

玉米季横垄坡面土壤剥蚀率与径流含沙量关系

王莹¹, 吴漩³, 郑子成¹, 李廷轩¹, 何淑勤², 林超文⁴

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 四川农业大学林学院, 成都 611130;

3. 什邡市农业局, 四川 什邡 618400; 4. 四川省农业科学研究所土壤肥料研究所, 成都 610066)

摘要: 为明确玉米全生育期横垄坡面土壤剥蚀率与径流含沙量之间的关系, 以川中丘陵紫色土区坡耕地为研究对象, 通过野外人工模拟降雨试验, 开展玉米全生育期土壤剥蚀率和径流含沙量变化特征研究, 并分析土壤剥蚀率与径流含沙量之间的关系。结果表明: (1) 玉米全生育期土壤剥蚀率随降雨强度的增大而增大, 2.0 mm/min 降雨强度条件下土壤剥蚀率分别为 1.5, 1.0 mm/min 降雨强度条件下的 1.87, 4.59 倍; 同一降雨强度条件下, 土壤剥蚀率在玉米生长过程中先降低后增加, 苗期显著高于其他生育期。(2) 不同降雨强度条件下, 产沙量随玉米生育期的推进先降低后增加, 苗期最大(306.6 g), 抽雄期最小(64.6 g); 除玉米抽雄期外, 其他各生育期产沙量随降雨强度的增大逐渐增加, 且苗期和拔节期产沙量在降雨强度间差异显著; 玉米各生育期径流含沙量在降雨过程中呈波动变化的趋势, 降雨强度越大, 其波动幅度越强。(3) 玉米全生育期土壤剥蚀率与径流含沙量呈幂函数关系, 且两者间达到极显著水平。研究结果可为揭示紫色土区坡耕地水蚀机理和区域水蚀预测预报模型构建提供理论依据。

关键词: 横垄垄作; 土壤剥蚀率; 玉米生育期; 径流含沙量; 产沙量

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0040-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.006

Relationship Between Soil Detachment Rate and Sediment Concentration in Runoff on Slope of Contour Tillage During Maize Growing Stages

WANG Ying¹, WU Xuan³, ZHENG Zicheng¹, LI Tingxuan¹, HE Shuqin², LIN Chaowen⁴

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2. College of Forestry, Sichuan

Agricultural University, Chengdu 611130; 3. Agricultural Bureau of Shifang, Shifang,

Sichuan 618400; 4. Soil and Fertilizer Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610066)

Abstract: The objective of this study was to investigate the relationship between soil detachment rate and sediment concentration of ridge contour during maize growing stages. This paper took sloping farmland of purple soil in Hilly Area of Central Sichuan basin as the research object. The filed artificial rainfall experiment was carried out for determination of characteristics of soil detachment rate and sediment concentration during maize growing stages, and to find the relationship between soil detachment rate and sediment concentration. The results showed that: (1) The soil detachment rate increased with the increasing rainfall intensity during maize growing stages, and the soil detachment rate under 2.0 mm/min rainfall intensity were 1.87 and 4.59 times greater than that under 1.0 and 1.5 mm/min rainfall intensity, respectively. During maize growing stages in the field, the soil detachment rate showed a falling-and-rising trend, and was significantly higher in the seedling stage than that in other growing stages under the same rainfall intensity. (2) Within maize growing stages, the sediment yield increased firstly and then decreased under different rainfall intensities. The largest sediment yield was (306.6 g) in the seedling stage, and the least (64.6 g) was in tasseling stage. The sediment yield increased with the increasing rainfall intensity in growing stages except for tasseling stage, while the difference was significant among rainfall intensities in seedling stage and jointing stage. The sediment concentration in runoff showed a fluctuating trend during the maize growing stages in the rainfall process, and the fluctuation range increased with the increasing rainfall intensity. (3) A power function relation was listed between soil detachment rate and sediment concentration in runoff during maize growing

收稿日期: 2017-10-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271307); 四川省教育厅项目(15ZB0009)

第一作者: 王莹(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: WaYing2017@163.com

通信作者: 郑子成(1976—), 男, 教授, 博导, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

stages, and the correlation was significant. The results provide references for revealing the mechanism of soil erosion in sloping farmland of purple soil and the construction of regional water erosion prediction model.

Keywords: contour tillage; soil detachment rate; maize growing stage; sediment concentration in runoff; sediment yield

土壤剥蚀率作为水蚀预报模型(WEPP)的关键参数,是估算土壤可蚀性的重要参数之一^[1]。在坡面水蚀过程中,雨滴击打土壤表面导致土粒分散,土粒更易被径流冲刷搬运,土壤侵蚀量增加^[2],土壤剥蚀率增大。而当径流含沙量大于输沙能力时,泥沙在坡面沉积,土壤剥蚀率为负值^[3]。可见,明确水蚀过程中土壤剥蚀率与径流含沙量之间的关系对揭示坡面水蚀机理具有重要意义。

土壤剥蚀率与径流含沙量关系的研究始于20世纪40年代,对土壤剥蚀率与径流含沙量方面的研究已备受国内外学者关注。有研究表明径流含沙量和土壤剥蚀率呈正相关,含沙量达到饱和时的径流剥蚀作用最强,但输沙能力较弱^[4];随后研究则发现土壤剥蚀率与径流含沙量呈负相关,土壤剥蚀率在清水时最大^[5]。土壤剥蚀率和径流含沙量虽受降雨和径流的共同影响,但降雨所造成的坡面侵蚀量是径流冲刷的3~19倍^[6]。相关研究表明,不仅实施耕作措施坡面土壤剥蚀率增大,土壤侵蚀加剧^[7],直线坡面土壤剥蚀率和径流含沙量也明显增加^[8];而也有研究表明,合理耕作对坡面土壤侵蚀具有抑制作用,可有效降低土壤剥蚀率^[9]。坡面植被覆盖度越大,对坡面土壤侵蚀产沙的抑制作用越强^[10]。降雨、耕作措施和植被覆盖度均对坡面土壤剥蚀和侵蚀产沙具有较大影响。紫色土作为一种侵蚀岩性土,生产力高,土体较薄,集中分布于川中丘陵区^[11],横坡垄作是这一区域实施的主要耕作措施。玉米作为该区主要的粮食作物之一,其生长阶段与研究区雨季同期,对坡面土壤侵蚀影响明显^[12]。因此,本文以川中丘陵区紫色土坡耕地为研究对象,开展玉米全生育期横垄坡面径流含沙量和土壤剥蚀率变化特征研究,阐明土壤剥蚀率与径流含沙量的关系,以期揭示紫色土区坡耕地水蚀机理与区域水土流失的有效防控提供理论依据。

1 研究区概况

试验在中国农业部长江上游农业资源与生态环境重点野外科学试验站(104°34'12"E, 30°05'12"N)进行,位于四川省资阳市雁江区松涛镇响水村。研究区主要以丘陵地貌为主,平均海拔395 m,平作和横坡垄作为研究区主要耕作措施,土地利用类型以耕地和林地为主,玉米为该区主栽农作物之一。属亚热带季风气候,年均气温16.8℃,年平均降水量965.8 mm,全年降水量的80%集中于5—9月份,多以暴雨

为主,坡面水土流失严重。研究区土壤类型为紫色土,属中性紫色土亚类,黏粒、粉粒和砂粒含量分别为22%,29%,49%,质地较轻,土壤容重1.21 g/cm³,土壤pH 7.5,有机质含量11.62 g/kg,全氮含量0.73 g/kg,碱解氮含量40.13 mg/kg,有效磷含量14.08 mg/kg,速效钾含量86.64 mg/kg。

2 研究方法

2.1 小区布设与降雨试验

采用人工模拟降雨和微小区相结合的研究方法,基于前期实地调查,径流小区设定为2 m×1 m,坡度设置为15°。降雨装置为SR型移动式人工模拟降雨器,喷头系统为美国V-80100,2台降雨器分别位于小区两侧实施对喷降雨,有效降雨高度和面积分别为6 m和35 m²,降雨均匀系数达85%以上。根据试验区多年降雨和水文资料,设计降雨强度分别为1.0, 1.5, 2.0 mm/min,总降雨时间为60 min,分别于玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期进行降雨,试验重复3次,共计36场。

2.2 供试玉米

小区横垄坡面的设置按照当地农耕习惯,垄高、垄宽、垄距分别为25,40,90 cm。供试玉米品种为正红6号(苗期、拔节期、抽雄期和成熟期株高分别为0.258,1.644,2.454,2.190 m;叶面积指数分别为0.108,2.236,2.770,1.356),于2015年4月垄上单行直播,行距90 cm,株距25 cm。播种前,基施尿素(含N 46.3%)(N)250 kg/hm²,过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)(P₂O₅)125 kg/hm²,拔节前期追施氮肥(N)150 kg/hm²。其他管理措施与当地农耕习惯一致。

2.3 数据处理与分析

试验过程中准确记录降雨特征时间点,径流量和产沙量每隔3 min收集1次,并分别用体积法和烘干法测定。

土壤剥蚀率的计算公式^[8]为:

$$D_r = \frac{M_t}{A_t}$$

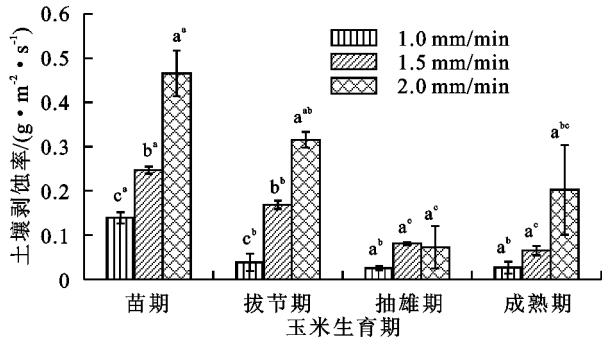
式中: D_r 为土壤剥蚀率(g/(m²·s)); M_t 为 t 时间内坡面侵蚀产沙量(g),由径流泥沙样确定; A 为试验小区面积(m²); t 为降雨时间(s)。

试验数据统计分析采用DPS 11.0软件,多重比较选择LSD法,方程拟合采用SPSS 17.0软件完成,图表制作采用Origin 9.0和Excel 2013。

3 结果与分析

3.1 土壤剥蚀率的变化特征

由图 1 可知,除玉米抽雄期外,其他各生育期土壤剥蚀率随降雨强度的增大而增大,2.0 mm/min 降雨强度条件下土壤剥蚀率分别是 1.0,1.5 mm/min 降雨强度条件下的 4.59,1.87 倍;而抽雄期土壤剥蚀率在 1.5 mm/min 降雨强度条件下最大,各降雨强度间差异不显著。同时,随着玉米生育期的推进,土壤剥蚀率总体呈先降低后增加的变化趋势,抽雄期土壤剥蚀率最小(0.16 g/(m²·s)),分别为苗期、拔节期、成熟期的 22.2%,31.5%,56.1%。在 1.0 mm/min 降雨强度条件下,玉米苗期土壤剥蚀率最大,显著高于其他生育期;在 1.5 mm/min 降雨强度条件下,玉米苗期土壤剥蚀率大于拔节期,且苗期和拔节期土壤剥蚀率与其他生育期差异显著;在 2.0 mm/min 降雨强度条件下,相比于其他玉米生育期,苗期土壤剥蚀率远大于抽雄期和成熟期,拔节期显著高于抽雄期。



注:图中不同小写字母表示同一生育期不同降雨强度间差异显著($p < 0.05$);上标不同小写字母表示相同降雨强度不同生育期间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同降雨强度下玉米各生育期土壤剥蚀率变化特征

由图 2 可知,降雨过程中,玉米各生育期土壤剥蚀率呈波动变化趋势,抽雄期土壤剥蚀率变化最小。1.0 mm/min 降雨强度条件下,玉米各生育期土壤剥蚀率总体较小,其中苗期土壤剥蚀率在降雨过程中均较其他生育期高,且在降雨 15 min 时出现最小值(0.004 g/(m²·s)),其他生育期土壤剥蚀率在降雨过程中波动均较小。在 1.5 mm/min 降雨强度条件下,各生育期土壤剥蚀率变化较为复杂,在降雨 30 min 时差异较小。在 2.0 mm/min 降雨强度条件下,玉米各生育期土壤剥蚀率变化总体较大,其中苗期土壤剥蚀率在降雨 0~21 min 期间总体呈下降趋势,后波动变化,降雨后期迅速降低,且在降雨 54 min 时出现最小值(0.012 g/(m²·s));拔节期土壤剥蚀率在降雨 0~12 min 期间迅速降低,且在 12 min 时出现最小值(0.014 g/(m²·s)),后随降雨时间延长逐渐趋于稳定;成熟期土壤剥蚀率在降雨 33~39 min 期间迅速增加,并达到最大(0.031 g/(m²·s));抽雄期土壤剥蚀率在整个降雨期间变化较为平稳。

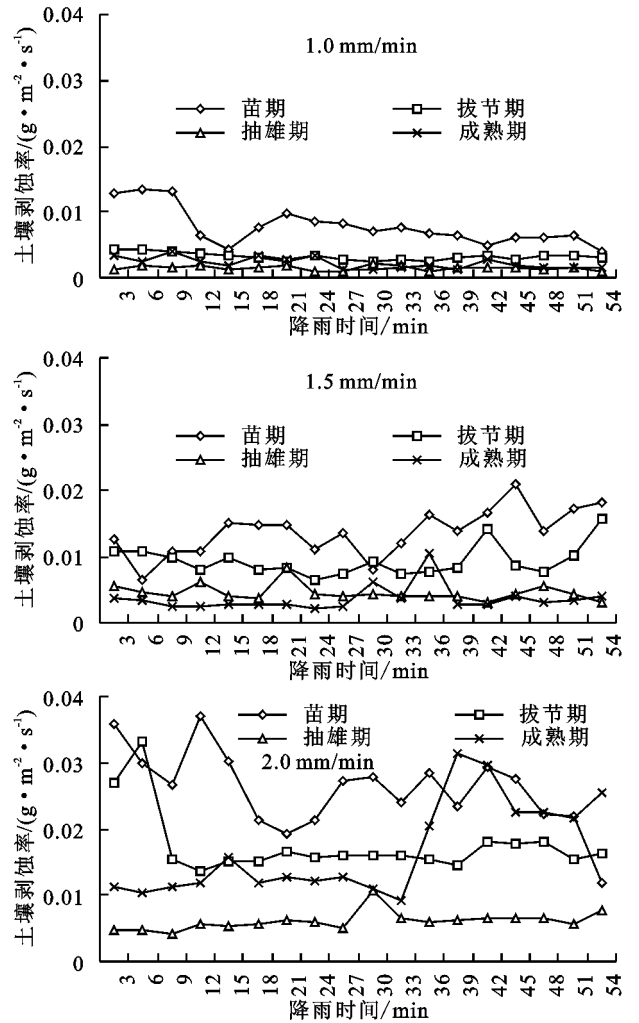


图 2 不同降雨强度下玉米各生育期土壤剥蚀率动态变化特征

3.2 坡面侵蚀产沙变化特征

从图 3 可以看出,除玉米抽雄期外,其他各生育期侵蚀产沙量随降雨强度的增大而增大,1.0 mm/min 降雨强度条件下产沙量分别是 1.5,2.0 mm/min 降雨强度条件下的 21%和 49%;抽雄期产沙量在降雨强度为 1.5 mm/min 时最大,但各降雨强度间差异不显著。随玉米生育期推进,坡面侵蚀产沙量在玉米生长过程中总体表现为苗期最大(306.6 g),抽雄期最小(64.6 g)。在 1.0 mm/min 降雨强度条件下,苗期产沙量最大,且显著高于其他生育期;在 1.5 mm/min 降雨强度条件下,坡面产沙量随玉米生育期推进逐渐降低,成熟期最小(23.47 g),与抽雄期差异不显著;在 2.0 mm/min 降雨强度条件下,抽雄期和成熟期产沙量显著低于苗期,拔节期显著高于抽雄期。

从 4 图可以看出,降雨过程中玉米各生育期径流含沙量呈波动变化趋势,玉米抽雄期径流含沙量变化最小。在 1.0 mm/min 降雨强度条件下,玉米各生育期径流含沙量总体偏小,其中苗期和拔节期径流含沙量在降雨 0~15 min 内较其他生育期高,且苗期在降雨 15 min 时最低(0.54 g/L),其他生育期径流含沙

量在降雨过程中波动幅度较低;在 1.5 mm/min 降雨强度条件下,玉米苗期径流含沙量在降雨过程中均较其他生育期高,且在降雨 30 min 时达到最低(0.91 g/L),拔节期径流含沙量在降雨 0~15 min 内高于抽雄期和成熟期,抽雄期和成熟期径流含沙量在降雨过程中总体变化较小;在 2.0 mm/min 降雨强度条件下,玉米抽雄期径流含沙量较低,除抽雄期外,其他各生育期径流含沙量在降雨 0~9 min 内迅速下降,拔节期变化幅度最大,成熟期在降雨 33~39 min 内迅速增加,后波动变化,抽雄期径流含沙量在降雨过程中变化总体较小。

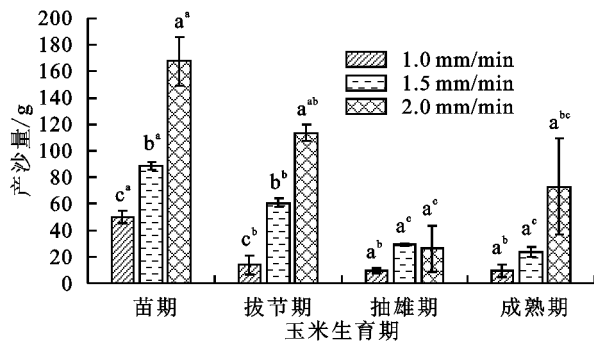


图3 不同降雨强度下玉米各生育期产沙量变化特征

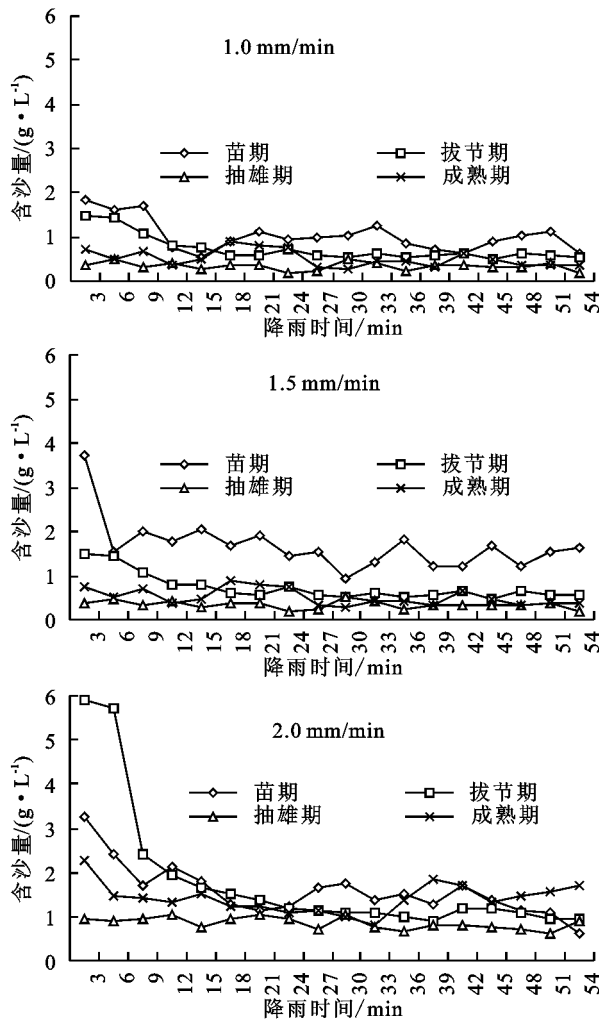


图4 不同降雨强度下玉米各生育期径流含沙量动态变化特征

3.3 土壤剥蚀率与径流含沙量的关系

采用回归分析研究不同降雨强度条件下玉米全生育期土壤剥蚀率和径流含沙量之间的关系可知,本试验条件下,随着径流含沙量增大,土壤剥蚀率逐渐增强,二者呈幂函数关系(表1)。函数关系式为:

$$D_r = aS_c^b$$

式中: D_r 为土壤剥蚀率($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); S_c 为径流含沙量(g/L); a 、 b 为拟合参数。由 R^2 可以看出,不同降雨强度条件下,土壤剥蚀率与径流含沙量之间方程拟合效果较好,且两者之间关系达到极显著水平,因此可通过径流含沙量对研究区土壤剥蚀率进行预测。

表1 不同降雨强度土壤剥蚀率与径流含沙量拟合方程

降雨强度/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	拟合方程	R^2
1.0	$y = 0.0056x^{1.219}$	0.859**
1.5	$y = 0.0071x^{0.876}$	0.800**
2.0	$y = 0.0112x^{0.981}$	0.487**

注:表中 y 表示土壤剥蚀率; x 表示径流含沙量。

4 讨论

本研究结果表明,降雨强度和玉米生育期二者共同影响土壤剥蚀率,降雨强度较小时,玉米全生育期土壤剥蚀率较低,此时降雨强度对土壤剥蚀率的影响较小,随着降雨强度的增大土壤剥蚀率逐渐增大,降雨强度对坡面土壤剥蚀率的影响逐渐增强。这主要是由于降雨强度增大,雨滴击打坡面能力增强,破坏表面土体结构,土壤颗粒更易被径流剥蚀搬运,土壤剥蚀率增加^[13]。同时,降雨强度增大,坡面水流侵蚀强烈,细沟发育迅速,在集中水流作用下,坡面侵蚀产沙量增大^[14]。同一降雨强度条件下,玉米各生育期土壤剥蚀率随降雨时间延长呈波动变化,苗期土壤剥蚀率显著高于其他生育期。本研究中玉米苗期植株较小(株高为 0.258 m),叶面积指数较低($\text{LAI} = 0.108$),玉米冠层对降雨拦截作用弱,坡面受雨滴直接击打,溅蚀量增大^[15]。随着玉米生育期推进,叶面积指数呈先降低后增加的趋势,玉米抽雄期生长旺盛,作物对坡面侵蚀产沙的抑制作用最强;成熟期玉米叶片枯萎低垂,叶面积指数有所降低($\text{LAI} = 1.356$),对雨滴的拦截作用和分流作用减弱,雨滴击溅和径流剥蚀作用增强,土壤剥蚀率增加^[16]。

除抽雄期外,降雨强度增加导致其他生育期侵蚀产沙量呈增加的趋势。这主要是由于降雨强度增大,坡面受到雨滴击打破坏较强,导致土壤颗粒易被径流剥蚀搬运,侵蚀产沙量增大^[17];同时,雨滴击打坡面径流造成径流紊动性增强,剥蚀和输沙能力增大^[18]。降雨强度较小条件下,坡面溅蚀量较小,加之植被冠层截留和茎秆汇流,进一步削弱了雨滴击溅作用,径流入渗增大^[19]。本研究中,随玉米生育期推进,坡面

侵蚀产沙受降雨强度的影响减弱。同一降雨强度条件下,坡面侵蚀产沙量在苗期最大,且显著高于其他生育期,侵蚀产沙量在抽雄期最小。玉米抽雄期和成熟期,植被覆盖度较大,叶面积指数分别为 2.770 和 1.356,对雨滴的拦截消能作用较强,加之玉米根系能有效增加径流入渗,增强表层土壤抗冲刷能力,降低坡面土壤侵蚀^[20]。而苗期和拔节期处于玉米生长前期,植被覆盖度相对较低,降雨对坡面侵蚀产沙的影响较大^[15]。径流含沙量在玉米生长过程中总体表现为苗期最大,抽雄期最小。这主要是由于玉米生育期推进,穿透雨量降低,茎秆汇流和冠层截留量增大,削弱了雨滴击溅作用,坡面产流量增加,径流含沙量降低。而玉米成熟期穿透雨量增加,雨滴直接击打坡面导致径流含沙量增大^[15]。降雨强度较大条件下,玉米各生育期径流含沙量在降雨前期迅速降低,而后逐渐趋于平稳。这可能是由于降雨初期,坡面浮土较多,雨滴击打坡面使土壤颗粒发生分散、跃移,更易随水流失,径流含沙量较大,随降雨时间延长,地表径流作用导致土壤紧凑度增大,径流入渗降低,地表径流增大,径流含沙量减少^[21];同时,玉米各生育期冠层截留、茎秆汇流和根系生长不同,对雨滴击溅作用削弱也存在差异,导致降雨前期玉米各生育期径流含沙量差别较大。

玉米全生育期内,土壤剥蚀率与径流含沙量之间呈幂函数关系,且二者之间的回归方程达到极显著水平,这与尚佰晓等^[22]、赵艳茹等^[14]的研究结果一致,主要是由于降雨作为土壤侵蚀的主要动力,对土壤击打导致局部土壤剥蚀率增大^[22]。而也有学者通过室内放水冲刷试验研究表明,土壤剥蚀率随径流含沙量增大呈线性递减关系^[1,3],这与本研究结论相悖,可能是由于径流冲刷条件下,径流携带泥沙量增大,导致径流剪切力和径流功率降低,径流剥蚀作用减弱^[23]。同时,在面蚀和细沟间侵蚀阶段,降雨为坡面主要侵蚀方式,坡面受雨滴击溅导致径流含沙量增大^[24]。因此,在模拟降雨条件下,通过含沙量可对坡面土壤剥蚀率进行预测。

5 结论

(1)玉米全生育期土壤剥蚀率随降雨强度的增大而增大,苗期最大,显著高于其他生育期;本试验条件下土壤剥蚀率受玉米生育期的影响在小降雨强度条件下较明显,在玉米生长中后期降雨强度对土壤剥蚀率的影响减弱。

(2)玉米全生育期径流含沙量随降雨强度的增大而增大,总体表现为苗期>拔节期>成熟期>抽雄期;玉米抽雄期,植被对坡面侵蚀产沙的抑制作用最强,而玉米生长前期,坡面侵蚀产沙较大,应实施合理的水土保持措施,降低坡面土壤侵蚀。

(3)玉米全生育期土壤剥蚀率与径流含沙量呈正相关,二者呈幂函数关系。表达式为: $D_r = aS_c^b$,其中 $0.005 < a < 0.012$, $0.8 < b < 1.3$,拟合方程达到极显著水平,可利用含沙量对坡面土壤剥蚀率进行预测。

参考文献:

- [1] 赵宇,陈晓燕,米宏星,等.估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J].农业工程学报,2014,30(15):174-181.
- [2] 马波,马璠,吴秋菊,等.玉米冠下溅蚀效应及其空间分布特征[J].农业工程学报,2012,28(20):135-142.
- [3] 黄钰涵,陈晓燕,丁琳桥,等.基于土槽冲刷法的紫色土侵蚀细沟剥蚀率研究[J].土壤学报,2016,53(3):594-601.
- [4] Ellison W D. Soil erosion studies. Part VI. Soil detachment by surface flow[J]. Agriculture Engineering, 1947, 28(10):402-408.
- [5] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(1):99-102.
- [6] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hill slope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of North-east China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 161(8):79-85.
- [7] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(9):1298-1304.
- [8] 郭明明,王文龙,李建明,等.黄土区坡耕地耕作对浅沟径流产沙及其形态发育特征的影响[J].农业工程学报,2015,31(15):114-123.
- [9] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等.工程堆积体坡面工程措施减流减沙效应的试验研究[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):1010-1015.
- [10] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4):7-12.
- [11] 黄成龙,何淑勤,郑子成,等.紫色土区玉米季坡耕地片蚀过程研究[J].水土保持学报,2015,29(1):70-74.
- [12] 聂小军,苏艳艳.川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征[J].生态环境学报,2012,21(4):682-686.
- [13] Wang B, Zheng F L, Römkens M J M, et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences [J]. Geomorphology, 2013, 187(5):1-10.
- [14] 赵艳茹,王瑄,丘野,等.模拟降雨下土壤剥蚀率和水流含沙量的关系[J].水土保持学报,2010,24(5):97-100.
- [15] 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.
- [16] 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.