigat Drain, 26(3):27-30, 34(in Chinese).
- 刘战东,高阳,巩文军,等,2012. 冬小麦冠层降水截留性能研究[J]. 麦类作物学报,32(4):678-682. Liu Z D, Gao Y, Gong W J, et al, 2012. Experimental study on capability of canopy interception of rainfall in winter wheat[J]. J Triticeae Crops, 32(4):678-682(in Chinese).
- 刘战东,刘祖贵,张寄阳,等,2015. 夏玉米降雨冠层截留过程及其模拟[J]. 灌溉排水学报,34(7):13-17. Liu Z D, Liu Z G, Zhang J Y, et al, 2015. Rainfall interception process and its simulation of summer maize[J]. J Irrigat Drain, 34(7):13-17(in Chinese).
- 马波,李占斌,马璠,等,2015. 模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. 生态学报,35(2):497-507. Ma B, Li Z B, Ma F, et al, 2015. Effects of maize plants on the redistribution of water under simulated rainfall conditions[J]. Acta Ecol Sin, 35(2):497-507(in Chinese).
- 马青荣,刘荣花,胡程达,等,2020. 干旱及灌溉对冬小麦根系和产量的影响研究[J]. 气象,46(7):971-981. Ma Q R, Liu R H, Hu C D, et al, 2020. Impacts of drought and irrigation on root and yield of winter wheat[J]. Meteor Mon, 46(7):971-981(in Chinese).
- 麻雪艳,周广胜,2013. 春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用[J]. 生态学报,33(8):2596-2603. Ma X Y, Zhou G S, 2013. Method of determining the maximum leaf area index of spring maize and its application[J]. Acta Ecol Sin, 33(8):2596-2603(in Chinese).
- 梅旭荣,康绍忠,于强,等,2013. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学,46(6):1149-1157. Mei X R, Kang S Z, Yu Q, et al, 2013. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain[J]. Sci Agric Sin, 46(6):1149-1157(in Chinese).
- 孙彩红,苏泳娴,韩留生,等,2020. 广东省 2004—2016 年植被冠层降雨截留模拟及时空变化特征[J]. 生态学报,40(7):2252-2266. Sun C H, Su Y X, Han L S, et al, 2020. The simulation and spatial-temporal variations of atmospheric rainfall interception by vegetation canopies based on MODIS LAI data at the basin scale in the Guangdong Province from 2004 to 2016[J]. Acta Ecol

- Sin, 40(7): 2252-2266 (in Chinese).
- 王迪, 李久生, 饶敏杰, 2007. 基于能量平衡的喷灌作物冠层净截留损失估算[J]. 农业工程学报, 23(8): 27-33. Wang D, Li J S, Rao M J, 2007. Estimation of net interception loss by crop canopy under sprinkler irrigation based on energy balance[J]. Trans CSAE, 23(8): 27-33 (in Chinese).
- 王玲, 谢德体, 刘海隆, 等, 2004. 玉米叶面积指数的普适增长模型[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 26(3): 303-306, 311. Wang L, Xie D T, Liu H L, et al, 2004. A universal growth model for maize leaf area index[J]. J Southwest Agric Univ (Nat Sci), 26(3): 303-306, 311 (in Chinese).
- 王文, 诸葛绪霞, 周炫, 2010. 植物截留观测方法综述[J]. 河海大学学报(自然科学版), 38(5): 495-504. Wang W, Zhuge X X, Zhou X, 2010. Methods for plant interception measurement[J]. J Hohai Univ (Nat Sci), 38(5): 495-504 (in Chinese).
- 王信理, 1986. 在作物干物质积累的动态模拟中如何合理运用 Logistic 方程[J]. 农业气象, (1): 14-19. Wang X L, 1986. How to use Logistic equation reasonably in dynamic simulation of crop dry matter accumulation[J]. Chin J Agrometeorol, (1): 14-19 (in Chinese).
- 尹伊, 陈海山, 2013. 植被冠层截留对地表水分和能量平衡影响的数值模拟[J]. 气象科学, 33(2): 119-129. Yin Y, Chen H S, 2013. Numerical experiment of impacts of canopy interception on land surface water and energy balance[J]. J Meteor Sci, 33(2): 119-129 (in Chinese).
- 张宏鸣, 刘雯, 韩文霆, 等, 2019. 基于梯度提升树算法的夏玉米叶面积指数反演[J]. 农业机械学报, 50(5): 251-259. Zhang H M, Liu W, Han W T, et al, 2019. Inversion of summer maize leaf area index based on gradient boosting decision tree algorithm[J]. Trans Chin Soc Agric Mach, 50(5): 251-259 (in Chinese).
- 张旭东, 蔡焕杰, 付玉娟, 等, 2006. 黄土区夏玉米叶面积指数变化规律的研究[J]. 干旱地区农业研究, 24(2): 25-29. Zhang X D, Cai H J, Fu Y J, et al, 2006. Study on leaf area index of summer maize in loess areas[J]. Agric Res Arid Areas, 24(2): 25-29 (in Chinese).
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元, 2010. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 65(1): 3-12. Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y, 2010. A new scheme for climate regionalization in China[J]. Acta Geogr Sin, 65(1): 3-12 (in Chinese).
- 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等, 2012a. 模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配的作用[J]. 水土保持研究, 19(4): 72-76. Zheng Z C, Li T X, Zhang X Z, et al, 2012a. Effect of maize plants on water distribution under the condition of simulated rainfall[J]. Res Soil Water Conserv, 19(4): 72-76 (in Chinese).
- 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等, 2012b. 玉米植株冠层截留分异特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 26(4): 208-211, 215. Zheng Z C, Li T X, Zhang X Z, et al, 2012b. Differentiation characteristics and influencing factors of rainfall interception in maize plants[J]. J Soil Water Conserv, 26(4): 208-211, 215 (in Chinese).
- 朱伟峰, 王斌, 杨军明, 2018. 基于 Free Search 的植被叶面积指数 Logistic 模型研究[J]. 节水灌溉, (7): 94-97, 103. Zhu W F, Wang B, Yang J M, 2018. A Logistic model of vegetation leaf area index calibrated by Free Search[J]. Water Saving Irrigation, (7): 94-97, 103 (in Chinese).
- 朱永杰, 毕华兴, 霍云梅, 等, 2014. 草冠截留影响因素及其测定方法对比研究综述[J]. 中国农学通报, 30(34): 117-122. Zhu Y J, Bi H X, Huo Y M, et al, 2014. Reviews of the affecting factors and comparison study on methods for grass crown interception[J]. Chin Agric Sci Bull, 30(34): 117-122 (in Chinese).
- 左冰洁, 孙玉军, 2019. 福建省几种气象干旱指数的对比分析[J]. 气象, 45(5): 685-694. Zuo B J, Sun Y J, 2019. Comparative analysis of several drought indices to use in Fujian Province[J]. Meteor Mon, 45(5): 685-694 (in Chinese).
- Haynes J L, 1940. Ground rainfall under vegetative canopy of crops[J]. Agron J, 32(3): 176-184.
- Kang Y H, Wang Q G, Liu H J, 2005. Winter wheat canopy interception and its influence factors under sprinkler irrigation[J]. Agric Water Manage, 74(3): 189-199.
- Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al, 2018a. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by maize canopy on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. Agric Water Manage, 195: 25-36.
- Zheng J, Fan J L, Zhang F C, et al, 2018b. Mulching mode and planting density affect canopy interception loss of rainfall and water use efficiency of dryland maize on the Loess Plateau of China[J]. J Arid Land, 10(5): 794-808.