

模拟降雨条件下谷子和冬小麦植株对降雨再分配过程的影响

马 波^{1,2}, 耿晓晨², 马 璠³, 李占斌¹, 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, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 宁夏农林科学院荒漠化治理研究所, 宁夏 银川 750002)

摘 要: 以谷子 (*Setaria italica*)、冬小麦 (*Triticum aestivum* Linn.) 为研究对象, 利用人工模拟降雨测定了不同降雨强度和生长阶段两种作物植株的穿透雨, 采用人工喷雾法测定了不同生长阶段的冠层截留, 根据水量平衡法计算了不同观测阶段的茎秆流。结果表明: 谷子、冬小麦冠层对降雨的再分配作用显著, 谷子冠下穿透雨率平均约为 79%, 茎秆流率平均约为 20%, 冠层截留率平均约占 1%; 冬小麦冠下穿透雨率平均约为 79%, 茎秆流率平均约为 19%, 冠层截留率平均约占 2%。在其全生育期内, 两种作物冠下穿透雨与茎秆流呈彼此消长趋势。穿透雨量和茎秆流量与降雨强度呈显著正相关关系, 但是穿透雨率和茎秆流率与降雨强度的关系不显著。茎秆流量和冠层截留量及其二者占总降雨量的比率均与作物叶面积指数呈显著正相关关系, 但穿透雨量及穿透雨率随叶面积指数增加呈显著下降趋势。

关键词: 作物; 降雨再分配; 影响因素; 穿透雨; 茎秆流; 冠层截留
中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0207-08

Effect of millet and winter wheat planting on the redistribution of rainfall under simulated rainfall conditions

MA Bo^{1,2}, GENG Xiao-chen², MA Fan³, LI Zhan-bin¹, WU Fa-qi²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Institute of Desertification Control, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Science, Yinchuan 750002, China)

Abstract: Effect of crop canopies on the reallocation of rainfall plays an important role in exploring the influence of crops on the formation and development of soil erosion in sloping fields, which has important significance for revealing the mechanism of crops affecting soil erosion as well as using agricultural water reasonably and effectively. The study aims to determine the through fall of two crops, millet and winter wheat, during different growth periods under different rainfall intensity. Based on the rainfall simulation experiment, canopy interception in different growth periods was determined with the artificial spray method, and stem flow was calculated by water balance. The results showed that rainfall reallocation was significantly affected by canopies of millet, with the mean through fall rate of 79%, the mean stem flow rate 20%, and the mean canopy interception rate 1%. Winter wheat showed the similar trend, with the mean through fall rate being 79%, the mean stem flow rate 19%, and the mean canopy interception rate being 2%. For the whole growth period, there was a opposite trend between the through fall and flow of stem of two crops under canopies. There was a significant positive correlation between through fall capacity or stem flow capacity and rainfall intensity, but there was no significant correlation between through fall rate or stem flow rate and the rainfall intensity. There was a positive correlation among stem flow and canopy interception as well as the proportion of both in the total rainfall capacity, but through fall capacity and through fall rate both decreased with the leaf area index increased. This finding could lay the foundation

收稿日期: 2014-04-19
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); 教育部高等学校特色专业建设项目(TS2406)
作者简介: 马 波(1982—), 博士, 主要从事黄土高原坡耕地土壤侵蚀试验研究。E-mail: soilcrop@163.com。
通信作者: 吴发启, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: wufaqi@263.net。

of improving water use efficiency and reducing soil erosion.

Keywords: crops; rainfall redistribution; influencing factors of rainfall reallocation; through fall; stem flow; canopy interception

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]。一般情况下,在降雨过程中除了蒸发外,降雨在经过作物后,被大致分配为穿透雨(Throughfall)、茎秆流(Stemflow)和冠层截留(Interception storage)三部分^[4]。由于蒸发量与降雨量相比量非常小,因而在研究中常常被忽略不计^[5]。因此,穿透雨、茎秆流和冠层截留就成为人们研究作物对降雨再分配的主要内容。这些问题的研究不仅能指导旱作农业中的节水灌溉、作物管理等,而且也分析坡耕地作物防蚀机理提供了理论依据^[6-7]。

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,而对作物冠层对降雨或喷灌水量的截留分异作用的研究目前还较少^[8-15]。从 Haynes 首次进行了几种作物穿透雨的研究至今,由于区域作物布局、需要解决的问题和工作性质与任务等的不同,许多研究工作者主要开展了玉米(*Zea mays*)、高粱(*Sorghum bicolor* (L.) Moench)、大豆(*Glycine max*)、马铃薯(*Solanum tuberosum*)、燕麦(*Avena sativa*)、春小麦和棉花(*Gossypium spp*)等主要作物对降雨再分配作用的分析,但研究得出的结果差异较大,且系统性不强^[9,11-12,14,16-17]。例如, Haynes 的研究得出玉米穿透雨量占总降雨量的 70%^[9],而 Quinn 和 Laflen 的结果则为 51%~84%^[18],Steiner 的测定为 31%~91%^[5],王迪等和李王成的结果分别为 45%和 47%^[8,19]。对茎秆流的测定结果表明玉米的茎秆流可占到总雨量的 40%~50%甚至更多^[5,9,15,18],高粱也有相似的结果^[15],大豆将约 1/3 的降雨转化为茎秆流^[9],马铃薯能将约 20%~46%的降雨汇集到茎秆^[13]等。冠层截留量在作物对降雨再分配的 3 个分量中占的份额较小。Lamm 等、Steiner 等、王迪等以及郝芝建等得出玉米冠层的截留量从 0.8 mm 到 3.6 mm 不等^[4-5,8,20],而 van Dijk 测得的结果为

0.066 mm^[21];冬小麦的为 0.68~1.47 mm^[22]。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^[8]。而由于作物冠层截留分异降雨,造成了降雨在地表的分布不均,不仅影响了作物植株对水分的利用和根系生长^[4,23],而且对土壤侵蚀也会产生一定的影响^[24,25]。可见,对于作物冠层截雨能力的观测研究,其成果还存在较大的差异,这可能是由于作物种类、品种、叶型、种植密度以及喷灌或降雨等试验条件的不同所造成的^[23]。目前的研究多集中于玉米植株,而针对作物全生育期内对降雨的拦截分配作用研究还颇为少见,这些问题还需要进一步的探究。本研究的目的是系统测定谷子和冬小麦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作物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。供试冬小麦品种为小偃 22,谷子为晋谷 29,分别于 2007 年 10 月 3 日和 2008 年 5 月 10 日种植在实验室邻近的实验种植园内,土壤为杨凌塬土。冬小麦为条播,播种量为 130 kg·hm⁻²;谷子为条播,行距 20 cm,待生长至三叶期时按 10 cm 株距定苗。两种作物播种前均按 25 000 kg·hm⁻²水平施入有机肥和 1 000 kg·hm⁻²磷酸钙。其它管理按当地农作习惯进行。依据作物生长和叶片数量及面积将谷子观测期划分为拔节初期、拔节中后期、抽穗期和灌浆期 4 个观测阶段;将冬小麦观测期划分为返青期、拔节期、抽穗前期和开花期 4 个观测阶段;根据各项试验的实际需要分别进行试验。在谷子生长季内每次随机采取植株分别进行穿透雨和冠层截留的观测,并依据水量平衡原理计算茎秆流量;在冬小麦生长季内每次随机采取冬小麦植株进行冠层截留的观测,于相应阶段在上述实验种植园进行穿透雨的观测,并依据水量平衡原理计算茎秆流量;各项观测项目在两种作物各个

生长阶段的不同降雨强度下各测定 1 次。根据当地夏秋两季多大到暴雨的特点,室内外降雨强度均设计为 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

本试验室内外人工降雨装置均采用中科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 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$,利用色斑法测得降雨机不同降雨强度下的平均雨滴直径为 1.8 mm,降雨动能是天然降雨动能的 75%,降雨均匀度可达到 80%。通过不同进水阀门开关-出水喷头组合来实现降雨强度的调节,可调节降雨强度范围为 $20\sim 160\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

1.2 冠下穿透雨测定

穿透雨测定是在每个观测阶段,将连续 3 行谷子从田间齐地面切下(每行 9 株,共计 27 株),迅速移植室内按种植行间距竖直固定在铁架上(图 1a)。在降雨机下方地面上按图 1a 所示的位置摆放口径为 5.5 cm 的雨量筒 60 个,先将设计降雨强度调节至 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,在不放置作物植株情况下降雨 30 min 以测定裸地降雨量。利用喷雾器将固定在铁架上的谷子植株表面充分润湿以消除冠层截留对第一次穿透雨测定的影响。待润湿后的谷子叶片不再向

下滴水之后。将铁架和玻璃杯同时放置在降雨机下,降雨 30 min 以收集冠下穿透雨;然后将设计雨强调节至 $80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,重复上述测定步骤。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($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$)。将作物冠下平均穿透雨量与降雨量相除,可得到作物的穿透雨率(%),即作物穿透雨量占冠上总降雨量的比例。每轮次实验前均需测定作物叶面积,并计算叶面积指数。

对于小麦,由于其植株不易用上述方法在室内固定,故该项目在室外田间测定。在相邻的 2 个行间地带按图 1b 所示位置和数量设置雨量收集装置,同时将相邻区域保持为裸露状态,设置一组雨量筒以测定裸地的降雨量。收集装置如图 1c 所示:分内外两个筒,外筒口径 6.5 cm,长期埋入地下,内筒即室内所用的雨量筒,用于收集穿透雨,这样雨量筒的放置和取出均较为简便。各轮次第一场降雨实验前对小麦植株进行润湿,以消除截留的影响,方法与前述相同。在 $40\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $80\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 设计降雨强度下各降雨 30 min 收集穿透雨。降雨前在小区内随机取 10 株小麦用以测定叶面积,并计算叶面积指数。

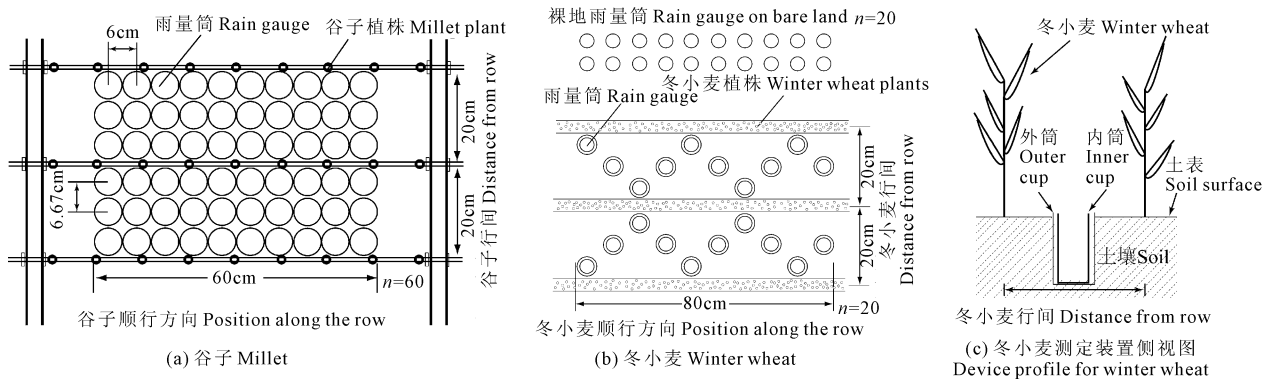


图 1 冠下穿透雨测定容器摆放位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of positions of cups of throughfall measurements under canopy

1.3 冠层截留测定

为获得玉米植株的最大截留能力,冠层截留量的测定采用喷雾法。将谷子和冬小麦植株各 20 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并称重,后将植株直立固定。用喷雾器在植株上方喷雾对植株进行数分钟的湿润(喷雾强度为 $0.3\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$),直至叶片表面附着形成的水滴开始滚落,再将植株缓慢置入塑料桶中称重。喷雾前后作物植株的重量差再除以单株作物的占地面积,即为作物植株的冠层截留量(mm)。每轮次实验前均需测定叶面积,并计算叶面积指数。

1.4 茎秆流测定

沿作物茎秆下流的水量根据水量平衡原理由式(1)计算:

$$S = P - T - I_a \tag{1}$$

式中, S 为沿作物茎秆下流量(mm); P 为冠层上方承接降雨量(mm); T 为冠下穿透降雨量(mm); I_a 为冠层截留量(mm)。

将单位时间沿茎秆下流量定义为单株作物茎秆流量($SF, \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$);将作物茎秆流量与降雨量相除,可得到作物的茎秆流率($SR, \%$),即作物茎秆流量所占降雨量的比例。

1.5 叶面积指数测定

单株谷子和冬小麦叶面积测定是将单株作物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 ,按下式计算单株作物的总叶面积 A_L 。

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

(2)

式中, A_L 为单株作物总叶面积(cm^2); k 为修正系数,取 0.85; 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 为单株作物的叶片数。

作物叶面积指数按下式计算。

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

(3)

式中, LAI 为叶面积指数; A_{Li} 为第 i 株作物总叶面积(cm^2); n 为作物植株数; I_w 为株距(cm); R_w 为行距(cm)。

2 结果与分析

2.1 作物作用下的降雨再分配

谷子和冬小麦分别在 4 个测试阶段观测了穿透雨和冠层截留,并据此计算了茎秆流。两种作物对降雨的拦截再分配各组分占总降雨量比例如表 1 所示。

表 1 谷子、冬小麦不同生育期穿透雨、茎秆流和冠层截留量占降雨量的比例

Table 1 Ratio of throughfall, stem flow and canopy interception to rainfall at different growth stages of millet and winter wheat.

作物 Crops	观测期 Observation period	叶面积指数 Leaf area index	穿透雨量比例 Ratio of throughfall /%	茎秆流量比例 Ratio of stemflow /%	冠层截留量比例 Ratio of interception storage/%
谷子 Millet	拔节初期 Early jointing stage	1.12	91.97	7.82	0.21
	拔节中后期 Mid-late jointing stage	1.71	86.75	12.87	0.38
	抽雄期 Tasseling stage	2.62	71.56	27.82	0.63
	灌浆期 Filling stage	3.38	66.18	32.96	0.86
	平均 Average	2.21	79.11	20.37	0.52
冬小麦 Winter wheat	返青期 Green period	2.64	81.88	17.00	1.12
	拔节期 Jointing stage	3.83	80.83	17.55	1.62
	抽穗前期 Early heading stage	4.84	78.90	19.30	1.80
	开花期 Anthesis stage	5.99	76.40	21.56	2.03
	平均 Average	4.32	79.50	18.86	1.64

注:表中所列三组分占降雨量的比例为两个设计降雨强度下的平均值。
Note: Ratio of these three pants of water to rainfall were average value of two rainfall intensities.

由表 1 可知,谷子在其全生育期内穿透雨占总降雨量比例(穿透雨率)平均为 79.11%,茎秆流量占总降雨量比例(茎秆流率)平均为 20.37%,冠层截留量占总降雨量比例(冠层截留率)平均为 0.52%。在谷子观测期内,穿透雨率随谷子生长逐渐降低,由拔节初期($LAI = 1.11$)的 91.91%降至灌浆期($LAI = 3.40$)时的 66.18%,降幅达 28.04%。与此同时,茎秆流率逐渐增大,至灌浆期时平均升高至 32.96%,增幅达到 321.48%。谷子冠层截留率总体较小,但由拔节初期的平均 0.21%增加至灌浆期的平均 0.86%,增幅为 309.52%。

冬小麦冠层对降雨的再分配过程与谷子具有相似的规律,在其全生育期内穿透雨率平均为 79.50%,茎秆流率平均为 18.86%,冠层截留率平均为 1.64%。与谷子相比,小麦冠层对降雨的再分配各组分雨量比例随小麦生长的变化幅度相对较小。其中穿透雨率由返青期($LAI = 2.62$)的平均 81.88%

降低至开花期($LAI = 5.92$)的平均 76.40%,降幅仅为 6.69%。茎秆流率平均由 17.00%增加至 21.56%,增幅为 26.82%。而冠层截留率则由平均 1.12%增加至平均 2.03%,增幅为 81.25%。但与谷子相似,由于单株小麦植株较小,叶面积有限,因此其冠层截留量也相对较小,在总降雨量中所占比例最高仅为 2%。

对于谷子和冬小麦而言,在其全生育期内冠层对降雨拦截分异后主要以穿透雨的形式使降雨到达地表,其次为茎秆流。与谷子相比,冬小麦在其全生育期内穿透雨率相对较低,而茎秆流率则较谷子高约 2%。

2.2 降雨强度和叶面积指数对降雨再分配的影响

2.2.1 对穿透雨的影响

由前述分析可知,降雨强度和叶面积指数是影响作物对降雨再分配的两个主要因素。图 2 反映的是两因素对谷子和冬小麦穿透雨变化的影响结果。

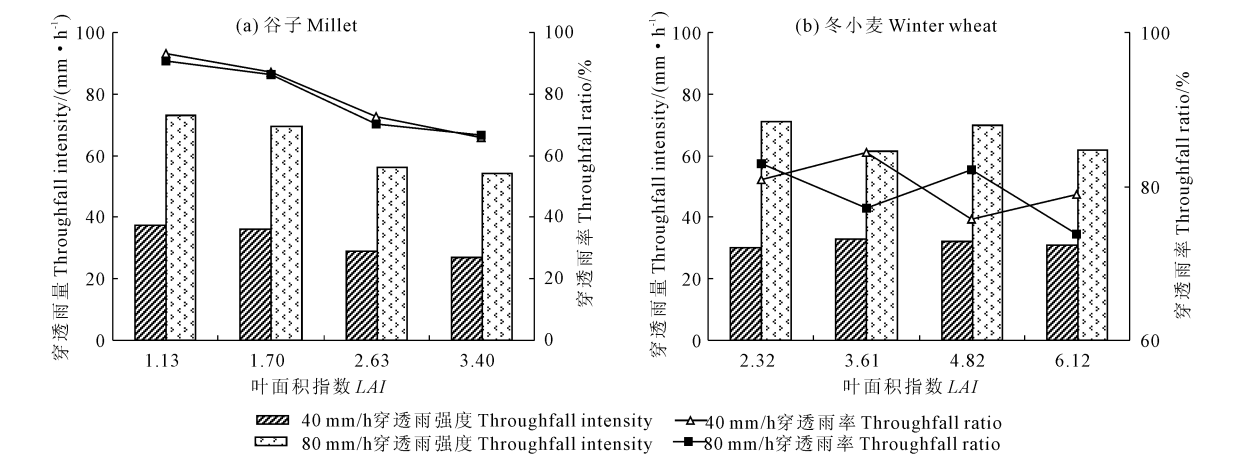


图 2 冠下穿透雨与叶面积指数关系

Fig.2 Relationship between LAI and throughfall under crop canopy

由图 2 可知,随着叶面积指数的增加,谷子冠下穿透雨强度逐渐降低。谷子冠下穿透雨量受降雨强度影响较大,在不同生长阶段,降雨强度增加至 80 mm·h⁻¹时,穿透雨强度的增幅均在 90%以上。较大降雨强度(80 mm·h⁻¹)下的穿透雨强相应较大,且变化幅度较大;而较小降雨强度(40 mm·h⁻¹)下的穿透雨强度变化也相对较平缓(图 2a)。虽然 40 mm·h⁻¹和 80 mm·h⁻¹降低趋势基本一致,但是数量差异较大,而占降雨量的比例则相差无几,说明降雨强度对谷子的穿透雨率影响较小。在不同雨强下谷子穿透雨率随叶面积指数增加均呈现下降趋势,同一阶段不同降雨强度下的穿透雨率较为相近,但是 80 mm·h⁻¹降雨强度下随叶面积指数波动较大,这可能是由于较强的降雨动能引起的。与谷子相比,穿透雨强度随冬小麦叶面积指数的下降趋势并不明显(图 2b)。其中 80 mm·h⁻¹降雨强度下的穿透雨波动较大。降雨强度对小麦穿透雨强度影响较为明显,降雨强度大,其穿透雨强度也相应较大。冬小麦穿透雨占总降雨量的比例大致随叶面积指数呈现下降趋势,而降雨强度对穿透雨率的影响甚微。

由方差分析可知,谷子和冬小麦穿透雨强度与其叶面积指数和降雨强度均存在显著差异($P < 0.05$);穿透雨率与其叶面积指数存在显著性差异($P < 0.05$),与降雨强度不存在显著性差异($P > 0.05$)。经回归分析得到谷子、冬小麦穿透雨与叶面积指数和降雨强度的回归方程,如下所示:

谷子: $I_{TH} = -7.195LAI + 0.772I + 16.989$
 $R^2 = 0.983 \quad F = 142.650^{**}$ (4)

$R_{TH} = -12.039LAI + 105.781$
 $R^2 = 0.969 \quad F = 189.924^{**}$ (5)

冬小麦: $I_{TH} = -0.980LAI + 0.788I + 4.483$

$R^2 = 0.988 \quad F = 203.789^{**}$ (6)

$R_{TH} = -1.455LAI + 0.350$
 $R^2 = 0.350 \quad F = 3.2360$ (7)

式中, I_{TH} 为平均冠下穿透雨强度(mm·h⁻¹); R_{TH} 为穿透雨率(%); I 为降雨强度(mm·h⁻¹); LAI 为叶面积指数; ** 表示 $P < 0.001$ 显著水平。

由式(4)、(5)可知,谷子穿透雨强度与其叶面积指数和降雨强度的拟合程度较高,其线性关系显著。对于冬小麦而言,即使剔除了降雨强度,冬小麦冠下穿透雨率与叶面积指数之间的关系仍不显著(式 7)。

2.2.2 对茎秆流的影响 图 3 反映的是降雨强度和叶面积指数对谷子和冬小麦茎秆流变化的影响。由图 3a 可知,两种降雨强度下,随着谷子叶面积指数的增加,茎秆流量和茎秆流率均呈增加趋势。同一生长阶段,80 mm·h⁻¹降雨强度下茎秆流量略高于 40 mm·h⁻¹降雨条件,且在谷子抽雄阶段($LAI = 2.62$)两者的差异达到最大。说明降雨强度对谷子茎秆流量的影响较为显著($P < 0.01$),随降雨强度增加的趋势明显。但是谷子茎秆流率受降雨强度的影响较小,其变化可能取决于谷子的叶面积和生长状况。

由于穿透雨所占总降雨量的比重较大,因此穿透雨随冬小麦生长产生的波动导致了经水量平衡计算所得的茎秆流随冬小麦叶面积指数增加也表现出明显的波动性,但总体呈现增加趋势(图 3b)。与谷子相似,降雨强度对冬小麦茎秆流量的多寡产生了深刻的影响,但是对茎秆流率的影响不显著($P > 0.05$)。

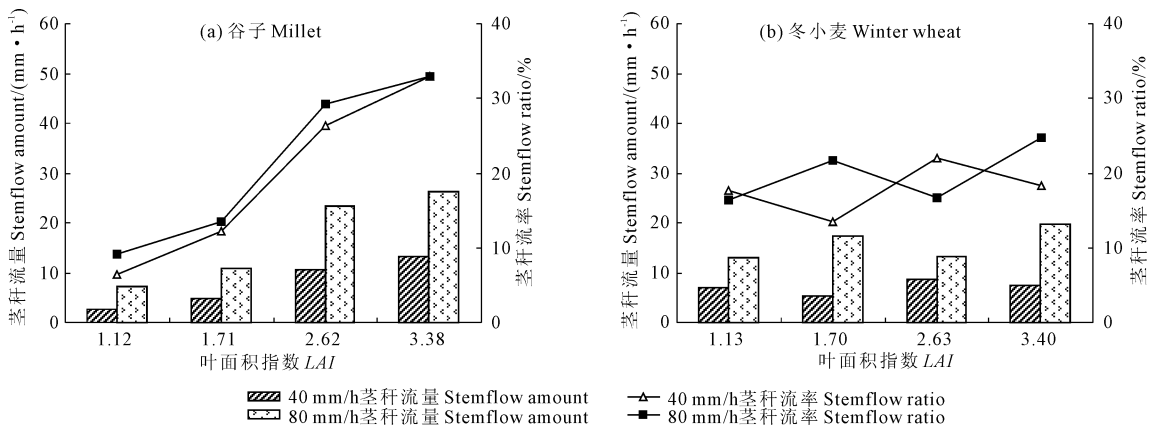


图 3 茎秆流与叶面积指数的关系

Fig.3 Relationship between stemflow and leaf area index.

注:图中叶面积指数数值为相同观测阶段穿透雨和冠层截留实验实测叶面积指数的平均值。
Note: Leaf area index in figure 3 are average of ones measured in throughfall and interception test in the same growth stage.

方差分析表明,谷子和冬小麦茎秆流量随其叶面积指数变化存在显著差异 ($P < 0.05$),随降雨强度变化存在极显著差异 ($P < 0.01$);茎秆流率随其叶面积指数变化存在显著差异 ($P < 0.05$),随降雨强度变化不存在显著差异 ($P > 0.05$)。由此可见,谷子和冬小麦茎秆流率与降雨强度的相关性较低,影响不显著。

经回归分析得到谷子、冬小麦茎秆流与叶面积指数和降雨强度的回归方程,如下所示:

谷子: $SF = 0.029 LAI^{1.386} I^{1.199}$
 $R^2 = 0.982 \quad F = 134.555^{**}$ (8)

$SR = 6.521 LAI^{1.386}$
 $R^2 = 0.960 \quad F = 143.104^{**}$ (9)

冬小麦: $SF = 0.067 LAI^{0.277} I^{1.153}$
 $R^2 = 0.875 \quad F = 17.505^{**}$ (10)

$SR = 12.503 LAI^{0.277}$
 $R^2 = 0.211 \quad F = 1.601$ (11)

式中, SF 为茎秆流量 ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$); SR 为茎秆流率 (%)。

由上述回归分析结果可知,冬小麦茎秆流率与其叶面积指数间的函数关系较弱。

2.2.3 对冠层截留的影响 图 4 反映的是用喷雾法研究的谷子和冬小麦的冠层截留测定结果。谷子在其全生育期内平均截留量为 0.28 mm。而就各个生育期而言,其截留量随作物生长呈增加趋势。若以 60 min 内降雨量来计算,分别占 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 下降雨量比例仅为 0.69% 和 0.35%,其对谷子降雨再分配的影响甚微。小麦全生育期平均截留量为 0.88 mm,按 60 min 内降雨量计,分别占 $40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降雨条件下降雨量比例为 2.19% 和 1.10%。从图中可知,虽两种作物的冠层截留量都相对很小,但也有随作物生长而增加的变化规律,可用以下两式表示。

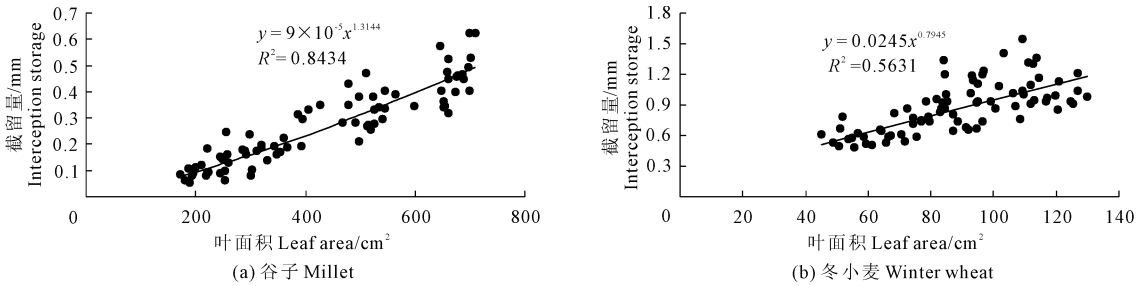


图 4 作物单株截留量与叶面积指数的关系

Fig.4 Relationship between leaf area index and interception storage per wheat plant

谷子: $I_a = 6.127 LAI^{0.779}$
 $R^2 = 0.999 \quad F = 2062.063^{**}$ (12)

冬小麦: $I_a = 5.125 LAI^{1.129}$
 $R^2 = 0.970 \quad F = 64.765^{**}$ (13)

式中, I_a 为冠层截留量 (mm)。

从图4a中可以看到:当谷子单株叶面积 $>400\text{ cm}^2$ 时,数据点偏离趋势线较远,但是其相关系数 R^2 为0.843,说明其相关性较高,叶面积与谷子单株截留量关系较为密切。与谷子相比,冬小麦截留量与单株叶面积回归相关系数 R^2 仅为0.563,说明两者的相关性较低。由方差分析可知,谷子和冬小麦的叶面积指数对其截留量的影响达到了极显著水平($P < 0.01$)。单株冬小麦的截留量整体大于谷子(图4b),且由于冬小麦分蘖的特性使其植株密度较大(实测 $500\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$),从而使单位面积上的冬小麦群体截留量更是远远大于谷子冠层。

由以上分析可知,随着作物叶面积指数的变化,谷子和冬小麦冠下穿透雨和茎秆流呈彼此消长的规律,即穿透雨降低的同时,茎秆流相应增加。而冠层截留量相对较小,并不是冠层再分配的主要组成部分。两种作物冠层对降雨拦截分异能力主要受穿透雨和茎秆流影响。穿透雨量的减少,使穿过作物冠层直接到达地表的降雨相应减少;与此同时,由作物叶片汇集而下的大雨滴由于大大降低了降落高度而削减了雨滴能量,这对减少降雨对地表的打击、防止溅蚀的发生具有积极的作用。更多的降雨沿作物茎秆到达作物根部土壤,更有利于作物对水分的吸收和利用,提高存储在田间的有效水量。

3 讨论

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^[4]。本研究中对分析降雨强度对穿透雨和茎秆流的影响时,仅设计了两个降雨强度,不易全面反映谷子和冬小麦生育期的降雨再分配情况。因此在以后的研究中需根据实际增加降雨强度梯度,以便于获得更为精确的变化规律和系统的研究成果。

冬小麦冠层对降雨拦截形成的穿透雨可占降雨量76%~82%,略高于杜尧东的观测成果(70%~75%)^[12]。冬小麦冠层截留量随冬小麦叶面积指数增加而增加,其最大截留量出现在抽穗期至开花期,这与王庆改^[26]和刘战东^[27]分别在喷灌和浸水条件下得到的结论基本一致。采用喷雾法测得冬小麦冠层截留量为0.49~1.55 mm,这与王迪^[22]采用喷灌法观测的结果相近,而略高于王庆改^[26]和Kang^[28]的观测结果。王庆改和Kang采用“擦拭法”测定的结果仅为1 mm^[26,28],这可能是由于观测方法、作物叶片状态及湿润过程与程度不同造成的差异。

Li^[11]和杜尧东^[12]等提出的冬小麦冠层截留量较高,在24%~30%之间,远远高于本研究结果。这是因为他们所测定的截留量包括有冬小麦的茎秆流,这两者合计占冠上承接水量的比例也高于本研究中相应两者占总降雨量12%~24%的比例。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。

4 结论

谷子和冬小麦虽同为小粒作物,但是其冠层对降雨的再分配作用各有不同。测定结果表明,全生育期内,谷子冠下穿透雨量占总降雨量比例约为79%,茎秆流量约占20%,冠层截流量最小,约占总降雨量不足1%;冬小麦在其全生育期内冠下穿透雨量占总降雨量比例约为79%,茎秆流量约占19%,冠层截流量约占2%。随着作物生长,穿透雨与茎秆流呈彼此消长的规律,即穿透雨降低的同时,茎秆流则相应增加。

降雨强度和叶面积指数对两种作物冠层的降雨再分配作用影响显著。降雨强度的提高可显著增加穿透雨量和茎秆流量,但是对二者占总降雨量的比例影响不显著。作物叶面积指数的增加可显著降低穿透雨量和穿透雨率,并且茎秆流和冠层截留及其二者占总降雨量的比例均随叶面积指数的增加而增加。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:

- [1] 王思远,刘纪远,张增祥,等.中国土地利用时空特征分析[J].地理学报,2001,56(6):631-639.
- [2] Liu Jiyuan, Liu Mingliang, Tian Hanqin, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990—2000: An analysis based on Landsat TM data[J]. 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[J]. Transactions of the ASABE, 2000,43(3):909-918.
- [5] Steiner L J, Kanemansu T E, Clark N R. Spray losses and partitioning of water under a center pivot sprinkler system[J]. Transactions of the ASABE, 1983,26(4):1128-2234.

[6] 李久生. 喷灌均匀系数对土壤水分空间分布及作物产量影响的研究现状[J]. 农业工程学报, 1998, 14(3): 132-137.

[7] 桑以琳. 土壤学与农作学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.

[8] 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[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 43-47.

[9] Haynes L J. Ground rainfall under vegetative canopy of crops[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1940, 32(3): 176-184.

[10] 马 波, 吴发启, 马 璠, 等. 叶面积和降雨强度对大豆茎秆流的影响[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 58-62.

[11] Li Jiusheng, Rao Minjie. Sprinkler water distribution as affected by winter wheat canopy[J]. Irrigation Science, 2000, 20(1): 23-35.

[12] 杜尧东, 王 建, 刘作新, 等. 春小麦田喷灌的水量分布及小气候效应[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 398-400.

[13] Saffigna G P, Tanner B C, Keeney R D. Non-uniform infiltration under potato canopies caused by interception, stemflow, and hilling[J]. Agronomy Journal, 1976, 68(2): 337-342.

[14] Ayars E J, Hutmacher B R, Schoneman A R, et al. Influence of cotton canopy on sprinkler irrigation uniformity[J]. Transactions of the ASABE, 1991, 34(3): 890-896.

[15] Bui E N, Box J E Jr. Stemflow, rain throughfall, and erosion under canopies of corn and sorghum[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(1): 242-247.

[16] 郝芝建, 范兴科, 冯 浩, 等. 玉米冠层对喷灌水量的再分配[J]. 中国农学通报, 2008, 24(5): 456-460.

[17] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米植株对降雨再分配过程的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12): 2608-2615.

[18] Quinn W N, Laflen M J. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy[J]. Transactions of the ASABE, 1983, 26(5): 1445-1450.

[19] 李王成, 黄修桥, 龚时宏, 等. 玉米冠层对喷灌水量空间分布的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 59-62.

[20] 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[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 25-27.

[21] van Dijk A I J M, 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]. Journal of Hydrology, 2001, 247(3): 239-262.

[22] 王 迪, 李久生, 饶敏杰. 喷灌冬小麦冠层截留试验研究[J]. 中国农业科学, 2006, 39(9): 1859-1864.

[23] 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[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 137-142.

[24] Glover J, Gwynne M D. Light rainfall and plant survival in Africa I. maize[J]. Journal of Ecology, 1962, 50(1): 111-118.

[25] van Elewijck L. Stemflow on maize: a stemflow equation and the influence of rainfall intensity on stemflow amount[J]. Soil Technology, 1989, 2(1): 41-48.

[26] 王庆改, 康跃虎, 刘海军. 冬小麦冠层截留及其消散过程[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 3-8.

[27] 刘战东, 高 阳, 巩文军, 等. 冬小麦冠层降雨截留过程及其模拟研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 53-58.

[28] Kang Yaohu, Wang Qinggai, Liu Haijun. Winter wheat canopy interception and its influence factors under sprinkler irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3): 189-199.

(上接第 175 页)

[20] 海米提·依米提, 热比娅·吐尔逊, 胡小韦, 等. 新疆于田绿洲盐渍化土壤盐分动态变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 100-104.

[21] 张金池, 李东海, 林 杰, 等. 基于小流域尺度的土壤可蚀性 K 值空间变异[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2199-2206.

[22] 熊亚兰, 魏朝富. 坡面土壤水分特性的空间变异及其水库贮量[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 136-199.

[23] 刘国华, 海米提·依米提, 王庆峰, 等. 于田绿洲土壤盐分特征分析[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3): 260-263.

[24] 胡小韦. 于田绿洲土壤盐渍化与地下水环境变化的关系研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2008.

[25] 梅志雄, 黎 夏. 基于地统计分析的房价空间分布差异研究——以东莞市 2006 年普通住宅价格为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2007, (4): 120-126.

[26] 李晓晖, 袁 峰, 贾 蔡, 等. 基于反距离加权和克里格插值的 $S-A$ 多重分型滤波对比研究[J]. 测绘科学, 2012, 37(3): 87-89.

[27] Wang Qian, Ding Ning, Sun Yingjun. Comparison between sequential gaussian simulation and kriging interpolation on soil heavy metal pollution[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 12(3): 561-564.

[28] 彭 彬, 周艳莲, 高 苹, 等. 气温插值中不同空间插值方法的适用性分析——以江苏省为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 539-548.

[29] 阮本清, 许凤冉, 蒋任飞. 基于球状模型参数的地下水水位空间变异特性及其演化规律分析[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 573-579.

[30] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1202-1209.