

# 玉米苗期横垄坡面侵蚀产沙与有机碳流失特征

何淑勤<sup>1,2</sup>, 武万华<sup>1</sup>, 宫渊波<sup>1,2</sup>, 郑子成<sup>3</sup>

(1. 四川农业大学林学院, 成都 611130; 2. 四川省水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130; 3. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 为揭示紫色土横垄坡面侵蚀产沙与有机碳流失对坡度的响应特征, 通过人工模拟降雨和野外径流小区相结合的方法, 探讨了不同坡度下玉米苗期径流、侵蚀泥沙及其有机碳流失特征。结果表明: 玉米苗期不同坡度下地表径流量总体表现为降雨初期变化较为稳定, 随降雨时间持续呈逐渐增加的趋势, 而壤中流表现为 10° 坡度下, 径流量在降雨初期变化不大, 随降雨时间持续呈逐渐增大的趋势, 15° 和 20° 坡度下壤中流则表现为逐渐增加的变化趋势; 不同坡度下侵蚀强度均表现为 20° > 15° > 10°, 且 20° 坡度下侵蚀强度显著高于 10° 和 15° 坡度; 不同坡度下, 地表径流总有机碳 (TOC) 和可溶性有机碳 (DOC) 质量浓度随降雨时间延长呈逐渐降低趋势, 有机碳质量浓度均表现为 20° > 15° > 10°, 而壤中流表现为先升高后降低的趋势, 质量浓度表现为 10° > 15° > 20°, 且地表径流、壤中流 TOC 和 DOC 质量浓度相差不大; 不同坡度下 TOC 和 DOC 迁移通量总体表现为壤中流大于地表径流, 地表径流有机碳迁移通量则表现为 20° > 15° > 10°, 而壤中流迁移通量表现为 10° > 15° > 20°, 且径流 DOC 迁移通量占 TOC 迁移通量百分比高达 90%; 不同坡度下侵蚀泥沙中有机碳含量随坡度增大均呈减小趋势, 且同一坡度下, 泥沙有机碳含量随降雨时间的延长呈降低的趋势; 侵蚀泥沙中有机碳富集明显, 随坡度的增大富集比减小。因此, 紫色土区坡耕地径流中有机碳主要以 DOC 的形式流失, 壤中流为 DOC 迁移的主要方式。

**关键词:** 玉米苗期; 地表径流; 壤中流; 有机碳; 迁移通量; 侵蚀泥沙

**中图分类号:** S157.1; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0166-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.024

## Characteristics of Sediment Yield and Organic Carbon Loss in Slope Farmland with Contour Ridges During Maize Seedling Stage

HE Shuqin<sup>1,2</sup>, WU Wanhua<sup>1</sup>, GONG Yuanbo<sup>1,2</sup>, ZHENG Zicheng<sup>3</sup>

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

2. Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Desertification Combating, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 3. College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

**Abstract:** In order to reveal the response of the soil erosion and organic carbon loss on purple slope farmland with contour ridges to slope gradient, characteristics of the runoff, sediment yield and organic carbon loss on different slopes were studied during maize seedling stage through surveying field runoff plots and simulating rainfall artificially. The results showed that during maize seedling stage, the surface runoffs on different slopes were stable in the initial stage of rainfall, and they gradually increased with the duration of rainfall. On 10° slope, the interflow did not change at the beginning of rainfall, and gradually increased with rainfall duration, while on 15° and 20° slopes, the interflow showed a gradually increasing trend with rainfall duration. The erosion intensities of different slopes listed in the order of 20° > 15° > 10°, and erosion intensity of 20° slope was significantly higher than those of 10° and 15° slopes. The concentrations of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC) in surface runoff decreased with the increasing of rainfall time on different slopes, and the organic carbon mass concentration followed the order of 20° > 15° > 10°, while the TOC and DOC concentrations in interflow firstly increased and then decreased, and organic carbon mass concentration followed the order of 10° > 15° > 20°. And the concentrations of TOC and DOC in surface runoff were not very different with those in interflow; TOC and DOC migration fluxes in interflow were both greater than those in surface runoff on different slopes, organic carbon migration flux in surface runoff

followed the order of  $20^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$ , while organic carbon migration flux in interflow showed contrary order, and DOC migration flux accounted for 90% of TOC migration flux in runoff. The organic carbon content in sediment decreased with the increasing of slope gradient, and on the same slope, the organic carbon content in sediment decreased with the duration of rainfall. The organic carbon was enriched obviously in sediment, and the enrichment ratio decreased with the increasing of slope gradient. Therefore, the organic carbon in runoff was mainly lost in the form of DOC on purple sloping farmland, and interflow was the main mode of the DOC migration.

**Keywords:** maize seedling stage; surface runoff; interflow; organic carbon; migration flux; erosion sediment

全球土壤有机碳储存约为 1 400~1 500 Gt,是大气碳库(750 Gt)的 2 倍,是陆地植物碳库的(500~600 Gt)的 2~3 倍<sup>[1-2]</sup>。根据 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)最新估计,土壤有机碳损失对全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的贡献率为 30%~50%<sup>[3]</sup>。已有研究表明,土壤侵蚀严重的坡面,有机碳流失高达 70%<sup>[4]</sup>,可见陆地生态系统和大气之间碳的交换受土壤侵蚀的影响较大,并对调节大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的平衡起着重大作用<sup>[5]</sup>。降雨引起的坡面径流对土壤有机碳流失过程及坡面径流与土壤有机碳流失关系有重要影响,已有研究表明,坡面径流有机碳流失受产流过程的影响较小,主要由径流与土壤表面接触的时间和面积决定<sup>[6]</sup>,而坡面产流过程对泥沙有机碳的影响较大,因为坡面土壤团聚性受径流分散和迁移能力的破坏<sup>[7]</sup>,使得泥沙流失量增加。泥沙流失率增加伴随占土壤有机碳主体的泥沙态有机碳流失率也随之增加<sup>[8]</sup>。紫色土坡耕地作为一种侵蚀型高生产力的岩性土壤,因其具质地松散、易风化等特点,极易发生水土流失<sup>[9-11]</sup>。刘旦旦等<sup>[12]</sup>研究表明坡度作为坡面侵蚀的重要影响因素之一,在降雨过程中土壤养分随径流和泥沙迁出地表,随着坡度增大,坡面土壤持水能力降低使得径流量增加,径流量的增加促使其对坡面侵蚀强度增加,导致对表层土壤冲刷能力增大,这使得地表产沙量增加,且有机质流失量随着坡度的增大也随之增加,进而导致土壤养分流失加剧、土地退化严重。紫色土区降雨充沛,但降雨时空分布不均,季节性干旱频繁,故坡耕地多采用横坡垄作<sup>[13]</sup>。玉米作为紫色土区的雨季旱坡地主栽农作物,对降雨的再分配作用及土壤侵蚀有重要影响。玉米苗期植株矮小,冠层截留率低,降雨过程中玉米植株保土较弱,且郑子成等<sup>[14]</sup>研究发现苗期表土受人为扰动明显,土壤抗蚀性较其他生育期小;秦凤等<sup>[15]</sup>指出坡耕地在玉米苗期的产流产沙均大于其他生育期。鉴于此,本文以紫色土横坡垄面坡耕地为研究对象,系统探讨不同坡度下玉米苗期径流及泥沙流失特征,弄清降雨过程中径流及泥沙中有机碳动态流失特征,阐明径流中有机碳流失的主要方式及泥沙中有机碳的富集现象,可为紫色土区坡耕地有效防治碳素流失提供一定理论基础,以期服务于紫色土坡耕地农业生产的可持续发展。

## 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花椒沟小支流和响水滩上端,位于  $104^{\circ}34'12''$ — $104^{\circ}35'19''$  E,  $30^{\circ}05'12''$ — $30^{\circ}06'44''$  N,隶属四川省资阳市雁江区松涛镇,平均海拔 395 m,年均降雨量为 965.8 mm,且 80%集中于 5—10 月。研究区坡耕地以玉米(*Zea mays*)种植为主,辅以种植白菜(*Beassica pekinensis*)、芋头(*Colocasia esculenta*)、辣椒(*Capsicum annuum*)等。土壤为遂宁组母质发育的紫色红棕紫泥,前期含水量为 9.25%,土壤肥力较低,有机质和有机碳含量分别为 9.14, 5.32 g/kg,可溶性有机碳含量 13.37 mg/L,全氮、碱解氮含量分别为 0.76 g/kg 和 38.16 mg/kg,有效磷和速效钾含量分别为 14.36, 97.82 mg/kg。

### 1.2 试验设计

基于野外实地调查,结合研究区域坡耕地分布零散的特点,试验小区由 4 个微小区构成,每个微小区设计为 2 m×1 m,其中 3 个微小区为试验重复,一个作为空白对照(图 1)。小区下垫面用混凝土固化防渗形成相对不透水层,并铺 10 cm 厚石英砂,上面覆土 60 cm。各小区坡面底部由水泥砌成“V”形集水槽,且与 PVC 管连接,以便收集径流。根据当地农耕习惯,在每一小区布设横坡垄作,垄高 15 cm,垄宽 40 cm,垄距 30 cm。2016 年 4 月,选用玉米正红 6 号,采用垄上直播,每个微小区栽种 8 株。株距 20 cm,行距 30 cm。播种前分别施过磷酸钙和氯化钾各 170, 140 kg/hm<sup>2</sup>,其他管理措施与当地农耕习惯一致。

采用野外人工模拟降雨和径流小区相结合的方法,人工降雨装置采用 SR 型降雨机(中国科学院水土保持研究所),装置喷头系统为美国生产的 V-80100,降雨机高度为 6 m,有效降雨面积为 35 m<sup>2</sup>。根据紫色土坡耕地土壤侵蚀的临界坡度约为  $22^{\circ}$ <sup>[16]</sup>,设计坡度分别为  $10^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ 。依据研究区域多年降雨特点及频率,设计降雨强度 1.5 mm/min,降雨历时从地表径流产流开始计时为 40 min。在玉米苗期开展试验,这一时期玉米株高 0.42 m,平均叶面积 0.04 m<sup>2</sup>,叶面积指数为 0.15,所有试验重复 3 次,共计 9 场降雨。

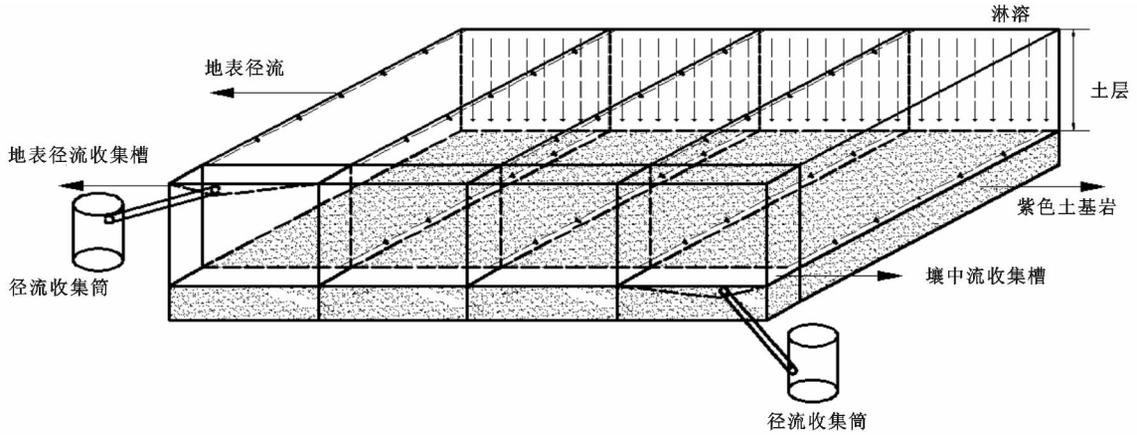


图 1 紫色土坡耕地径流小区设计示意

### 1.3 测定项目与方法

用塑料桶收集地表径流及壤中流,产流开始每 6 min 收集 1 次,直至降雨结束。产流结束后,将径流收集桶静置 6 h,待澄清后将径流和泥沙分开,径流体积采用体积法测定。收集径流上清液于 250 mL 塑料瓶中,加浓硫酸调  $\text{pH} \leq 2$ ,存放冰箱( $2 \sim 4 \text{ } ^\circ\text{C}$ )冷冻,待测。可溶性有机碳采用 TOC(TOC-V CPH)分析仪进行测定。径流含沙量采用烘干称重法测定,即将收集径流静置澄清后,去除上清液后,于  $65 \text{ } ^\circ\text{C}$  烘干至恒重用天平称量。泥沙中有机碳采用重铬酸钾容量法—外加热法测定。

### 1.4 数据处理及分析

径流样品中测定的 DOC 质量浓度及迁移通量均为 3 个小区的平均值,DOC 迁移通量计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$Q = C \times q$$

式中:  $Q$  为地表径流或壤中流迁移通量( $\text{mg}/\text{m}^2$ );  $C$  为地表径流或壤中流 DOC 质量浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $q$  为地表径流或壤中流单位面积径流量( $\text{L}/\text{m}^2$ )。

试验数据统计分析采用 SPSS 17.0 软件,图表制作采用 Origin 9.0 和 Excel 2007 软件。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流及侵蚀产沙特征

2.1.1 径流量变化特征 由图 2(a)可以看出,不同坡

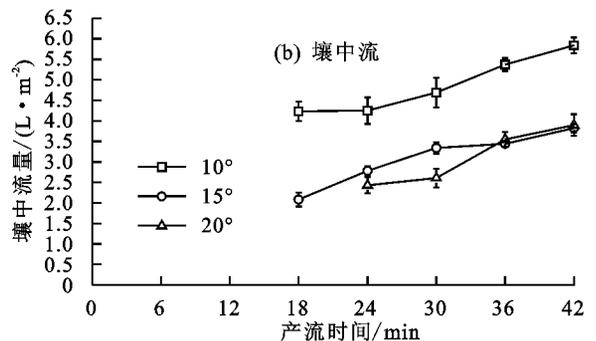
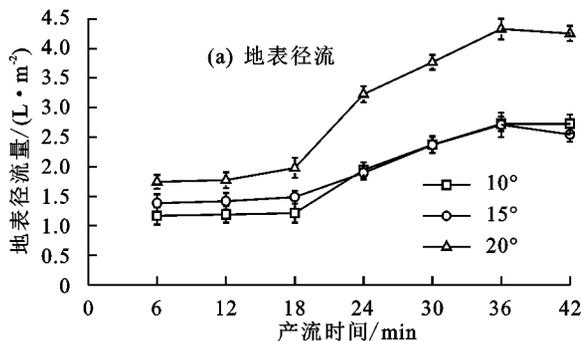


图 2 玉米苗期不同坡度下径流动态变化特征

2.1.2 侵蚀强度变化特征 由图 3 可以看出,玉米苗期,不同坡度下侵蚀强度大小表现为  $20^\circ > 15^\circ >$

度条件下,玉米苗期地表径流量在降雨初期均表现为稳定状态,随着降雨时间的持续径流量呈先增加,后趋于稳定的变化趋势。 $10^\circ$ 和 $15^\circ$ 坡面径流量增加的时间均出现在 18 min 左右, $20^\circ$ 坡面出现于 12 min 左右,且  $20^\circ$ 坡面径流量增幅显著高于其他坡面,不同坡面径流量均在 36 min 左右呈现稳定的趋势。不同坡度下,地表径流总量分别为 13.35,13.81,21.08  $\text{L}/\text{m}^2$ , $20^\circ$ 坡度径流量依次为  $10^\circ$ 和 $15^\circ$ 坡度下的 1.58,1.53 倍,且  $10^\circ$ 和 $15^\circ$ 坡度下径流总量相差不大,是因为坡度较小时,降雨初期入渗时间相对较长,入渗量持续增加,导致径流量较小,随着降雨时间的持续土壤含水量趋于饱和,土壤入渗稳定,径流量呈增加的趋势。 $20^\circ$ 坡度下,由于坡度较大,降雨来不及入渗迅速汇集形成径流,故径流量增加的时间相较于其他坡度。

由图 2(b)可以看出, $10^\circ$ 和 $15^\circ$ 坡度下,壤中流产流时间均出现在自地表径流产流开始 18 min 左右, $20^\circ$ 坡面则出现在 24 min 左右。玉米苗期  $10^\circ$ 坡度下,壤中流量在降雨初期变化不大,随降雨时间的持续,在 24 min 左右呈现逐渐增大的趋势; $15^\circ$ 和 $20^\circ$ 坡度下,自壤中流产生开始径流量就呈现出逐渐增大的趋势。不同坡度下,壤中流总量依次为 24.39,15.47,12.48  $\text{L}/\text{m}^2$ , $10^\circ$ 坡度下壤中流量最大, $20^\circ$ 坡度下最小,且  $10^\circ$ 坡度下壤中流总量显著高于其他坡度。

$10^\circ$ , $20^\circ$ 坡度下,侵蚀强度显著高于其他坡度。玉米苗期不同坡度下,侵蚀强度动态变化特征不尽相同;

10°坡度下,侵蚀强度表现为产流初期较大,而后降低并维持一稳定状态,这可能是由于地表径流产流初期,容重较小的表层土壤及坡面细小的松散颗粒随径流迁移,补给能力较强,土壤侵蚀受地表径流影响较大<sup>[18]</sup>。而后径流逐渐趋于集中,松散细颗粒补给减小,侵蚀强度趋于稳定状态。15°坡度下,侵蚀强度表现为先增大后缓慢降低,且维持一稳定状态后又呈现出升高的趋势,是因为随着降雨时间的持续,15°坡度下相较于 10°坡度,细沟间侵蚀逐渐发育为细沟侵蚀的过程较为明显,故侵蚀强度呈现出略微升高的趋势,其侵蚀强度的最小值为 3.56 g/m<sup>2</sup>,最大值为 4.54 g/m<sup>2</sup>;20°坡度下侵蚀强度随降雨时间的持续表现为先缓慢增大,而后迅速增大的趋势,其最小值为 3.65 g/m<sup>2</sup>,最大值为 6.48 g/m<sup>2</sup>。这主要是因为随着降雨时间的持续,小区地表微地形变化明显,20°坡面下部及小区边缘细沟发育明显,细沟发育不仅极易造成严重土壤侵蚀,也是坡耕地表土及养分流失的主要原因<sup>[19]</sup>,因此侵蚀强度变化幅度较大。可见,在 20°坡度下,侵蚀强度受坡度影响较大。

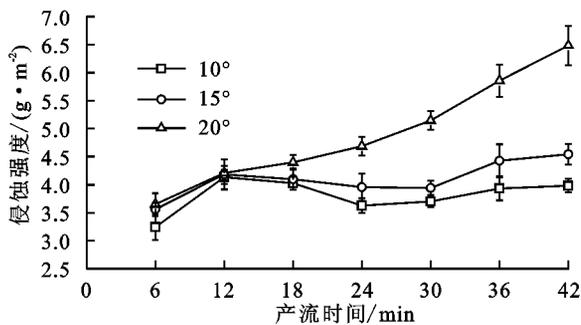


图 3 玉米苗期不同坡度下侵蚀强度变化特征

## 2.2 径流中有机碳流失特征

### 2.2.1 径流有机碳质量浓度 由图 4(a)可以看

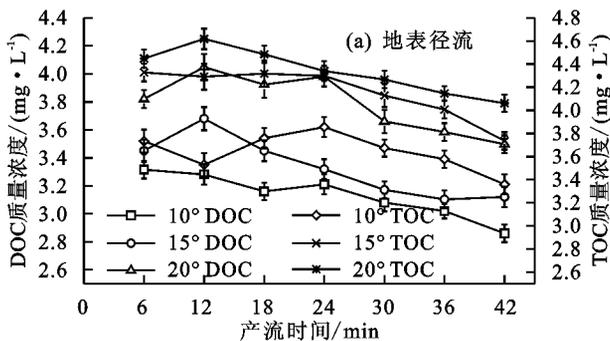
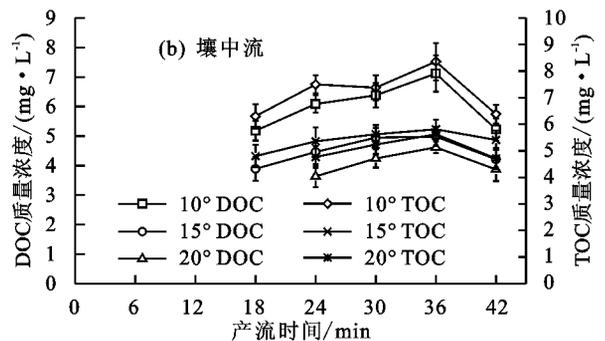


图 4 玉米苗期不同坡度下径流 DOC 质量浓度动态变化特征

2.2.2 径流 DOC 迁移通量 由图 5 可以看出,玉米苗期地表径流有机碳(TOC 和 DOC)迁移通量大小均表现为 20°>15°>10°,不同坡度下地表径流 TOC 和 DOC 迁移通量间差异显著,且 20°坡度下,地表径流 DOC 迁移通量显著高于其他坡度;10°,15°和 20°坡度下,地表径流 DOC 迁移通量大小依次为 41.22,

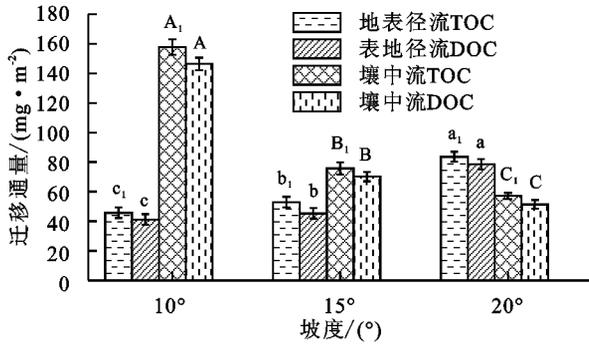
出,不同坡度下,TOC 和 DOC 质量浓度随着降雨时间的持续总体呈现出逐渐降低的趋势,这主要与壤中流形成有关,随着壤中流形成,入渗水中携带大量表层土壤可溶性有机碳,导致地表径流 DOC 质量浓度降低。在相同降雨时间段,TOC 和 DOC 质量浓度总体表现为 20°>15°>10°,且 20°坡面 TOC 和 DOC 质量浓度显著高于其他坡度。10°坡度下,TOC 质量浓度的变化范围为 3.21~3.62 mg/L;DOC 质量浓度的最小值为 2.86 mg/L,最大值仅为 3.32 mg/L;15°坡度下,TOC 质量浓度的变化范围为 3.52~4.01 mg/L;DOC 质量浓度的变化范围为 3.10~3.68 mg/L;20°坡度下,TOC 质量浓度的变化范围为 3.79~4.25 mg/L;DOC 质量浓度变化范围为 3.50~4.05 mg/L。同一坡度下,有机碳质量浓度的变幅较小,均在 0.50 mg/L 左右。

由图 4(b)可以看出,不同坡度下,TOC 和 DOC 质量浓度随着降雨时间的持续总体呈现出先升高后降低的趋势,且 10°坡度下壤中流 TOC 和 DOC 质量浓度显著高于其他坡度。同一降雨时间段内,TOC 和 DOC 质量浓度均表现为 10°>15°>20°。10°坡度下,TOC 质量浓度的变化范围为 5.67~7.52 mg/L;DOC 质量浓度的变化范围为 5.18~7.12 mg/L;15°坡度下,TOC 质量浓度的变化范围为 4.32~5.23 mg/L;DOC 质量浓度的最小值为 3.89 mg/L,最大值为 4.98 mg/L;20°坡度下,TOC 质量浓度的变化范围为 4.24~5.06 mg/L;DOC 质量浓度的变化范围为 3.63~4.62 mg/L。10°坡度下,有机碳质量浓度变幅较大,在 2.0 mg/L 左右,15°和 20°坡度其变幅在 1.0 mg/L 左右。同一降雨时间段,壤中流有机碳质量浓度高于地表径流,可见壤中流对径流有机碳的流失影响较大。



45.26, 78.64 mg/m<sup>2</sup>, 分别占总有机碳(TOC)的 90.22%, 85.56%, 94.03%;其中 20°坡度下迁移通量是 10°和 15°坡度下的 1.91, 1.74 倍。玉米苗期壤中流有机碳迁移通量则表现为 10°>15°>20°,不同坡度下壤中流有机碳迁移通量间差异显著,且 10°坡度下,壤中流有机碳迁移通量显著高于其他坡度;不

同坡度下壤中流 DOC 迁移通量大小依次为 146.47, 70.28, 51.34  $\text{mg}/\text{m}^2$ , 分别占总有机碳 (TOC) 的 92.82%, 92.75%, 89.83%; 其中  $10^\circ$  坡度下 DOC 迁移通量是  $15^\circ$  和  $20^\circ$  坡度下的 2.08, 2.85 倍。仅在  $20^\circ$  坡度下壤中流有机碳迁移通量低于地表径流有机碳迁移通量, 主要是因为大坡度下壤中流产流时间相对较晚所致, 其他坡度下迁移通量大小均表现为壤中流高于地表径流, 且  $15^\circ$  和  $20^\circ$  坡度下壤中流 DOC 迁移通量是地表径流 DOC 迁移通量的 3.56, 1.55 倍。



注: 图中小写字母表示坡度对地表径流迁移通量的影响; 大写字母表示坡度对壤中流迁移通量的影响; 相同字母表示差异不显著, 不同字母表示显著 ( $p < 0.05$ )。

图 5 玉米苗期不同坡度下径流 DOC 迁移通量变化特征

### 2.3 侵蚀泥沙中有机碳流失特征

**2.3.1 泥沙有机碳含量** 由图 6 可以看出, 玉米苗期不同坡度下, 泥沙有机碳含量动态变化特征基本一致, 随产流时间的持续均表现为逐渐降低的趋势, 这是由于地表径流产流初期, 径流产生于表层土壤, 径流的优先选择性较高, 将所需动能低、有机质含量高、容重小的土壤颗粒优先迁移, 产流初期, 土壤颗粒的大小决定了养分元素的富集, 使得泥沙黏粒富集和所吸附化学元素富集明显<sup>[20]</sup>, 侵蚀程度随着降雨时间的持续呈不同程度增大的趋势, 粗颗粒随径流迁移比重增加, 导致泥沙有机碳含量减小。不同坡度下泥沙有机碳含量大小表现为  $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$ , 且  $10^\circ$  坡度泥沙有机碳含量显著高于其他坡度。  $10^\circ$  坡度下, 侵蚀泥沙有机碳含量的最大值为 14.98  $\text{g}/\text{kg}$ , 最小值为 11.36  $\text{g}/\text{kg}$ ;  $15^\circ$  坡度下, 泥沙有机碳含量在 9.46 ~ 12.36  $\text{g}/\text{kg}$  范围内变化;  $20^\circ$  坡度下, 泥沙有机碳含量的最小值为 7.23  $\text{g}/\text{kg}$ , 最大值为 10.23  $\text{g}/\text{kg}$ 。

**2.3.2 泥沙有机碳的富集** 由表 1 可以看出,  $20^\circ$  坡度下平均侵蚀强度最大, 为 11.47  $\text{g}/\text{m}^2$ ,  $10^\circ$  坡度下最小, 仅为 8.88  $\text{g}/\text{m}^2$ , 且  $20^\circ$  坡度下平均侵蚀强度分别是  $10^\circ$  和  $15^\circ$  坡度下的 1.29, 1.2 倍。土壤侵蚀过程中径流筛选作用明显, 优先将动能低、养分含量高的表层土壤迁移, 导致侵蚀泥沙中养分元素富集, 富集现象通常用泥沙与土壤中养分含量的比值来表征, 即

富集比。泥沙中有机碳含量显著高于土壤有机碳含量,  $20^\circ$  坡度下富集比最小, 为 1.95;  $10^\circ$  坡度下富集比最大, 为 3.05; 有机碳富集比随坡度和侵蚀强度的增大均呈减小的趋势。

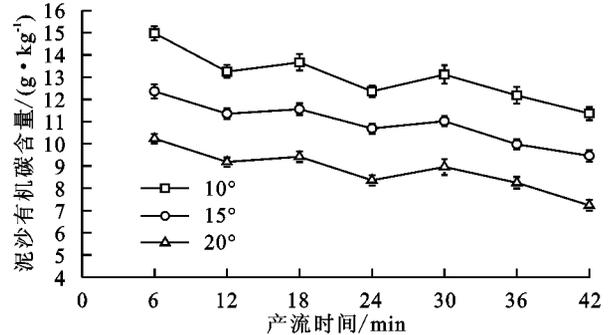


图 6 玉米苗期不同坡度下泥沙有机碳含量变化特征

表 1 玉米苗期不同坡度对泥沙中有机碳富集比的影响

小区 坡度/ $^\circ$	平均侵蚀强度/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )	有机碳含量/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$		富集比
		土壤	泥沙	
$10^\circ$	8.88	4.26	12.99	3.05
$15^\circ$	9.57	4.08	10.92	2.68
$20^\circ$	11.47	4.52	8.80	1.95

注: 泥沙中有机碳含量为同一场降雨不同时间段的平均值。

## 3 讨论

坡度是坡耕地土壤侵蚀的重要影响因素之一, 降雨条件相同时, 因坡度不同, 形成的坡面流存在着差别, 导致侵蚀程度的不同<sup>[21]</sup>。本研究结果表明, 玉米苗期,  $20^\circ$  坡度下地表径流量较  $10^\circ$  和  $15^\circ$  坡度下径流量大, 这与王全九等<sup>[22]</sup> 研究结果相一致, 在坡度为  $20^\circ$  时, 坡面径流量达到最大值, 主要是由于坡度较大时, 坡面土体不稳定性增加, 坡面土粒随径流迁移蓄积于垄沟, 径流迅速汇集于垄沟, 加上本试验模拟零散坡耕地, 面积较小、相较于垄沟控蚀效果较差, 导致垄沟内大量积水顺垄坡细沟流下, 使得径流量增加<sup>[23]</sup>; 壤中流则表现为  $10^\circ$  坡度下径流总量最大, 一是因为该坡度下壤中流产流时间相对较早, 二是因为随着降雨时间的持续土壤入渗稳定增加, 导致径流量逐渐增加。可见, 壤中流量大小不仅与坡度有关, 而且产流时间一定程度也影响其大小。不同坡度下玉米苗期侵蚀程度随坡度增大而增大, 表现为  $20^\circ$  坡度下侵蚀强度显著高于其他坡度, 这与陈俊杰等<sup>[24]</sup> 研究结果相一致, 一方面是因为坡度较小时, 以土壤入渗为主, 垄上径流冲刷作用较弱, 导致侵蚀强度较小, 随着坡度增大, 一定程度提前了垄沟内蓄水破垄或越垄的时间, 加速了坡面细沟的发育, 进而导致侵蚀强度的迅速增大; 另一方面是由于随坡度的增大, 坡面土体不稳定性也随之增加, 径流位能增大, 侵蚀能力增强。  $20^\circ$  坡度相较其他坡度细沟出现时间均有不同程度提前, 导

致侵蚀强度随坡度增大而增大。

苗期不同坡度下地表径流 TOC 和 DOC 质量浓度随坡度的增大而增大,且 20°坡度 TOC 和 DOC 质量浓度显著高于其他坡度,主要是因为降雨优先将表层细颗粒土壤 DOC 迁移,随着坡度的增大,地表径流流速加快,径流动能增强,对土壤颗粒的破碎能力提高,径流不断浸提深层土壤溶质,进而导致径流 TOC 和 DOC 浓度增大;而壤中流 TOC 和 DOC 质量浓度则表现为随着坡度的增大而减小,且 10°坡度 TOC 和 DOC 质量浓度显著高于其他坡度,这可能与表层土壤 TOC 和 DOC 迁移及大颗粒土壤被破坏其中部分有机碳被迁移有关。不同坡度下壤中流 DOC 质量浓度均表现为先升高后降低的趋势,这与壤中流组成有关,壤中流一般认为由基质流和土壤中大孔隙流组成,且基质流形成速率远小于大孔隙流<sup>[25]</sup>。壤中流产流初期,以大孔隙流为主,且大孔隙入渗水与土壤 DOC 间溶解交互作用较小,随着产流时间的持续,基质流的形成使得入渗水携带土壤 DOC 增加,导致 DOC 质量浓度呈升高趋势,当 DOC 质量浓度出现峰值时,降雨增加反而对 DOC 质量浓度起到稀释作用。玉米苗期 DOC 迁移通量总体表现为壤中流高于地表径流,这与花可可等<sup>[17]</sup>研究表明紫色土坡耕地可溶性有机碳淋失以壤中流为主要方式相一致。主要有以下原因:一是由于采用横垄耕作方式,随降雨时间延长,垄沟内蓄水,使得壤中流发育提前;二是与其紫色土特殊土壤一母岩二元结构有关,水分下渗至透水性较弱的紫色泥页岩极易汇集产生壤中流<sup>[24]</sup>,同时壤中流也是紫色土坡耕地径流的主要组成方式。

玉米苗期 20°坡度下泥沙有机碳含量显著低于其他坡度,主要是因为坡度较小时,径流流速和径流量均较小,径流迁移能力较小,筛选作用更明显,将细小的颗粒优先迁移;坡度较大时,径流位能增大,使得土壤大颗粒及大团聚体被迁移,侵蚀选择性迁移能力随泥沙输移的增加而减弱<sup>[26]</sup>。可见,坡度对泥沙有机碳含量影响较大,坡度越大,泥沙有机碳含量越小,且侵蚀泥沙中有机碳富集明显,且坡度越大富集比越小,这与贾松伟<sup>[21]</sup>对黄土丘陵区坡度对有机碳流失的影响相一致。这主要是因为侵蚀强度越大时,土壤中粗颗粒及大团聚体容易被径流迁移,而颗粒越大养分含量越低,故泥沙有机碳含量降低,富集比减小。可见,研究区在控制径流方式对土壤养分流失的同时还应采取增加植被盖度等措施,通过减少侵蚀产沙,以全面控制坡耕地有机碳的流失。

## 4 结论

(1) 不同坡度下,玉米苗期地表径流大小表现为

20°>15°>10°,而壤中流则表现为 10°>15°>20°,不同坡度下侵蚀强度总体表现为 20°>15°>10°,且 20°坡度侵蚀强度显著高于其他坡度。

(2) 地表径流 TOC 和 DOC 质量浓度随降雨时间的持续总体呈现逐渐降低的趋势,而壤中流则呈现先升高后降低的趋势,地表径流 TOC 和 DOC 质量浓度随坡度增大而增大,而壤中流有机碳质量浓度随坡度增大而减小。同一坡度同一时间段径流 TOC 和 DOC 质量浓度相差不大,且壤中流有机碳质量浓度高于地表径流。

(3) 不同坡度下,径流 DOC 迁移通量占 TOC 迁移通量百分比高达 90%左右,故径流中有机碳主要以可溶性有机碳的形式流失,TOC 和 DOC 迁移通量总体表现为壤中流大于地表径流,故壤中流是径流有机碳迁移的主要方式;地表径流有机碳迁移通量由径流量大小决定;而壤中流有机碳迁移通量由壤中流初始产流时间、有机碳质量浓度及产流量共同影响。

(4) 玉米苗期,不同坡度下泥沙有机碳含量随坡度的增大均呈减小趋势,且同一坡度下,泥沙有机碳随降雨时间的延长也呈降低的趋势;不同坡度下,泥沙有机碳的富集明显,坡度越大,富集比越小。

## 参考文献:

- [1] 刘留辉,邢世和,高承芳. 土壤碳储量研究方法及其影响因素[J]. 武夷科学,2008,23(1):219-226.
- [2] 刘京,常庆瑞,陈涛,等. 陕西省土壤有机碳密度空间分布及储量估算[J]. 土壤通报,2012,43(3):656-661.
- [3] IPCC report. Climate Change [M]. United Kingdom: Cambridge Univ. Press, 1995.
- [4] Anderson D W, De Jong E, Verity G E, et al. The effects of cultivation on the organic matter of soils of the Canadian prairies [M]. Hamburg: International Society of Soil Science,1986:1344-1345.
- [5] Liu S, Bliss N, Sundquist E, et al. Modeling carbon dynamics in vegetation and soil under the impact of soil erosion and deposition [J]. Global Biogeochem Cycles, 2003,17(2): 1074.
- [6] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180-191.
- [7] 闫峰陵,史志华,蔡崇法,等. 红壤表土团聚体稳定性对坡面侵蚀的影响[J]. 土壤学报,2007,44(4):577-583.
- [8] 黎四龙,蔡强国,吴淑安. 次降雨侵蚀量的计算[J]. 泥沙研究,1999(1):49-55.
- [9] Lin C, Tu S, Huang J, et al. The effect of plant hedg-

- erows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(2): 307-312.
- [10] 罗付香, 刘海涛, 林超文, 等. 不同形态氮肥在坡耕地雨季土壤氮素流失动态特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(3):12-20.
- [11] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(10):2241-2249.
- [12] 刘旦旦, 王健, 尹武君. 天然降雨对黄土坡地土壤侵蚀和养分流失的影响[J]. *节水灌溉*, 2011, 8(4):17-24.
- [13] 林超文, 庞良玉, 陈一兵, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土坡耕地降雨有效性的影响[J]. *生态环境*, 2008, 17(3):1257-1261.
- [14] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗蚀性及其影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(4):100-108.
- [15] 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]. *水土保持报*, 2013, 27(3):18-22.
- [16] 陈正发, 郭宏忠, 史东梅, 等. 地形因子对紫色土坡耕地土壤侵蚀作用的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(5):83-87.
- [17] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5):81-88.
- [18] 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.
- [19] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J]. *生态学报*, 2014, 34(19):5514-5521.
- [20] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. *环境科学*, 2000, 21(6):16-19.
- [21] 贾松伟. 黄土丘陵区不同坡度下土壤有机碳流失规律研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(2):30-33.
- [22] 王全九, 穆天亮, 王辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(4):176-179.
- [23] 何晓玲, 郑子成, 李廷轩. 不同耕作方式对紫色土侵蚀及磷素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(12):2492-2500.
- [24] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素. *土壤学报*, 2013, 50(2):281-288.
- [25] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地硝酸盐流失过程与特征研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(5):963-970.
- [26] 王文欣, 庄义琳, 庄家尧, 等. 不同降雨强度下坡地覆盖对土壤有机碳流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4):62-66.
- (上接第 149 页)
- [26] 陈奇伯, 王克勤, 齐实, 等. 黄土丘陵区坡耕地水土流失与土地生产力的关系[J]. *生态学报*, 2003, 23(8):1463-1469.
- [27] 刘慧, 魏永霞. 黑土区土壤侵蚀厚度对土地生产力的影响及其评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20):288-296.
- [28] 韩晓增, 邹文秀, 阎百兴, 等. 水土流失对黑土理化性状的影响及水土保持措施的效果[J]. *中国水土保持*, 2009(1):13-16.
- [29] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(4):611-620.
- [30] 陈强, Yuriy S K, 陈渊, 等. 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1):11-21.
- [31] 郭贤仕, 杨如萍, 马一凡, 等. 保护性耕作对坡耕地土壤水分特性和水土流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(4):1-5.
- [32] Castro F C, Lourenco A, Guimarães m f, et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, 65(1):45-51.
- [33] 左继超, 胡建民, 王凌云, 等. 侵蚀程度对红壤团聚体分布及养分含量的影响[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1):112-117.
- [34] 孟凯, 张兴义, 随跃宇, 等. 黑龙江海伦农田黑土水分特征[J]. *土壤通报*, 2003, 34(1):11-14.
- [35] 林璐, 乌云娜, 田村宪司, 等. 呼伦贝尔典型退化草原土壤理化与微生物性状[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12):3407-3414.
- [36] 冯志珍, 郑粉莉, 易祎. 薄层黑土微生物生物量碳氮对土壤侵蚀—沉积的响应[J]. *土壤学报*, 2017, 54(6):1332-1344.
- [37] 景国臣, 刘绪军, 任宪平. 黑土坡耕地土壤侵蚀对土壤性状的影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(6):28-31.