

模拟降雨条件下玉米马铃薯间作对降雨入渗量的影响

欧阳铖人, 字淑慧, 吴开贤, 吴伯志

(云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要: 为研究间作对土壤侵蚀的调控机制, 采用人工模拟降雨方法分析了生育期内玉米马铃薯间作及起垄在不同降雨强度(40, 80 mm/h)和坡度(10°, 15°)下的降雨入渗规律。结果表明:(1)生育期内同一坡度同一降雨条件下玉米马铃薯间作的降雨入渗结束时间比单作玉米推迟, 入渗开始时间差别不明显;玉米马铃薯间作的入渗量高于单作玉米($P < 0.01$), 而与单作马铃薯差异不显著($P > 0.05$)。生育期内 40, 80 mm/h 雨强下间作的入渗量比单作玉米分别增加了 25.75%~69.07%和 21.76%~50.95%。同一雨强下间作的入渗速率高于单作玉米, 但与单作马铃薯差别不明显。(2)生育期内间作高垄的入渗量高于间作低垄($P > 0.05$)、单作玉米高垄($P < 0.01$)和单作玉米低垄($P < 0.01$)。生育期内 40 mm/h 雨强下间作高垄、间作低垄、单作玉米高垄的入渗量分别比单作玉米低垄增加了 10.10%~28.14%, 25.75%~65.96%, 41.59%~75.46%; 80 mm/h 雨强下间作高垄、间作低垄、单作玉米高垄的入渗量分别比单作玉米低垄增加了 9.12%~18.03%, 21.76%~44.34%, 36.45%~57.05%。间作增加了降雨过程中水分的渗入, 减少地表径流的发生, 为深入认识作物栽培控制土壤侵蚀的机理提供参考依据。此外, 间作条件下起垄能有效增加降雨入渗量, 这对于区域水资源管理以及农业的可持续发展具有重要的指导意义。

关键词: 间作; 降雨入渗; 起垄; 玉米; 马铃薯

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0014-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.003

Effects of Maize and Potato Intercropping on Rainfall Infiltration Under Stimulated Rainfall

OUYANG Chengren, ZI Shuhui, WU Kaixian, WU Bozhi

(Faculty of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: In order to study the regulation mechanism of intercropping on soil erosion, the rainfall infiltration rules of maize-potato intercropping and ridging under different rainfall intensities (40 and 80 mm/h) and slope gradients (10° and 15°) were evaluated by stimulated rainfall method. The results suggested that: (1) The infiltration terminal time of maize-potato intercropping (IC) was later than that of maize sole crop (MC) under the same slope and rainfall condition during the growth period, and the difference of infiltration start time was not significant. During the experimental periods, the infiltration amount of IC was significantly higher than that of MC ($P < 0.01$), but not significantly different from that of potato sole crop (PC) ($P > 0.05$). During the growth period, the infiltration amount of IC were 25.75% ~ 69.07% and 21.76% ~ 50.95% higher than that of MC under the rainfall intensities of 40 mm/h and 80 mm/h, respectively. The infiltration rate of IC was higher than that of MC under the same rainfall intensity, but there was no significant difference between IC and PC. (2) The infiltration amount of intercropping with high ridging (IC+HR) was significantly higher than those of intercropping with low ridging (IC+LR) ($P > 0.05$), maize sole crop with high ridging (MC+HR) ($P < 0.01$) and maize sole crop with low ridging (MC+LR) ($P < 0.01$). Under the rainfall intensity of 40 mm/h, infiltration amount of IC+LR, IC+HR and MC+HR was 10.10% ~ 28.14%, 25.75% ~ 65.96% and 41.59% ~ 75.46% higher than that of MC+LR, respectively, while under the rainfall intensity of 80 mm/h, the corresponding values were 9.12% ~ 18.03%, 21.76% ~ 44.34%

收稿日期: 2018-12-19

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503119); 国家科技支撑计划项目(2015BAD06B04); 云南省现代玉米产业体系项目(2016)

第一作者: 欧阳铖人(1988—), 男, 博士, 主要从事耕地水土保持和山地可持续农业研究。E-mail: Chengrenouyang@outlook.com

通信作者: 吴伯志(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物栽培与耕作研究。E-mail: Bozhiwu2003@aliyun.com

and 36.45% ~ 57.05%, respectively. Thereby, intercropping increased rainfall infiltration and reduced the occurrence of surface runoff, which provided an important reference for understanding the mechanism of soil erosion controlling by crop cultivation. In addition, intercropping with high ridging could effectively increase rainfall infiltration, which was important for guiding regional water resources management and sustainable development of agriculture.

Keywords: intercropping; rainfall infiltration; ridging; maize; potato

土壤侵蚀是全球最为严重的环境问题之一^[1]。其中,坡地耕作是造成土壤侵蚀的主要来源。加之人为干扰及管理的不完善,坡耕地的土壤侵蚀变得十分严重^[2]。如何有效地控制坡地土壤侵蚀是各国关注的焦点。间作是广泛认可的控制农田土壤侵蚀的种植方式之一,能显著减少径流量和泥沙量^[3-4]。此外,间作还能减少泥沙中的养分含量(包括N、P和有有机碳等),从而改善土壤理化性质,维持或增加土壤肥力以及减少面源污染发生的风险^[5-6]。然而,间作控制土壤侵蚀的机制还不完全清楚。

间作控制土壤侵蚀的机制中,大量的研究围绕地上和地下部空间探索了间作对土壤侵蚀的影响及调控作用。从地上部来看,间作增加了覆盖度,这对于增加降雨拦截、减少土壤水分蒸发具有重要的意义^[7]。从地下部来看,根系在间作控制土壤侵蚀中也发挥着重要的作用,如改变根系的空间分布,增加根系密度,改变根系形态及构型(根系直径、根系深度、根系方向等)^[8-9]。根系的这些变化改变了降雨过程中的水分分布,增加土壤水分的吸收及存储,增加土壤水分的渗入,减少地表径流的产生^[10]。这些研究主要关注于间作体系地上部和地下部对土壤侵蚀的调控机制,而缺乏对于地表特性对土壤侵蚀的控制机制的研究。

地表糙度是重要的地表特性之一,是影响地表水力学特性的重要参数之一^[11-12]。这是因为地表糙度直接影响着土壤侵蚀过程中降雨入渗量的多寡^[13]。事实上,降雨入渗是土壤水分循环中的一个重要环节,其入渗量的多少直接决定了降雨在土壤中的存储状况,也直接关系到径流的流速及泥沙的搬运速率^[14]。因此,探讨不同种植方式下地表糙度的变化

特征对降雨入渗量的影响具有重要的理论意义。

玉米马铃薯间作是一种重要的禾本科-茄科间作方式。为了进一步探明该种植方式下减轻土壤侵蚀的机制,本文以云南省常见的红壤为材料,采用人工模拟降雨的方法,研究不同降雨强度和坡度下玉米马铃薯间作的降雨入渗规律,为作物栽培控制土壤侵蚀的机理和坡地土地管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置和供试土壤

人工模拟降雨装置由南京林业大学制造,该装置由水槽及喷头降雨系统、控制器、动力系统以及供排水系统组成,具有降雨强度稳定、降雨均匀系数好、性能稳定以及操作方便等优点。模拟降雨机采用下喷式降雨方式,喷头高度9 m,喷头口径(1.5~5.0 mm),通过控制压力和口径可获得不同的降雨强度,可模拟雨强范围为15~150 mm/h,降雨均匀系数大于85%。

供试土壤为红壤。土壤质地为粉质黏壤土,沙粒(2 000~60 μm)、粉粒(60~2 μm)和黏粒(<2 μm)分别约占10%,50%,40%。耕作层(0~20 cm)的土层中,土壤有机质含量23.60 g/kg,全氮0.15 g/kg,全磷0.08 g/kg,全钾0.15 g/kg,碱解氮37.29 mg/kg,速效磷20.36 mg/kg,速效钾83.30 mg/kg,pH为6.66。试验前,收集种植作物10年以上的耕作层土壤(坡度为 $8^\circ\sim 10^\circ$),过10 mm的筛。为了使得每个径流小区的土壤容重(控制在1.10~1.20 g/cm³)基本一致,过筛的土壤按每层5 cm,分5层填入微型径流小区。微型径流小区由南京农业大学设计,面积为1.6 m \times 0.8 m,深0.3 m(图1)。

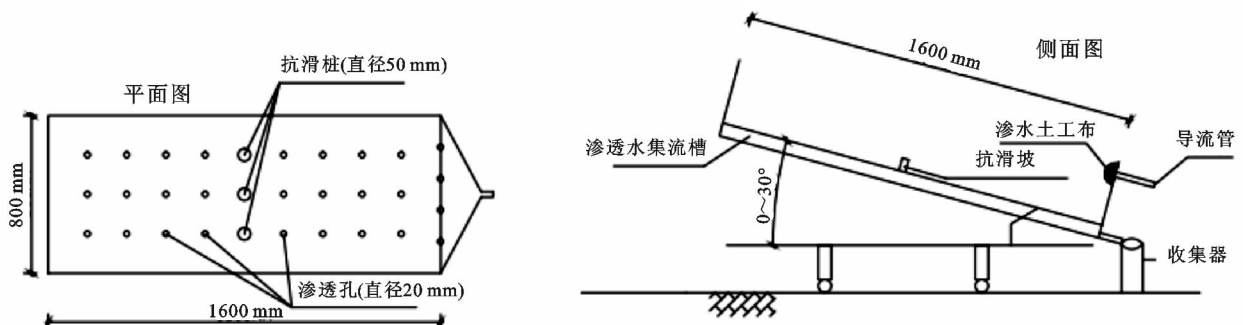


图1 微型径流小区示意

1.2 试验设计

模拟降雨试验位于云南农业大学水资源和节水灌溉实验室(25°18' N, 102°45' E, 海拔 1 930 m)。试验采用裂区设计,以种植方式单作玉米、单作马铃薯、2 行玉米 2 行马铃薯(玉米 || 马铃薯)为主因素,耕作方式(低垄和高垄)为副因素。所有处理采用等高线种植,低垄处理的垄高为 3~5 cm,垄宽为 4~6 cm;高垄处理的垄高为 6~8 cm,垄宽为 10~12 cm。试验采用 40, 80 mm/h 2 种雨强,每种雨强重复 4 次,降雨历时为 60 min。坡度采用 10°, 15°。模拟降雨前,所有小区在室外自然状态下生长,试验前 24 h 将径流小区推到降雨装置下用 20 mm/h 的雨强降雨 1 h,使得各小区前期含水量相一致。为了使得初始地表糙度相一致,第 1 场降雨结束后将表层土壤用新土代替,使垄高与垄宽基本保持一致,随后进行第 2 场降雨。

单作玉米的株行距为 0.20 m × 0.80 m,种植密度为 62 490 株/hm²;单作马铃薯的株行距为 0.30 m × 0.60 m,种植密度为 55 545 株/hm²;间作玉米的株行距为 0.20 m × 0.40 (1.20) m,马铃薯的株行距为 0.30 m × 0.40 (1.20) m,间作玉米的种植密度与单作玉米相一致,间作马铃薯的种植密度低于单作马铃薯,为 41 670 株/hm²。

2016 年 4 月 5 日,马铃薯块茎在 1.25% 次氯酸钠中浸泡 5 min 消毒,用蒸馏水漂洗后,将马铃薯块茎放在含有细沙和蛭石的苗床上进行催芽,适时浇水,幼苗长至 6~10 cm,选取长势一致的幼苗移栽至微型径流小区中,每穴移栽 2 株幼苗。移栽时施入普钙、尿素和硫酸钾分别为 350, 95, 65 kg/hm²,后期不追肥。2016 年 4 月 24 日,选均一饱满的玉米种子在含有细沙和蛭石的苗床上进行催芽,适时浇水,待长至 5~8 cm 时,选取长势一致的幼苗移栽,每穴移栽 1 株幼苗。移栽时施入普钙、尿素和硫酸钾分别为 560, 150, 100 kg/hm²,在拔节期和大喇叭口期追施尿素 150, 300 kg/hm²。

1.3 数据收集和处理

为了能方便直观地测量入渗量,在微型径流小区中设计了入渗孔(20 cm × 20 cm, 图 1)。试验前在入渗孔下方放置一个圆柱形收集器(图 1)。模拟降雨试验开始后,用秒表记录入渗开始及结束时间,每隔 3 min 测量 1 次收集器内的水深用于计算入渗量和入渗速率,降雨历时为 1 h。地表糙度采用链条法测量。入渗开始和结束时间、入渗量及入渗速率分别在 6 月中(马铃薯花蕾期和玉米拔节期,马铃薯播种后 67 天和玉米播种后 46 天)和 7 月初(马铃薯末花期和玉米抽雄期,马铃薯播种后 83 天和玉米播种后 62 天)观测。

采用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件进行方差及相关分析,采用 LSD 方法进行多重比较。入渗量以种植和耕作方式进行二因素方差分析,分析前对方差不齐的变量进行自然对数转换。显著水平均为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理下入渗开始及结束时间

同一坡度同一雨强下间作的入渗开始时间比单作玉米提前,但差别不明显(表 1)。生育期内 10° 坡度 40 mm/h 雨强下间作的入渗开始时间比单作玉米提前了 30~50 s, 80 mm/h 雨强下提前了 18~30 s。间作的入渗开始时间与单作马铃薯差别不明显。同一坡度同一雨强下高垄处理的入渗开始时间与于低垄处理无明显差别。同一坡度同一雨强下间作高垄的入渗开始时间比单作玉米高垄和单作玉米低垄提前。生育期内 40 mm/h 雨强下间作高垄的入渗开始时间比单作玉米高垄和单作玉米低垄提前了 32~50, 43~55 s; 80 mm/h 雨强下间作高垄的入渗开始时间比单作玉米高垄和单作玉米低垄提前了 18~53, 21~54 s。同一雨强 15° 坡度下的入渗开始时间比 10° 坡度推迟。表明随着坡度的增加入渗开始时间推迟。

表 1 模拟降雨条件下不同处理下的入渗开始时间

坡度/ (°)	种植方式	入渗开始时间/s							
		6 月				7 月			
		40 mm/h		80 mm/h		40 mm/h		80 mm/h	
	低垄	高垄	低垄	高垄	低垄	高垄	低垄	高垄	
10	单作玉米	125	120	120	115	141	123	136	131
	单作马铃薯	103	82	101	90	108	80	122	87
	玉米 马铃薯	87	70	98	71	97	87	110	82
15	单作玉米	133	13	121	118	140	129	150	144
	单作马铃薯	122	117	145	113	114	102	120	110
	玉米 马铃薯	103	83	120	100	100	97	121	97

同一坡度同一雨强下间作的入渗结束时间比单作玉米推迟(表 2)。生育期内 40 mm/h 雨强下间作

入渗结束时间比单作玉米推迟了 200~920 s; 80 mm/h 雨强下推迟了 157~397 s。生育期内间作的

入渗结束时间差别不明显。同一坡度同一雨强下高垄处理的入渗结束时间明显滞后于低垄处理。生育期内 40 mm/h 雨强下高垄处理的入渗结束时间比低垄处理推迟了 86~875 s;80 mm/h 雨强下推迟了 75~627 s。同一坡度同一雨强下间作高垄的入渗结束时间比单作玉米高垄和单作玉米低垄推迟。生育期内 40 mm/h 雨强下间作高垄的入渗结束时间比单作玉米

高垄和单作玉米低垄推迟了 463~1 085,408~1 019 s;80 mm/h 雨强下间作高垄的入渗开始时间比单作玉米高垄和单作玉米低垄推迟了 518~847,220~820 s。可见,增加地表糙度能延长降雨入渗结束时间,这对于增加入渗量具有重要的意义。同一雨强 15°坡度下的入渗结束时间比 10°坡度提前。表明随着坡度的增加入渗结束时间提前。

表 2 模拟降雨条件下不同处理下的入渗结束时间

坡度/ (°)	种植方式	入渗结束时间/s							
		6 月				7 月			
		40 mm/h		80 mm/h		40 mm/h		80 mm/h	
低垄	高垄	低垄	高垄	低垄	高垄	低垄	高垄		
10	单作玉米	610	696	573	1200	544	613	611	926
	单作马铃薯	780	935	788	1335	815	1377	753	1240
	玉米 马铃薯	810	1695	970	1420	830	1553	768	1225
15	单作玉米	391	730	450	623	445	580	487	645
	单作马铃薯	555	1185	428	930	608	870	605	838
	玉米 马铃薯	580	1138	795	968	795	968	700	885

2.2 不同处理下入渗量

同一坡度同一雨强下间作的入渗量显著高于单作玉米($P < 0.01$,表 3)。生育期内 40,80 mm/h 雨强下间作的入渗量比单作玉米分别增加了 25.75%~69.07%和 21.76%~50.95%。同一坡度同一雨强下间作的入渗量高于单作马铃薯,但差异不显著($P > 0.05$)。同一坡度同一雨强下高垄处理的入渗量显著高于无垄处理($P < 0.05$)。生育期内 40,80 mm/h 雨强下高垄处理的入渗量比低垄处理分别增加了 10.10%~27.93%和 9.12%~18.00%。表明高糙

度的地表能增加水分的渗入。

生育期内间作高垄的入渗量高于间作低垄($P > 0.05$)、单作玉米高垄($P < 0.01$)和单作玉米低垄($P < 0.01$)。生育期内 40 mm/h 雨强下间作高垄、间作低垄、单作玉米高垄的入渗量分别比单作玉米低垄增加了 10.10%~28.14%,25.75%~65.96%,41.59%~75.46%;80 mm/h 雨强下间作高垄、间作低垄、单作玉米高垄的入渗量分别比单作玉米低垄增加了 9.12%~18.03%,21.76%~44.34%,36.45%~57.05%。表明间作条件下起垄能增加降雨的渗入。

表 3 模拟降雨条件下不同坡度下种植和耕作方式对入渗量的影响

坡度/ (°)	雨强/ (mm·h ⁻¹)	种植 方式	入渗量/L			
			6 月		7 月	
			低垄	高垄	低垄	高垄
10	40	单作玉米	16.07±2.32a	22.30±2.20a	23.61±4.33a	35.79±1.60b
		单作马铃薯	41.75±1.56b	43.72±2.04b	38.42±1.71b	50.03±2.28c
		玉米 马铃薯	51.96±1.46c	65.51±1.16d	46.24±2.08c	51.44±1.16c
	80	单作玉米	44.69±2.12a	52.33±1.20b	38.18±1.46a	44.33±2.16b
		单作马铃薯	60.68±1.89c	74.71±3.21d	49.79±2.15b	62.33±1.04c
		玉米 马铃薯	64.62±2.08c	78.81±1.64d	59.28±2.66c	65.23±1.46c
15	40	单作玉米	11.65±0.37a	23.67±2.57b	21.50±2.20a	27.33±2.32b
		单作马铃薯	23.91±1.34b	32.51±1.61c	31.34±2.23bc	35.83±1.46c
		玉米 马铃薯	24.92±2.08b	34.68±1.09c	31.26±1.43bc	36.81±1.94c
	80	单作玉米	26.11±1.34a	33.84±1.55b	38.13±1.46a	46.94±3.36b
		单作马铃薯	51.04±2.22c	59.72±1.67cd	49.63±2.59b	54.70±2.34bc
		玉米 马铃薯	52.32±1.43c	60.80±1.74d	53.37±2.04bc	60.00±1.16c

注:处理间不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

同一坡度下入渗量随着雨强的增加而增加(表 3)。

40 mm/h 雨强下的入渗量低于 80 mm/h 雨强。7

月,80 mm/h 雨强下的入渗量是 40mm/h 雨强下的 1.2~1.6 倍。尽管如此,入渗速率是否随着雨强的增加而增加有待于进一步探讨。此外,同一雨强下入渗量随着坡度的增加而降低(表 3)。同一降雨条件下 15°坡度的入渗量低于 10°坡度。40 mm/h 雨强单作玉米 15°坡度下的入渗量比 10°坡度下减少了 8.93%~27.90%,单作马铃薯减少了 18.42%~42.73%,玉米马铃薯间作减少了 19.90%~47.06%。

相同坡度下累计入渗量随着雨强的增加而增加,40 mm/h 雨强的累计入渗量低于 80 mm/h 雨强。7 月,80 mm/h 雨强下的入渗量是 40 mm/h 雨强下的 1.2~1.6 倍。此外,相同雨强下 15°坡度的累计入渗量低于 10°坡度。40 mm/h 雨强单作玉米 15°坡度下的平均入渗量比 10°坡度下减少了 8.40%~11.49%,单作马铃薯减少了 7.19%~9.13%,玉米马铃薯间作减少了 13.25%~16.96%。因此,随着坡度的增加入渗量逐渐降低。

2.3 不同处理下入渗速率

生育期内同一雨强下间作的入渗速率高于单作玉米,而与单作马铃薯差别不明显(图 2)。7 月,40 mm/h 雨强下单作玉米、单作马铃薯和玉米马铃薯间作的平均入渗速率分别为 0.06~0.07,0.08~0.09,0.09~0.10 mm/min;80 mm/h 雨强下的平均入渗速率分别为 0.07~0.08,0.09~0.11,0.10~0.12 mm/min。

相同种植方式下高垄处理的入渗速率高于低垄处理,但差别不明显。7 月,40,80 mm/h 雨强下低垄的平均入渗速率分别为 0.080,0.104 mm/min,高垄处理的平均入渗速率分别为 0.089,0.111 mm/min。

相同坡度下 40 mm/h 雨强下的平均入渗速率低于 80 mm/h 雨强(图 3)。7 月,80 mm/h 雨强下的平均入渗速率是 40 mm/h 雨强下的 1.1~1.2 倍。相同雨强下 15°坡度下的平均入渗速率低于 10°坡度。40 mm/h 雨强单作玉米 15°坡度下的平均入渗速率比 10°坡度下分别减少了 3.17%~6.45%,单作马铃薯减少了 1.17%~8.24%,间作减少了 4.54%~10.08%。

2.4 地表糙度和叶面积指数与降雨入渗的关系

相关分析(图 4)表明,地表糙度和叶面积指数影响着降雨入渗,即入渗量随地表糙度的增加而增加($P<0.01$),随叶面积指数的增加而增加($P<0.01$)。表明降雨入渗量的变化与地表糙度和叶面积指数呈正相关关系。可能的原因是高糙度地表下能增加水流的注积量,使得水分滞留于地表(滞留效应),故而推迟入渗结束时间,提高土壤水分转化效率。此外,叶面积指数的增加延长了降雨到达地面的时间,进一

步增加降雨的转化效率。

3 讨论

3.1 种植和耕作方式对降雨入渗量的影响

间作是控制土壤侵蚀的重要种植方式^[3]。对于坡地而言,经典的双环法需将坡面整理成基本水平后方可测定,具有一定的局限性。本研究采用人工模拟降雨的方法定量分析了不同种植方式下的入渗量。结果显示玉米马铃薯间作的入渗量显著高于单作玉米。表明间作能增加降雨的渗入,增加水分转化效率,这对于澄清间作减少坡面径流的产生具有重要的理论意义。进一步结合起垄来看,间作条件下起垄的降雨入渗量显著高于间作低垄、单作玉米高垄和单作玉米低垄。说明间作条件下起垄能有效地增加降雨渗入,对于区域水资源的管理具有重要的指导意义。

间作在控制土壤侵蚀过程中发挥着重要的作用。本研究重点从地表的角度来探讨间作减少土壤侵蚀的机制。相关分析表明入渗量随着地表糙度的增加而增加。结合起垄来看,增加糙度(起垄)显著地增加了入渗量,即高垄处理下的入渗量显著高于低垄处理。研究发现起垄后入渗量的增加与土壤水分的入渗速率无关。可能的原因是高糙度的地表直接拦截降雨产生的水流,增加降雨过程中地表的注积量,使得水分滞留于地表(滞留效应),推迟入渗结束时间,从而增加降雨入渗及阻碍地表径流的产生^[15]。对于间作系统而言,更多的水分渗入意味着间作能增加雨水的转化效率,对于提高干旱半干旱区水分管理具有重要意义。另一方面,高糙度的地表可能减缓了坡面径流的流速,增加降雨时坡面流阻力,使得泥沙沉积于地表,结果是减少泥沙的搬运^[16-17]。从长期尺度来看,土壤流失量的减少意味着土壤养分流失量减少,对于改善坡地土壤的结构(包括土壤容重、土壤孔隙度、土壤团聚体结构等土壤物理性状),改变土壤的持水能力,为作物根系的生长提供优良的土壤环境具有重要的意义。

间作增加降雨入渗可能还与地上部相关。本研究结果表明,地表糙度与叶面积指数呈正相关关系。可能的原因是间作后改变了冠层对降雨的再分配作用,降低了雨滴对地表的打击和剥离作用,保护土壤颗粒,维持一定的地表糙度,阻止土壤结皮的发育,从本质上削弱了径流冲刷挟沙的能力,增加了雨水的下渗时间,增强土壤抗侵蚀的能力的同时进一步增加降雨的转化效率^[8]。尽管如此,本试验是在玉米马铃薯间作这一常见模式下得出的,其他间作模式下可能会有不同,需进一步研究。

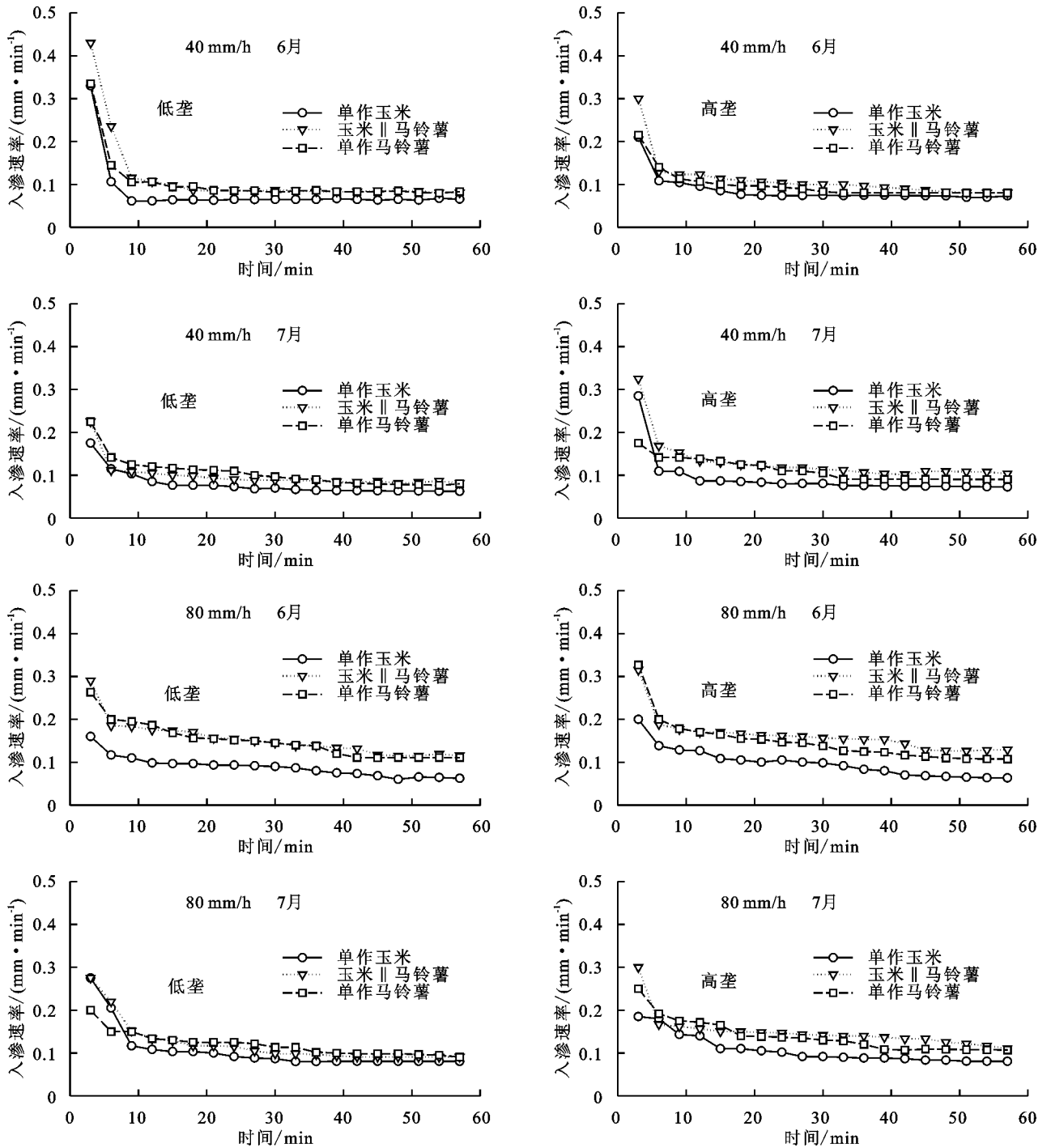


图2 模拟降雨条件下种植和耕作方式对入渗速率的影响(以 10° 坡度为例)

3.2 降雨强度和坡度对降雨入渗量的影响

本研究结果表明,降雨强度影响着降雨的渗入,即当降雨强度从 40 mm/h 增加到 80 mm/h 时,入渗速率有所增加。其可能原因是水体自重力增加和雨滴击所产生的冲力加速入渗水流的速率,同时使部分静止的毛管水加入到入渗水流中^[18]。研究表明,相同的降雨历时下 80 mm/h 雨强下的入渗速率仅为 40 mm/h 雨强下的 $1.1\sim 1.2$ 倍,而降雨量是 40 mm/h 雨强的2倍。说明雨强的增加使得更多的水分形成地表径流,导致集中流和沟蚀发生,更多的土壤颗粒被分离及转移,导致水土资源损失更为严重,

农业生态系统变得更加脆弱^[19-20]。然而,本研究中,高强度降雨条件下间作的入渗速率和入渗量总是高于单作玉米。说明间作这种多样性种植方式在遭遇由气候变化导致的严重降雨事件时变得更加的稳定。

坡度也影响着降雨的渗入。研究表明,当坡度从 10° 增加到 15° 时,降雨入渗量和入渗速率降低。关于坡度对土壤水分入渗能力的影响,尽管已有学者进行了研究,但是由于所用的方法和试验条件不同,得出结论也不尽相同。一些研究者^[18]认为水分在土壤中的入渗与坡面上的压力有关。一方面,随着坡度的增加,坡面上的压力沿垂直坡面方向的分力逐渐减

小,而沿坡面方向的分力逐渐增大,由于水体沿坡面移动,使水分进入土壤的机会减少,导致入渗速率减

少。另一方面,进入土壤孔隙中的水分在重力和毛管吸力的合力作用下运动。

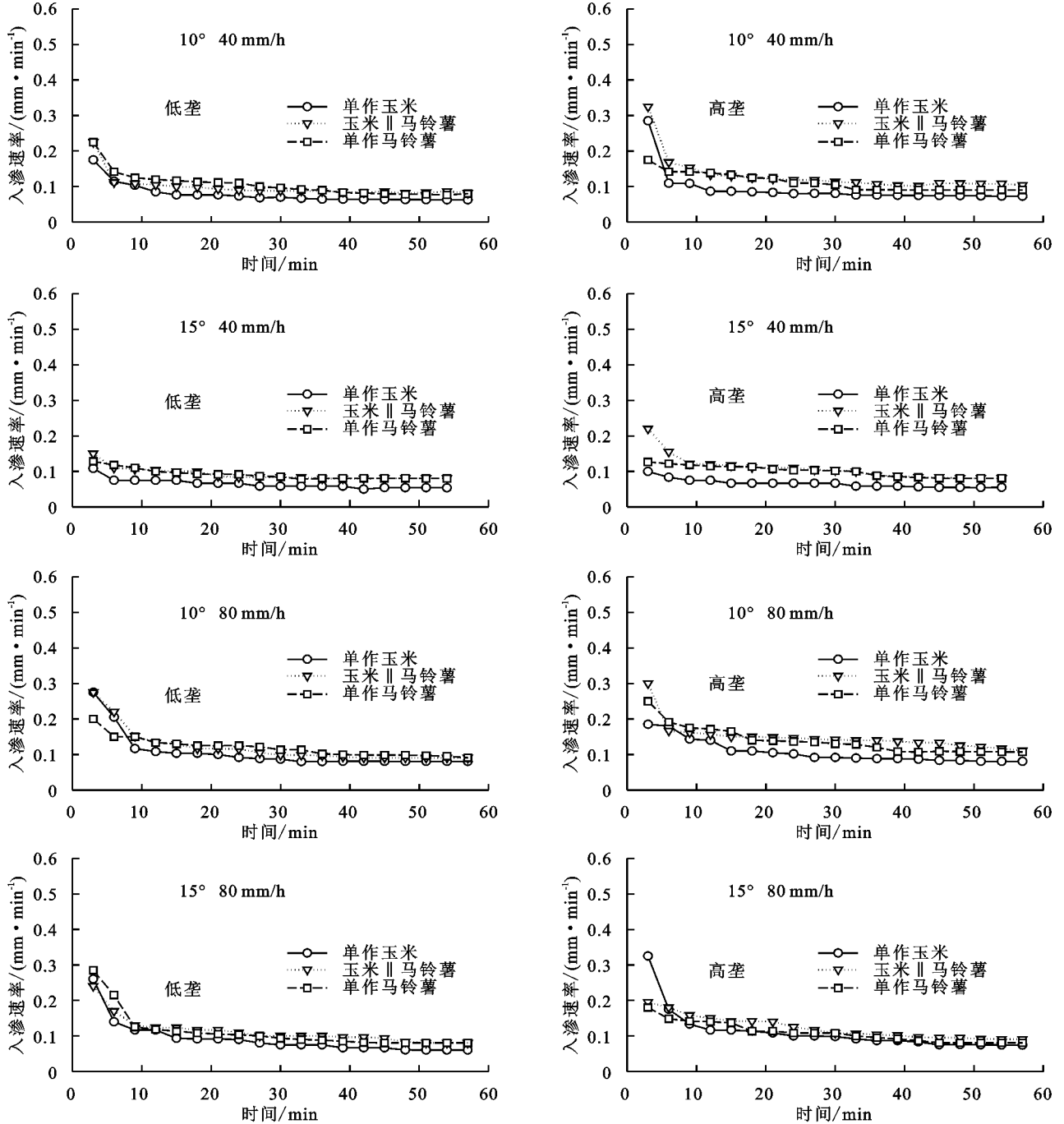
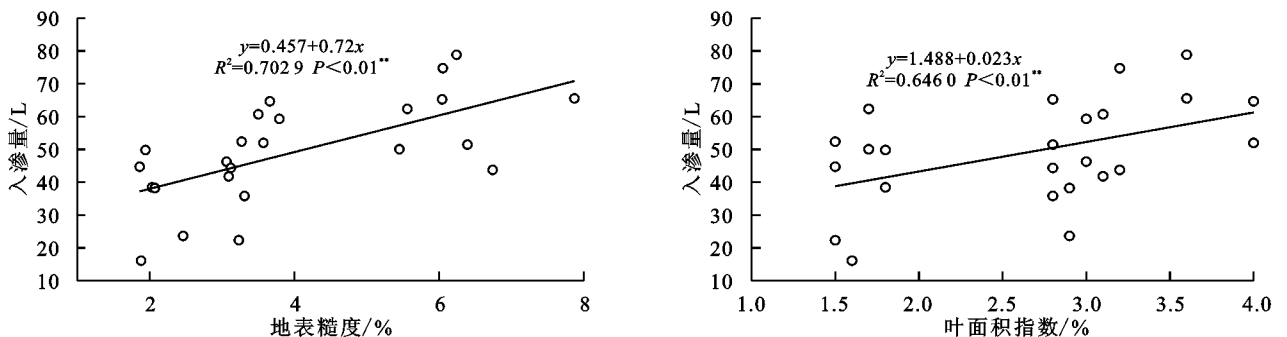


图 3 模拟降雨条件下降雨强度和坡度对入渗速率的影响(以 7 月为例)



注: ** 表示差异显著($P < 0.01$)。

图 4 模拟降雨条件下叶面积指数和地表粗糙度与降雨入渗的关系

此时,同样有2个分力:一个与土壤表面垂直,使水分向下运动;另一个与土壤表面平行,使水分横向运动,一部分使土壤表层饱和,阻滞雨水入渗,导致入渗速率的减小^[21]。结果是径流冲刷能力增强,形成细沟侵蚀或沟蚀,泥沙转移速率增加。然而,无论坡度如何变化,间作的入渗量总是高于单作玉米,说明多样性种植方式能有效地减轻农田土壤侵蚀发生的风险。

4 结论

(1)与单作玉米相比,玉米马铃薯间作的入渗结束时间滞后,入渗开始时间则差别不明显;玉米马铃薯间作的入渗量高于单作玉米,表明间作增加了降雨的渗入,这是间作减轻土壤侵蚀的重要机制之一。

(2)间作高垄的入渗量高于间作低垄、单作玉米高垄和单作玉米低垄,表明间作条件下起垄能增加降雨的渗入,提高雨水的转化效率。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget [J]. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [2] VanOost K, Quine T A, Govers G, et al. The impact of agricultural soil erosion on the global carbon cycle [J]. *Science*, 2007, 318(5850): 626-629.
- [3] Sharma N K, Singh R J, Mandal D, et al. Increasing farmer's income and reducing soil erosion using intercropping in rainfed maize-wheat rotation of Himalaya, India [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 247: 43-53.
- [4] Whitmore A P, Schröder J J. Intercropping reduces nitrate leaching from under field crops without loss of yield: A modelling study [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 27(1): 81-88.
- [5] Bashagaluke J B, Logah V, Opoku A, et al. Soil nutrient loss through erosion: Impact of different cropping systems and soil amendments in Ghana [J]. *PLoS One*, 2018, 13(12): e0208250.
- [6] Wang Z, Bao X, Li X, et al. Intercropping maintains soil fertility in terms of chemical properties and enzyme activities on a timescale of one decade [J]. *Plant and Soil*, 2015, 391(1/2): 265-282.
- [7] Fan Z, An T, Wu K, et al. Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff [J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 166: 9-16.
- [8] Wu G L, Yang Z, Cui Z, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 54-60.
- [9] Ghestem M, Veylon G, Bernard A, et al. Influence of plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance [J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1/2): 43-61.
- [10] Cong W F, Hoffland E, Li L, et al. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1715-1726.
- [11] Govers G, Takken I, Helming K. Soil roughness and overland flow [J]. *Agronomie*, 2000, 20(2): 131-146.
- [12] Darboux F, Gascuel-Oudou C, Davy P. Effects of surface water storage by soil roughness on overland-flow generation [J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2002, 27(3): 223-233.
- [13] Zheng Z, He S, Wu F. Changes of soil surface roughness under water erosion process [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(12): 3919-3929.
- [14] Archer N A L, Otten W, Schmidt S, et al. Rainfall infiltration and soil hydrological characteristics below ancient forest, planted forest and grassland in a temperate northern climate [J]. *Ecohydrology*, 2016, 9(4): 585-600.
- [15] Zhao L, Wang L, Liang X, et al. Soil surface roughness effects on infiltration process of a cultivated slopes on the loess plateau of China [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(14): 4759-4771.
- [16] Rosa J D, Cooper M, Darboux F, et al. Soil roughness evolution in different tillage systems under simulated rainfall using a semivariogram-based index [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124(4): 226-232.
- [17] Jian W, Watts D B, Meng Q, et al. Influence of surface crusting on infiltration of a loess plateau soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(3): 683-692.
- [18] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment [J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(6): 582-590.
- [19] Peng W, Zhang Z, Zhang K. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes [J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(17): 3677-3686.
- [20] Wei W, Chen L, Fu B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(3/4): 247-258.
- [21] 吴发启,赵西宁,余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 16-18.