

玉米季横垄坡面片蚀阶段产流及水动力学参数变化特征

何淑勤^{1,2}, 尹忠³, 宫渊波^{1,2}, 郑子成⁴

(1. 四川农业大学林学院, 成都 611130; 2. 四川农业大学, 水土保持与荒漠化防治重点实验室,
成都 611130; 3. 四川省林业调查规划院, 成都 610081; 4. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 为弄清玉米各生育期片蚀阶段的径流特征, 采用人工模拟降雨与微小区试验相结合的方法, 研究不同坡度下紫色土横垄坡面片蚀阶段产流及水动力学参数变化特征。结果表明:(1) 15°坡面, 拔节期和抽雄期片蚀出现时间在8 min后, 且与苗期和成熟期间达显著差异; 20°坡面, 拔节期和抽雄期片蚀出现时间在6 min后, 且与苗期、成熟期片蚀出现时间达显著差异。(2) 15°坡面, 径流总量和产流率均表现为成熟期>苗期>抽雄期>拔节期, 且成熟期径流总量和产流率分别为31.25 L和1.04 L/min; 20°坡面, 径流总量和产流率却表现为苗期>成熟期>抽雄期>拔节期, 且成熟期径流总量和产流率分别为34.62 L和1.44 L/min; 径流总量和产流率总体表现为20°坡面显著高于15°坡面。(3) 15°坡面, 水流剪切应力在各生育期无显著差异, 其它水动力学参数均表现为抽雄期最小, 成熟期和苗期较大。20°坡面, 单位水流功率在各生育期无显著差异, 其它水动力学参数表现为拔节期或抽雄期最小, 成熟期或苗期最大。断面单位能量和水流功率是试验条件下与横垄坡面片蚀产流率关系最密切的水动力学参数, 可较好地表征横垄坡面产流特征。研究结果可为紫色土丘陵区坡耕地片蚀的有效防控提供理论依据。

关键词: 玉米; 横坡垄作; 片蚀; 径流量; 水动力学参数

中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2016)05-0018-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.003

Change Characteristics of Runoff and Hydrodynamic Parameters of Sheet Erosion Processes on Cross Ridge Sloping Farmland during Maize Growing Season

HE Shuqin^{1,2}, YIN Zhong³, GONG Yuanbo^{1,2}, ZHENG Zicheng⁴

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2. Key Lab. of Soil & Water

Conservation and Desertification Combating, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 3. Sichuan Forestry
Inventory and Planning Institute, Chengdu 610081; 4. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: To clarify the runoff characteristics of sheet erosion during maize growing season, change characteristics of runoff and hydrodynamic parameters of sheet erosion processes were studied on cross ridge sloping farmland with different slope gradients during whole maize growing stage in purple soil area based on the combining method of micro-plot and artificial simulated rainfall. The results showed that (1) The time of sheet erosion occurrence was after 8 minutes of the rainfall on slope gradient with 15° at the jointing stage and tasseling stage, and the time of sheet erosion occurrence had the significant difference between the jointing stage, tasseling stage and seedling stage, mature stage. The time of sheet erosion occurrence was after 6 minutes of the rainfall on slope gradient with 20° at the jointing stage and tasseling stage, and the time of sheet erosion occurrence had the significant difference between the jointing stage, tasseling stage and seedling stage, mature stage. (2) On slope gradient with 15°, the runoff amount and runoff rate showed that mature stage>seedling stage>tasseling stage>jointing stage, and the runoff amount and runoff rate was 31.25 L and 1.04 L/min respectively at the mature stage. However, on slope gradient with 20°, the runoff amount and runoff rate showed that seedling stage>mature stage>tasseling stage>jointing stage, and the runoff amount and runoff rate was 34.62 L and 1.44 L/min respectively at the seedling stage. The runoff amount ascended with the increasing slope gradient during whole maize growing stage. (3) On slope gradient with 15°, runoff shear stress had no significant difference among the growing stages of maize, and the other hydrodynamic parameters showed the minimum at tasseling stage, and a large value appeared at mature stage and seedling stage. On slope gradient with 20°, unit stream power had no significant difference among the growing stages of maize, and the other hydrodynamic parameters showed the minimum at tasseling stage or joint-

ing stage, and the maximum appeared at mature stage or seeding stage. Stream power and section flow energy were the best parameters closely related to the runoff rate of sheet erosion process on cross ridge sloping farmland. Runoff characteristics of the cross ridge sloping farmland could be well described by stream power and section flow energy on the condition of our experiment. This results would provide theory basis for the effective prevention and control of sheet erosion in purple soil area.

Keywords: maize; cross ridge; sheet erosion; runoff amount; hydrodynamic parameters

紫色土区岩石风化强烈^[1],降雨集中,暴雨频繁,使得该区域土壤侵蚀十分严重,尤以坡耕地最为突出。有研究表明,目前紫色土区的平均侵蚀模数约为3 035 t/(km²·a),个别地区甚至高达9 000 t/(km²·a)^[2]。盆地丘陵区坡耕所占比例高,其中10°~25°坡耕地面积达65%以上,是长江上游主要侵蚀产沙区之一。片蚀作为土壤侵蚀从雨滴击溅侵蚀向坡面流侵蚀演变的最初过程,它是由坡面分散薄层水流在坡面流动过程中对土壤进行分散和输移作用形成的,具有其独特的侵蚀特征,是极其重要的土壤侵蚀过程之一^[3]。近年来,对片蚀的研究一直受到国内外学者的关注,但主要集中于水动力学机理^[4-5]、影响因素^[6-7]等方面。刘俊娥等^[8]研究认为,坡面片蚀动力学过程的发生发展根源于坡面薄层径流的水流功率的动力作用,而水流断面单位能量与黄土坡面片蚀动力学过程关系最密切^[9]。但片蚀主要是坡面薄层水流的作用引起的,其水力学特征复杂多变^[10],以及试验条件的差异性等^[11-12],国内外学者研究出现结果不尽一致。此外,对片蚀的研究多集中在裸露坡耕地且以室内试验为主^[8,11],就不同作物生育期片蚀过程产流及水动力参数变化方面的研究甚少。玉米(*Zea mays*)作为紫色土区的雨季旱坡地主栽农作物,玉米季紫色土坡耕地不同地表坡面径流和侵蚀产沙的变化,除和玉米生育期有关外^[12-13],还可能与坡面片蚀的出现密切相关^[14]。因此,本文以紫色土坡耕地为研究对象,探讨不同坡度下横坡垄作坡面片蚀阶段径流特征,阐明不同生育期玉米对坡面片蚀阶段径流量的响应,以期促进片蚀理论的进一步发展和完善,服务于紫色土丘陵区坡耕地片蚀的有效防控。

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区概况

位于长江上游沱江水系花椒沟支流响水滩上端,隶属于四川省资阳市雁江区松涛镇。该区属于亚热带季风气候,年均气温为16.8℃,年日照时间为1 300 h,年均无霜期长达300 d,年均降雨量为965.8 mm,主要集中于5—10月,约占全年降雨总量的80%。研究区属于典型的川中丘陵地貌,区域内水土流失的主要发生地为农耕地,以种植玉米为主,辅以种植辣椒、白菜、芋头等。

1.2 供试材料

供试土壤为遂宁组母质发育而来的红棕紫泥,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为45%,31%,24%,土壤平均容重为1.21 g/cm³,土壤pH为8.1,有机质含量为11.6 g/kg,全氮和碱解氮含量分别为0.73 g/kg,40.1 mg/kg,有效磷含量为14.08 mg/kg,速效钾含量为86.6 mg/kg,肥力较低。供试玉米品种为正红6号,于2014年4月15日垄上单行直播,行距80 cm,株距30 cm。播种前,基施氮肥(N)250 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)125 kg/hm²,拔节前期追施氮肥(N)150 kg/hm²。氮肥为尿素(含N 46.3%),磷肥为过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)。其他管理措施与当地农耕习惯一致。

1.3 研究方法

采用微小区与人工模拟降雨相结合的研究方法,在农业部长江上游农业资源与生态环境重点野外科学观测试验站进行。径流小区面积为2 m×1 m。按照当地坡耕地分布特点,坡度设置为15°和20°。小区内布设当地主推的横坡垄作,垄高25 cm,垄宽40 cm,垄距90 cm。降雨装置为SR型野外移动式人工模拟降雨器,装置喷头系统为美国V—80100,降雨高度6 m,有效降雨面积为35 m²,降雨均匀系数在85%以上。根据研究区多年水文资料记录的降雨频率及特点,设计雨强1.5 mm/min,降雨视小区内的土壤表面上出现鱼鳞状小坑和微跌水时结束,确定为降雨历时。每间隔3 min收集地表径流和泥沙样一次,采用体积法测定径流量,烘干称重法测定泥沙量。

采用染色剂示踪法测定微小区径流坡面流速,并根据流速和径流深计算水动力学参数:

$$\tau = \gamma \times R \times J$$

式中: τ 为水流切应力(Pa); γ 为水流比重(N/m³); R 为水力半径(m); J 为水力比降, $J = \sin\theta$, 在坡面上由于水流为典型的薄层水流, 所以可以直接用径流深 h (m) 替换 R , 下同。

$$w = \tau \times V$$

式中: w 为水流功率(W/m²); V 为平均流速(m/s)。

单位水流功率:

$$P = V \times J$$

式中: P 为单位水流功率(m/s)。

$$E = \frac{\alpha \times V}{2g} + h \cos\theta$$

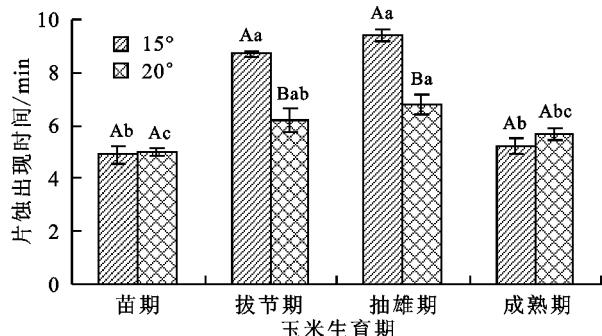
式中: E 为单位能量(cm); α 为动能校正系数, 取值为 1; V 为流速(cm/s); g 为重力加速度, $g=980 \text{ cm/s}^2$; h 为径流深(m); θ 为坡度($^\circ$)。

使用 Excel 2007 对数据进行前期处理及制作图表, 用 SPSS 17.0 对数据进行统计分析及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 片蚀出现时间

由图 1 可知, 随玉米生育期推进, 各坡面片蚀出现时间均表现为先增加后减少的趋势。15°坡面, 拔节期和抽雄期片蚀出现时间较迟, 且与苗期和成熟期间达显著差异。20°坡面, 抽雄期片蚀出现时间最迟, 且与苗期、成熟期达显著差异, 苗期与成熟期片蚀出现时间无显著差异。同一玉米生育期, 随坡度增加, 拔节期和抽雄期片蚀出现时间有所提前, 不同坡度间差异显著, 苗期和成熟均无显著差异。



注: 柱状图上不同大写字母表示同一生育期不同坡度间在 $P<0.05$ 水平上差异显著; 不同小写字母表示同一坡度不同生育期间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 1 玉米季坡耕地不同坡度条件片蚀出现时间

在玉米生长初期, 玉米植株低矮, 叶片面积小, 玉米植株冠层对降雨截留能力弱^[15], 雨滴直接打击土壤表面, 易形成土壤结皮, 加之雨滴的溅蚀作用, 破坏土体结构, 溅散的土壤颗粒阻塞土壤孔隙, 阻碍水分

下渗, 溅蚀阶段历时变短^[16], 故片蚀出现的时间较短。在玉米拔节期和抽雄期, 由于植株生长旺盛, 叶片面积大, 且相互叠加作用较强, 降雨通过玉米植株冠层, 一部分降雨被玉米截留, 有效削弱了降雨对表土的打击, 雨滴对地表土体破坏能力减弱, 增加了水分入渗, 加之部分截留降雨在玉米叶片和叶鞘内蓄积, 进入地表的降雨量减少, 进而地表径流量减小, 导致其土壤表面产生薄层水流的时间推迟, 故拔节期—抽雄期片蚀出现时间推迟。到玉米生长后期, 玉米植株开始枯萎, 叶片开始萎蔫、下垂, 冠层对降雨的截留作用减弱, 降雨对地表土体的破坏能力增强, 加速土壤结皮的形成, 迅速产生片状水流, 故玉米成熟期片蚀出现时间又有所提前。

随着坡度增加, 坡面汇集的降雨在坡面停留的时间变短, 入渗时间减少, 加速了坡面薄层水流的形成, 故片蚀出现时间稍有提前。拔节期和抽雄期玉米植株冠幅最大, 对降雨的截留作用导致降雨前期径流量差异较大^[15], 导致不同坡度条件下同一生育期间片蚀出现时间差异达显著水平。

2.2 径流总量和产流过程

由表 1 可知, 除抽雄期和成熟期外, 玉米其他生长期, 20°坡面片蚀阶段径流总量和产流率显著高于 15°坡面。同一坡度下, 随玉米生长期的推进, 片蚀阶段径流总量和产流率呈先显著减少后增加的趋势, 拔节期片蚀阶段径流总量显著低于其他生长期。由于坡度增加, 径流势能增大, 径流在坡面停留的时间缩短, 单位时间内流出小区的径流增加, 这表明在苗期、拔节期和成熟期, 坡度的增加, 增加了片蚀出现的风险, 尤其是玉米苗期和拔节期表现尤为突出。而抽雄期, 玉米植株阻流作用增强, 在一定程度上削弱了坡度的作用, 使得该时期径流在两坡度间差异不显著。

表 1 不同坡度条件玉米各生育期片蚀阶段产流特征

坡度/ ($^\circ$)	径流总量/L				产流率/(L·min ⁻¹)			
	苗期	拔节期	抽雄期	成熟期	苗期	拔节期	抽雄期	成熟期
15	25.60 Ba	12.10 Bc	20.06 Ab	31.25 Aa	0.74 Bb	0.34 Bc	0.61 Bb	1.04 Aa
20	34.62 Aa	23.88 Ac	29.09 Aab	31.63 Aab	1.44 Aa	0.80 Ac	0.88 Abc	1.17 Ab

注: 表中不同大写字母表示同一玉米生育期不同坡度间在 $P<0.05$ 水平上差异显著; 不同小写字母表示同一坡度不同生育期间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。

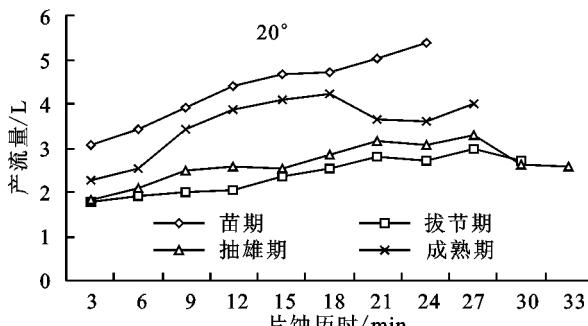
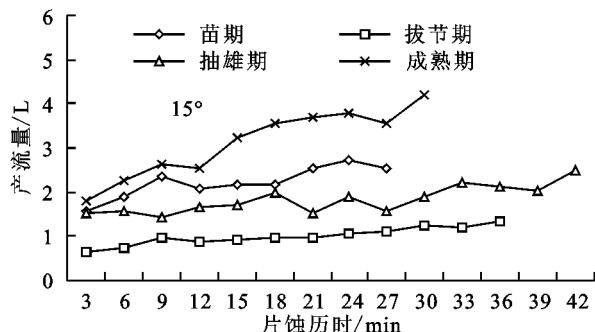


图 2 玉米季坡耕地不同坡度条件下片蚀阶段产流量

由图 2 可知,产流过程与径流总量、产流率在各生育期变化基本一致。随生育期推进,不同坡度下片蚀产流量表现为拔节期最小且变化较为平稳,抽雄期次之,苗期和成熟期较大,这一结果与刘俊娥等研究不一致^[8],可能是由于横坡垄作的微地形作用与玉米不同生育期冠层相互作用所致。随坡度增加,各生育期产流量均有所上升。15°坡面,不同生育期间产流量变化明显,成熟期>苗期>抽雄期>拔节期。20°坡面,拔节期和抽雄期差异不大,其余生育期间差异明显,具体表现为苗期>成熟期>抽雄期>拔节期。

由于玉米苗期植株矮小,冠层的截留作用弱,雨滴的击打及土壤结皮的出现,对坡面产流有一定的促进作用;而在成熟期,玉米植株枯萎,下垂叶片覆盖在地表易于地表径流汇集,故苗期和成熟期坡面产流量均较高。拔节期和抽雄期玉米植株生长旺盛,叶片面积大,植株覆盖率高,降雨在进入地表的过程中,部分雨滴被冠层截留,减少雨滴对地表的打击,抑制了地表结皮,导致拔节期和抽雄期产流量低。抽雄期玉米植株较拔节期旺盛,植株间叶片相互重叠,降雨在叶片表面汇集较为集中,降雨的入渗面积减少,径流量增

大,故抽雄期产流率大于拔节期。坡度也是影响坡面产流的一个重要因素。15°坡度成熟期产流量大于苗期,20°坡度苗期产流量大于成熟期,出现这一现象的原因可能是因为坡度通过改变径流水体的受力状况,使径流在坡面方向上的分力大小发生变化,从而通过影响径流速度和土壤入渗量的大小^[17],实现对坡面产流的作用。此外,苗期植株低矮,随着坡度的增加,植株对地表的保护作用削弱,故导致其产流量增加。

2.3 水动力学参数变化

由表 2 可知,15°坡面,随玉米生长期的推进,径流剪切力均无明显变化,而水流功率却呈先显著降低后增加的变化趋势,且在拔节期和抽雄期显著低于苗期和成熟期;随玉米生长期的推进,单位水流功率和单位能量均呈先显著降低再增加的变化趋势,且在抽雄期显著低于苗期和成熟期。20°坡面,随玉米生长期的推进,径流剪切力和水流功率均呈先显著降低后增加的变化趋势。同一生长期内,20°坡面的径流剪切力、水流功率均显著大于 15°坡面,表明坡度对玉米种植条件下横垄坡面的径流剪切力和水流功率影响较大。

表 2 不同坡度条件下玉米各生育期水动力学参数变化特征

坡度/ (°)	水动力学参数	玉米生育期			
		苗期	拔节期	抽雄期	成熟期
15	剪切应力/Pa	6.80Ba	5.81Ba	6.13Ba	7.29Ba
	水流功率/(W·m ⁻²)	0.42Ba	0.31Bb	0.29Bb	0.45Ba
	单位水流功率/(m·s ⁻¹)	0.016Ba	0.014Bab	0.012Bb	0.016Ba
	单位能量/cm	0.022Aa	0.017Aab	0.014Bb	0.023Ba
20	剪切应力/Pa	11.08Aa	8.66Ab	9.08Aab	10.75Aa
	水流功率/(W·m ⁻²)	0.68Aa	0.49Ab	0.56Aab	0.78Aa
	单位水流功率/(m·s ⁻¹)	0.021Aa	0.019Aa	0.021Aa	0.025Aa
	单位能量/cm	0.022Ab	0.019Abc	0.022Ab	0.030Aa

坡面土壤侵蚀中土壤的剥离、输移和沉积作用是由降雨产生的径流所具有的能量造成的^[18],具体表现为单位水流功率和单位能量。15°坡面,随玉米生长期的推进,单位水流功率和单位能量均呈先显著降低再增加的变化趋势,且在抽雄期显著低于苗期和成熟期。20°坡面,随玉米生长期的推进,单位水流功率各生育期间无显著差异,而单位能量却呈逐渐增加的

变化趋势,且成熟期显著高于其他生育期。同一生长期内,20°坡面的单位水流功率和单位能量均显著大于 15°坡面,表明坡度对玉米种植条件下横垄坡面的单位水流功率和单位能量影响也较大。

为了明确片蚀产流率与水动力学参数间关系,经统计回归分析可知,玉米季坡耕地横垄坡面片蚀水动力学参数与片蚀产流率存在极显著正相关线性关系(表 3)。

表 3 不同坡度条件下产流率与水动力学参数的关系

坡度/(°)	水动力学参数	经验方程	相关系数	显著性水平
15	剪切应力/Pa	$Q_s = 0.1406\tau - 0.1491$	0.693	—
	水流功率/(W·m ⁻²)	$Q_s = 1.6658\omega + 0.1457$	0.780	0.01
	单位水流功率/(m·s ⁻¹)	$Q_s = 74.294P - 0.3009$	0.769	0.05
	单位能量/cm	$Q_s = 20.146E - 0.0599$	0.781	0.01
20	剪切应力/Pa	$Q_s = 0.1873\tau - 0.7492$	0.857	0.01
	水流功率/(W·m ⁻²)	$Q_s = 1.6291\omega + 0.0353$	0.876	0.01
	单位水流功率/(m·s ⁻¹)	$Q_s = 73.744P - 0.5419$	0.797	0.05
	单位能量/cm	$Q_s = 27.558E - 0.2726$	0.860	0.01

注: Q_s 为产流率(L/min)。

15°坡面,片蚀产流率与水动力学参数的相应相关决定系数表现为断面单位能量>水流功率>单位水流功率>剪切应力,这与刘俊娥等^[6]的研究一致。20°坡面,片蚀产流率与水动力学参数的相应相关决定系数却表现为水流功率>断面单位能量>剪切应力>单位水流功率,这与刘俊娥等^[6]的研究不一致,主要由于横垄坡面在降雨条件下,微地形起伏动态变化以及玉米植株的综合作用,使得水动力学参数与产流率的关系出现不同结果。可见,研究区横垄15°坡面采用断面单位能量、水流功率、单位水流功率水动力参数可以较好地表征产流情况;而横垄20°坡面,断面单位能量、水流功率、单位水流功率、剪切应力与产流率均达显著或极显著,但单位水流功率在玉米各生育期无显著差异。综合各回归方程的R²值,研究区横垄坡面径流率可用断面单位能量、水流功率这两个水动力学参数表征。

3 结论

(1)玉米种植条件下,横垄坡面抽雄期片蚀产流时间最迟,拔节期次之,均较苗期和成熟期延迟4~4 min30 s。可见,横垄坡面玉米苗期和成熟期易于发生片蚀。随坡度增加,拔节期和抽雄期片蚀出现时间均有所提前。

(2)15°坡面,玉米各生育期径流总量和产流率表现为成熟期>苗期>抽雄期>拔节期;20°坡面,玉米各生育期径流总量和产流率则表现为苗期>成熟期>抽雄期>拔节期。玉米苗期和拔节期,20°坡面片蚀阶段径流总量和产流率显著高于15°坡面。表明苗期和成熟期片蚀潜在作用较为强烈,且坡度对苗期的片蚀作用影响最大。

(3)随玉米生长期的推进,15°坡面水流功率、单位水流功率和单位能量呈先显著降低后增加的变化趋势,且在玉米抽雄期出现最小值;20°坡面径流剪切力和水流功率均呈先显著降低后增加的变化趋势,而单位能量却呈逐渐增加的变化趋势。研究区横垄坡面径流率,可通过断面单位能量、水流功率这2个水动力学参数较好的表征。

参考文献:

- [1] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土(上篇)[M].北京:科学出版社,1994:40-62.
- [2] Stolte J, Shi X, Ritsema C J. Introduction; Soil erosion and nutrient losses in the hilly purple soil area in China [J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105(2):283-284.
- [3] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):230-235.
- [4] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等.黄土坡面片蚀过程动力学机理试验研究[J].农业工程学报,2012,28(7):144-149.
- [5] Liu J E, Wang Z L, Yang X M, et al. The impact of natural polymer derivatives on sheet erosion on experimental loess hillslope[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 139(2):23-27.
- [6] 刘俊娥,王占礼,高素娟.黄土坡面片蚀过程试验研究[J].水土保持学报,2011,25(3):35-39.
- [7] Dlamini P, Orchard C, Jewitt G, et al. Controlling factors of sheet erosion under degraded grasslands in the sloping lands of KwaZulu-Natal, South Africa[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(11):1711-1718.
- [8] 刘俊娥,王占礼,高素娟,等.黄土坡面片流产流过程模拟研究[J].土壤学报,2013,50(2):268-274.
- [9] 刘俊娥,王占礼,袁殷,等.黄土坡面薄层流产流过程试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(5):223-227.
- [10] Oakes E G M, Hughes J C, Jewitt G P W, et al. Controls on a scale explicit analysis of sheet erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(8):847-854.
- [11] 郑子成,何淑勤,吴发启.降雨条件下地表糙度对片蚀的影响及其变化[J].农业工程学报,2010,26(1):139-145.
- [12] 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研究[J].水土保持学报,2012,26(4):208-211,215.
- [13] 郑子成,林代杰,李廷轩,等.不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):24-28.
- [14] 罗键,郑子成,秦凤,等.玉米生长期坡耕地地表径流及侵蚀产沙特征[J].水土保持研究,2014,21(3):11-15.
- [15] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.玉米植株对降雨再分配影响的试验研究[J].中国农业科学,2011,44(12):2608-2615.
- [16] 焦银龙,郑子成,李廷轩,等.玉米季坡耕地地表糙度的变化及其对土壤溅蚀的影响[J].水土保持学报,2014,28(6),7-12.
- [17] 陈力,刘青泉,李家春.坡面降雨入渗产流规律的数值模拟研究[J].泥沙研究,2001(4):61-67.
- [18] 肖培青,郑粉莉,姚文艺.坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J].水科学进展,2009,20(2):236-240.