

玉米马铃薯间作和起垄对坡面水动力学特性的影响

欧阳钺人, 字淑慧, 吴开贤, 杨友琼, 吴伯志

(云南农业大学农学与生物技术学院, 昆明 650201)

摘要: 为了研究间作体系下地表特性对土壤侵蚀的影响, 采用人工降雨法分析了玉米马铃薯间作及起垄在不同降雨强度(40, 80 mm/h)下的水力学参数的变化特征。结果表明: (1) 同一降雨强度下玉米马铃薯间作的阻力系数高于玉米单作处理, 雷诺数、弗劳德数和径流流速低于单作玉米处理($P < 0.05$)。7 月初 80 mm/h 降雨强度下玉米马铃薯间作和玉米单作的阻力系数分别为 0.41~0.53 和 0.09~0.10; 径流流速分别为 0.11~0.12, 0.19~0.21 m/s。玉米马铃薯间作的径流流速和阻力系数与马铃薯单作差异不显著($P > 0.05$)。 (2) 同一降雨强度下间作高垄的阻力系数最高, 径流流速、雷诺数和弗劳德数最低。40 mm/h 降雨强度下间作高垄、间作低垄、玉米高垄的径流流速分别比玉米低垄分别减少 35.71%, 35.71% 和 14.29%。间作条件下起垄能增加坡面流阻力, 降低雷诺数和弗劳德数, 进而减缓坡面径流流速, 这对于坡耕地土壤侵蚀的防治以及农业的可持续发展具有重要的指导意义。

关键词: 间作; 径流流速; 降雨强度; 阻力系数; 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)06-0143-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.020

Effects of Maize and Potato Intercropping and Ridging on Flow Hydraulics Under Simulation Rainfall

OUYANG Chengren, ZI Shuhui, WU Kaixian, YANG Youqiong, WU Bozhi

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

Abstract: Intercropping is an important practice for controlling soil erosion in the world. However, knowledge on this phenomenon is not well understood, especially in flow hydraulics. A lab experiment was conducted to provide the theoretical basis for reducing erosion mechanisms in intercropping. Three cropping patterns i.e. maize monoculture (MC), potato monoculture (PC), and two rows of maize intercropped with two rows of potato (IC) were used under two surface roughness models: low ridging and high ridging, totaling six treatments. The runoff velocity, Reynolds number, Froude number, and Darcy-Weisbach resistance coefficient were measured with two rainfall intensities (40, 80 mm/h) during the experimental periods. The results suggested that: (1) The values of IC were lower than those of MC in terms of runoff velocity, Reynolds number, and Froude number. Furthermore, the resistance coefficients in IC were higher than those in MC at the same rainfall intensity. There was no difference between IC and PC in terms of runoff velocities and resistance coefficients. In early July, the resistance coefficients were 0.41~0.53 for IC and 0.09~0.10 for MC at the rainfall intensity of 80 mm/h. The runoff velocities was 0.11~0.12 m/s for IC and 0.19~0.21 m/s for MC at the same rainfall intensity. (2) The lowest runoff velocity, Reynolds number, and Froude number were observed in intercropping with high ridging, which gave the highest resistance coefficient. In early July, the runoff velocities of intercropping with high ridging, intercropping with low ridging, and maize monoculture with high ridging were 35.71%, 35.71% and 14.29% respectively lower than that of maize sole crop with low ridging at the rainfall intensity of 40 mm/h. Thereby, intercropping could increase resistance coefficient to reduce runoff velocity, which was one of mechanism to reduce erosion in intercropping and provide an important reference for understanding the mechanism of soil erosion controlling by crop cultivation. In addition,

收稿日期: 2019-04-19

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

第一作者: 欧阳钺人(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, 主要从事作物栽培学与耕作学研究。E-mail: Bozhiwu2003@aliyun.com

intercropping with high ridging could effectively decrease runoff velocity on the surface, and might be contributed to the soil erosion control and sustainable development of agriculture.

Keywords: intercropping; runoff velocity; rainfall intensity; resistance coefficient; maize; potato

土壤侵蚀是全球性的环境生态问题,是影响生态农业和社会经济可持续发展的重要因素之一^[1]。坡地耕作是造成土壤侵蚀的主要来源^[2]。如何有效控制坡耕地的土壤侵蚀是学者们关注的热点问题。间作是控制土壤侵蚀的重要种植方式之一^[3],有研究^[4]表明,间作能减少径流量和泥沙量,降低泥沙中的 N、P 和有机碳含量,进而降低面源污染发生的风险^[5]。泥沙中养分含量的降低进一步改善了土壤的理化性质,增加氮的存储含量^[6],维持或增加了土壤肥力^[7]。这是间作被学者们广泛关注的重要原因之一。有研究^[8-9]表明,间作增加了地上部的覆盖度,增加了冠层对降雨的拦截和减少地表土壤水分蒸发。此外,间作改变了地下部根系的直径、深度、方向、生长角度以及根应力等空间分布^[10-11],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,进而减少地表径流的发生^[12]。关于间作体系地上和地下部对土壤侵蚀的影响已得到广泛关注,但缺乏关于地表特性对土壤侵蚀的调控作用,尤其缺乏水力学证据的支持。

降雨过程中形成的坡面径流是土壤侵蚀的主要动力^[13]。因为坡面径流变化是雨水集流、下渗、冲刷坡面的过程,其径流流速的变化直接决定坡面侵蚀产沙量的大小^[14]。因此,澄清坡面产流的动力学特点对于进一步阐明土壤侵蚀的过程至关重要,特别是在坡面径流的流态、流速分布及阻力规律方面^[15]。然而,坡面径流的形成过程是一个很复杂的物理过程。就地表层而言,地表特性影响着坡面土壤侵蚀过程,其变化特征决定着径流冲刷力的大小及泥沙输移的多少。地表糙度是重要的地表特性之一^[16],因其具有高低起伏的特点直接决定着地表径流流速的大小。有研究^[17]表明,随地表糙度的增加,径流量和产沙量显著减小。

玉米与马铃薯间作是一种重要的禾本科和茄科作物间作方式,在中国、印度、比利时和伊朗等世界范围内广泛种植,其显著的增产效果已在世界许多地区得到证实。有研究^[18]表明,该间作方式控制土壤侵蚀的效果显著,但相关控蚀机制还不清楚。为了进一步探明该种植方式地表特性对土壤侵蚀的影响及控蚀机制,本研究基于云南省常见的红壤类型,研究不同降雨强度下玉米马铃薯间作和起垄对坡面水力学特性的影响,为坡耕地土壤侵蚀的防治和山地可持续发展农业的发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

人工模拟降雨装置由南京林业大学提供,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),可模拟雨强范围 15~150 mm/h,降雨均匀系数>85%。

1.2 供试土壤

供试土壤为旱地红壤(中国分类标准),TypicHapludult(美国分类标准)。土壤质地为粉质黏壤土,土壤基本理化性质参照欧阳铨人等^[18]描述。试验前收集 8°~10°坡度的耕作层土壤(0~25 cm),过 10 mm 的筛。为使每个径流小区的土壤容重(1.10~1.20 g/cm³)基本一致,过筛的土壤按 5 cm 的厚度分 5 层填入微型径流小区。为方便移动微型径流小区,径流小区由南京林业大学设计,面积为 1.6 m×0.8 m,深 0.3 m^[18]。

1.3 试验设计

模拟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,以种植方式为主因素,耕作方式为副因素。种植方式设玉米单作、马铃薯单作、2 行玉米间作 2 行马铃薯 3 个处理,耕作方式设低垄和高垄 2 个处理,共 6 个处理。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,坡度为 10°。所有小区在室外自然状态下生长,模拟降雨试验前 24 h 将径流小区推到降雨区域采用 20 mm/h 的雨强降雨 1 h,使得各小区前期含水量一致。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。

模拟试验中,玉米单作的株行距为 0.2 m×0.8 m,种植密度为 62 490 株/hm²;马铃薯单作的株行距为 0.3 m×0.6 m,种植密度为 55 545 株/hm²;间作体系采用宽窄行设计,宽行的行距为 1.2 m,窄行行距为 0.4 m,玉米间作的株距为 0.2 m,马铃薯间作的株距为 0.3 m。玉米间作的种植密度与单作玉米相一致,马铃薯间作的种植密度低于马铃薯单作,为 41 670 株/hm²。马铃薯种薯和玉米育苗、幼苗移栽和施肥量和管理措施等参考欧阳铨人等^[18]描述。

1.4 数据收集与处理

模拟降雨试验开始前,使用冠层分析系统(英国

DELTA-T)观测叶面积指数,观测方法参考 Darboux 等^[17]的测量方法。用卷尺测量玉米、马铃薯的株高。采用链条法评估地表糙度的变化特征^[19]。径流流速是坡面水力学特性的重要参数之一,是评估水流流态及阻力系数的基础。采用经典的 KMnO_4 染色示踪法测定径流流速,记录染色水流流过测定区域所用的时间,多次测定表层水流坡上、坡中、坡下的流速,求其平均值。雷诺数(Re)是用以判断水流流态的主要指标,它是表征惯性力与黏滞力的比值。雷诺数越大,坡面流的紊动性越大,水流剥蚀以及携沙能力也越强。当 $Re < 500$ 时,为层流, $500 < Re < 2\,000$, 为过渡流, $Re > 2\,000$ 时,为紊流。弗劳德数(Fr)是评价水流流态的重要参数之一。 $Fr > 1$ 表示水流为急流,反之为缓流, $Fr = 1$ 为临界流。阻力系数(f)反映坡面水流的阻力大小。常利用 Darcy-Weisbach 均匀流公式来计算阻力系数 f 。株高、叶面积指数及径流流速分别在 6 月中期(马铃薯出苗后 46 天,玉米出苗后 25 天),7 月初期(马铃薯出苗后 62 天,玉米出苗后 41 天)和 7 月末期(马铃薯出苗后 88 天,玉米出苗后 67 天)3 个时期内测定。

数据运用 IBM SPSS Statistics 23.0 软件进行统计分析,方差分析后采用 LSD 法进行多重比较。径流流速和阻力系数以种植和耕作方式进行双因素方差分析。显著水平均为 $P < 0.05$ 。

表 1 种植和耕作方式对株高的影响 单位:cm

耕作 方式	种植 方式	6 月中期		7 月初期		7 月末期	
		玉米	马铃薯	玉米	马铃薯	玉米	马铃薯
低垄	单作	50.2±4.7a	46.7±3.6a	137.2±15.5a	82.2±7.5a	183.2±13.4a	91.1±7.6a
	间作	47.6±4.0a	52.1±4.5a	118.6±14.9a	90.3±10.0a	152.7±15.0b	95.4±6.3a
高垄	单作	50.1±5.2a	45.1±5.2a	130.3±16.3a	85.4±6.6a	185.5±12.1a	94.2±8.1a
	间作	45.3±3.7a	53.4±3.7a	115.2±15.0a	92.3±8.8a	148.2±16.6b	98.2±6.9a

注:表中数据为平均值±标准差;不同小写字母表示各处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著(LSD 法)。下同。

表 2 种植和耕作方式对叶面积指数 LAI 的影响

耕作 方式	种植 方式	6 月 中期	7 月 初期	7 月 末期
低垄	玉米单作	1.0±0.2b	1.6±0.3b	2.9±0.3a
	马铃薯单作	2.2±0.3a	3.1±0.4a	1.8±0.3b
	玉米马铃薯间作	2.8±0.3a	4.0±0.4a	3.0±0.4a
高垄	玉米单作	1.1±0.3b	1.5±0.2a	2.8±0.2a
	马铃薯单作	2.1±0.4a	3.2±0.3a	1.7±0.2b
	玉米马铃薯间作	2.6±0.2a	3.6±0.3a	2.8±0.2a

2.2 不同处理下水力学参数的变化

2.2.1 不同处理下径流流速的变化 从图 1 可以看出,同一雨强和耕作方式下 6 月中期和 7 月初期玉米马铃薯间作的径流流速显著低于玉米单作($P < 0.05$),7 月末期则差异不显著($P > 0.05$)。7 月初期,40, 80 mm/h 降雨强度下玉米马铃薯间作的径流流速比玉

2 结果与分析

2.1 不同处理下株高和叶面积指数的变化

从表 1 可以看出,同一耕作方式下间作玉米的株高低于玉米单作,而间作马铃薯的株高高于马铃薯单作。生育期内间作玉米的株高比玉米单作降低 5.00%~11.64%,间作马铃薯的株高则比马铃薯单作增加 4.00%~9.76%。同一耕作方式下玉米马铃薯间作的叶面积指数均高于玉米单作处理和马铃薯单作处理(表 2)。7 月初玉米马铃薯间作的叶面积指数显著高于玉米单作($P < 0.05$),而 7 月末差异不显著($P > 0.05$)。说明种植方式影响植株的生长。可能的原因是植株之间的竞争作用抑制了间作玉米植株的光合作用,进而抑制了玉米的生长;而间作马铃薯植株的光合能力强于单作马铃薯,促进了马铃薯的生长。

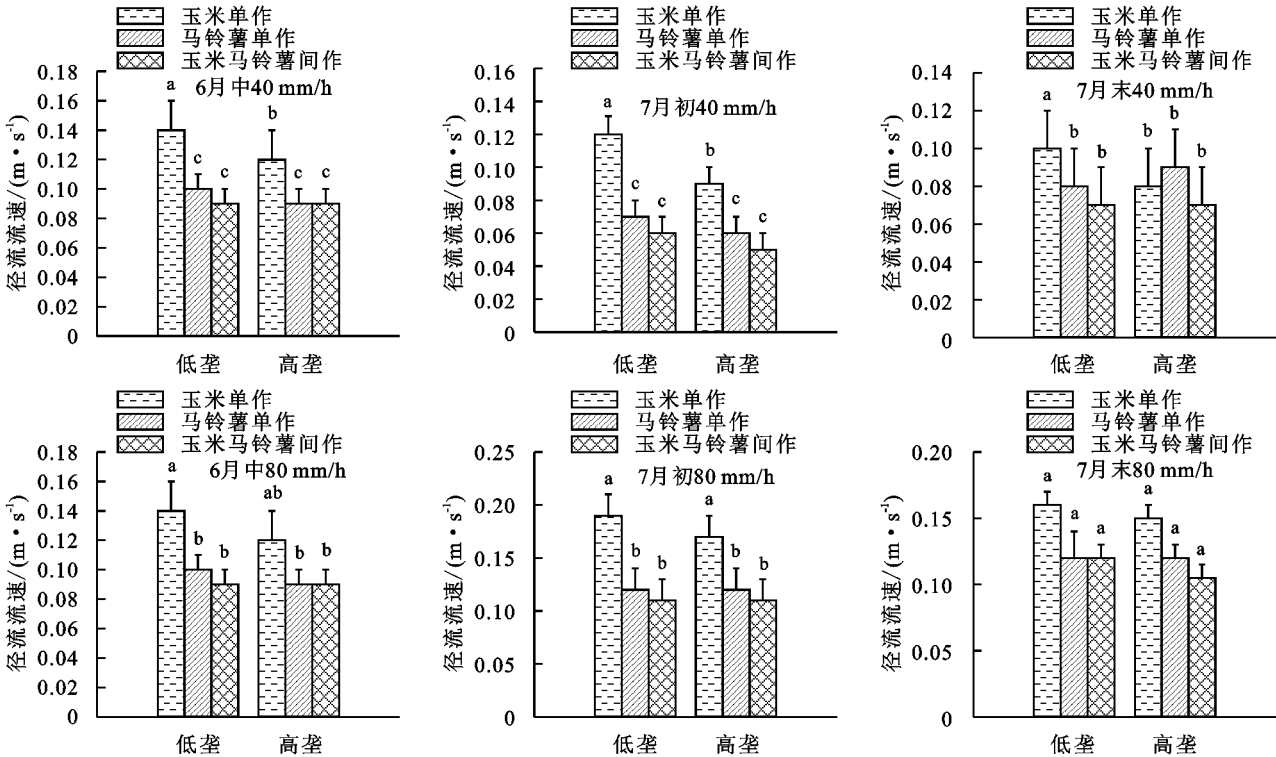
同一种植方式下高垄处理的株高与低垄处理差异不显著($P > 0.05$)。7 月初玉米高垄和玉米低垄的株高分别为 137, 130 cm,马铃薯高垄和马铃薯低垄分别为 82, 85 cm。同一种植方式下高垄与低垄处理的叶面积指数差异不显著($P > 0.05$)。7 月初玉米高垄和玉米低垄的叶面积指数分别为 1.6, 1.5,马铃薯高垄和马铃薯低垄分别为 3.1, 3.2。说明耕作方式不影响植株的生长,可能的原因是在本试验条件下高垄处理的土壤温湿度条件与低垄处理的差异不显著。

米单作分别减少 12.5%~44.4% 和 6.6%~35.0%。生育期内玉米马铃薯间作的径流流速低于马铃薯单作,但差异不显著($P > 0.05$)。说明种植方式影响坡面径流流速。可能的原因是 6 月中期和 7 月处于作物生长的旺长期,此时间作的地表覆盖度高于玉米单作,增加对降雨拦截的同时减缓降雨到达地面的终点速度,削弱降雨对地表的击溅作用,7 月末期玉米马铃薯间作的地表覆盖优势不显著,故坡面径流流速差异不显著。

6 月初期到 7 月末期,40 mm/h 降雨强度下玉米高垄处理的径流流速显著低于玉米低垄处理($P < 0.05$),80 mm/h 降雨强度下玉米高垄处理与玉米低垄处理差异不显著($P > 0.05$)。7 月初期,40, 80 mm/h 降雨强度下高垄处理的径流流速分别比低垄

处理减少 7.00%~14.28% 和 10.00%~14.28%。同一种植方式下马铃薯高垄处理与马铃薯低垄处理差异不显著($P>0.05$),间作高垄处理与间作低垄处理差异不显著($P>0.05$)。可能的原因是起垄增加了地表糙度,增加坡面阻力的同时减缓坡面径流流速。同一雨强下间作高垄处理的径流流速最低。40 mm/h 降

雨强度下间作高垄、间作低垄、玉米高垄处理的径流流速分别比玉米低垄处理分别减少 35.71%,35.71% 和 14.29%。表明间作条件下起垄能减缓坡面径流流速。生育期内所有处理的坡面径流流速随着降雨强度的增加而增加,生育期内 80 mm/h 降雨强度下的径流流速是 40 mm/h 雨强下的 1.5~2.2 倍。



注:图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 种植和耕作方式对径流流速的影响

2.2.2 不同处理下流态的变化 水力学理论中,雷诺数和弗劳德数是反映水流流态的 2 个重要参数。生育期内同一雨强和耕作方式下间作玉米马铃薯处理的雷诺数和弗劳德数显著低于玉米单作处理($P<0.05$,表 3)。6 月中期,40 mm/h 降雨强度下玉米马铃薯间作和玉米单作的雷诺数分别为 93.33~151.17 和 153.28~184.47,80 mm/h 降雨强度下分别为 211.33~263.56 和 382.94~563.56。6 月中期到 7 月末期玉米间作的弗劳德数显著低于玉米单作($P<0.05$)。6 月中期,40 mm/h 降雨强度下玉米马铃薯间作和玉米单作的弗劳德数分别为 0.65~0.66 和 1.00~1.26,80 mm/h 降雨强度下分别为 0.71~0.80 和 1.09~1.52。表明玉米单作的水流流态为过度流或急流,而玉米马铃薯间作的水流向层流和缓流转变。可能的原因是间作条件下的雨滴数量和雨滴终点速率低于玉米单作,增加坡面流阻力,减缓水流流速。同一种植方式下,6 月中期 40 mm/h 降雨强度下玉米马铃薯间作的雷诺数与马铃薯单作差异不显著($P>0.05$),80 mm/h 降雨强度下间作的雷诺数显著低于马铃薯单作($P<0.05$)。同一种植方式下,7 月初期

玉米马铃薯间作与马铃薯单作的雷诺数差异不显著($P>0.05$)。7 月末期间作高垄的雷诺数显著低于马铃薯高垄($P<0.05$),间作低垄的雷诺数与马铃薯低垄差异不显著($P>0.05$)。

同一雨强和种植方式下高垄处理的雷诺数和弗劳德数低于低垄处理。6 月中期,40,80 mm/h 降雨强度下高垄处理的雷诺数分别为 93.33~153.28 和 211.33~382.94,弗劳德数分别为 0.65~1.00 和 0.71~1.09;低垄处理的雷诺数分别为 151.87~184.47 和 263.56~563.56,弗劳德数分别为 0.65~1.26 和 0.80~1.52。说明起垄影响地表坡面径流的流态,可能的原因是起垄增加了地表糙度,增加坡面流阻力,进而减缓坡面径流流速。生育期内间作高垄的雷诺数和弗劳德数最低,显著低于间作高垄、玉米高垄和玉米低垄处理。6 月中期和 7 月初期间作高垄的雷诺数和弗劳德数显著低于马铃薯低垄和间作低垄处理($P<0.05$),但与马铃薯高垄差异不显著($P>0.05$)。7 月末期间作高垄的雷诺数和弗劳德数显著间作低垄、马铃薯高垄和马铃薯低垄处理。说明间作条件下起垄能改变坡面水流的流态,这对于减少坡地土壤侵蚀具有重要的理论意义。生育期内所有

处理的雷诺数和弗劳德数随着降雨强度的增加而增加。7 月初期 80 mm/h 降雨强度下的雷诺数是 40 mm/h 雨强下的 5.8 倍,弗劳德数是 40 mm/h 雨强下的 1.8 倍。表明随着降雨强度的增加,水流向急流或过度流转变,坡面的水流冲刷力增强。

2.2.3 不同处理下阻力系数的变化 阻力系数反映坡面流阻力的大小。一般而言,坡面流受到的阻力越大,径流被拦蓄入渗量越多,产流量越少,水流挟带泥

沙量越少,土壤侵蚀率越小。生育期内间作玉米马铃薯处理的阻力系数显著高于玉米单作处理($P<0.05$),但与马铃薯单作处理相比差异不显著($P>0.05$,图 2)。7 月初,40,80 mm/h 降雨强度下间作处理的阻力系数分别为 1.63~2.82 和 0.41~0.53,玉米单作处理的阻力系数分别为 0.20~0.48 和 0.09~0.10。表明间作增加了坡面水流阻力,可能与间作较高的覆盖度及地表糙度相关。

表 3 种植与耕作方式对雷诺数和弗劳德数的影响

月份	耕作方式	种植方式	雷诺数 Re		弗劳德数 Fr	
			40 mm/h	80 mm/h	40 mm/h	80 mm/h
6 月中期	低垄	玉米单作	184.67±21.23a	565.56±49.08a	1.26±0.23a	1.52±0.24a
		马铃薯单作	165.56±12.67ab	411.00±38.23b	0.76±0.11b	0.89±0.13b
		玉米马铃薯间作	151.17±9.83b	263.56±30.47c	0.66±0.10b	0.80±0.16b
	高垄	玉米单作	153.28±13.08b	382.94±30.55b	1.00±0.12a	1.09±0.11b
		马铃薯单作	119.78±10.29c	273.39±24.68c	0.65±0.08b	0.71±0.10b
		玉米马铃薯间作	90.33±11.21c	211.33±20.36d	0.65±0.06b	0.71±0.07b
7 月初期	低垄	玉米单作	67.85±7.00a	297.21±21.32a	1.00±0.12a	1.41±0.13a
		马铃薯单作	23.49±3.27b	165.47±14.88b	0.45±0.06c	0.71±0.06b
		玉米马铃薯间作	18.97±2.15bc	149.23±15.25b	0.35±0.06c	0.62±0.06b
	高垄	玉米单作	26.01±2.01b	174.76±18.02b	0.65±0.07b	1.52±0.11a
		马铃薯单作	15.74±3.06c	88.91±9.23c	0.35±0.04c	0.71±0.05b
		玉米马铃薯间作	11.96±1.03c	86.46±10.00c	0.27±0.03c	0.62±0.06b
7 月末期	低垄	玉米单作	53.76±6.28a	203.81±21.96a	0.76±0.11a	1.09±0.10a
		马铃薯单作	34.77±3.87b	193.83±20.00b	0.54±0.03b	0.71±0.08b
		玉米马铃薯间作	27.39±3.00b	149.03±17.33bc	0.45±0.05b	0.71±0.06b
	高垄	玉米单作	26.41±2.39b	173.05±19.05b	0.54±0.04b	0.99±0.11a
		马铃薯单作	31.76±3.13b	130.48±11.21c	0.65±0.05b	0.62±0.07b
		玉米马铃薯间作	17.58±2.02c	96.19±10.17d	0.45±0.03b	0.62±0.05b

同一种植方式下高垄处理的阻力系数高于低垄处理,但差异不显著($P>0.05$)。7 月初,40,80 mm/h 降雨强度下高垄处理的阻力系数分别为 0.48~2.82 和 0.09~0.53,低垄处理的阻力系数分别为 0.20~1.63 和 0.10~0.53。同一耕作方式下,6 月中期和 7 月末期间作低垄处理的阻力系数显著高于马铃薯低垄处理,间作高垄处理的阻力系数与马铃薯高垄处理差异不显著($P>0.05$)。7 月初期,间作处理的阻力系数与马铃薯单作处理差异不显著($P>0.05$)。表明起垄能增加地表糙度,增加坡面流阻力,拦截降雨过程中产生的水流,阻挡水流的冲刷。生育期内间作高垄的径流流速、雷诺数和弗劳德数均最低,阻力系数则最高。40 mm/h 降雨强度下间作高垄、间作低垄、玉米高垄和玉米低垄的阻力系数分别为 0.48~2.82,0.48~1.63,0.20~0.69 和 0.16~0.35;80 mm/h 降雨强度下间作高垄、间作低垄、玉米高垄和玉米低垄的阻力系数分别为 0.41~0.53,0.32~0.41,0.17~0.21,0.17~0.21 和 0.09~0.17。表明间作条件下起垄能增加坡面流阻力。6 月中期到 7 月末期所有处理的阻力系数随着降雨强度的增加而降低。7 月初期 40 mm/h 降雨强度下的阻力系数是 80 mm/h 雨强下的

3.8 倍。表明随着降雨强度的增加,坡面流阻力降低。

2.3 种植方式和起垄与坡面径流的关系

坡面径流形成过程是一个复杂的物理过程,其流速大小受雨强、坡度和坡长等众多因素的影响。本研究中,相关分析表明,叶面积指数与坡面流呈负相关关系,即坡面径流流速随着叶面积指数的增加而降低($P<0.01$,图 3b);地表糙度与坡面流呈负相关关系,即坡面径流流速随着地表糙度的增加而降低($P<0.01$,图 3a)。表明间作后较高的叶面积指数和地表糙度在控制土壤侵蚀过程中发挥着重要的作用,在减缓坡面径流流速的同时增加坡面阻力系数。

3 讨论与结论

间作是控制土壤侵蚀的重要种植方式^[4]。本研究采用人工降雨的方法分析了间作体系下地表特性对坡面水力学参数的影响特征,结果表明,与玉米单作相比,玉米马铃薯间作和马铃薯单作增加了阻力系数,降低了雷诺数和弗劳德数(为层流或缓流),进而减缓了坡面径流流速。坡面径流流速的大小受雨强、植被覆盖、坡度和坡长等众多因素的影响。通过相关

性分析表明,径流流速与叶面积指数呈负相关关系。说明间作体系通过增加地表覆盖度(即叶面积指数),增加了对降雨的拦截来影响坡面径流流速。这种拦截体现在 2 个方面:一方面较高的覆盖度削弱雨滴的终点速度的同时快速分散雨滴,削弱雨滴对土壤的击溅;另一方面,较高的覆盖度还能延迟雨滴到达地面

的时间,即延滞效应^[20],减少雨滴穿透的数量及延长雨滴到达地面的时间。雨滴穿透数量和雨滴终点速度的降低意味着雨滴对地表土壤打击和剥离作用进一步削弱(即雨滴侵蚀力削弱),进而有效保护土壤结构(土壤孔隙度和土壤团聚体等),维持较高的地表糙度,阻碍土壤结皮的发生,改善土壤的渗透能力。

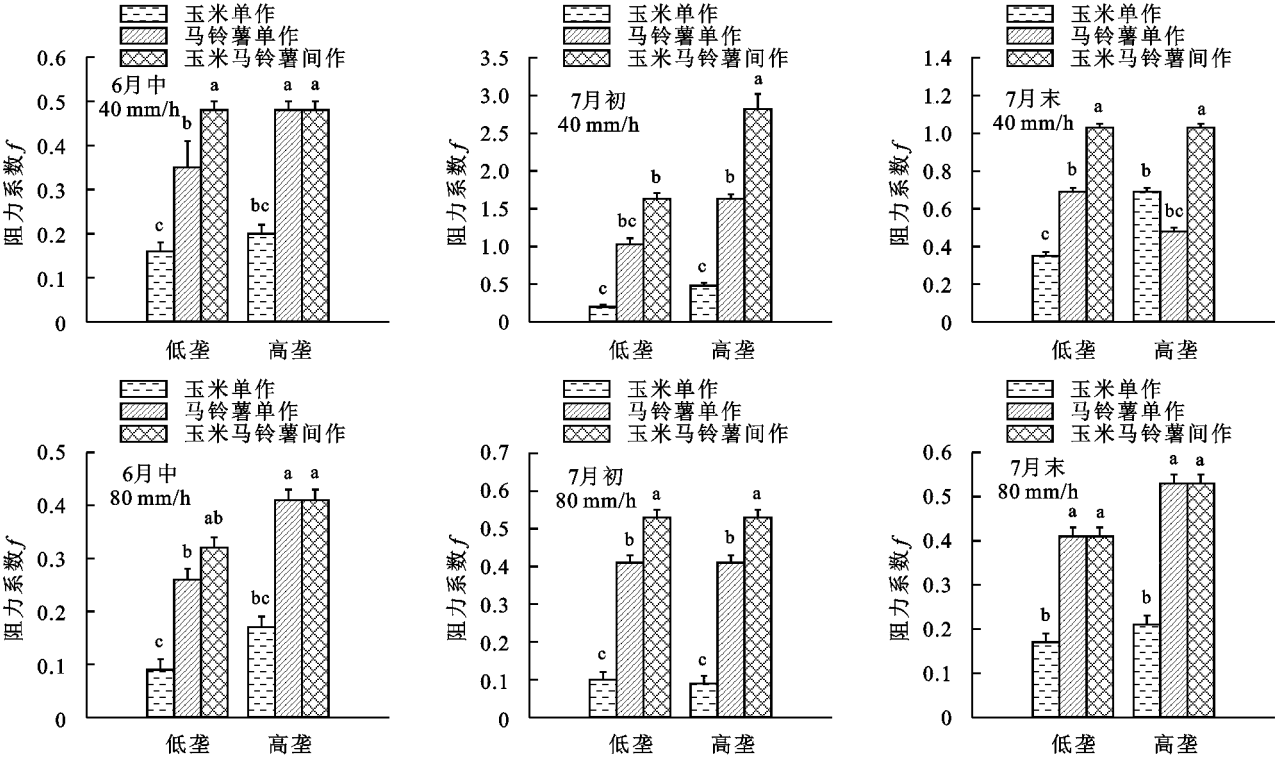


图 2 种植及耕作方式对坡面阻力系数的影响

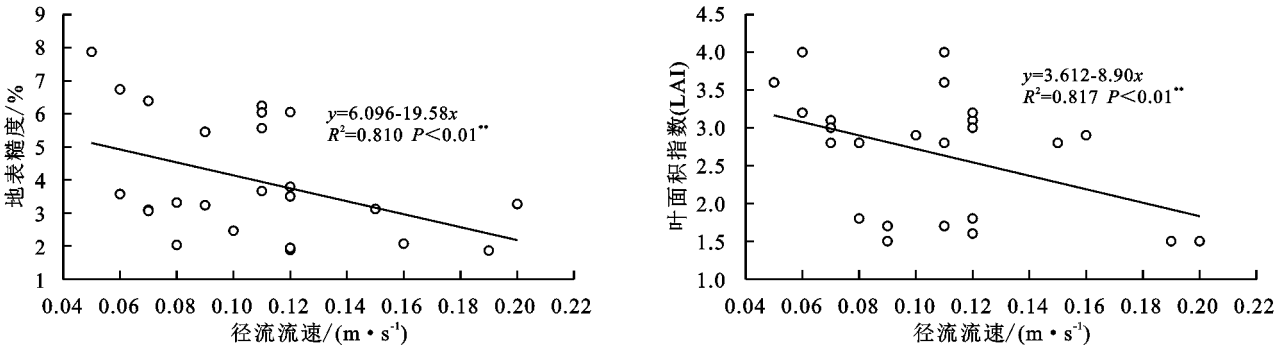


图 3 叶面积指数和地表糙度对坡面径流的影响

较高的地表糙度对于增加降雨过程中雨水的渗入和区域水资源的管理具有重要的意义。本研究表明,间作条件下起垄的阻力系数高于间作低垄、玉米高垄和玉米低垄处理,结果是径流流速显著低于间作低垄、玉米高垄和玉米低垄处理。进一步结合起垄来看,与低垄处理相比,高垄处理能降低雷诺数和弗劳德数,增加阻力系数,减缓坡面径流流速。通过相关性分析,径流流速与地表糙度呈负相关关系。说明间作体系中地表糙度在控制土壤侵蚀的过程中发挥着重要的作用,在增加坡面流阻力的同时有效减轻坡耕地的径流流速。可能的原因是间作增加了垄的数目,即增加了地表糙度。较高的地表糙度增加了降雨过程中坡面流阻力,

增加坡面水流的能量消耗,进而减小对坡面土壤做功^[21],使得水流的流态向缓流或层流转变。

坡面流阻力的增加一方面是增加对泥沙的拦截,使得土壤沉积于地表,降低泥沙的转运速率,从而减少坡面的输沙量,最大程度地保护土壤;另一方面增加对降雨产生水流的拦截,增加了地表的注积量^[17]。地表注积量的作用一方面延长雨水的入渗时间,使得单位时间内雨水快速渗入到土壤中,阻碍径流形成;另一方面起到缓冲径流的作用,削弱地表径流的流速。径流流速的降低进一步减少地表径流对土壤的冲刷力,减少径流量和泥沙量。从中长期来看,土壤侵蚀量的降低进一步减少土壤中养分的流失,进而改

善作物根系的生长环境。根系的生长既提升了根系自身的固土能力,增强土壤的抗侵蚀能力,又提高作物对土壤水分和养分的吸收效率(即提高土壤水分和养分的利用效率),减少肥料投入的同时获得较高的产量,这对于区域土壤侵蚀的防治和农业的可持续发展具有重要的意义。因此,间作体系中应重点关注地表特性对土壤侵蚀的影响。

降雨强度影响坡面水力学参数的变化特征。本研究结果表明,同一种植方式下阻力系数随着降雨强度(当降雨强度从 40 mm/h 增加到 80 mm/h 时)的增加而降低,雷诺数、弗劳德数和径流流速随降雨强度的增加而增加。说明随着降雨强度的增加,坡面流阻力降低,水流向紊流和急流转变,这与丁文峰等^[13]的结果相类似。可能的原因是高强度降雨条件下坡面流阻力降低,水流向紊流和急流转变,加剧了对地表的冲刷,更多的土壤颗粒被分离及转移,使得降雨入渗能力降低,导致细沟侵蚀或沟蚀的发生^[22]。降雨强度及侵蚀力的增加使得农业生态系统更加脆弱,导致半干旱区发生水土资源损失更为严重^[23]。然而,本研究中,随着降雨强度的增加,玉米马铃薯间作的阻力系数高于玉米单作,导致径流流速低于玉米单作处理。说明间作这种多样性种植方式在遭遇极端降雨事件时变得更加的稳定。尽管如此,本试验基于模拟降雨试验完成的,而对于复杂降雨事件下坡面水力学特征还有待于进一步的探讨。

参考文献:

- [1] Lal R. Soil erosion and the global carbon budget[J]. *Environment International*, 2003, 29(4): 437-450.
- [2] Van Oost 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] 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.
- [4] 安瞳昕,李彩虹,吴伯志,等.玉米不同间作方式对坡耕地水土流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(5): 18-20.
- [5] Ali I, Khan F, Bhatti A U. Soil and nutrient losses by water erosion under mono-cropping and legume intercropping on sloping land[J]. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 2007, 20(3/4): 161-166.
- [6] Xia L Z, Liu G H, Ma L, et al. The effects of contour hedges and reduced tillage with ridge furrow cultivation on nitrogen and phosphorus losses from sloping arable land[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(3): 462-470.
- [7] Wang Z G, Bao X G, Li X F, 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.
- [8] Ruiz-Colmenero M, Bienes R, Eldridge D J, et al. Vegetation cover reduces erosion and enhances soil organic carbon in a vineyard in the central Spain[J]. *Catena*, 2012, 104(2): 153-160.
- [9] Pohl M, Graf F, Buttler A, et al. The relationship between plant species richness and soil aggregate stability can depend on disturbance[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1/2): 87-102.
- [10] Zhou Z C, Shanguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2007, 70(3): 350-355.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 丁文峰,李亚龙,王一峰,等.人工模拟降雨条件下紫色土坡面流水动力学参数特征[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(2): 66-69.
- [14] Brodowski R. Soil detachment caused by divided rain power from raindrop parts splashed downward on a sloping surface[J]. *Catena*, 2013, 105: 52-61.
- [15] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 124: 9-17.
- [16] Govers G, Takken I, Helming K. Soil roughness and overland flow[J]. *Agronomie*, 2000, 20(2): 131-146.
- [17] Darboux F, Gascuel-Oudoux C, Davy P. Effects of surface water storage by soil roughness on overland-flow generation[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(3): 223-233.
- [18] 欧阳铖人,吴伯志,吴开贤,等.玉米间作马铃薯及起垄的水土保持效应[J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 44-52.
- [19] Saleh A. Soil roughness measurement: Chain method[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1993, 48(6): 527-529.
- [20] 陈书军,陈存根,邹伯才,等.秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应[J]. *生态学报*, 2012, 32(4): 1142-1150.
- [21] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport on slope erosion[J]. *Catena*, 2013, 107: 145-153.
- [22] Wei W, Chen L D, Fu B J, 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.
- [23] Peng W Y, Zhang Z D, Zhang K L. Hydrodynamic characteristics of rill flow on steep slopes[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 29(17): 3677-3686.