大豆冠层对降雨再分配的影响

徐 宁[1], 杨一凡[1], 林青涛[1], 吴发启[2]

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 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)

摘 要: [目的] 研究农作物冠层的降雨再分配特征,为区域水土流失治理和生态环境建设提供科学依据。[方法] 以大豆作为研究对象,采取人工模拟降雨法以及喷雾法观测大豆不同生育期(幼苗期、始花期、盛花期、结荚期和始粒期)以及降雨强度(40,80 mm/h)下的茎秆流量、穿透雨量以及冠层截留量,探究大豆全生育期的冠层截留分异特征及叶面积指数和降雨强度对大豆降雨再分配的影响。[结果] 大豆生育期内,茎秆流率平均值为 15.02%,穿透雨率平均值为 83.94%,冠层截留率平均值仅为 1.04%。表明冠层截留所占降雨再分配的比例很小,其对降雨空间分异的影响所占比例较小。随着叶面积指数的增加,大豆的茎秆流量及茎秆流率,冠层截留量及冠层截留率均显著增加,然而穿透雨强度及穿透雨率显著减小。当降雨强度由 40 mm/h 增大到 80 mm/h 时,大豆的茎秆流量显著增加,但茎秆流率随雨强的变化并无显著差异;穿透雨量随着雨强的增大而增大,且随着雨强的变化存在显著性差异,但穿透雨率随降雨强度的变化并无显著差异。[结论] 大豆冠层对降雨的再分配主要体现在茎秆流以及穿透雨,冠层截留所占比例很小,且叶面积指数与降雨强度均对降雨再分配有着重要的影响作用。

关键词: 大豆; 降雨再分配; 茎秆流; 穿透雨; 冠层截留

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)02-0115-05 **中图分类号**: S157.1

文献参数: 徐宁, 杨一凡, 林青涛, 等. 大豆冠层对降雨再分配的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 115-119. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.02.016; Xu Ning, Yang Yifan, Lin Qingtao, et al. Effects of soybean canopy on rainfall redistribution [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 115-119.

Effects of Soybean Canopy on Rainfall Redistribution

Xu Ning[1], Yang Yifan[1], Lin Qingtao[1], Wu Faqi[2]

(1. *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*)

Abstract: [Objective] The rainfall redistribution characteristics of crop canopy were studied, in order to provide scientific basis for regional soil erosion control and ecological environment construction. [Methods] Soybean was used as the research object. The artificial rainfall simulation and spray method were used to observe the stalk flow, penetrating rainfall and canopy interception at different growth stages of soybean (seedling stage, initial blossoming stage, full flowering stage, pod bearing stage and initial pod filling stage) under different rainfall intensity (40, 80 mm/h), in order to explore the effects of canopy interception differentiation characteristics in the whole growth period of soybean and the influence of leaf area index and rainfall intensity on rainfall redistribution. [Results] The average stalk flow rate was 15.02%, the average penetration rate was 83.94%, and the average canopy interception rate was only 1.04%. It showed that the proportion of rainfall redistribution in canopy interception to rainfall redistribution was small, and its influence on rainfall spatial differentiation was relatively small. With the increase of leaf area index, the stalk flow rate and stalk flow rate, canopy interception and canopy interception rate of soybean increased significantly, but the penetration rain intensity and penetration rate decreased significantly. When the rainfall intensity increased from 40 mm/h to 80 mm/h, the stalk flow rate of soybean increased significantly, but there was no significant difference between stalk flow rate and rain intensity. The penetration rainfall increased significantly with the

收稿日期:2019-11-06 **修回日期**:2019-12-08

资助项目:国家自然科学基金项目"黄土坡耕地作物覆盖与管理的防蚀作用研究"(41977065)

第一作者:徐宁(1994—),女(汉族),陕西省韩城市人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。Email:471835123@qq.com。

通讯作者:吴发启(1957—),男(汉族),陕西省黄陵县人,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。Email:wufaqi@263.net。

increase of rain intensity, but there was no significant difference between the penetration rate and the change of rainfall intensity. [Conclusion] The redistribution of rainfall by soybean canopy is mainly reflected in stalk flow and penetrating rain. Canopy interception accounts for a small proportion. And both leaf area index and rainfall intensity have an important effect on rainfall redistribution.

Keywords: soybean; rainfall redistribution; stalk flow; penetrating rain; canopy interception

水土流失作为制约我国生态环境建设和社会可持续发展的主要因素之一,其研究和发展一直以来都是人们讨论的热点问题。如何有效防治水土流失并减少土壤侵蚀俨然已经成为我们急需解决的问题。林草植被覆盖是防治水土流失的根本措施[1],其水土保持功能突出,该功能原理表现为冠层截留、凋落物持水和根系保土等。作物也是植被的一种类型,与森林植被相比,作物防蚀机制主要表现在冠层对降雨的再分配、增加降雨入渗和作物根系固土等 3 个方面[2-3]。其中,针对作物冠层降雨再分配作用的研究相比林木冠层降雨截留研究相对不够深入和系统,并且差异性较大[4-5]。从作物的空间分布来看,作物对降雨的再分配主要体现为茎秆流、穿透雨、冠层截留以及蒸散发,其中蒸散发在降雨过程中所所占比例例极小,可忽略不计。因此其计算方法可以得到简化,即将冠层内蒸散发视为零,从而在已知茎秆流、穿透雨以及冠层截留中的任意两个的基础上,利用水量平衡方程可求得第 3 个量[6]。作物种类、生长季节、长势和降雨强度不同时,其对降雨分配量的大小也出现了差异,即就是同种作物差异也很大。玉米是前人研究较为集中的作物,林代杰等[7]认为穿透雨占总降雨量的 30%~90%,茎秆流量占 40%~50%,截留量总体较小。就全生育期的研究结果来看,谷子、玉米、冬小麦和大豆的平均穿透雨量分别占总降雨量的 79.55%,62.5%,79.15%和 86.33%;茎秆流分别占 29.38%,38.2%,19.1%和 12.79%;冠层截留量分别为 0.28,0.10,0.85,0.50 mm[8-9]。Haynes[10]对包括大豆、玉米、苜蓿等 6 种植物的降雨再分配进行了研究,指出大豆在生长旺盛时期,其茎秆流约占大气降雨的1/3,玉米、大豆和燕麦的穿透雨占总降雨量 70%,65%和 80%。王迪等[11]利用喷灌技术研究得出,玉米茎秆流约占其冠层上部水量的 43%,穿透雨占 45%。van Dijk[12]研究得出玉米的截留量约为 0.066 mm,郝芝建[13]等得出喷灌条件下玉米冠层截留量约为0.8~3.6 mm 不等。然而,这些研究主要针对玉米,大豆作为黄土高原地区的主要农作物之一,对其降雨再分配的研究却较少,且已有的研究都是在大豆生长旺盛期或接近旺盛期进行的[14],很难反映整个生长季内大豆茎秆流、穿透雨及冠层截留的特征。因此,本研究以大豆作为研究对象,通过人工模拟降雨观测并探讨大豆不同生育期和降雨强度下的茎秆流、穿透雨,冠层截留的变化,并且分析叶面积指数、降雨强度与这三者间的关系,从而得出大豆对降雨再分配的影响,为防治水土流失并提高农耕地水分利用效率提供理论基础[15],并且为作物植被保持水土机理的研究及农业可持续性发展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2018 年 7 月到 8 月在西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治教学试验基地的径流小区上进行。人工模拟降雨试验采用中科院水保所研制的下喷式降雨模拟器进行。喷头安装高 4 米,有效降雨面积 3 m×3 m。径流小区面积为 4 m×1 m,大豆选用中黄 13 号,株行距为 15 cm×40 cm。由于该地区雨季降雨量大[16],因此试验设计了两个雨强,分别为 40 和 80 mm/h,可通过阀门调节供水压力以控制降雨强度。大豆的播种时间以及后续的田间管理参照黄土高原大田实际情况进行,并且根据大豆生长过程中叶片的数量和面积将大豆全生育期划分为幼苗期、始花期、盛花期、结荚期和始粒期 5 个生育期。在不同降雨强度下于大豆各生育期内随机选取大豆并分别测定大豆茎秆流、穿透雨、冠层截留量和叶面积,试验重复 3 次。

1.2 指标测定

1.2.1 大豆茎秆流测定 在大豆每个生育期内,将连续的两行(16 株)大豆沿地面水平切下迅速移至室内,调整并竖直固定大豆植株在茎秆流收集桶中,然后以大豆播种时的株行距为依据,将其移至降雨机下方开始降雨试验,20 min 后将桶中收集的水倒入量筒中测量水体积,并且根据大豆株行距与雨量筒水量计算茎秆流量。不同降雨强度下各测定 1 次。茎秆流率(%)的计算通过大豆茎秆流量与降雨量相除得到,观测工作结束后,立即测定大豆的叶面积。其中茎秆流量计算公式为。

$$S_a=\frac{10\times60\times10^3V}{20r_wI_w} \tag{1}$$

式中:S_a 为茎秆流量(mm/h);V 为雨量筒水量(ml);r_w 为行距(cm);I_w 为大豆间距(cm)。

1.2.2 大豆穿透雨测定 大豆穿透雨量可通过室外

人工模拟降雨进行测定,分别在 40 和 80 mm/h 的雨强下重复进行同样操作。首先在大豆径流小区上于上部、中部和下部的冠层下并排放置三个同等规格的矩形集雨槽(长 30 cm,宽 10 cm,高 7 cm)。然后在每一个集雨槽的底端开一个小口连接乳胶管,以便集雨槽中的雨水可以顺利收集到集雨桶中。此时集雨桶中收集的水量即为大豆穿透雨量。

1.2.3　*大豆冠层截留测定*　利用喷雾法可得到大豆冠层截留量[12]。在大豆各生育期,由于将大豆植株齐地面切下后植株切口处会出现水分的散失与吸收,因此用石蜡熔浆快速封闭切口。封闭切口后迅速转移大豆植株到室内去称重,然后垂直固定大豆植株,使用喷雾器于植株上方开始喷雾,观察其表面湿润直至叶尖处出现滴水,叶基处也有茎秆流出现时称取植株的质量。大豆冠层截流量即为喷雾之前与喷雾之后大豆植株的质量差与单株大豆的占地面积之商。在试验之前需要测定大豆的叶面积。

1.2.4　*叶面积指数测定*　大豆某生育期的叶面积指数(LAI)可通过叶面积与相应土地面积的比值来进行计算,其中,大豆叶面积的测量采用比叶重法/重量比例法[17],即利用在大豆各生育期的单位面积叶片干物质质量与其叶面积的定量关系计算,计算公式为:

$$\mathrm{LSI}=\frac{T_{ai}}{D_{wi}} \tag{2}$$

$$A_L=W\cdot\mathrm{LSI} \tag{3}$$

式中:LSI 为比叶面积(cm^2/g);A_L 为单株大豆的叶面积(cm^2);D_{wi} 为大豆某生育期单位叶面积的干质量(g);T_{ai} 为大豆某生育期的单位叶面积(cm^2);W 为所测大豆植株的叶干物质质量(g)。

1.3　数据处理

利用 SPSS 21.0 进行大豆植株在同一雨强不同生育期下降雨再分配特征的单因素方差分析,利用独立样本 T 检验比较同一生育期不同雨强下降雨再分配特征的差异,Origin 9.1 作图。

2　结果与分析

2.1　大豆植株影响下的降雨再分配

经过试验观测得到了 40,80 mm/h 雨强的茎秆流量、穿透雨量以及冠层截留量。大豆不同生育期截留分异特征详见表 1。由表 1 可知,大豆全生育期的茎秆流量占总降雨量的比例(茎秆流率)平均值为 15.02%,穿透雨占总降雨量的比例(穿透雨率)平均值为 83.94%,冠层截留量占总降雨量的比例(冠层截留率)平均值为 1.04%。大豆整个生育期中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。随着大豆的生长,茎秆流率不断增大,从幼苗期的 3.24%增加到始粒期的 22.84%,增加约 5 倍;穿透雨率随着大豆生育期的后移逐渐降低,从幼苗期的 96.57%降低到始粒期的 75.49%,降低的幅度为 21.83%,但在各个生育期内,穿透雨率都是最高的,这可能与大豆自身的冠层特征有关,其冠层对于降雨拦截的能力比较弱,使得有较高的穿透雨率;冠层截留率在大豆全生育期内整体都比较小且随大豆的生长不断增大,从幼苗期的 0.19%增加到始粒期的 1.67%,增加了约 7 倍。

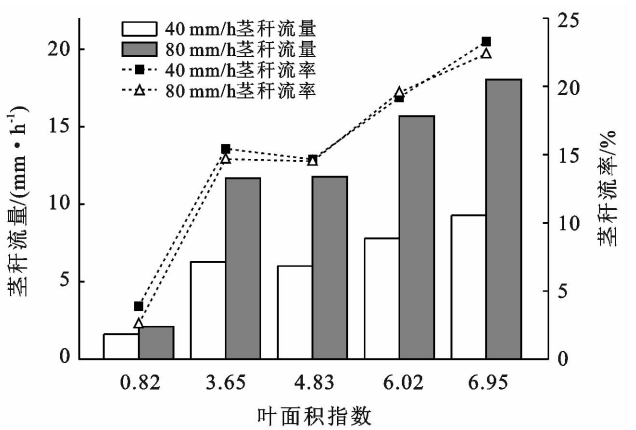
表 1　大豆不同生育期茎秆流、穿透雨和冠层截留量占总降雨量的比例

生育期	叶面积指数	茎秆流率/%	穿透雨率/%	冠层截留率/%
幼苗期	0.82	3.24	96.57	0.19
始花期	3.65	15.05	84.17	0.78
盛花期	4.83	14.59	84.33	1.08
结荚期	6.02	19.37	79.13	1.50
始粒期	6.95	22.84	75.49	1.67

注:表中所列茎秆流率、穿透雨率和冠层截留率为两个设计降雨强度(40,80 mm/h)下的平均值。

2.2　降雨强度和叶面积指数对降雨再分配的影响

2.2.1　*对茎秆流的影响*　降雨强度和叶面积指数是影响作物对降雨再分配的两个重要因素。不同雨强和叶面积指数对大豆茎秆流的影响均呈现一定的规律(图 1)。



注:叶面积指数的数值为同一观测阶段的茎秆流和冠层截留测得的叶面积所计算的叶面积指数的平均值。下同。

图 1　叶面积指数与茎秆流的关系

在本研究所设计的两个雨强下,大豆茎秆流量均随大豆叶面积指数的增加而增加,且存在显著性差异($p<0.05$),这主要是由于叶面积的增加致使降雨汇集的有效面积增大。40 mm/h 雨强下茎秆流量从大

豆幼苗期(LAI=0.82)的 1.62 mm/h 增加到始粒期(LAI=6.95)的 9.29 mm/h;80 mm/h 雨强下茎秆流量从大豆幼苗期(LAI=0.82)的 2.10 mm/h 增加到始粒期(LAI=6.95)的 18.05 mm/h。并且在同一生长期,降雨强度增大使得单位面积大豆叶片汇集雨量的增加,80 mm/h 雨强下的茎秆流量均高于 40 mm/h 雨强下的茎秆流量,也说明了茎秆流量随着雨强的增加呈现增加趋势,且茎秆流量随雨强变化存在显著差异($p<0.05$)。两个雨强下茎秆流率随着大豆叶面积指数和降雨强度的增加呈现一定的浮动,从幼苗期(LAI=0.82)40 mm/h 雨强下的3.88%增加到始粒期(LAI=6.95)的 23.28%;80 mm/h 雨强下从幼苗期(LAI=0.82)的 2.60%增加到始粒期(LAI=6.95)的 22.39%。其中茎秆流率随着叶面积指数的增加而增加,且随着叶面积指数的变化存在显著性差异($p<0.05$)。最大的茎秆流率为 23.28%,即茎秆流量最大还不到总降雨量的 1/4,这很有可能是大豆这种冠层结构并不能够很好的汇集雨水以形成茎秆流,且茎秆流率随降雨强度的变化并无显著差异($p>0.05$)。

2.2.2 对穿透雨的影响 不同雨强和叶面积指数对大豆穿透雨的影响均呈现一定的规律(图 2)。大豆的穿透雨量(穿透雨强度)随大豆叶面积指数的增加而减小,并且穿透雨量随着叶面积指数的变化呈现出显著性差异($p<0.05$)。40 mm/h 雨强下大豆冠下穿透雨量从幼苗期(LAI=0.82)的 38.74 mm/h 减小到始粒期(LAI=6.95)的 30.55 mm/h;80 mm/h 雨强下大豆冠下穿透雨量从幼苗期(LAI=0.82)的 78.16 mm/h 减小到始粒期(LAI=6.95)的 60.87 mm/h。在大豆同一生长期,80 mm/h 雨强下的穿透雨强度均高于 40 mm/h 雨强下的穿透雨强度,增加的幅度均可达到 90%以上,且穿透雨强度随雨强的变化存在显著差异($p<0.05$),因此大豆冠下穿透雨量受降雨强度的影响较大。这可能是由于雨滴动能因降雨强度的增加而增加后,雨滴对叶片的打击力度进而增强,致使雨滴停留在叶片上的时间减少,大豆冠下单位时间内的雨量增加,因此导致穿透雨量的增加。随着大豆叶面积指数的增加,穿透雨率减小且存在显著性差异($p<0.05$),从幼苗期(LAI=0.82)40 mm/h 雨强下的 96.28%减小到始粒期(LAI=6.95)的 74.76%;80 mm/h 雨强下穿透雨率从幼苗期(LAI=0.82)的 96.86%减小到始粒期(LAI=6.95)的 76.22%。同一生育期大豆在 40 mm/h 和 80 mm/h 雨强下的穿透雨率数值相近,且穿透雨率随降雨强度变化不存在显著性差异($p>0.05$)。大豆自身的生理状态也会影响其降雨再分配,并不仅仅由降雨强度决定其截留分异作用的发挥,因此降雨强度对穿透雨率的影响存在不确定性。

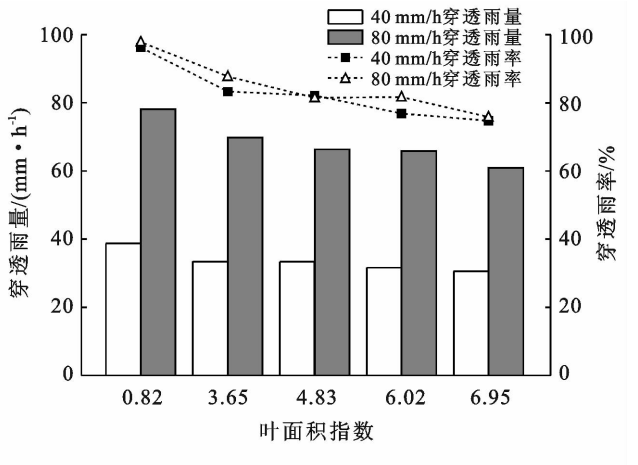


图 2 叶面积指数与穿透雨的关系

2.2.3 对冠层截留的影响 由表 2 可知,随着叶面积指数的增加,大豆冠层截留量也随之增加,全生育期的冠层截留量均值为 0.556 mm,且整体数值均较小。从冠层截留率来看,以 60 min 降雨历时进行计算,40 mm/h 雨强和 80 mm/h 雨强下从大豆幼苗期(LAI=0.82)的 0.25%和 0.13%增加到了始粒期(LAI=6.95)的 2.23%和 1.11%。冠层截留率最大仅为大豆始粒期(LAI=6.95)时的 2.23%和1.11%。由此可见,大豆降雨再分配中冠层截留所占的比例较小,其对降雨截留分异的影响所占比例也较小。

表 2 大豆不同生育期冠层截留特征

叶面积指数	40 mm/h 雨强		80 mm/h 雨强	
	冠层截留量/mm	冠层截留率/%	冠层截留量/mm	冠层截留率/%
0.82	0.096	0.25	0.104	0.13
3.65	0.404	1.04	0.416	0.52
4.83	0.559	1.44	0.601	0.72
6.02	0.81	2.00	0.79	1.00
6.95	0.892	2.23	0.888	1.11

注:截留率按照 60 min 降雨历时进行计算。

3 讨 论

本研究得出,大豆全生育期茎秆流量和茎秆流率在两个雨强下的平均值分别在 1.86~13.67 mm/h 和 3.24%~22.84%之间,且均随叶面积指数的增加而显著增加,这与马波[18]的研究结果相近。穿透雨和茎秆流变化恰好相反,研究测得大豆穿透雨量和穿透雨率分别在 58.45~45.71 mm/h 和 96.57%~75.49%之间,叶面积指数越大,穿透雨量和穿透雨率反而显著减小。这可能是由于穿透雨越小,雨滴从大

豆冠层中穿过落到地面的雨量就会减小,从而停留在大豆叶片上的雨滴数量就会增多,进而茎秆流量变大。本研究测得的两个雨强下的平均冠层截留量在0.1～0.89 mm之间,其值略小于马璠[19]的研究结果。这可能是由于所采取的观测方法不同,马璠使用的是浸泡法,本试验采取的是喷雾法。但均体现出大豆冠层截留量占总降雨比例很小,这一部分在大豆截留分异中起到的作用相比茎秆流和穿透雨而言很微弱。降雨强度对大豆截留分异也有显著的影响,降雨强度增加,茎秆流量和穿透雨量均增加,且随雨强的变化存在显著性差异,然而雨强的变化对茎秆流率与穿透雨率无显著影响。本研究通过人工模拟降雨,探讨大豆不同生育期茎秆流、穿透雨和冠层截留与大豆叶面积指数和降雨强度之间的关系,以期对作物防蚀机理以及黄土高原农耕地土壤侵蚀防治提供一定理论基础。同时本试验的设计中也存在一定的改进之处,分析降雨强度的变化对大豆降雨再分配的影响作用时,降雨强度的梯度设置还不够,在本试验当中仅仅设置了40和80 mm/h两个降雨强度梯度,相对而言不能够很全面的反映大豆生育期的降雨再分配,再多增加几个降雨强度能够更加系统全面的反映大豆降雨再分配特征及其规律。

4　结 论

(1) 随着大豆的生长,茎秆流与冠层截留所占总降雨量比例不断增加,穿透雨则不断减少。大豆全生育期的茎秆流率为15.02%;穿透雨率为83.94%;冠层截留率仅为1.04%。

(2) 叶面积指数对大豆降雨再分配有着显著的影响作用,随着叶面积指数的增加,大豆的茎秆流量及茎秆流率,冠层截留量及冠层截留率均显著增加,然而穿透雨量及穿透雨率显著减小。

(3) 降雨强度对大豆截留分异也起着显著的影响作用。本研究设计了两个降雨强度,降雨强度变大,大豆的茎秆流量与穿透雨量均增大,且两者随雨强的变化存在显著性差异,然而茎秆流率和穿透雨率随雨强的变化并无显著性差异。对农作物冠层降雨再分配特征的研究,可为作物植被保持水土机理研究及农业可持续性发展提供参考依据,对防治该区域水土流失和生态环境建设具有重要意义。

[参 考 文 献]

[1] Frasson R P D M, Krajewski W F. Rainfall interception by maize canopy: Development and application of a process-based model [J]. Journal of Hydrology, 2013, 489:246-255.

[2] 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.

[3] Lamm F R, Manges H L. Partitioning of sprinkler irrigation water by a corn canopy [J]. Transactions of the American Society of Agriculture Engineers, 2000, 43(4):909-918.

[4] 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.

[5] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.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,2012,26(4):208-211,215.

[6] 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[J].生态学报,2015,35(2):497-507.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 马璠,吴发启,马波,等.叶面积和降雨强度对玉米茎秆流量的影响[J].农业工程学报,2008,24(10):25-28.

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

[11] 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.

[12] van Dijk A I J M, Bruijnzeel A L. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an analytical model(Part2): Model validation for a tropical upland mixed cropping system [J]. Journal of Hydrology, 2001,247(3):239-262.

[13] 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.

[14] Armstrong C L, Mitchell J K. Transformations of rainfall byplant canopy [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(3):688-696.

[15] 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[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):137-142.

[16] 杨陵区地方志编撰委员会.杨陵区志[M].陕西 西安:西安地图出版社,2004.

[17] 卫新菊,贾志宽.施肥对苜蓿现蕾期叶面积及比叶重的影响[J].中国农学通报,2007,23(5):10-13.

[18] 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[J].农业工程学报,2014,30(16):136-146.

[19] 马璠.作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.