

# 横垄坡面地表糙度的变化特征及其对片蚀的响应

何淑勤<sup>1,2</sup>, 秦凤<sup>3</sup>, 宫渊波<sup>1,2</sup>, 郑子成<sup>4</sup>

(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. 什邡市农业局, 四川 什邡 618400; 4. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 为揭示地表糙度的片蚀效应, 采用野外人工模拟降雨, 研究了横垄坡面地表糙度在玉米不同生育期的变化特征, 并分析了地表糙度的变化对片蚀过程的响应特征。结果表明: 1.0 mm/min 降雨强度条件, 随着玉米生育期的推进, 地表糙度呈先增加后降低的变化趋势, 且在玉米苗期增幅最大, 在成熟期降幅最大。1.5, 2.0 mm/min 降雨强度条件, 随着玉米生育期的推进, 地表糙度呈先降低后增加的变化趋势, 且玉米苗期—拔节期地表糙度变幅却最大。降雨强度 1.0 mm/min 条件下, 随着玉米生育期的推进, 地表糙度的变化与径流量变化同步, 均呈先减小、后增加、再减小的变化趋势。降雨强度 1.5, 2.0 mm/min 条件下, 在玉米苗期—拔节期—抽雄期, 地表糙度与径流量呈同步的变化, 而在抽雄期—成熟期, 地表糙度呈减少的变化趋势, 而地表径流量却呈增加的变化。不同降雨强度条件下, 在玉米苗期和拔节期, 地表糙度的变化与产沙强度呈同步变化; 在抽雄期和成熟期, 两者间表现出相反的变化趋势。玉米拔节期, 地表糙度变幅与径流量呈极显著负相关关系, 抽雄期地表糙度变幅却与径流量呈极显著正相关关系; 玉米苗期、拔节期和成熟期, 地表糙度变幅与侵蚀产沙量呈显著或极显著正相关关系, 玉米抽雄期, 地表糙度变幅却与侵蚀产沙量呈极显著负相关关系。研究结果为揭示地表糙度在片蚀作用下的本质特征和坡耕地水土流失有效防控提供理论和技术支撑。

**关键词:** 玉米; 横垄坡面; 地表糙度; 片蚀; 径流; 产沙强度

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2018)01-0054-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.009

## Changes of Soil Surface Roughness and Its Response to Sheet Erosion in Sloping Cropland of Cross Ridge

HE Shuqin<sup>1,2</sup>, QIN Feng<sup>3</sup>, GONG Yuanbo<sup>1,2</sup>, ZHENG Zicheng<sup>4</sup>

(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. Shifang Agriculture Bureaus, Shifang, Sichuan 618400; 4. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

**Abstract:** To reveal the effects of soil surface roughness on sheet erosion, the changes of soil surface roughness on purple soils were studied during the whole growing stages of maize based on field artificial rainfall experiments, and the effects of soil surface roughness on runoff and sediment yield of sheet erosion process were analyzed. The results showed the soil surface roughness presented an increasing-first-and-then-decreasing trend with the advance of maize growing period under the rainfall intensity of 1.0 mm/min, and the maximum of increasing range appeared in maize seedling stage and the maximum of decreasing range appeared in mature stage. Under the rainfall intensity of 1.5 and 2.0 mm/min, the soil surface roughness presented a decreasing-first-and-then-increasing trend with the advance of maize growing period, and the changing range of soil surface roughness was the greatest at the stage of maize seedling-jointing. Under the rainfall intensity of 1.0 mm/min, the changes of soil surface roughness presented a decreasing-first-and-then-increasing-and-decreasing trend, and these changes were consistent with the changes of surface runoff under the rainfall intensity of 1.0 mm/min. At the stages of maize seedling-jointing and jointing-tasseling, the changes of soil surface roughness were consistent with the changes of surface runoff under the rainfall intensity of 1.5 and 2.0 mm/min, but inconsistent with the changes of surface runoff at the stage of maize tasseling-mature. At the stages of maize seedling and jointing, the changes of soil surface roughness showed the consistency with the changes of sediment yield intensity, however, they presented the opposite changes in soil surface roughness.

and sediment yield intensity at the stages of maize tasseling and mature. In maize jointing stage, there was a very significant negative relationship between the changing range of soil surface roughness and runoff amount, but a positive relationship between both in maize tasseling stage. In maize seedling, jointing and mature stage, there were the significant or very significant positive relationships between the changed range of soil surface roughness and sediment yield amount, however, a very significant negative relationship in maize tasseling stage. These results would provide theory basis for posing the sheet erosion nature of soil surface roughness, and also serve for harnessing soil and water loss of the slope farmland.

**Keywords:** maize; sloping cropland of cross ridge; soil surface roughness; sheet erosion; surface runoff; sediment yield intensity

紫色土作为一种侵蚀型的高生产力岩性土,分布区域内雨量充沛,暴雨频繁,土地垦殖率高,加上不合理的人为管理措施,区域内土壤侵蚀平均模数达4 000~7 000 t/(km<sup>2</sup>·a),部分地区高达9 000 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[1]</sup>,土壤侵蚀仅次于我国的黄土区<sup>[2]</sup>,尤以坡耕地最为突出,严重制约着区域农业的可持续发展。地表糙度是反映地表微地貌形态的主要物理性状指标之一,常受到降雨、土壤类型、耕作等因素的影响<sup>[3]</sup>。在水力侵蚀区,地表糙度会伴随着侵蚀过程,通过自身的消长与位置变化影响径流的产生、汇流及径流量的多寡,从而影响到侵蚀类型的演变和侵蚀产沙量的大小<sup>[4]</sup>。由于其分布的随机性和侵蚀过程中变化难确定性,目前研究结果存在两大相悖的观点,一种观点认为地表糙度可以削减侵蚀作用<sup>[5-6]</sup>,另一种观点则认为地表糙度可增加潜在冲刷,加剧侵蚀<sup>[7-8]</sup>,故地表糙度与土壤侵蚀方面的研究备受关注。

片蚀属于水力侵蚀阶段之一<sup>[9]</sup>,由坡面均匀薄层水流破坏和输移土壤而形成<sup>[10]</sup>,不同于其他水力侵蚀阶段的特征。在土壤水蚀过程研究中,片蚀的相关研究备受关注,许多学者进行了片蚀阶段的水动力学机理<sup>[11-13]</sup>、影响因素等方面的研究<sup>[14-15]</sup>,且多以室内模拟试验手段为主,就作物种植条件下坡耕地片蚀过程方面的研究甚少,难以以为坡耕地水土流失有效防控提供技术支撑。横坡垄作是我国西南坡耕地实施的主要耕作措施之一,以往研究表明,实施横坡垄作坡面不仅可明显拦截坡面径流,减缓对坡面的冲刷<sup>[16]</sup>,同时也会促使地表糙度的变化<sup>[17]</sup>。然而,针对紫色土区坡耕地地表糙度的变化对片蚀响应方面的研究还鲜见报道。因此,本文基于野外人工模拟降雨的方法,立足于地表糙度,开展紫色土区玉米种植条件下地表糙度的动态变化研究,揭示地表糙度的变化对片蚀响应规律,以期服务于区域坡耕地水土流失的防治和措施的合理配置。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于长江上游沱江水系响水滩流域,属典

型的丘陵地貌,所在地为农业部资阳长江上游农业资源与环境生态环境重点野外科学观测试验站。该区属内陆亚热带季风气候区,年均气温为16.8℃,年均日照1 233 h,全年降雨主要集中于5—10月,平均降雨量为965.8 mm,约占全年降雨量的70%~80%。坡耕地种植以玉米(*Zea mays*)为主,辅以种植芋头(*Colocasia esculenta*)、辣椒(*Capsicum frutescens*)、茄子(*Solanum melongena*)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,质地较轻,pH 8.1,有机质和全氮含量分别为11.6,0.73 g/kg,碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为40.1,14.08,86.6 mg/kg。

供试玉米品种为正红6号,于2014年4月上旬播种,株距25 cm,行距90 cm,40 000株/hm<sup>2</sup>。基于当地施肥习惯,种植前以氮肥、磷肥和钾肥为基肥,分别将尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、硫酸钾(含K<sub>2</sub>O 50%)以250 kg/hm<sup>2</sup>(N),125 kg/hm<sup>2</sup>(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和150 kg/hm<sup>2</sup>(K<sub>2</sub>O)的量施入。此外,在玉米拔节前期,以(N)150 kg/hm<sup>2</sup>的用量追施氮肥,田间管理均按当地农耕习惯进行。

### 1.3 研究方法

采用野外人工模拟降雨的方法,模拟降雨器为SR型(中国科学院水利部水土保持研究),均匀系数可达85%以上。根据研究区多年降雨频率,设置1.0,1.5,2.0 mm/min 3个降雨强度,分别在玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期开展降雨试验。根据研究区坡耕地零散分布和坡度的特点,试验设置长2 m、宽1 m的15°微小区。每一小区按照垄高20 cm、垄宽50 cm和垄距40 cm布设横坡垄作,重复3次,共计9个试验小区。

地表糙度的测定和计算采用Saleh链条法<sup>[18]</sup>。准确记录每次降雨时间,以出现坡面流作为片蚀开始时间,视小区内的土壤表面上出现鱼鳞状小坑和微跌水时结束降雨。试验从片蚀开始收集地表径流量,每3 min收集1次径流过程样。径流量和侵蚀泥沙分别采用体积法和烘干法进行测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表糙度的变化特征

由表 1 可知, 随玉米生育期推进, 不同雨强条件下地表糙度的变化各异。1.0 mm/min 降雨强度条件下, 玉米苗期和拔节期, 地表糙度均呈增加的变化趋势, 且在玉米苗期增幅最大, 是玉米拔节期的 2.58 倍; 而在玉米抽雄期和成熟期, 地表糙度却呈降低的变化趋势, 且在玉米成熟期降幅最大, 是玉米抽雄期的 1.14 倍。这可能是由于小雨强条件下, 玉米生长前期, 冠层对降雨截留作用很弱, 雨滴对地表击打作用为主, 故地表糙度以增加为主。玉米进入抽雄期, 冠层截留作用增强, 改变了降雨的落地方式, 坡面以径流作用为主, 故导致地表糙度呈降低的变化趋势;

表 1 不同降雨强度条件下玉米全生育期地表糙度的变化特征

生育期	地表糙度								
	1.0 mm · min <sup>-1</sup>			1.5 mm · min <sup>-1</sup>			2.0 mm · min <sup>-1</sup>		
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>r</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>r</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>r</sub>
苗期	7.10	7.33	3.20	7.10	6.65	-19.52	7.10	6.68	-9.27
拔节期	4.97	5.03	1.24	4.97	5.24	21.05	4.97	5.23	12.10
抽雄期	5.92	5.71	-3.50	5.92	6.27	2.06	5.92	6.29	6.59
成熟期	5.49	5.27	-3.99	5.49	5.80	4.20	5.49	5.80	2.74

注: R<sub>1</sub> 为雨前地表糙度; R<sub>2</sub> 为雨后地表糙度; R<sub>r</sub> 为地表糙度变幅。

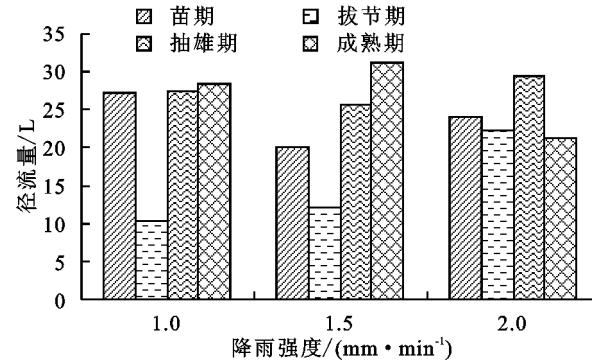
### 2.2 地表糙度变化对片蚀的响应

2.2.1 地表糙度变化对径流的响应 由图 1 可知, 不同降雨强度下地表糙度对径流的影响较为复杂。降雨强度 1.0 mm/min 条件下, 随着玉米生育期的推进, 地表糙度的变化与径流量变化同步, 均呈先减小、后增加、再减小的变化趋势。降雨强度 1.5, 2.0 mm/min 条件下, 在玉米苗期—拔节期—抽雄期, 地表糙度与径流量呈同步的变化, 而在抽雄期—成熟期, 地表糙度呈减少的变化趋势, 而地表径流量却呈增加的变化。玉米苗期, 地表糙度虽较大, 对地表径流有一定的阻滞作用, 但由于苗期玉米植株幼小, 冠层截留作用弱<sup>[19]</sup>, 雨滴对地表的打击作用强, 易形成地表结皮, 故导致不同降雨强度条件下径流量均较高, 表明这一时期, 地表糙度对片蚀径流量的作用弱于降雨强度。玉米拔节期, 虽地表糙度减小, 但玉米叶片面积变大、冠幅明显增加, 冠层截留及其对雨滴的缓冲作用增强, 穿透雨量最小<sup>[20]</sup>, 故导致径流量有所减少, 可能与地表糙度、玉米植株的以及降雨的叠加作用相关, 表明这一时期玉米植株对片蚀径流量的影响较明显。玉米抽雄期, 虽地表糙度略有增加, 但这一时期植株生长状况最好, 植株覆盖度最大, 叶片的汇流作用强烈, 导致径流较为集中, 故抽雄期径流量大于拔节期。玉米成熟期, 地表径流量变化极为复杂, 植株萎焉, 冠层截留作用减弱<sup>[20]</sup>, 在小雨强条件下, 地表糙度对地表径流的作用小于降雨, 而随着降

到玉米成熟期, 叠加了穿透雨的作用, 降幅更加明显。

1.5, 2.0 mm/min 降雨强度条件下, 玉米苗期, 降雨后地表糙度的变幅均呈降低的变化趋势; 玉米拔节期、抽雄期和成熟期, 地表糙度的变幅却呈增加的变化趋势。1.5 mm/min 降雨强度条件, 随着玉米生育期的推进, 地表糙度呈先降低后增加的变化趋势, 且在玉米苗期、拔节期和成熟期的变幅是 1.0 mm/min 降雨强度条件下的 6.1, 16.98, 1.05 倍; 在玉米苗期、拔节期和成熟期的变幅是 2.0 mm/min 降雨强度条件下的 2.11, 1.74, 1.53 倍。2.0 mm/min 降雨强度条件, 随着玉米生育期的推进, 地表糙度也呈先降低后增加的变化趋势, 且在玉米抽雄期的变幅较其他降雨强度条件下大。

雨强度的增加, 径流在垄沟内蓄积, 当垄沟内径流蓄满溢出, 径流量明显增加, 故导致其片蚀过程径流量明显高于其他生育期。



注: 苗期、拔节期、抽雄期、成熟期地表糙度分别为 7.10, 4.97, 5.92, 5.49。下同。

### 2.2.2 地表糙度变化对侵蚀产沙的响应

由图 2 可知, 不同降雨强度下地表糙度对产沙的影响与产流不尽一致。不同降雨强度条件下, 玉米苗期和拔节期表现为随着地表糙度的减小, 产沙强度呈降低的变化趋势, 侵蚀产沙量与径流量变化较为同步。根据实地调查可知, 当地种植玉米前, 均要对坡耕地进行翻耕, 然后在此基础上, 垂直坡面起垄, 虽在一定程度上可使种植玉米起到保墒作用, 但同时也破坏了土壤结构, 土壤抗蚀性有所降低<sup>[21]</sup>, 随着降雨的持续, 地表径流作用不断增强, 进一步对地表细小土粒分散、迁移, 故

导致苗期产沙强度较大。随着玉米生育期推进,玉米叶片伸展作用增强,试验小区覆盖度增大,玉米植株对降雨的截留作用减缓了雨滴对表土的击打<sup>[19]</sup>,同时地表糙度的增加一定程度上也缓解了地表径流作用,故导致拔节期和抽雄期径流产沙强度持续减小。虽然玉米苗期—拔节期地表糙度有所减少,但叠加玉米植株改变降雨再分配和地表径流的作用,仍表现出产沙量减少的变化趋势,而地表糙度的降低主要起到“削高填低”的作用。玉米拔节期—抽雄期,一方面这一时期玉米植株生长旺盛,虽径流量有所增加,但主要表现为茎秆流,故对地表泥沙迁移作用较小;另一方面由于根系固土等作用较强<sup>[20]</sup>,故抽雄期产沙量最低且变幅较小。到玉米成熟期,植株逐渐枯萎,多数叶片下垂,覆盖度明显降低,但仍高于苗期,降雨对地表的击打作用加大,破坏力增强<sup>[20]</sup>,这一作用在垄上表现尤为突出。在降雨作用下,垄上的土粒不断迁移至垄沟内,造成泥沙淤积,垄沟的蓄水作用减弱。随降雨进行,当垄沟内蓄水达到溢出状态时,水流动能迅速增大,对地表的冲刷和破坏作用增强,导致成熟期产沙强度明显增大,且随着雨强的增加,表现更为突出。

### 2.3 地表糙度变化与片蚀的耦合关系

为了进一步明确地表糙度变化对片蚀的响应,分别

表2 不同坡面玉米各生育期地表糙度变幅、降雨强度与片蚀产流、产沙的回归关系

生育期	径流量	侵蚀产沙量
苗期	$Q_r = 20.9971 + 3.3618I - 0.0346Rr \quad R^2 = 0.2457$	$Q_s = -1.9208 + 3.2343I + 0.1413Rr \quad R^2 = 0.5907^*$
拔节期	$Q_r = 31.2276 - 8.5197I - 0.3113Rr \quad R^2 = 0.9581^{**}$	$Q_s = -1.8314 + 3.0081I + 0.0398Rr \quad R^2 = 0.7472^*$
抽雄期	$Q_r = 30.1049 - 10.7070I + 2.8631Rr \quad R^2 = 0.6816^*$	$Q_s = -0.6974 + 1.7113I - 0.1266Rr \quad R^2 = 0.9218^{**}$
成熟期	$Q_r = -17.6286 + 14.9588I + 6.0870Rr \quad R^2 = 0.9229^{**}$	$Q_s = -2.0262 + 2.4757I + 0.3246Rr \quad R^2 = 0.9650^{**}$

注:  $Q_r$  为地表径流量(L);  $Q_s$  为侵蚀产强度(g/(L·min));  $I$  为降雨强度(mm/min);  $Rr$  为地表糙度变幅; \* 表示  $P < 0.05$  水平差异显著;

\*\* 表示  $P < 0.01$  水平差异显著。

## 3 结论

(1) 当降雨强度超过 1.0 mm/min 时,降雨强度对地表糙度的影响明显增强;不同降雨强度条件下,玉米各生育期对地表糙度的影响差异较大,且在拔节期—抽雄期影响最大。可见,降雨强度和玉米生育期对地表糙度变化影响均较大。

(2) 降雨强度 1.0 mm/min 条件下,玉米各生育期地表糙度的变化与径流量变化同步;降雨强度 1.5, 2.0 mm/min 条件下,仅在玉米苗期、拔节期和抽雄期,地表糙度与径流量呈同步的变化。不同降雨强度条件下,玉米苗期和拔节期地表糙度的变化与侵蚀产沙量呈同步变化。表明地表糙度的变化,在上述条件下,对片蚀的响应较为敏感。

(3) 除玉米苗期外,其余各生育期径流量、侵蚀产沙量均与降雨强度、地表糙度变幅呈显著或极显著相关关系,但由于玉米生育期及其片蚀阶段侵蚀作用,各生育期相关关系较为复杂。

对不同坡面玉米各生育期片蚀阶段径流量、侵蚀产沙量与降雨强度和地表糙度变幅关系进行了回归拟合,关系较为复杂。由表 2 可知,玉米苗期,降雨强度、地表糙度变幅仅与侵蚀产沙量呈显著正相关关系,与径流量关系未达到显著水平,表明地表糙度变幅对苗期径流量影响较小。玉米拔节期,降雨强度、地表糙度变幅仅与径流量呈极显著负相关关系,而与侵蚀产沙量呈显著正相关关系。玉米抽雄期,降雨强度与径流量呈显著负相关关系,而地表糙度变幅却与径流量呈显著正相关关系;侵蚀产沙量却呈相反的变化趋势,降雨强度与侵蚀产沙量呈极显著正相关关系,产沙量均呈极显著正相关关系。

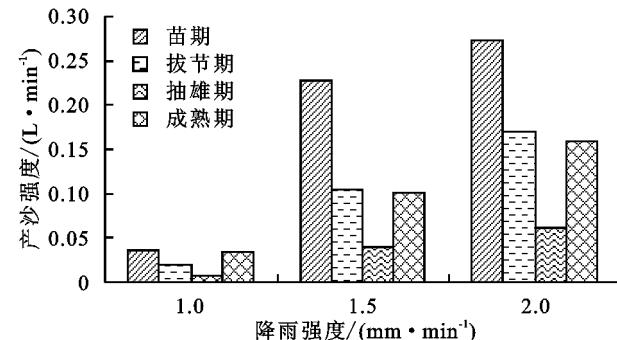


图2 不同降雨强度下地表糙度对产沙强度的响应

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘刚才. 紫色土侵蚀规律及其防治技术[M]. 成都: 四川大学出版社, 2008: 4-10.
- [3] Zheng Z C, He S Q, Wu F Q. Changes of soil surface roughness under water erosion process [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(12): 3919-3929.
- [4] Vermang J, Norton L D, Baetens J M, et al. Quantification of soil surface roughness evolution under simulated rainfall [J]. Transactions of the Asabe, 2013, 56(2): 505-514.
- [5] 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(增刊): 139-145.
- [6] Takken I, Govers G, Jetten V, et al. Effects of tillage on runoff and erosion patterns [J]. Soil and Tillage Research, 2001, 61(1): 55-60.
- [7] Gómez J A, Nearing M A. Runoff and sediment losses

- from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment[J]. *Catena*, 2005, 59(3): 253-266.
- [8] 秦凤, 郑子成, 李廷轩, 等. 玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 18-22.
- [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] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 何淑勤, 尹忠, 宫渊波, 等. 玉米季横垄坡面片蚀阶段产流及水动力学参数变化特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 18-22.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 罗键, 郑子成, 李廷轩, 等. 横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 66-72.
- [17] 林艺, 秦凤, 郑子成, 等. 不同降雨条件下垄作坡面地表微地形及土壤侵蚀变化特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(3): 32-38.
- [18] 王鹏飞, 郑子成, 张锡洲. 玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 30-34.
- [19] 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[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 208-211.
- [20] 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.
- [21] 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.

(上接第 53 页)

- [26] Liang T, Wang L, Hu Y, et al. Influence of slope and rainfall intensity on the rare earth elements and phosphorous loss from soil with surface runoff [J]. *Journal of Basic Science & Engineering*, 2010, 18(5): 741-749.
- [27] 陈学兄. 基于遥感与 GIS 的中国水土流失定量评价[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [28] 扶卿华, 喻丰华, 余顺超, 等. 基于 MODIS 植被指数的广西区植被覆盖度动态分析[J]. 数字技术与应用, 2010(7): 171-172.
- [29] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性[J]. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
- [30] 李小飞, 陈志彪, 陈志强. 南方稀土采矿恢复地土壤稀土元素含量及植物吸收特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2126-2132.
- [31] Migaszewski Z M, Gałuszka A, Dołęgowska S, et al. Assessing the impact of Serwis mine tailings site on farmers' wells using element and isotope signatures (Holy Cross Mountains, South-central Poland) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(1): 629-647.
- [32] 韩卓汝. 海南岛北部潮间带沉积物稀土元素富集规律及其生态效应研究[D]. 福建 海口: 海南师范大学, 2013.
- [33] 冉勇, 刘铮. 稀土元素在土壤和氧化物表面的吸附和解吸研究[J]. 环境科学学报, 1993, 13(3): 288-294.
- [34] 池汝安, 田君, 罗仙平, 等. 风化壳淋积型稀土矿的基础研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(4): 1-13.
- [35] 刘界, 彭子成, 韦刚健, 等. 海南岛近岸滨珊瑚稀土元素的年际变化与海平面等因素的相关性探讨[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(2): 55-61.
- [36] 金妹兰, 黄益宗. 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 4836-4845.
- [37] 黄圣彪, 王子健, 彭安. 稀土元素在土壤中吸持和迁移的研究[J]. 农业环境保护, 2002, 21(3): 269-271.
- [38] 温小军. 赣南稀土矿区土壤环境特征及稀土金属地球化学行为研究[D]. 昆明: 云南大学, 2012.
- [39] 魏复盛, 刘延良. 我国土壤中稀土元素背景值特征[J]. 环境科学, 1991, 12(5): 78-82.
- [40] 李小飞, 陈志彪, 张永贺, 等. 稀土矿区土壤和蔬菜稀土元素含量及其健康风险评价[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 835-843.
- [41] 朱为方, 徐素琴, 邵萍萍, 等. 赣南稀土区生物效应研究: 稀土日允许摄入量[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 63-66.