

DOI: 10.5846/stxb201303240505

马波, 李占斌, 马璠, 吴发启. 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.

Ma B, Li Z B, Ma F, Wu F Q. Effects of maize plants on the redistribution of water under simulated rainfall conditions. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 497-507.

模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响

马 波^{1,2}, 李占斌¹, 马 璠^{2,3}, 吴发启^{2,*}

1. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

3. 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 银川 750002

摘要:为系统测定玉米 (*Zea mays*) 不同生长阶段的穿透雨、茎秆流和冠层截留, 采用室内模拟降雨法测定了不同降雨强度、不同叶面积指数玉米冠下穿透雨和茎秆流, 采用喷雾法测定了玉米不同生长阶段的冠层截留。对其进行了量化分析, 并探讨了三者与玉米叶面积指数和降雨强度的关系, 阐明了玉米冠下穿透雨的空间分布特征。结果表明: 玉米冠下穿透雨量占冠上总降雨量比例为 30.97%—94.02%, 平均为 63.92%; 茎秆流量占降雨量比例的变化范围为 5.68%—75.70%, 平均为 35.28%; 冠层截留量在其全生育期内变化范围为 0.02—0.43 mm, 平均为 0.16 mm, 所占总降雨量比例最大仅为 1%。随玉米生长, 穿透雨量逐渐降低, 茎秆流量和冠层截留量逐渐增加。穿透雨与茎秆流呈现此消彼长的关系, 其中穿透雨率平均由 93.55% 降至 36.23%; 茎秆流率平均由 5.98% 增加至 70.42%。降雨强度与穿透雨量和茎秆流量呈正相关关系, 但是二者占总降雨量的比例与降雨强度关系不显著 ($P>0.05$)。随着玉米生长, 穿透雨冠下空间分布由均匀逐渐趋向于不均匀, 使降雨经过冠层后趋于向行中汇集, 但在玉米生长后期, 集中于行中的穿透雨量也因叶片衰败而随之降低。揭示了玉米对降雨的再分配作用特征, 可为农田水分有效利用、农田生态水文过程机理和坡耕地土壤侵蚀防治提供理论依据。

关键词: 玉米; 茎秆流; 穿透雨; 冠层截留; 降雨强度

Effects of maize plants on the redistribution of water under simulated rainfall conditions

MA Bo^{1,2}, LI Zhanbin¹, MA Fan^{2,3}, WU Faqi^{2,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China

Abstract: Water from rainfall or sprinkler irrigation is partitioned into four components as it passes through the crop canopy: stemflow, throughfall, interception storage and in-canopy evaporation. The crop canopy significantly changes the distribution of rain water and irrigation water in the canopy and topsoil, thus potentially causing uneven distribution of surface soil water content and altering water use efficiency. The objective of this experiment was to measure throughfall, stemflow, and interception storage at different times during the maize (*Zea mays* L.) growing season. Throughfall and stemflow were measured indoors during simulated rainfall events. The spray method was used to measure the interception storage of maize canopies with different leaf area index (LAI). The effects of LAI and rainfall intensity on throughfall, stemflow, and interception storage were analyzed and the spatial distribution of throughfall was clarified. The results showed

基金项目: 国家“973”重点基础研究项目 (2007CB407201-5); 国家自然科学基金重点项目 (41330858)

收稿日期: 2013-03-24; **网络出版日期:** 2014-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wufaqi@263.net

that there had a significant effect in rainfall redistribution by maize canopy under simulated rainfall. Throughfall accounted for 30.97% to 94.02% of the total rainfall, averaging 63.92% across the entire experiment. Stemflow accounted for 5.98% to 70.42% of the total rainfall, averaging 35.28%. Interception storage ranged from 0.02 mm to 0.43 mm. The average interception storage was 0.16 mm. These amounts were equivalent to less than 1% of the total rainfall amount. The variation of maize canopy had significant effect on rainfall redistribution. The amount of throughfall declined gradually as the maize leaf area index increased, whereas stemflow and interception storage gradually increased. There was close correlation between the throughfall amount and the stemflow amount. As a percentage of the total rainfall amount, throughfall decreased from 93.55% early in the growing season to 36.22% later in the growing season. In contrast, the percentage of stemflow increased from 5.98% to 70.42%. Rainfall intensity showed different effect on throughfall and stemflow. There was a positive correlation between rainfall intensity and throughfall amount. There was also a positive correlation between rainfall intensity and stemflow amount. The ratio of throughfall to total rainfall was not significantly related to rainfall intensity ($P>0.05$). Similarly, the ratio of stemflow to total rainfall was not significantly related to rainfall intensity ($P>0.05$). The effect of rainfall intensity on throughfall ratio was uncertain, and this effect was restricted and influenced by physiological state of maize plant. The throughfall intensity was large in some region under maize canopy, and even beyond the rainfall intensity, which lead to significant difference of spatial distribution under maize canopy. As the maize grew, the spatial distribution of throughfall gradually became uneven. Rainwater tended to concentrate in the inter-row area. However, when the maize leaves began to decompose at the end of the growing season, the amount of rainwater in the inter-row area decreased. The redistribution of rainfall by maize canopy would make uneven distribution of rainfall on the surface soil. And this would lead to redistribute rainfall energy on the surface soil under maize canopy, which may has large influence on splash detachment and its distribution under maize canopy. This study provides important insights into the effect of the maize canopy on the redistribution of rainfall. The study also provides information about ecological and hydrological processes in far and. Information from this study could be used as a theoretical basis for effectively using agricultural water and for controlling soil erosion on slopes.

Key Words: corn; stemflow; throughfall; interception storage; rainfall intensity

水土资源是农田生态系统中最为重要的自然资源,但随着我国人口增长和经济的发展,迫使农田生态环境日益恶化,干旱缺水 and 水土流失已经严重威胁我国的农业发展和粮食安全。中国农田面积占国土面积 19%,是仅次于草地和森林的第三大植被生态系统^[1-2]。对于农田生态系统而言,水循环过程与作物生长关系密切,对农业节水和粮食增产都有重要的影响^[3]。作物冠层对降雨或喷灌水具有拦截再分配作用,其结果是使其转变为穿透雨、茎秆流、冠层截留和冠层内蒸散发四部分,从而造成雨水或喷灌水在作物冠下和地表的分布不均匀^[4-6]。其中,冠层内蒸散发为降雨或喷灌过程中附着于枝叶表面并蒸发掉的水量,由于其量甚微,故常忽略不计^[5,7-8]。目前常见的对降雨再分配的量化计算方法是在忽略冠层内蒸散发的前提下,已知冠下穿透雨、茎秆流和冠层截留中的任意两个量,通过水量平衡法计算出第 3 个量^[4-5,7-8]。

作为防治水土流失最为有效的措施之一,植被冠层的水文作用一直是国内外研究的焦点。植被冠层对降雨的截留,改变了降雨在地表的分布;但是针对林冠影响降雨空间分布的研究较多较深入,而研究作物冠层对降雨或喷灌水量的截留分异作用目前还较少^[5,9-15]。有关作物冠层截雨能力的研究多集中于玉米,大量的研究得出玉米冠下穿透雨量比例在 31%—91%之间,茎秆流量占总降雨量比例约为 40%—50%,冠层截留量总体较小^[4-5,7,15-27]。但是不同学者的观测结果差异较大,例如 Quinn 和 Laflen^[18]通过测定发现玉米冠下穿透雨约占总降雨量比例为 51%—84%,茎秆流可占总降雨量比例 49%。Steiner 等^[7]则研究认为玉米穿透雨量约占总降雨量比例为 31%—55%,茎秆流量比例为 35%—64%,并利用水量平衡得出玉米冠层截留量为 0.8—7.0 mm,平均约为 2.7 mm。Lamm 和 Manges^[4]研究认为玉米穿透雨量约占总降雨量比例为 43%,茎秆流量比例为

53%,冠层截留量为 1.8 mm。国内相关研究也得出相差较大的结论,李王成等^[23]的观测结果为穿透雨量比例为 47%,茎秆流量比例为 53%;王迪等^[5]的观测结果表明,穿透雨量和茎秆流量占冠上总降雨量比例分别为 45%和 43%,截留量为 3.6 mm。郝芝建等^[25-26]研究认为穿透雨量占冠层上方总雨量比例为 48%,茎秆流量比例为 44%,冠层截雨量在 0.8—2.9mm 之间。林代杰等^[27]则认为玉米穿透雨比例平均为 64%,茎秆流为 29%,但是其冠层截留率高达约 8%。由此可见,对于玉米冠层截雨能力的观测研究,其成果还存在较大的差异,这可能是由于玉米品种、叶型、种植密度以及喷灌或降雨等实验条件的不同所造成的^[6]。目前的研究多集中于生长成熟的玉米植株,而作物全生育期内对降雨的拦截分配作用研究还颇为少见。作物冠层对降雨的截留能力有限且截留水量很小;对于这方面的研究,大部分是以喷灌为背景的,因为冠层截留作为喷灌水量的损失,其多寡关系到喷灌是否节水的争论^[5]。而玉米的茎秆流所占比例较大,加之穿透雨在行间的分布不均,造成了降雨在地表的分布不均,不仅影响了玉米植株对水分的利用和根系生长^[4,6],而且对土壤侵蚀也会产生一定的影响^[18,21]。本研究的目的是系统测定玉米不同生长阶段的穿透雨、茎秆流和冠层截留,对其进行量化分析并探寻三者与玉米叶面积指数和降雨强度之间的关系,为提高农田水分利用效率、完善农田生态水文过程机理和作物植被固土保水机制研究提供了参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在西北农林科技大学资源环境学院水土保持工程实验室人工降雨大厅进行。供试玉米品种为郑单 958,分别于 2007 年 6 月 10 日和 2008 年 6 月 13 日种植于实验室邻近的教学实验种植园内,行距 60 cm、株距 25 cm。玉米的种植与管理按当地农作习惯进行,并依据玉米生长和叶片数量及面积将玉米生育期划分为幼苗期、拔节初期、拔节中期、拔节中后期、抽雄前期和抽雄后期 6 个生长阶段,根据各项试验的实际需要将玉米植株移植到降雨大厅分别进行试验。在玉米生长季内每次随机采取玉米分别进行穿透雨、茎秆流、冠层截留和叶面积的观测,在各个生长阶段的不同降雨强度下各测定 1 次。

本试验所用人工降雨装置为中国科学院水利部水土保持研究所研制的下喷式降雨机。喷头为 Fulljet® GW 系列喷头,安装高度为 4 m,有效降雨面积约为 16 m²。通过不同喷头-阀门开关组合来实现供水压强的调节,可以达到调节降雨强度的目的,可实现的降雨强度范围为 20—160 mm/h。经测定,调节至任一喷头-压强组合下的降雨强度是稳定的,可以为试验采用。

1.2 玉米穿透雨测定

穿透雨测定是在每个测试阶段,将连续 2 行玉米植株齐地面剪断(每行 4 株,共计 8 株),并迅速转移至室内按田间株行距竖直固定在铁质支架上并置于降雨机下方。利用喷雾器将玉米植株表面充分润湿以消除冠层截留对第 1 次穿透雨测定的影响。待润湿后的玉米叶片不再向下滴水之后,用内径 5.5 cm 高 7 cm 的有机玻璃杯按图 1 所示以矩阵的方式置于作物冠下行间区域。为避免玉米叶缘叶尖处形成的水量过大超过雨量筒量程,故在设计降雨强度下降雨 30 min,然后收集测量各玻璃杯水量,并计算各点降雨量及降雨强度。再将作物移开,将玻璃杯再次按原位置摆放并在当前设计降雨强度下继续降雨 30 min,以观测对应降雨强度下裸地的降雨量。上述观测结束后将降雨强度调整其他设定值后,重复以上观测试验。根据当地夏秋两季多大到暴雨的特点,设计降雨强度为 40 mm/h 和 80 mm/h,每次降雨历时为 30 min,在各生长阶段不同降雨强度下各测定 1 次。将单位面积单位时间内的穿透雨量与其相应的降雨量相除,可得到玉米的穿透雨率(%),即玉米穿透雨量所占总降雨量的比例。待该阶段穿透雨测定结束后,测定各株玉米的叶面积,并计算叶面积指数。

1.3 玉米茎秆流测定

本试验所用茎秆流收集装置为一铁皮制带斜盖圆筒,直径 20 cm,高 15 cm,筒底圆心焊接一根长 15 cm 的钢钉用以固定玉米植株(图 2)。每次试验时随机采取 12 株玉米带至室内,利用喷雾器将玉米植株表面充分润湿以消除冠层截留对第 1 次茎秆流测定的影响。待润湿后将植株沥干,插入茎秆流收集筒中并编号。插

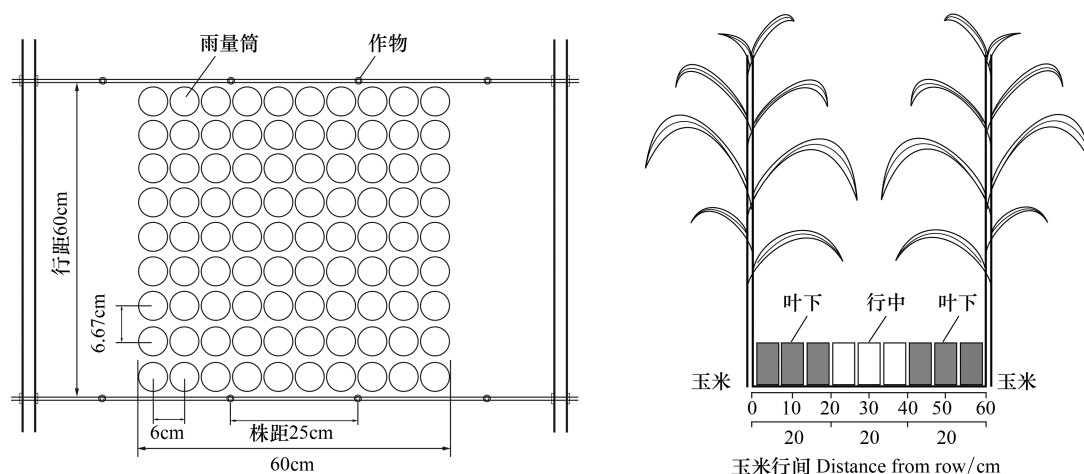


图1 玉米冠下穿透雨测定示意图

Fig.1 Throughfall measurement under crop canopy

入筒中时,保证每株玉米最下方的叶片基部不与茎秆流收集桶盖接触,以确保正常收集各生育期尤其是幼苗期下方叶片形成的茎秆流。以 25 cm×60 cm 的间距将玉米置于降雨机下进行降雨观测,为避免玉米成熟期茎秆流量过大,超过收集装置的容量,故将各降雨强度下的降雨历时设为 10 min。降雨结束后,用量筒测定各株玉米产生的茎秆流量。再在茎秆流收集筒的相应位置各放置一个口径为 8.3 cm 的雨量筒,在当前降雨强度下降雨 10 min,然后测量水量计算各位置点的实测雨强。为全面分析玉米茎秆流随降雨强度的变化,结合当地夏秋两季多大到暴雨的特点,将上述试验过程分别在 20、40、60、80、100 和 120 mm/h 设计降雨强度下分别进行观测。将作物茎秆流量与降雨量相除,可得到作物的茎秆流率(%),即作物茎秆流量所占降雨量的比例。待该阶段观测结束后,测定各株玉米的叶面积,并计算叶面积指数。

1.4 玉米冠层截留测定

为获得玉米植株的最大截留能力,宜采用喷雾法测定其冠层截留量。在每个测试阶段,随机将 12 株玉米植株齐地面切下后,立即用熔化的石蜡封闭切口以防止水分从切口处散失和吸收。迅速将作物植株转移至室内称重。再将植株直立固定,用喷雾器在植株上方喷雾对植株表面湿润,喷雾强度为 0.3 mm/min,当叶缘叶尖处开始形成滴水以及叶基处开始有茎秆流形成时停止喷雾,并将作物取下称重。喷雾前后玉米植株的重量差再除以单株玉米的占地面积,即为玉米植株的冠层截留量(mm)。待该阶段观测结束后,测定各株玉米的叶面积,并计算叶面积指数。

1.5 玉米叶面积指数测定

单株玉米叶面积测定是将玉米叶片按顺序沿叶片基部剪下,分别测量每个叶片的长度 L 和叶片最宽处 W ,计算单株玉米的总叶面积 A_L [28]:

$$A_L = \sum_{i=1}^n (k \times L_i \times W_i) \quad (1)$$

式中, A_L 为单株玉米总叶面积, cm^2 ; k 为修正系数,取 0.75; L_i 为第 i 片叶片的长度, cm ; W_i 为第 i 片叶片最宽处的宽度, cm ; n 为单株玉米的叶片数。

玉米叶面积指数:

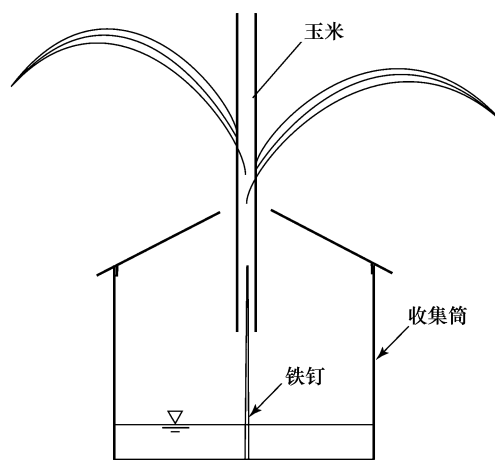


图2 玉米茎秆流收集筒剖面示意图

Fig.2 Stemflow collection cylinder for corn

$$LAI = \sum_{i=1}^n (A_{Li}) / (n \times I_w \times R_w) \quad (2)$$

式中, LAI 为叶面积指数; A_{Li} 为第 i 株玉米总叶面积, cm^2 ; n 为玉米植株数; I_w 为株距, cm ; R_w 为行距, cm 。

2 结果与分析

2.1 玉米冠下穿透雨

2.1.1 玉米冠下穿透雨强度特征

为了便于分析, 将作物冠下单位时间单位面积上的穿透雨量定义为穿透雨强度 (mm/h)。由图 3 中可知, 玉米全生育期内平均穿透雨强度为 39.84 mm/h , 占冠上降雨量的比例为 63.92% 。就各生长阶段而言, 幼苗期 ($LAI=0.26$) 的截雨能力最弱, 冠下穿透雨量最大, 可占冠上降雨量 90% 以上; 而抽雄前期 ($LAI=4.48$) 的截雨能力最强, 冠下穿透雨量也最小, 占冠上总降雨量比例约为 $31\%—41\%$ 。但是玉米进入抽雄后期 ($LAI=3.67$), 由于营养生长逐渐由盛转衰, 冠下穿透雨强度又有所上升, 其穿透雨率较之前提高了 16% 以上。但总体上随着玉米生长, 穿透雨呈逐步降低趋势。

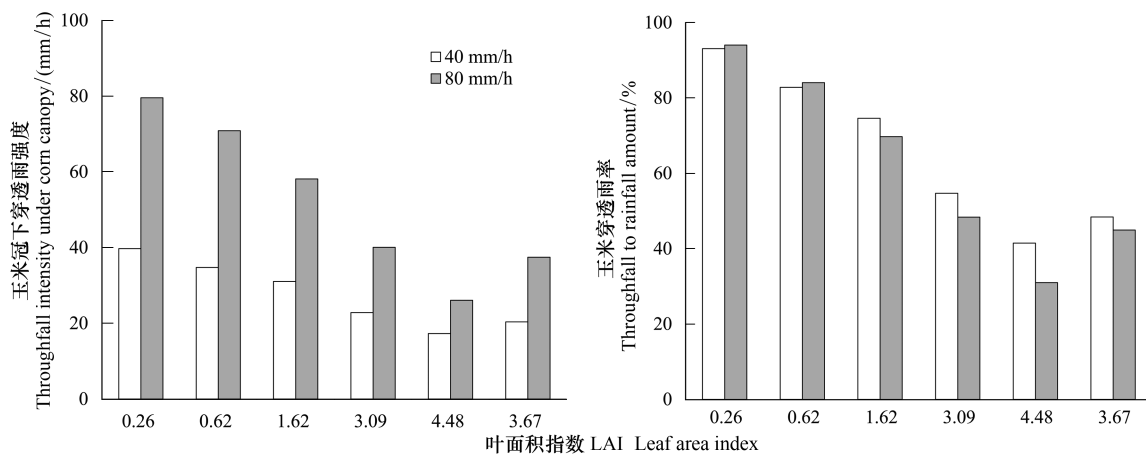


图 3 玉米不同生育期冠下穿透雨
Fig.3 Throughfall under corn canopy in different growth stage

玉米冠层形成穿透雨的能力不仅受叶面积指数等自身生理指标的影响, 同时也受到降雨强度的影响。30 min 降雨历时条件下, 全生育期内 80 mm/h 下的平均穿透雨强度为 52.02 mm/h , 是 40 mm/h 下的 1.9 倍。随着玉米的生长, 不同降雨强度下的穿透雨强度变化趋势存在一定差异。由图 3 可以看出随着玉米叶面积指数的增加, 80 mm/h 下穿透雨变化较为剧烈, 40 mm/h 下则较为平缓。雨强较大时 (80 mm/h), 降雨具有较高的能量, 对玉米植株的打击力度也较强。当玉米植株较小时, 叶片也较小较柔弱, 受降雨打击后, 易发生向下弯曲变形且在受到打击的同时叶片发生较大震动, 不利于雨水在叶片表面的附着和流动, 从而使大部分降雨以穿透雨的形式到达地表。而随着玉米生长, 植株承受降雨打击的能力加强, 叶片也较为宽大, 使降雨能更有效地转化为茎秆流等其他形式, 从而大大减少了穿透雨量。当雨强较小时 (40 mm/h), 降雨动能也较小, 对玉米植株施加的作用较弱, 因此穿透雨量的变化基本不受降雨能量的影响, 故其变化较为平缓。由方差分析可知, 玉米穿透雨强度与玉米叶面积指数存在显著差异 ($P<0.05$), 与降雨强度存在极显著差异 ($P<0.01$)。

不同降雨强度下, 玉米冠下穿透雨率差异较小。由图 3 可以看出, 当玉米植株较小时 ($LAI=0.26—0.62$), 不同雨强下的穿透雨率差异不到 1% , 而随着作物持续生长, 这种差异逐渐扩大, 在抽雄前期达到最大, 即 40 mm/h 降雨强度下穿透雨率较 80 mm/h 降雨强度下高 10 个百分点。当进入抽雄后期阶段, 两者差距又缩小至 3.5 个百分点, 由此表明降雨强度对穿透雨率的影响存在不确定性, 并且其发挥作用还受到玉米植株自身生理状态的制约和影响。由方差分析可知, 玉米穿透雨率与玉米叶面积指数存在极显著差异 ($P<$

0.05),与降雨强度的差异不显著($P>0.05$)。

将不同降雨强度下玉米全育期内的穿透雨进行回归分析可知,玉米穿透雨强度和穿透雨率与各因子具有较高的线性相关性,回归结果如下所示:

$$I_{TH} = 1.183 \cdot LAI^{0.307} \cdot I^{0.868} \quad R^2 = 0.916, F = 48.770^{**} \quad (3)$$

$$R_{TH} = -13.098 \cdot LAI + 93.914 \quad R^2 = 0.974, F = 373.132^{**} \quad (4)$$

式中, I_{TH} 为作物冠下穿透雨强度(mm/h); R_{TH} 为穿透雨率(%);LAI为叶面积指数; I 为降雨强度(mm/h);**为 $P<0.001$ 显著水平。

2.1.2 玉米冠下穿透雨空间分布特征

虽然玉米冠下的平均穿透雨强度随叶面积指数的增加呈降低趋势,但是在实验过程中经测定,在玉米生长旺盛期冠下某些位置的穿透雨强度较大,甚至超过了降雨强度。这说明玉米冠下降雨空间分布存在较大差异。若将两行玉米之间行间区域划分为如图1所示的叶下空间和行中区域,则两个区域的穿透雨强度及其变化存在较大差异(表1)。以40 mm/h降雨强度下的穿透雨强度为例,平均冠下穿透雨强度 C_V 值由幼苗期的0.14增加至抽雄前期的0.98,说明随着玉米的生长,冠下各点之间的穿透雨强度差异越来越大,分布越来越不均匀。而40 mm/h降雨强度下,各生长阶段的 C_V 值略高于80 mm/h降雨强度下的相应 C_V 值,说明小雨强下玉米冠下穿透雨空间分布不均匀性较高。这是因为大雨强下,由于雨滴能量大,在其打击下使玉米叶片上向地表滴水的位置点增加;加之雨量较大,使产生较大穿透雨量的位置数量也有所增加,在一定面积上降低了穿透雨的不均匀性。

表1 玉米冠下不同区域的穿透雨分布

Table 1 Distribution of throughfall in different area under corn canopy

降雨强度 Rainfall intensity/ (mm/h)	生育期 Growth stage	叶面积指数 Leaf area index	冠下穿透雨量 Throughfall amount under canopy/mm			冠下穿透雨强 Throughfall intensity under canopy/(mm/h)				平均冠下 雨强变异 系数
			叶下 雨量	行中 雨量	平均冠 下雨量	叶下 雨强	行中 雨强	(行中- 叶下)/ 叶下/%	平均冠 下雨强	
40	幼苗期	0.26	19.16	21.26	19.86	38.32	42.53	10.98	39.72	0.14
	拔节初期	0.62	17.51	20.85	17.37	35.01	41.69	19.08	34.74	0.27
	拔节中期	1.62	14.44	17.69	15.52	28.88	35.39	22.54	31.05	0.50
	拔节中后期	3.09	9.80	14.64	11.41	19.60	29.28	49.39	22.82	0.79
	抽雄前期	4.48	8.90	8.11	8.64	17.81	16.22	-8.92	17.28	0.98
	抽雄后期	3.67	10.03	10.50	10.19	20.06	21.00	4.69	20.37	0.72
80	幼苗期	0.26	38.78	41.79	39.79	77.57	83.58	7.75	79.57	0.12
	拔节初期	0.62	42.02	42.43	35.43	84.04	84.86	0.98	70.86	0.20
	拔节中期	1.62	27.44	32.31	29.06	54.89	64.61	17.68	58.13	0.43
	拔节中后期	3.09	17.90	24.31	20.03	35.79	48.61	35.82	40.06	0.62
	抽雄前期	4.48	14.00	11.08	13.03	28.00	22.17	-2.08	26.06	0.95
	抽雄后期	3.67	17.88	20.40	18.72	35.75	40.81	14.15	37.44	0.69

叶下雨量 Rainfall amount in the region direct under the canopy; 行中雨量 Rainfall amount in the region between rows; 平均冠下雨量 Average rainfall amount under canopy;; 叶下雨强 Rainfall intensity in the region direct under the canopy; 行中雨强 Rainfall intensity in the region in the middle rows; (行中-叶下)/叶下 Growth rate rainfall intensity in the region between rows /%; 平均冠下雨强 Average throughfall intensity under canopy; 平均冠下雨强变异系数 Coefficient of variation of average throughfall intensity under corn canopy (C_V)

从表中可以看出,玉米幼苗期至拔节期间(LAI=0.26—3.09),行中穿透雨强度明显高于叶下区域,且差异随着生长逐渐呈增大趋势。在40 mm/h降雨强度下,两个区域穿透雨强度的差异率由10.98%增加至49.39%;80 mm/h降雨强度下行中穿透雨强度与叶下区域的差异率普遍小于40 mm/h降雨强度,并由幼苗期(LAI=0.26)的7.75%提高至拔节中后期(LAI=3.09)的35.82%。这也说明降雨强度对玉米冠下穿透雨的分

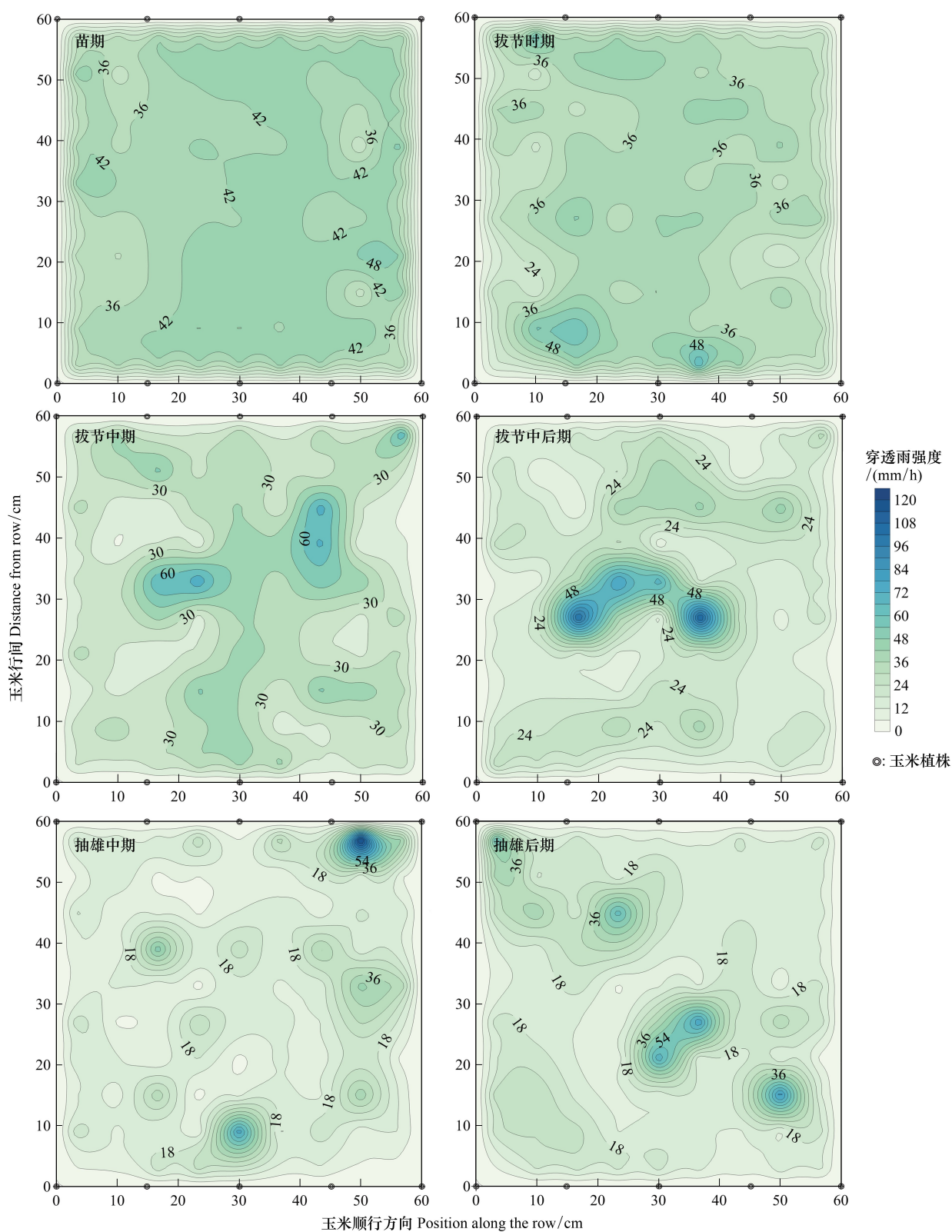


图4 玉米不同生育期冠下穿透雨空间分布(以40mm/h降雨强度为例)

Fig.4 Spatial distribution of throughfall intensity under corn canopy in different growth stage. Rainfall intensity was 40 mm/h

布有一定影响。降雨强度较小时,穿透雨更倾向于向行中集中,而降雨强度较大时,冠下穿透雨分布倾向于均匀分布。然而进入抽雄前期以后,行中穿透雨又略小于叶下,随后又略高于叶下。这可能是因为玉米生长最

为旺盛时期对行间空地的覆盖度更高的缘故。而当植株下层叶片开始衰败时(抽雄后期, $LAI=3.67$), 对地表覆盖相应下降, 而且衰败的叶片向下倾斜, 也使叶面上雨水趋于向行中流动, 造成行中穿透雨量复又上升。根据玉米的生长变化, 不难看出, 冠下穿透雨的空间分布具有一定规律性。以 40 mm/h 为例, 各生长阶段的冠下穿透雨强度空间分布特征如图 5 所示。

在玉米幼苗期, 由于作物植株较小, 所能影响到的冠下空间范围有限, 只能在靠近植株附近较小区域内有所作用, 但由于植株过小, 行间大部分区域没有被叶片覆盖, 对穿透雨空间分布影响微弱。因此穿透雨主要以降雨直接到达地表的形式存在, 其空间分布与裸地形似, 分布较为均匀(图 4)。但随着玉米的生长, 叶尖逐渐向行间伸展, 穿透雨开始向某些特定区域集中, 在拔节初期主要集中于行间 $10\text{—}20\text{ cm}$ 之间区域, 但是在 $20\text{—}30\text{ cm}$ 的行中区域的穿透雨依然较大, 且以降雨直接到达地表为主(图 4)。而进入拔节中后期, 穿透雨主要集中于行正中 20 cm 宽度 ($20\text{—}30\text{ cm}$ 区域) 的区域内, 其强度最大可到达 111.67 mm/h , 远远高于 40 mm/h 的降雨强度(图 4)。但进行抽雄后期以后, 穿透雨集中点多分布于 $10\text{—}20\text{ cm}$ 空间范围内, 较拔节中后期相比, 其分布较为均匀(图 4)。这是由于玉米叶片较长, 在其生长旺盛期, 一些较长叶片可跨过行中, 叶尖靠近相邻一排玉米附近区域上空, 因此减少了行中区域穿透雨量, 增加了另外一行玉米叶下区域的穿透雨量, 使其空间分布相对均匀。但进入抽雄后期, 玉米营养生长由盛转衰, 随着部分老叶片脱落, 以及部分叶片形态发生较大改变, 致使穿透雨又一次集中于行正中 20 cm 的行中区域(图 4)。综上所述, 由于玉米特殊的形态结构, 使降雨经过冠层后趋于向行中汇集, 随玉米生长又倾向于向叶下汇集, 且在某些特殊位置上出现远远大于降雨强度的极端值。在实际观测中, 我们也发现出现这种极端值或较大穿透雨的区域往往是叶尖滴水 and 叶缘凹向下方形成汇集出水断面的地方。而这种特征又往往具有随机性, 从而造成冠下穿透雨的不均匀性。

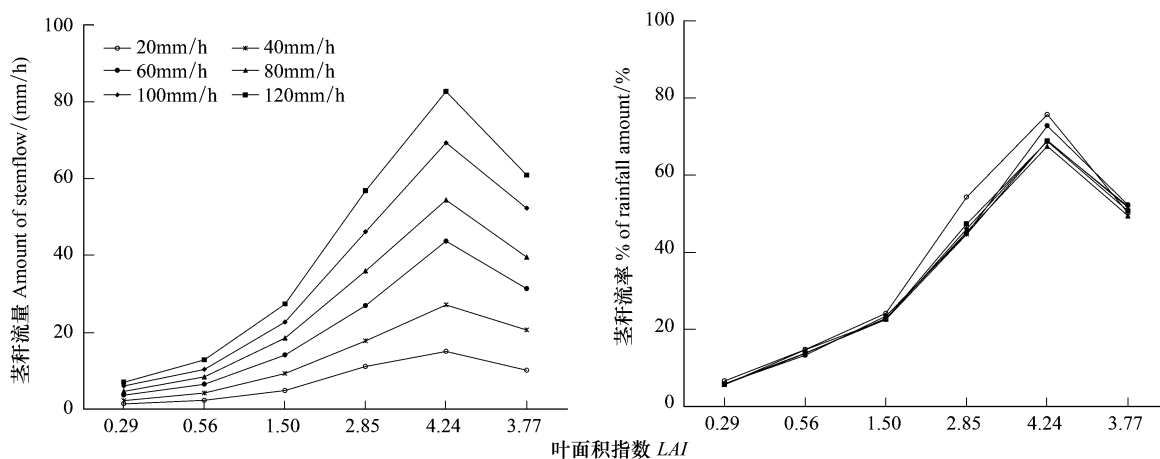


图 5 玉米不同生育期的茎秆流

Fig.5 Stemflow of corn in different growth stage

2.2 玉米茎秆流

不同生长阶段单株玉米茎秆流量及茎秆流率如图 5 所示。玉米全生育期内平均茎秆流量为 24.11 mm/h , 占降雨量比例可达 35.28% 。在各生长阶段, 茎秆流差异较大, 其中幼苗期为 4.14 mm/h , 占降雨量 5.98% ; 而抽雄前期最大, 为 48.71 mm/h , 占降雨量 70.42% 。这说明玉米对降雨的拦截能力是随着作物植株生长而逐渐增大的, 并在生长旺盛期达到峰值, 其茎秆流量可占降雨量达 70% 左右, 而在 20 mm/h 降雨强度下更是高达 76% 。

在同一降雨强度下, 单株玉米茎秆流量及茎秆流率随叶面积增加呈现增大趋势。由图 5a 可知, 玉米茎秆流量随叶面积指数和降雨强度呈显著增大的趋势。当降雨强度较小时 ($20\text{—}40\text{ mm/h}$), 茎秆流量变化较为平缓, 当降雨强度较大时 ($\geq 60\text{ mm/h}$), 随雨强增大其茎秆流量上升幅度也逐渐增大。其中降雨强度为 120 mm/h 下的茎秆流变化最为剧烈, 从幼苗期 ($LAI=0.29$) 的 6.99 mm/h 上升至抽雄前期的 82.66 mm/h 。这说

明强降雨条件下,较大的降雨量为作物形成茎秆流提供较多水源的同时,其较强的雨滴动能打击使叶片产生较大震动,从而影响雨水在叶面上的移动方向,进而影响茎秆流的形成。这种影响在玉米植株较小时($LAI < 0.56$)比较显著,导致降雨更多地以穿透雨形式接触地表;而当植株较大时($LAI > 1.50$),逐渐强壮的植株使这种影响慢慢降低,加之漏斗型的特殊形态,在降雨量较大时更有利于汇集雨水至叶基内侧形成茎秆流。因此,在同一叶面积指数下,降雨强度对茎秆流的影响较为显著,随降雨强度呈现增大趋势;并且这种趋势随着玉米生长逐渐扩大。各降雨强度下的茎秆流率随玉米生长的关系与茎秆流量具有相似的变化规律。但是同一生长阶段不同降雨强度下的茎秆流率差异不明显。由方差分析可知,玉米茎秆流量与玉米叶面积指数和降雨强度均存在极显著差异($P < 0.01$);玉米茎秆流率与玉米叶面积指数存在极显著差异($P < 0.01$),与降雨强度不存在显著差异($P > 0.05$)。说明降雨强度对其茎秆流率的影响较小,而叶面积成为其主要影响因素。将不同降雨强度下玉米全生育期内的茎秆流进行回归分析,得到以下回归方程。

$$SF = 0.207 \cdot LAI^{0.883} \cdot I^{0.961} \quad R^2 = 0.994, \quad F = 2524.326^{**} \quad (5)$$

$$SR = 18.803 \cdot LAI^{0.839} \quad R^2 = 0.976, \quad F = 1388.098^{**} \quad (6)$$

式中,SF 为单株玉米茎秆流量(mm/h);SR 为单株玉米茎秆流率(%);LAI 为叶面积指数; I 为降雨强度(mm/h);* * 为 $P < 0.0001$ 显著水平。

由回归方程的相关系数可知,玉米茎秆流与各因子具有较高的相关性,玉米茎秆流量和茎秆流率的回归方程均达到了极显著水平($P < 0.01$),说明回归结果是有意义的。

2.3 玉米冠层截留

对玉米冠层的截留量进行了测定,其结果如表 2 所示。

由表中可知,玉米全生育期内冠层截留量平均为 0.16 mm,其中幼苗期($LAI = 0.27$)最小,平均为 0.03 mm;抽雄前期($LAI = 4.19$)最大,平均为 0.33 mm,较幼苗期增长了 10 倍。与喷雾法相比,根据水量平衡估算的玉米冠层截留量普遍偏低。所以要观测玉米的最大截留能力,就本研究结果看,喷雾法较为合适。单株玉米冠层截留量随玉米生长逐渐增加,但是与降雨量没有关系。在降雨过程中,各阶段冠层截留量达到最大后便趋于稳定,即茎叶可以承接附着降雨的表面全部润湿,也称最大截留能力。因此冠层截留量占降雨量的比例会随降雨强度或降雨量的增大而降低。以 20 mm/h 降雨强度为例,当玉米生长最为旺盛时($LAI = 4.19$),其 60 min 降雨冠层截留量与降雨量比例为 1.30%,而 80、120 mm/h 下这一比例将会更低,由此也说明作物冠层截留量并不是其降雨再分配的主要部分,其对降雨的空间分异影响很小。

表 2 不同测算方法测得玉米冠层截留量

Table 2 Interception storage of corn plant using different methods

生育期 Growth stage	叶面积指数 Leaf area index	喷雾法测得截留量 Interception storage amount with spaying method/mm	根据水量平衡 估算截留量 Interception storage amount according to water balance/mm
幼苗期 Seedling stage	0.27	0.03	0.02
拔节初期 Early jointing stage	0.62	0.04	0.03
拔节中期 Middle jointing stage	1.85	0.09	0.08
拔节中后期 Late jointing stage	2.91	0.19	0.16
抽雄前期 Early tasseling stage	4.19	0.33	0.27
抽雄后期 Late tasseling stage	3.7	0.28	0.23
平均 Average	2.26	0.16	0.13

将玉米全生育期内的冠层截留量进行回归,得到以下回归方程。

$$I_c = 0.027 \cdot e^{0.625LAI} \quad R^2 = 0.993, \quad F = 539.961^{**} \quad (7)$$

式中, I_c 为单株玉米冠层截留量(mm); e 为自然对数的底; LAI 为玉米叶面积指数;* * 为 $P < 0.0001$ 显著水平。

单株玉米冠层截留量与叶面积指数具有较高的相关性。对回归结果的 F 检验可知,玉米冠层截留量的回归方程达到了极显著水平($P<0.01$)。

作物的截留能力是随着作物生长而不断增大的,但是在一定的叶面积指数下,作物的截留能力是有限的,一旦达到截留上限,便保持相对稳定,降雨强度对其便没有意义。但是冠层截留机制和作用依然存在,叶面、枝干汇集的雨水进一步转化为茎秆流和穿透雨。

3 结论与讨论

玉米植株会对降雨产生强烈的再分配作用,再分配作用改变了降雨在地面上的均匀面状输入特性,将降雨主要划分为穿透雨、茎秆流和冠层截留,并以不同的形式进入地表或散入大气。人工模拟降雨条件下,玉米全生育期内,降雨经过冠层再分配后穿透雨率平均为 64%,茎秆流率平均为 35%,冠层截留率平均仅占 1%。冠下穿透雨与玉米叶面积指数呈负相关关系,与降雨强度呈正相关关系。茎秆流和冠层截留与叶面积指数均呈正相关关系,其中茎秆流与降雨强度呈负相关关系。

作物冠层对降雨的再分配作用不仅受作物种类、品种、叶型等因素的影响,还与作物种植密度、降雨或喷灌特性等关系密切。种植密度不同,产生的集水面积也会发生变化,进而对田间的水量分布产生影响^[6]。通过对玉米的研究认为,玉米种植面积越大,穿透雨所占比例会随之增加,但是茎秆流率则会随之降低^[4,6,18]。此外本研究中在分析降雨强度对玉米穿透雨的影响时,仅设计了 2 个降雨强度,不利于分析。因此在以后的研究中需根据实际增加降雨强度梯度,以便于获得更精确的玉米穿透雨随降雨强度的变化规律。

穿透雨降低与茎秆流的增加,对坡耕地土壤侵蚀都具有重要意义。作物冠层对降雨起到缓冲作用,消减降雨动能,使其转化为能量较小的茎秆流和穿透雨。但是穿透雨又因作物形态不同而差异较大。玉米为高秆作物,其较高的株型使叶缘、叶尖处下落的大雨滴重新获得了能量,会对冠下溅蚀、增加坡面径流紊动性产生积极影响。在观测中我们也注意到,在作物生长旺盛期,玉米的茎秆流量占降雨量比例高达 70% 左右,如此多的雨水集中于作物茎秆根部下泄进入地表,势必会对土壤侵蚀产生一定影响。而在野外人工降雨观测中也发现玉米根部沿下坡方向有较为明显的茎秆流侵蚀痕迹。因此应重视玉米茎秆流的影响,在提高水分利用的同时,降低其侵蚀危害。作物冠层对降雨再分配作用研究是作物植被影响坡耕地土壤侵蚀发生发展的重要内容,也有助于阐明不同作物冠层的水分空间分异和农田水量平衡特征,为明晰农田生态水文过程和作物植被固土保水机理研究提供了理论参考。

参考文献 (References):

- [1] 王思远,刘纪远,张增祥,周全斌,赵晓丽. 中国土地利用时空特征分析. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.
- [2] Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, Zhuang D F, Zhang Z X, Zhang W, Tang X M, Deng X Z. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990—2000: An analysis based on Landsat TM data. Remote Sensing of Environment, 2005, 98(4): 442-456.
- [3] 雷慧闽. 华北平原大型灌区生态水文机理与模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [4] Lamm R F, Manges L H. Portioning of sprinlier irrigation water by a corn canopy. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2000, 43(3): 909-918.
- [5] 王迪,李久生,饶敏杰. 玉米冠层对喷灌水量再分配影响的田间试验研究. 农业工程学报, 2006, 22(7): 43-47.
- [6] 刘海军,康跃虎,王改庆. 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.
- [7] Steiner L J, Kanemansu T E, Clark N R. Spray losses and Partitioning of water under a center pivot sprinkler system. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1983, 26(4): 1128-2234.
- [8] Thompson L A, Martin L D, Norman M J, Howell A T. Scheduling effects on evaporate transpiration with overhead and below canopy application. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. USA: American Society of Agricultural Engineers, 1996: 182-188.
- [9] Haynes L J. Ground rainfall under vegetative canopy of crops. Agronomy Journal, 1940, 32(3): 176-184.
- [10] 马波,吴发启,马璠,周米京. 叶面积和降雨强度对大豆茎秆流的影响. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 58-62.
- [11] Li J S, Rao M J. Sprinkler water distributions as affected by winter wheat canopy. Irrigation Science, 2000, 20(1): 29-35.
- [12] 杜尧东,王建,刘作新,蔡崇光,杨久廷,甘作勋. 春小麦田喷灌的水量分布及小气候效应. 应用生态学报, 2001, 12(3): 398-400.

- [13] Saffigna P G, Tanner C B, Keeney D R. Non-uniform infiltration under potato canopies caused by interception, Stemflow, and Hilling. *Agronomy Journal*, 1976, 68(2): 337-342.
- [14] Ayars J E, Hutmacher R B, Schoneman R A, Dettinger D R. Influence of cotton canopy on sprinkler Irrigation uniformity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1991, 34(3): 890-896.
- [15] Bui E N, Box J E Jr. Stemflow, rain throughfall, and erosion under canopies of corn and sorghum. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(1): 242-247.
- [16] Gwynne M D, Glover J. Light rainfall and plant survival: measurement of stem flow run-off. *Nature*, 1961, 191(4795): 1321-1322.
- [17] Glover J, Gwynne M D. Light rainfall and plant survival in Africa I. maize. *Journal of Ecology*, 1962, 50(1): 111-118.
- [18] Quinn W N, Laflen M J. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1983, 26(5): 1445-1450.
- [19] Parkin T B, Codling E E. Rainfall distribution under a corn canopy: Implications for managing agrochemicals. *Agronomy Journal*, 1990, 82(6): 1166-1169.
- [20] van Elewijck L. Stemflow on maize: a stemflow equation and the influence of rainfall intensity on stemflow amount. *Soil Technology*, 1989, 2(1): 41-48.
- [21] van Elewijck L. Influence of leaf and branch slope on stemflow amount. *Catena*, 1989, 16(4/5): 525-533.
- [22] Paltineanu C I, Starra L J. Preferential water flow through corn canopy and soil water dynamics across rows. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(1): 44-54.
- [23] 李王成, 黄修桥, 龚时宏, 仵峰, 范永申. 玉米冠层对喷灌水量空间分布的影响. *农业工程学报*, 2003, 19(3): 59-62.
- [24] 马璠, 吴发启, 马波, 周米京. 叶面积和降雨强度对玉米茎秆流量的影响. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 25-28.
- [25] 郝芝建, 范兴科, 吴普特, 叶成恒. 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.
- [26] 郝芝建, 范兴科, 冯浩, 阳晓原. 玉米冠层对喷灌水量的再分配. *中国农学通报*, 2008, 24(5): 456-460.
- [27] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 王永东. 玉米植株对降雨再分配过程的影响. *中国农业科学*, 2011, 44(12): 2608-2615.
- [28] 蔡一林, 何晓阳. 玉米叶面积分布及估测. *西南农业大学学报: 自然科学版*, 1994, 16(1): 63-65.