

玉米—马铃薯间作根系特征及其与坡耕地 红壤径流养分流失的关系

杜静, 范茂攀, 王自林, 马志鹏, 马宇航, 李永梅

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

摘要: 农作物在生长过程中其根系对土壤的固持作用可以减轻坡耕地土壤的养分流失, 测定农作物根系对径流中养分流失的影响可以从侧面评价不同作物的水土保持作用。选取云南主要农作物玉米、马铃薯为研究对象, 测定了不同种植模式下作物生育期内坡耕地的产流次数、径流量、土壤流失量、径流中养分流失量以及通过采用剪切箱, 在农作物生育期对玉米、马铃薯单作与间作等3种植植模式下的作物根系特征进行了测定。结果表明, 在常规管理条件下, 与单作模式相比, 间作模式具有明显减轻水土流失的作用。玉米马铃薯间作产流次数较马铃薯单作、玉米单作分别减少4次和2次; 在开花期, 玉米马铃薯间作处理较马铃薯单作、玉米单作处理径流量分别减少了20.49%, 27.15%; 成熟期玉米马铃薯间作处理较马铃薯单作、玉米单作处理土壤流失量分别减少了49.67%, 40.31%; 在成熟期, 玉米马铃薯间作处理径流携带总磷养分流失最少, 较马铃薯单作、玉米单作处理分别减少了78.06%, 73.98%。成熟期玉米马铃薯间作处理的根长、根表面积、根体积与马铃薯单作、玉米单作处理的根长、根表面积、根体积达到显著水平($P < 0.05$), 间作处理较马铃薯单作、玉米单作处理根长分别增加了80.06%, 73.54%。在全生育期, 玉米马铃薯间作处理的根长、根表面积、根体积与径流中总氮养分流失量分别达到显著负相关和极显著负相关, 说明间作种植模式下农作物根系较单作更发达, 更有利于控制径流中养分流失。

关键词: 红壤; 坡耕地; 间作; 养分流失量; 根系特征

中图分类号: S157.1; S157.4⁺³¹

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0055-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.010

Effects of Root System Characteristics and Its Relationship with Soil Nutrient Loss in Runoff Under Maize and Potato Intercropping on Slope Land of Red Soil

DU Jing, FAN Maopan, WANG Zilin, MA Zhipeng, MA Yuhang, LI Yongmei

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201)

Abstract: Effects of root system on soil fixation could reduce nutrient loss from the slope land. Assessment of root systems on soil nutrient loss in runoff under different cropping patterns could be used to evaluate different crops' effect on soil and water conservation. This paper took the main crops, corn and potato, in Yunnan province as case study, the erosive events, runoff yield, soil loss, and nutrient loss in runoff during crop growth season under different cropping patterns as well as root characteristics of maize monoculture, potato monoculture and maize and potato intercropping were determined. Results showed that compared with monoculture, intercropping pattern could significantly decrease water and soil erosion under conventional management. The erosive events under maize-potato intercropping were 4 and 2 times less than those under potato monoculture and maize monoculture, respectively. In the flowering period, the runoff yield from intercropping reduced by 20.49% and 27.15%, compared with potato monoculture and maize monoculture, respectively. During mature period, intercropping reduced soil loss by 49.67% and 40.31% compared with potato and maize monocultures, respectively. Meanwhile, total phosphorus loss in runoff under intercropping pattern was smallest, which reduced by 78.06% and 73.98%, respectively compared with potato monoculture and maize monoculture. There was a significant difference ($P < 0.05$) in maize and potato intercropping and monocultures in terms of

收稿日期: 2016-09-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(41461059); 云南省教育厅基金项目(2013Y467); 科技创新创业行动基金项目(2016ZKX068)

第一作者: 杜静(1991—), 女, 四川广安人, 硕士, 主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail: 308379330@qq.com

通信作者: 李永梅(1966—), 女, 河南新乡人, 博士, 教授, 主要从事坡地水土保持与持续利用研究。E-mail: youngmaylee@126.com

root length, root surface area and root volume during mature period. Compared with potato and maize monocultures, root length with intercropping increased by 80.06% and 73.54%, respectively. The root length, root surface area and root volume of intercropping negatively correlated with total nitrogen loss in runoff, which indicated that intercropping had better root system and thus better control on nutrient loss.

Keywords: red soil; sloping arable land; intercropping; nutrient loss; root characteristics

云南省山地面积占全省国土面积的 94%,耕地以坡耕地为主,平缓的耕地较少。在全省 611.96 万 hm^2 的耕地中,6°以上的坡耕地面积占 74.5%^[1]。坡耕地是云南省重要的土地资源。坡耕地利用上,农作物占 89.4%,夏季以玉米、烤烟为主。因为顺坡种植的普遍存在,造成了严重的水土流失^[2]。一些学者利用植物护坡、农林间作、等高梯田、增加覆盖等措施来防治云南省坡耕地红壤的水土流失,取得了良好效果^[3-7]。在生物措施中,植物根系对水土流失的控制作用有地上部分和其他措施无法比拟的效果^[8-9]。本课题组前期对玉米、小麦、油菜的固土力学特征进行了研究,认为农作物根系具有固土能力,且与根系密度有关^[10-11]。然而由于植物的根径、根系形态、根系长度和根系密度不同,不同植物根系对土壤的固土能力也各不相同^[12-14]。

坡耕地的水土流失不仅造成土壤质量退化,而且也容易引起水体富营养化。目前,对于地表径流中氮、磷流失的研究多采用径流小区以及人工模拟降雨试验,研究不同气候条件(雨量、雨强等)和不同土壤性质等自然因素对养分流失规律的影响^[15-16]。关于农作物种植模式、农作物根系等与坡耕地径流中养分流失的关系的研究鲜见报道。

为了探讨云南坡耕地红壤不同农作物单间作及其根系特征对地表径流中氮、磷流失的影响,以云南省主要农作物玉米、马铃薯为研究对象,设计不同种植模式的处理,通过对比分析,加强农作物根系特征对坡耕地地表径流养分流失的影响研究,指导合理选择农作物种类和合理配置种植模式以期对坡耕地的可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概述

试验于 2015 年 5—9 月在云南农业大学试验农场径流小区进行。试验地点的中心地理坐标为 24°58′36″N, 102°40′10″E,坡度为 10°,20°,30°,海拔为 1 950 m,坡向为北偏西 57°。周年气温为 4.7~23.7℃,无霜期为 250~365 d,年平均降雨量为 1 200 mm,属于低纬度高原季风气候,干冷同期,雨热同季^[17]。土壤为轻红黏土,粘粒<0.01 mm 为 62.47%,粘粒 1~0.01 mm 为 37.53%^[18],是云南省典型的坡耕地红壤水土流失区。试验小区土壤基本理化性质为有机质含量 35.48 g/kg, pH 6.08,全氮含

量 0.79 g/kg,碱解氮含量 104.06 mg/kg,速效磷含量 5.24 mg/kg,速效钾含量 87.15 mg/kg。

1.2 试供作物

玉米为宣黄单 4 号,是宣威市种子公司选育的优质玉米新品种;马铃薯为合作 88,由云南师大薯类作物研究所和会泽县农技中心选育,2 种作物品种的生长期均为 100 d 左右。施用肥料为多酶金尿素含 N $\geq$ 46.2%,过磷酸钙含 $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 16.0\%$,农业用硫酸钾含 $\text{K}_2\text{O} \geq 51.0\%$ 。

1.3 试验设计

1.3.1 试验小区 试验小区共有 3 种不同尺寸、不同坡度的 9 个径流小区,具体情况为:3 个坡度为 10°,长 10 m,宽 4 m,面积为 40 m^2 的小区;3 个坡度为 20°,长 7 m,宽 4 m,面积为 28 m^2 的小区;3 个坡度为 30°,长 6 m,宽 4 m,面积为 24 m^2 的小区。试验小区有一个 DSJ2 型宏吸式雨量计用于观测作物生育期内的降雨量。

1.3.2 试验设计 试验处理为玉米单作(MM)、马铃薯单作(PP)玉米马铃薯间作(PM)共 3 个处理,按 10°,20°,30°各重复 3 次。

种植规格采用沿等高线常规种植。玉米宽窄行种植,大行距 80 cm,小行距 50 cm,株距 35 cm,种植密度 44 010 株/ hm^2 ;马铃薯单作采用宽窄行种植,宽行 70 cm,窄行 50 cm,株距 35 cm,种植密度 45 870 株/ hm^2 ;玉米马铃薯采用 2:2 模式间作时,玉米与玉米之间的行距是 40 cm,株距 35 cm,马铃薯与马铃薯的行距是 40 cm,株距 35 cm,间作时玉米的种植密度 34 395 株/ hm^2 ;马铃薯的种植密度 34 395 株/ hm^2 。玉米每塘播种 2 粒,后期玉米每塘留 1 株,马铃薯每塘播种 1 粒。玉米、马铃薯于 2015 年 5 月 12 日播种,9 月 20 日收获,生长期为 128 d。

1.3.3 施肥及田间管理 玉米按当地常规施肥 N 298 kg/ hm^2 、 P_2O_5 120 kg/ hm^2 和 K_2O 120 kg/ hm^2 ,氮肥分基肥、小喇叭口期追肥和大喇叭口期追肥 3 次施入,分别占总施氮肥量的 35%,30%,35%,磷肥和钾肥均一次性作为基肥施入。马铃薯总共施 N 150 kg/ hm^2 、 P_2O_5 150 kg/ hm^2 和 K_2O 225 kg/ hm^2 ,均一次性作为基肥施入。5 月 13 日—6 月 20 日为幼苗期;6 月 21 日—8 月 1 日为开花期;8 月 2 日—9 月 20 日为成熟期。在玉米和马铃薯的整个生长期,根据试验小区的具体情况,进行浇水、除草及防治病虫

害等农事活动。

1.4 观测项目及其测定方法

(1)气象资料:试验地旁建有小型气象观测站,在玉米和马铃薯全生育期内,于每日 18:00 记录前日 18:00 至当日 18:00 的降雨情况(降雨量),所用雨量计为 DSJZ 型宏吸式雨量计。

(2)径流量与土壤流失量测定:每次降雨产生后测定各蓄水桶的产流量。以一次降雨过程为单位,通过记录径流桶内水文尺刻度,计算降雨产生的径流量。

径流量计算方法:由于收集径流的塑料桶为近乎标准的几何体,根据上下圆半径和桶高,可以将桶内积水的体积换算为以水深表示的数学表达式,用来计算每次降雨产生的径流量,计算公式为:

$$V=0.0145h^3+6.225h^2+891.517h$$

式中: V 为径流量(cm^3 或 ml); h 为桶内积水的深度(cm)。

每次径流水样采集前,将径流桶内水充分搅拌均匀,分上、中、下 3 层共取水样 250 ml,带回实验室,通过 0.45 μm 滤纸,滤纸烘干后称重,通过 2 次滤纸重量差减,计算泥沙(SS)含量。泥沙流失量=径流量(L/m^2) $\times$ SS(mg/L) $\times 1/1\,000$ 。

(3)径流全磷浓度(TP)用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法(GB 11893—89);径流中全氮浓度(TN)用碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法(F-HZ-HJ-SZ-0040)测定,总流失量=径流量(L/m^2) $\times$ 浓度(mg/L)。

(4)按玉米、马铃薯生育期取样,分别在喇叭口期、抽雄期、成熟期和幼苗期、盛花期、成熟期取样。取样时用剪切箱(长 $\times$ 宽 $\times$ 高=30 cm $\times$ 30 cm $\times$ 10 cm)采集不同作物 0—30 cm 的根系,采用全挖掘法,冲洗根系,根系形态结构参数使用 EPSON 4900 扫描仪扫描后,用 WINRHIZO 根系分析软件(Win-Rhizo Pro Vision 5.0a)对扫描根系图进行处理,对根系形态参数进行分析,计算出根长、根表面积和根体积。

1.4 数据处理

试验所得数据用 Excel 2007 进行计算和图表制作,用 SAS 进行统计分析。采用单因素方差分析,Duncan 多重比较法检验差异显著性。采用 SPSS 相关分析检测根系特征与养分流失的相关性。

2 结果与分析

2.1 作物生育期内降雨特征分析

2015 年 5 月 13 日至 2015 年 9 月 20 日整个作物生育期内降雨情况见表 1:降雨集中在 6—9 月份,期间降雨次数和降雨量分别占整个生育期的 95.06%和 94.61%;间作种植模式产流 10 次,较玉米单作、马铃薯单作分别减少了 2 次和 4 次;产生径流主要集中在 5—7 月,占整个生育期的 90.67%;土壤流失主要集中在 5—6 月份,占整个生育期的 84.11%。在整个生育期,径流量和土壤流失量都是先增加后降低。雨水的过分集中使土壤含水量常处于较高水平,导致坡耕地在降雨过程中易产生较大的地表径流,易造成水土流失。

表 1 2015 年 5 月 13 日至 9 月 20 日玉米和马铃薯生育期内降雨特征

日期 (年-月)	降雨次数	产流次数			降雨量/ mm	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
		MM	PP	PM			
2015-05	4	2	3	2	33.6	85.06	3.64
2015-06	13	5	5	5	167.0	130.71	11.39
2015-07	20	3	4	2	95.5	230.11	1.64
2015-08	24	2	2	1	255.7	45.87	1.20
2015-09	20	0	0	0	72.0	0	0
合计	81	12	14	10	623.8	491.75	17.87

2.2 不同种植模式对径流和土壤流失的影响

2.2.1 不同种植模式对径流量和土壤流失量的影响

在不同种植模式下,各个生育期的径流量和土壤流失量见表 2:在整个生育期,总土壤流失量依次由大到小为 PP>MM>PM,地表径流量和土壤流失量均随生育期的推进呈先增加后降低的趋势,PM 与 PP、MM 之间总的径流量差异显著。在作物生长过程中,幼苗期 MM、PM 之间土壤流失量无显著差异,但 PP、PM 之间土壤流失量差异显著,且 PM 处理较 PP 处理土壤流失量减少了 17.26%。在开花期,PM 处理较 PP、MM 处理径流量分别减少了 20.49%、27.15%,土壤流失量分别减少了 11.54%、3.72%,PP 与 PM 之间和 MM 与 PM 之间土壤流失量达到显著水平($P<0.05$),PM 与 MM 之间径流量的差异显著。成熟期 PM 与 PP 之间径流量差异显著,PM 处理较 PP 处理径流量减少 38.12%,PM 处理较 PP、MM 处理土壤流失总量分别减少了 49.67%、40.31%。

表 2 不同种植模式下农作物不同生育期内径流量和土壤流失量

处理	幼苗期		开花期		成熟期		整个生育期	
	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	土壤流失量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
PP	138.38a	15.99a	318.73ab	2.34a	64.92a	1.53a	522.03a	19.86a
MM	146.69a	13.9ab	347.85a	2.15b	32.52b	1.29a	527.06a	17.35a
PM	132.58a	13.23b	253.42b	2.07c	40.17b	0.77a	426.18b	16.07a
F 值	1.14	4.38	4.99	93.49	10.97	2.75	6.12	1.76
P 值	0.405	0.098	0.082	0.0004	0.024	0.177	0.061	0.283

注:同一列不同字母表示不同种植模式径流量和土壤流失量在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

2.2.3 不同种植模式对坡耕地径流中养分流失的影响 径流中 TP 和 TN 的流失量不仅与土壤向径流中释放的浓度有关,而且与径流量有关。玉米马铃薯生育期内各处理养分流失量见表 3,结果表明,在整个生长过程中 TP 和 TN 流失量逐渐降低,PP 处理 TN 养分流失总量最少,较 MM、PM 处理分别减少了 5.57%,4.35%,PM 处理 TP 养分流失总量最少,较 PP、MM 处理分别减少了 23.44%,23.36%。在开花

期,PM 处理径流中携带 TN 养分流失较 PP、MM 处理分别减少了 13.72%,20.28%,径流中携带 TP 养分流失较 PP、MM 处理分别减少了 29.64%,27.59%。在成熟期,MM 处理径流中携带 TN 养分流失最少,较 PP、PM 处理分别减少了 8.78%,24.71%,从 TP 流失量看,PM 与 MM、PP 之间显著差异,PM 处理径流中携带 TP 养分流失最少,较 PP、MM 处理分别减少了 78.06%,73.98%。

表 3 不同种植模式下径流中总氮和总磷流失量 单位:g/hm²

处理	幼苗期		开花期		成熟期		整个生育期	
	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
PP	275.43b	20.00a	73.82a	4.96a	42.36a	4.65a	391.61a	29.61a
MM	296.19a	20.84a	79.89a	4.82a	38.64a	3.92a	414.71a	29.58a
PM	294.39a	18.16a	63.69a	3.49a	51.32a	1.02b	409.4a	22.67a
F 值	7.48	0.84	3.59	1.62	2.50	24.08	2.36	3.95
P 值	0.045	0.495	0.128	0.305	0.198	0.006	0.210	0.113

2.3 不同种植模式下农作物根系特征

根长、根表面积和根体积是表示根系特征的参数指标。在不同种植模式下,农作物各个生育期的根系特征结果表明(表 4)在作物生长过程中,PM 处理的根长、根表面积和根体积均大于 PP 和 MM 处理,且玉米、马铃薯的根长、根表面积、根体积随生育期的推进均呈先增加后减少的趋势。在幼苗期,PM 处理的根长、根表面积与 PP、MM 处理的根长、根表面积达到显著水平($P<0.05$),从根体积看,PM、PP、MM 之间无显著差异。PM 处理较 PP、MM 处理根长分别增加了 62.84%,81.61%,根表面积分别增加了 66.58%,67.48%。开花期,玉米、马铃薯的根长、根

表面积、根体积达到最大。PM 处理的根长、根表面积、根体积与 PP、MM 处理的根长、根表面积、根体积均达到显著水平($P<0.05$),PM 处理较 PP、MM 处理根长分别增加了 66.01%,73.1%,根表面积分别增加了 84.45%,48.55%,根体积分别增加了 50.7%,42.25%。成熟期 PM 处理的根长、根表面积、根体积与 PP、MM 处理的根长、根表面积、根体积达到显著水平($P<0.05$),PM 处理较 PP、MM 处理根长分别增加了 80.06%,73.54%,根表面积分别增加了 87.07%,48.93%,根体积分别增加了 62.96%,59.26%。由此可见,在农作物根系特征方面,玉米马铃薯间作效果远好于玉米单作和马铃薯单作。

表 4 不同种植模式下农作物根系特征

处理	幼苗期			开花期			成熟期		
	根长/ (m·hm ⁻²)	根表面积/ (m ² ·hm ⁻²)	根体积/ (m ³ ·hm ⁻²)	根长/ (m·hm ⁻²)	根表面积/ (m ² ·hm ⁻²)	根体积/ (m ³ ·hm ⁻²)	根长/ (m·hm ⁻²)	根表面积/ (m ² ·hm ⁻²)	根体积/ (m ³ ·hm ⁻²)
PP	684727b	314.62b	0.24a	1076121b	434.1c	0.35b	445331c	236.32c	0.20b
MM	338817b	306.19b	0.16b	851702b	1436.4b	0.41b	591090b	933.38b	0.22b
PM	1842572a	941.53a	0.23ab	3166183a	2791.8a	0.71a	2233845a	1827.69a	0.54a
F 值	44.88	30.04	6.03	296.42	66.56	30.65	815.58	490.58	49.64
P 值	0.0018	0.0039	0.062	<0.0001	0.0009	0.0038	<0.0001	<0.0001	0.0015

2.4 不同种植模式下农作物根系特征与径流中养分流失的关系

2.4.1 不同种植模式下农作物根系特征与总磷养分流失的关系 在不同种植模式下,农作物根系特征与 TP 养分流失的相关性见表 5。在作物幼苗期,PP 处理的 TP 养分流失量与根体积的相关系数达到显著负相关,MM 处理的 TP 养分流失量与根长、根表面积的相关系数达到显著负相关。在作物开花期,PM 处理的 TP 养分流失量与根体积的相关系数达到显著负相关,PP、MM 处理的相关性均较高。成熟期作物根系特征与 TP 养分流失量的相关系数虽未达到

显著,但相关性较高。在农作物的整个生育期,MM 处理的 TP 养分流失量与根长、根表面积的相关系数达到极显著负相关,PM 处理的 TP 养分流失量与根表面积、根体积的相关系数分别达到显著负相关和极显著负相关。

2.4.2 不同种植模式下农作物根系特征与总氮养分流失的关系 通过计算农作物不同生育期的根长、根表面积、根体积与径流中 TN 养分流失的相关系数得下表(表 6)。在作物幼苗期 PM 处理的根长、根表面积、根体积与径流中 TN 养分流失量的相关系数虽未达到显著但相关性较高。开花期 PM 处理的根长、根

表面积与径流中 TN 养分流失量的相关系数分别达极显著负相关和显著负相关。在成熟期 MM 处理的根体积与径流中 TN 养分流失量达到显著负相关。在整个生育期,MM 处理的根长、根表面积与径流中 TN 养分流失量分别达到显著负相关和极显著负相关,PM 处理的根长、根表面积、根体积与径流中 TN 养分流失量分别达到显著负相关和极显著负相关。

表 5 不同种植模式下农作物不同生育期内总磷流失量与根系特征指标间的相关系数

生育期	处理	根长	根表面积	根体积
幼苗期 (n=3)	PP	-0.935	-0.896	-0.999*
	MM	-1.000*	-0.999*	-0.992
	PM	-0.971	-0.937	-0.965
开花期 (n=3)	PP	-0.947	-0.938	-0.972
	MM	-0.931	-0.895	-0.924
	PM	-0.984	-0.988	-0.998*
成熟期 (n=3)	PP	-0.986	-0.990	-0.955
	MM	-0.983	-0.988	-0.992
	PM	-0.852	-0.967	-0.957
全生育期 (n=9)	PP	-0.147	-0.131	-0.245
	MM	-0.810**	-0.833**	-0.620
	PM	-0.633	-0.778*	-0.878**

注: * 表示显著水平达 0.05; ** 表示显著水平达 0.01。下同。

表 6 不同种植模式下农作物不同生育期内总氮流失量与根系特征指标间的相关系数

生育期	处理	根长	根表面积	根体积
幼苗期 (n=3)	PP	-0.758	-0.993	-0.925
	MM	-0.956	-0.952	-0.921
	PM	-0.993	-0.972	-0.989
开花期 (n=3)	PP	-0.980	-0.985	-0.957
	MM	-0.930	-0.959	-0.937
	PM	-1.000**	-1.000*	-0.995
成熟期 (n=3)	PP	-0.975	-0.969	-0.996
	MM	-0.994	-0.996	-0.999*
	PM	-0.822	-0.952	-0.940
全生育期 (n=9)	PP	-0.047	-0.022	-0.139
	MM	-0.754*	-0.798**	-0.549
	PM	-0.672*	-0.819**	-0.906**

3 讨论

3.1 不同降雨及生育期的径流量和土壤流失特征

本研究条件下,降雨集中在 6—9 月份,期间降雨次数和降雨量分别占整个生育期的 95.06%和 94.61%,在同样降雨条件下,PM 处理在整个生育期产流 10 次,较 MM 处理、PP 处理分别减少了 2 次、4 次;在开花期,PM 处理较 PP、MM 处理径流量分别减少了 20.49%,27.15%;成熟期 PM 处理较 PP、MM 处理土壤流失量分别减少了 49.67%,40.31%。与杨友琼等^[19]在自然降雨条件下,通过径流小区试验研究了玉米间作蔬菜和牧草对径流、土壤侵蚀的影响结果一致,间作的水土保持效果优于单作。由于玉米马铃薯之间形成了高低落差,当雨水溅落在玉米植株上时形成了一级缓冲,再落到马铃薯植株上形成了二级缓冲,比单作的一级缓冲更能削弱雨滴的动能。张勇等^[20]研究了坡耕地种植作

物种类对土壤流失的影响,结果表明马铃薯增大了地表覆盖度比裸地在径流量上减少了 68%~83%。到了成熟期,玉米、马铃薯的植被覆盖率都达到最大化,叶子能有效减少雨水的动能和降雨的侵蚀力,减小了雨水对土壤的溅蚀作用。因此,在坡耕地水土流失防护过程中,不仅要选择合理的耕作措施,而且还应考虑种植作物的各生育期水土流失特征,这样才能够有效地治理坡耕地水土流失。

3.2 作物根系特征与径流中养分流失的关系

在整个生育期,PM 处理相对于 PP、MM 处理在径流中携带 TP 流失量上具有一定优势,较 PP、MM 处理分别减少了 23.44%,23.36%;在成熟期,PM 处理径流携带 TP 养分流失最少,较 PP、MM 处理分别减少了 78.06%,73.98%。与李俊波等^[21]从理论上结合前人对坡耕地养分流失的研究结果一致,间作能有效减少坡耕地养分流失。在不同的种植模式中,间作系统养分吸收优势主要来源于 2 种植物对资源在时间和空间上的互补利用。从整个生育期 TP 和 TN 总流失量看,流失总量逐渐降低。与何晓玲等^[22]玉米种植条件下坡耕地径流中磷素流失特征研究结果一致,横坡垄作在玉米生长前期控制壤中流磷素流失效果较差,在玉米后期控制壤中流磷素流失效果较好。由于施肥量是严格按照每株定量施用,按面积折算后,单位面积所施肥料相等,故可排除施肥量对本试验径流携带 TP 和 TN 养分流失的影响,说明单纯从径流所携带养分流失角度考虑,PM 处理在 TP 和 TN 流失层面有一定优势。

在作物生长过程中,PM 处理的根长、根表面积和根体积均大于 PP 和 MM 处理。成熟期 PM 处理的根长、根表面积、根体积与 PP、MM 处理的根长、根表面积、根体积达到显著水平($P<0.05$),PM 处理较 PP、MM 处理根长分别增加了 80.06%,73.54%,根表面积分别增加了 87.07%,48.93%,根体积分别增加了 62.96%,59.26%。与宋日等^[23]对玉米、大豆间作条件下 2 种作物根系形态特征的研究结果一致,间作有利于根系的生长。可能是因为间作根系在土壤空间分布上的差异,根系功能活跃期在时间上的错位,以及根系形态上的变化,形成了资源的合理利用。玉米的根长、根表面积、根体积均随玉米生育期的推进呈先增加后降低的趋势,且均于开花期达到最大,与郑子成等^[24]对玉米根系特征的研究结果一致,说明玉米根系在幼苗期和成熟期之间发育较快。

径流中养分流失量随作物根长、根表面积、根体积的增加而减少;径流中总磷、总氮养分流失与作物根长、根表面积、根体积呈显著负相关,与马志鹏等^[25]、李勇等^[26]提出的根系因子与土壤流失量呈显著负相关,土壤抗冲性的增强主要取决于根系的缠绕和固结作用的研究结果一致。整个生育期,MM 处理的 TP 养分流失量

与根长、根表面积的相关系数达到极显著负相关,与张雷昌等^[27]对于玉米根系对磷吸收的影响的研究结果一致,玉米对磷的吸收利用率与根系生长呈正相关。整个生育期,PM 处理的根长、根表面积、根体积与径流中 TN 养分流失量分别达到显著负相关和极显著负相关,与吴开贤等^[28]玉米马铃薯间作对氮的吸收研究结果一致,玉米马铃薯间作加剧了种间竞争,有利于氮素的吸收,减少了径流中总氮养分的流失。

4 结论

作物生育期内,产流次数、径流量、土壤流失量和养分流失量等指标都表明间作种植模式优于单作种植模式的趋势。具体表现在整个生育期间作种植模式产流次数较玉米单作、马铃薯单作分别减少了 2 次、4 次,PM 处理总径流量显著少于 PP、MM 处理,总土壤流失量依次为 PP>MM>PM,玉米马铃薯间作处理总磷养分流失最少,较马铃薯单作、玉米单作处理分别减少了 23.44%,23.36%。农作物通过合理间作可以减少坡耕地红壤的水土流失。玉米马铃薯间作与其单作相比,作物的根长密度、根表面积和根体积都高于单作,各处理间差异性显著。整个生育期,玉米马铃薯间作处理的总磷流失量与根表面积、根体积的相关系数分别达到显著负相关和极显著负相关。玉米马铃薯间作处理的根长、根表面积、根体积与径流中总氮养分流失量分别达到显著负相关和极显著负相关。综合表明,在坡耕地红壤地区,农作物间作及其根系能有效减少径流中的养分流失和土壤流失。

参考文献:

- [1] 彭尔瑞,王穗,郝莉莎,等. 云南耕地与基本农田保护现状分析及对策研究[J]. 资源与产业,2009,11(4):59-63.
- [2] 安瞳昕,吴伯志. 坡耕地玉米双垄种植及地表覆盖保持耕作措施研究[J]. 西南农业学报,2004,17(增刊 1):94-100.
- [3] 郑子成,何淑勤,尹忠,等. 不同坡度下玉米季坡耕地地表径流中磷素流失特征[J]. 水土保持学报,2013,27(5):109-114.
- [4] 马琨,王兆骞,陈欣. 不同农业模式下水土流失的生态学特征研究[J]. 中国生态农业学报,2008,16(1):187-191.
- [5] 邱学礼,段宗颜,胡万里,等. 降水特征与农作处理对坡耕地水土流失的动态研究[J]. 水土保持学报,2010,24(1):82-85.
- [6] 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):18-20,24.
- [7] 米艳华,潘艳华,沙凌杰,等. 云南红壤坡耕地的水土流失及其综合治理[J]. 水土保持学报,2006,20(2):17-21.
- [8] Gysels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(2): 189-217.
- [9] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.
- [10] 徐少君,曾波,类淑桐,等. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J]. 土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [11] 郑朝元,范茂攀,郑毅,等. 玉米根系原位固土力学特征研究[J]. 云南农业大学学报,2010,25(4):562-567.
- [12] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1):169-183.
- [13] 徐少君,曾波,类淑桐,等. 三峡库区几种耐水淹植物根系特征与土壤抗水蚀增强效应[J]. 土壤学报,2011,48(1):160-167.
- [14] 湛芸,祝亚军,何丙辉. 三峡库区狗牙根根系固坡抗蚀效应研究[J]. 水土保持学报,2010,24(6):42-45.
- [15] 康玲玲,朱小勇,王云璋,等. 不同雨强条件下黄土性土壤养分流失规律研究[J]. 土壤学报,1999,36(4):536-543.
- [16] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2003,9(1):71-74.
- [17] 陈小强,范茂攀,李永梅,等. 不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(4):48-52,65.
- [18] 毛妍婷,郑毅,李永梅,等. 狗尾草根系固土拉力的原位测定[J]. 土壤通报,2009,40(3):580-584.
- [19] 杨友琼,吴伯志,安瞳昕. 云南省玉米间作蔬菜和牧草对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持通报,2011,31(3):26-29.
- [20] 张勇. 不同作物种植方式对坡耕地产流产沙的影响[J]. 中国西部科技,2014,13(1):47-49.
- [21] 李俊波,华珞,冯琰. 坡地土壤养分流失研究概况[J]. 土壤通报,2005,36(5):753-757.
- [22] 何晓玲,郑子成,李廷轩. 玉米种植下紫色坡耕地径流中磷素流失特征研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(12):2441-2450.
- [23] 宋日,牟瑛,王玉兰,等. 玉米、大豆间作对两种作物根系形态特征的影响[J]. 东北师大学报(自然科学版),2002,34(3):83-86.
- [24] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等. 玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J]. 农业工程学报,2014,30(4):100-108.
- [25] 马志鹏,范茂攀,陈小强,等. 间作模式下作物根系与坡耕地红壤抗蚀性的关系[J]. 水土保持学报,2016,30(4):68-73.
- [26] 李勇,吴钦孝,朱显谟,等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究[J]. 水土保持学报,1990,4(1):1-6.
- [27] 张雷昌,汤利,郑毅. 根系互作对玉米大豆间作作物磷吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(5):1142-1149.
- [28] 吴开贤,安瞳昕,范志伟,等. 玉米与马铃薯的间作优势和种间关系对氮投入的响应[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(4):1006-1012.