

不同坡度下玉米生长期紫色土坡面径流及其可溶性有机碳流失特征

何淑勤^{1,2}, 宫渊波^{1,2}, 武万华¹, 郑子成³

(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: 为探明紫色土横垄坡面径流与可溶性有机碳流失对不同坡度的响应特征, 通过径流小区和野外人工模拟降雨相结合的方法, 探讨了不同坡度条件下玉米各生育期地表径流、壤中流及其可溶性有机碳(DOC)流失特征。结果表明: 玉米各生育期同一降雨时间段地表径流量均表现为 $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$, 壤中流径流量却表现为 $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$ 。不同坡度下, 玉米生育期地表径流量大小总体表现为苗期 $>$ 成熟期 $>$ 拔节期 $>$ 抽雄期, 壤中流流量整体表现为抽雄期 $>$ 拔节期 $>$ 苗期 $>$ 成熟期。玉米各生育期地表径流 DOC 质量浓度均表现为 $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$, 不同坡度下玉米生育期地表径流 DOC 质量浓度表现为苗期 $>$ 拔节期 $>$ 成熟期 $>$ 抽雄期。苗期、拔节期和成熟期壤中流 DOC 质量浓度大小表现为 $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$, 不同坡度下玉米生育期壤中流 DOC 质量浓度的总体表现为苗期最大, 抽雄期最小。玉米各生育期地表径流 DOC 迁移通量大小均表现为 $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$, 不同坡度地表径流 DOC 迁移通量均表现为苗期 $>$ 成熟期 $>$ 拔节期 $>$ 抽雄期; 玉米各生育期壤中流 DOC 迁移通量大小均表现为 $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$, 不同坡度下壤中流 DOC 迁移通量与地表径流一致。研究结果可为不同坡度条件下玉米生长期坡面径流损失和有机碳流失调控提供理论依据。

关键词: 玉米生育期; 坡度; 地表径流; 壤中流; 可溶性有机碳; 迁移通量

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0091-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.016

Characteristics of Runoff and Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil with Different Slope Gradients During Maize Growth Stages

HE Shuqin^{1,2}, GONG Yuanbo^{1,2}, WU Wanhua¹, ZHENG Zicheng³

(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. College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: In order to investigate the response characteristics of the runoff and organic carbon loss to slope gradients in slope purple soil farmland with contour ridges, the surface runoff, interflow and dissolved organic carbon loss were studied during maize growth stages. Runoff plots and field artificial rainfall simulation methods were adopted. The results showed that the surface runoff displayed an order of $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$ during the whole maize growth stage, while the interflow for $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$. For the different slope gradients, the surface runoff displayed an order of seedling stage $>$ mature stage $>$ jointing stage $>$ tasseling stage, however, the interflow followed: tasseling stage $>$ jointing stage $>$ mature stage $>$ seedling stage. The dissolved organic carbon (DOC) mass concentrations of surface runoff showed $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$ during the whole maize growth stage, and seedling stage $>$ jointing stage $>$ mature stage $>$ tasseling stage for the different slope gradients. The DOC mass concentrations of interflow showed an order of $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$ at seedling stage, jointing stage and mature stage. The DOC mass concentration of interflow at seedling stage was maximum and tasseling stage was minimum for the different slope gradients. The DOC migration flux of surface runoff displayed an order of $20^\circ > 15^\circ > 10^\circ$ during the whole maize growth stage, and seedling stage $>$ mature stage $>$ jointing stage $>$ tasseling stage for the different slope gradients. The DOC migration flux of interflow displayed an order of $10^\circ > 15^\circ > 20^\circ$ during the whole maize growth stage, while DOC migration flux of interflow for the different slope gradients showed the consistency with surface runoff.

These results could provide theoretical basis for runoff and organic carbon loss regulation under different slope gradients during maize growth season.

Keywords: maize growth stage; slope gradient; surface runoff; interflow; dissolved organic carbon; migration flux

土壤水力侵蚀和 CO₂ 排放引发的全球变化是当前两大世界性的环境问题^[1], 据报道^[2], 每年全球通过水力侵蚀发生的碳通量迁移有 4 gt。可见, 探讨水力侵蚀影响下土壤有机碳流失方面的研究显得尤为必要。水蚀引起的坡面土壤有机碳(SOC)迁移及分布是一个较为复杂的物理化学过程, 受多重因素的影响。坡面径流是 SOC 流失的主要动力^[3], 而径流中主要以可溶性有机碳(DOC)方式存在, 且常用来作为评价土壤有机碳库损失的指标^[4]。不同降雨强度、坡度下径流中 DOC 含量表现为产流初期呈逐渐减小的趋势, 产流中后期略有增加的趋势, 且量值区间变幅不大^[5-6]。相关研究^[7-8]表明, 地表径流驱动下碳素迁移规律主要受降雨特征、地形条件、土壤性质、耕作方式、地表覆盖等多种因素影响, 其中降雨强度、坡度、径流量和侵蚀泥沙量是主要影响因素。目前, 国内关于土壤侵蚀对土壤有机碳的影响研究主要集中在黄土高原、东北黑土区以及南方红壤丘陵区。相关研究^[9-10]表明, 土壤有机碳流失程度与降雨强度以及坡面坡度呈正相关, 若降雨强度增加 1.6 倍, 土壤 SOC 流失量可增加近 3.2 倍; 地表坡度由 10° 增加到 20°, 由土壤侵蚀导致 SOC 流失量可增加 6.3 倍^[11]。紫色土作为一种侵蚀型高生产力岩性土壤, 因其质地松散、易分化等特点, 极易发生水土流失^[12-13], 严重的水土流失不仅导致径流损失, 同时也必然引起土壤元素的迁移或流失。研究区坡耕地多采用横坡垄作, 玉米作为该区域的主栽农作物, 其茎干流随玉米生育期推进的变化在一定程度上影响了径流和养分流失的方式^[14]。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生长期径流及有机碳流失特征, 以期对紫色土区坡耕地有机碳流失有效防控和土壤资源可持续利用提供一定理论基础。

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小流域上端(104°34'12"—104°35'19" E, 30°05'12"—30°06'44" N), 隶属四川省资阳市雁江区松涛镇, 平均海拔 395 m, 属于典型的紫色土丘陵区。年均降水量 965.8 mm, 且 80% 集中于 5—9 月。研究区坡耕地以玉米(*Zea mays*) 种植为主, 试验区域土壤为遂宁组母质发育的紫色棕紫泥, 有机碳含量 5.41 g/kg, 可溶性有机碳含量 1.08 g/kg, 全氮含量为 0.81 g/kg, 碱解氮、有效磷和

速效钾含量分别为 37.52, 13.84, 96.17 mg/kg, 土壤肥力处于中等水平。

1.2 研究方法

试验于 2016 年 4—8 月进行, 采用野外人工模拟降雨和定位小区相结合的方法。基于研究区分布零散坡耕地的特点, 试验设置 2 m×1 m 的微小小区, 坡度设置为 10°, 15°, 20°。试验小区建于 2009 年, 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。每个小区坡面下部用水泥砌成“V”形集水槽, 集水槽通过 PVC 管连接到径流收集桶。根据试验区紫色土的特征, 在每个小区设置从地表至 20 cm 处壤中流收集装置。基于当地农耕习惯, 在每个小区布设横坡垄作, 垄高 30 cm, 垄宽 50 cm, 垄距 90 cm, 设置 3 个重复。试验所用降雨设备是中国科学院水土保持研究所生产的 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。根据该区域降雨特点, 设置降雨强度为 1.5 mm/min, 降雨历时为从产流开始计时 40 min。种植玉米品种为“正红 6 号”, 采用垄上直播, 行距 90 cm, 株距 25 cm。分别在玉米苗期、拔节期、抽雄期、成熟期按上述设计进行人工模拟降雨。

1.3 测定项目及方法

用塑料桶收集地表径流和壤中流, 每 6 min 收集 1 次, 直至降雨结束。产流结束后, 将径流收集桶放置 3 h, 待澄清后将径流和泥沙分开, 径流采用体积法测定。收集径流上清液于 250 mL 塑料瓶中, 加浓硫酸调 pH ≤ 2, 存放冰箱(2~4 ℃)冷冻, 待测。可溶性有机碳采用 TOC 分析仪进行测定。

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^[15]为:

$$Q=C \times q$$

式中: Q 为地表径流或壤中流迁移通量(mg/m²); C 为地表径流或壤中流 DOC 质量浓度(mg/L); q 为地表径流或壤中流单位面积径流量(L/m²)。

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 径流特征

由图 1 可知, 玉米各生育期同一降雨时间段地表

径流量均表现为 $20^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$; 10° 坡度下, 径流量的最大值出现在苗期 (2.73 L/m^2), 最小值出现在抽雄期 (0.66 L/m^2); 产流初期玉米各生育期径流量变化平稳, 随着降雨历时的延长, 苗期径流量在 18 min 左右呈迅速增大的趋势, 而其他生育期均表现为缓慢增大而后趋于平稳的变化趋势。 15° 坡度下, 径流量最大值、最小值依次出现在苗期 (2.71 L/m^2)、抽雄期 (0.81 L/m^2); 自产流开始玉米各生育期径流量均

表现为缓慢增大的趋势。 20° 坡度下, 径流量最大值、最小值依次出现在苗期 (4.33 L/m^2)、抽雄期 (1.14 L/m^2); 产流初期苗期径流量表现为缓慢增大, 在 18 min 左右呈现迅速增大的趋势; 拔节期和抽雄期径流量均表现为缓慢增大的趋势; 成熟期径流量产流初期表现为迅速增大, 而后维持一稳定状态, 最后又呈增大的趋势。不同坡度下, 玉米生育期径流量大小总体表现为苗期 $>$ 成熟期 $>$ 拔节期 $>$ 抽雄期。

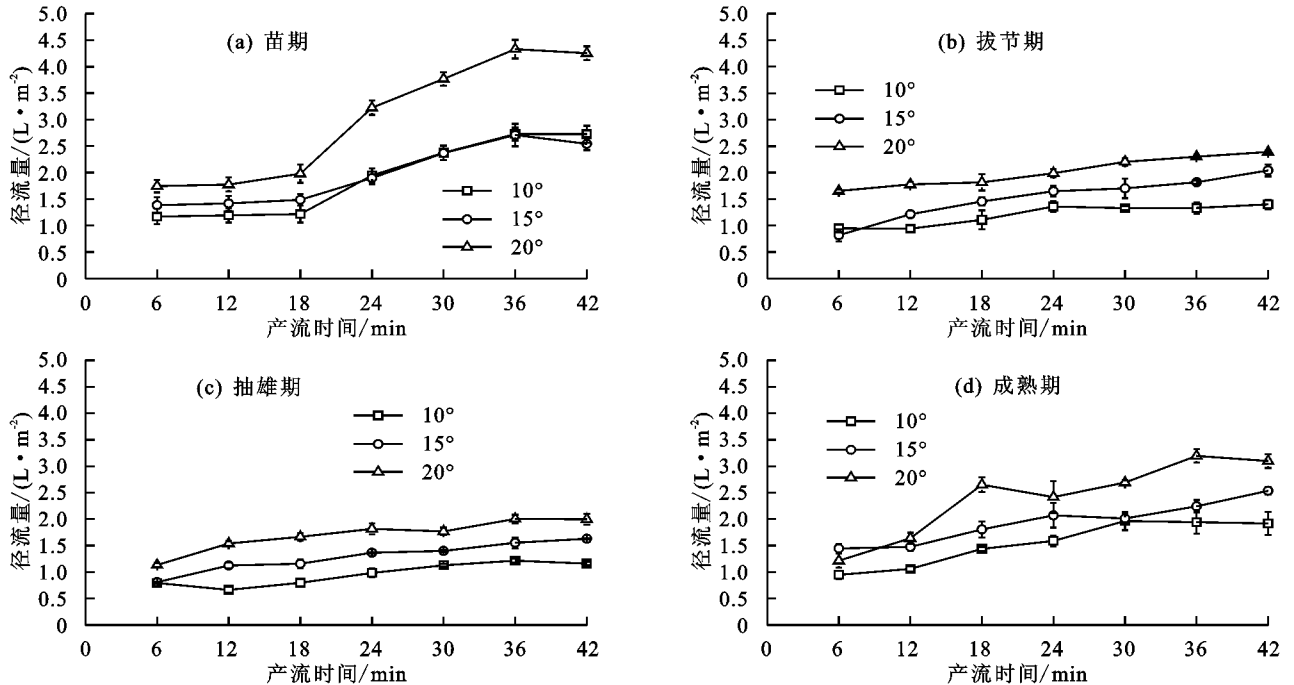


图 1 不同坡度下玉米各生育期地表径流量变化特征

由图 2 可知, 玉米各生育期同一降雨时间段壤中流径流量均表现为 $10^{\circ} > 15^{\circ} > 20^{\circ}$; 10° 和 15° 坡度下, 壤中流产流时间在 18 min 左右, 20° 坡度下, 壤中流产流时间在 24 min 左右; 10° 坡度下, 径流量最大值、最小值依次出现在抽雄期 (9.49 L/m^2)、成熟期 (2.89 L/m^2), 玉米成熟期壤中流径流量在产流初期变化稳定, 在 30 min 左右呈明显增大的趋势, 其他生育期径流量变化总体呈现为逐渐增大的趋势; 15° 坡度下, 径流量最大值、最小值依次出现在抽雄期 (9.82 L/m^2)、成熟期 (1.97 L/m^2), 抽雄期壤中流径流量显著高于拔节期和成熟期, 且拔节期和成熟期径流量呈缓慢增大的趋势, 抽雄期径流量大小表现为先增大而后趋于平稳的趋势, 苗期径流量变化波动较大; 20° 坡度下, 径流量最大值、最小值依次出现在抽雄期 (7.35 L/m^2)、成熟期 (1.30 L/m^2), 抽雄期和拔节期壤中流径流量大小呈迅速增大后缓慢增大的趋势, 苗期和成熟期径流量呈缓慢增大的趋势; 不同坡度下, 玉米各生育期壤中流径流量大小整体表现为抽雄期 $>$ 拔节期 $>$ 苗期 $>$ 成熟期。

2.2 径流 DOC 质量浓度

由图 3 可知, 玉米各生育期地表径流 DOC 质量浓度均表现为 $20^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$; 10° 坡度下, 径流 DOC 质量浓度最大值、最小值依次出现在拔节期 (3.94 mg/L)、抽雄期 (1.22 mg/L); 苗期和拔节期地表径流 DOC 质量浓度呈逐渐减小的趋势, 且减小幅度不大; 成熟期和抽雄期 DOC 质量浓度也呈减小趋势, 但减小幅度较大; 15° 坡度下, 径流 DOC 质量浓度最大值、最小值依次出现在拔节期 (4.04 mg/L)、抽雄期 (1.08 mg/L); 玉米各生育期地表径流 DOC 质量浓度变化规律同 10° 坡度基本一致, 但 15° 坡度下, DOC 质量浓度初值相对较高; 20° 坡度下, 径流 DOC 质量浓度最大值、最小值依次出现在拔节期 (4.45 mg/L)、抽雄期 (2.13 mg/L); 玉米各生育期地表径流 DOC 质量浓度初值相对其他坡度最高, 总体表现为逐渐较小的趋势, 抽雄期 DOC 质量浓度变化幅度相对其他生育期较大; 不同坡度下玉米生育期 DOC 质量浓度表现为苗期 $>$ 拔节期 $>$ 成熟期 $>$ 抽雄期。

由图 4 可知, 玉米不同生育期壤中流 DOC 质量浓度随着降雨历时的延长总体表现为先升高后降低

的趋势,且同一产流时间段苗期、拔节期和成熟期壤中流 DOC 质量浓度大小表现为 $10^{\circ} > 15^{\circ} > 20^{\circ}$,而抽雄期壤中流 DOC 质量浓度受坡度的影响与其他生育期不尽相同。 10° 坡度下,壤中流 DOC 质量浓度最大值、最小值依次出现在苗期(7.12 mg/L)、抽雄期(1.73 mg/L);拔节期壤中流 DOC 质量浓度的峰值出现在 30 min 左右,其他生育期 DOC 质量浓度峰值均出现在 36 min 左右; 15° 坡度下,壤中流 DOC 质量

浓度最大值、最小值依次出现在苗期(4.99 mg/L)、抽雄期(1.69 mg/L);成熟期 DOC 质量浓度的峰值出现在 36 min 左右,其他生育期峰值出现在 30 min 左右; 20° 坡度下,壤中流 DOC 质量浓度最大值、最小值依次出现在苗期(4.62 mg/L)、拔节期(1.12 mg/L);各生育期 DOC 质量浓度的峰值均出现在 36 min 左右;不同坡下玉米生育期壤中流 DOC 质量浓度的总体表现为苗期最大,抽雄期最小。

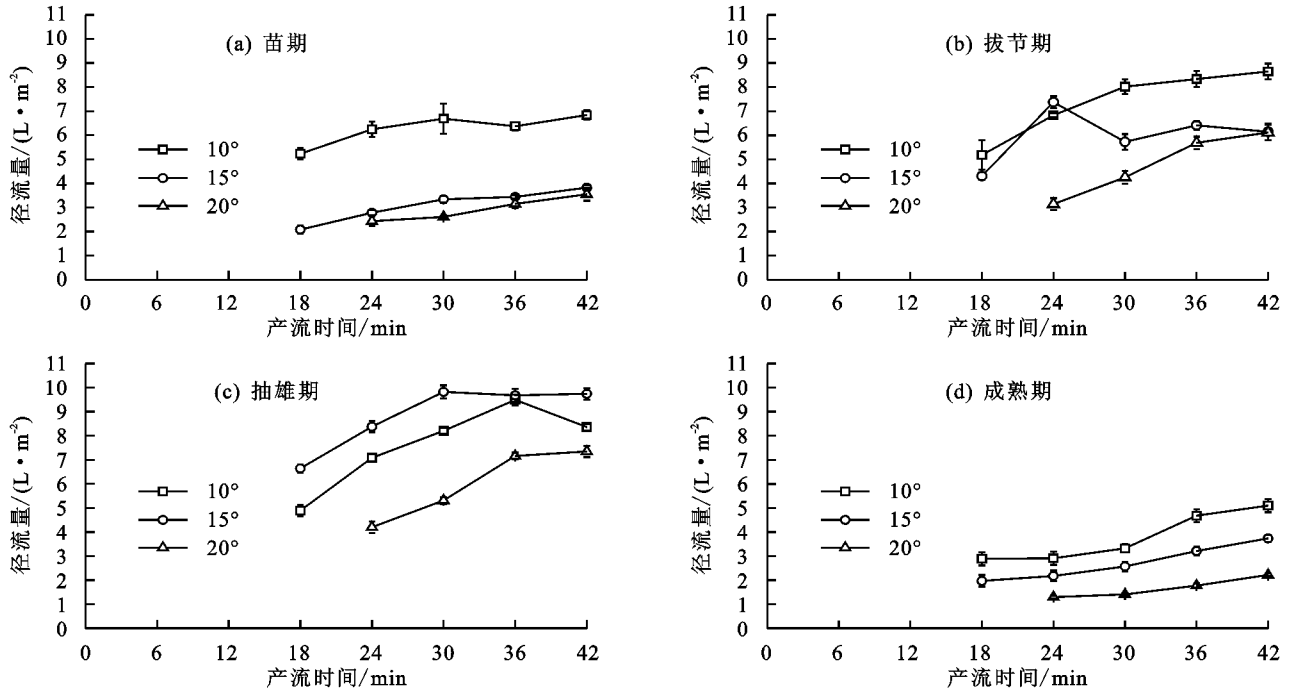


图 2 不同坡度下玉米各生育期壤中流径流量变化特征

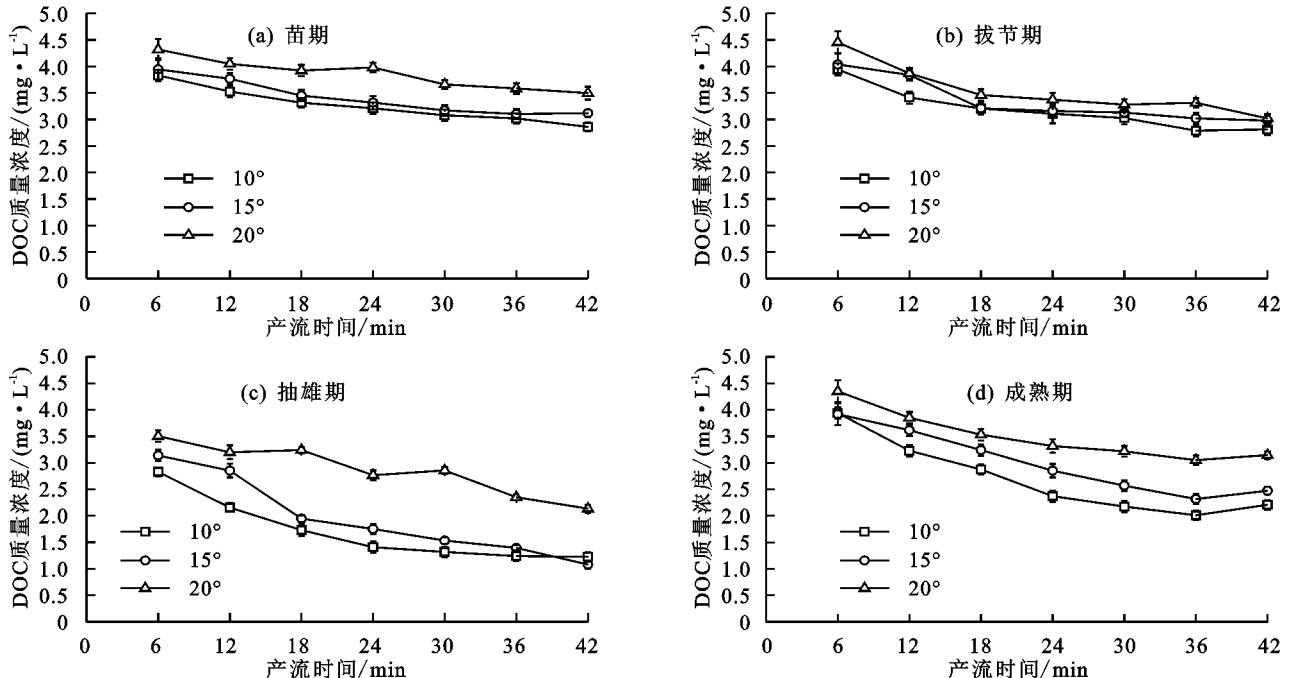


图 3 不同坡度下玉米各生育期地表径流 DOC 质量浓度变化特征

2.3 径流 DOC 迁移通量

由图 5 可知,自产流开始 42 min 内玉米各生育期地表径流 DOC 迁移通量大小均表现为 $20^{\circ} > 15^{\circ} >$

10° ,且 20° 坡度下地表径流 DOC 迁移通量显著高于其他坡度。整个玉米生育期, 10° , 15° , 20° 坡度下产流 42 min 内地表径流 DOC 迁移通量分别为 107.04,

136.67, 219.28 mg/m², 其中 20° 坡度下的迁移通量分别是 15°, 10° 坡度下迁移通量的 1.60, 2.05 倍。随玉米生育期推进, 不同坡度地表径流 DOC 迁移通量均表现为苗期 > 成熟期 > 拔节期 > 抽雄期。玉米各

生育期, 不同坡度下地表径流 DOC 迁移通量间差异显著; 同一坡度下, 玉米各生育期地表径流 DOC 迁移通量间差异显著, 且抽雄期迁移通量显著低于其他生育期。

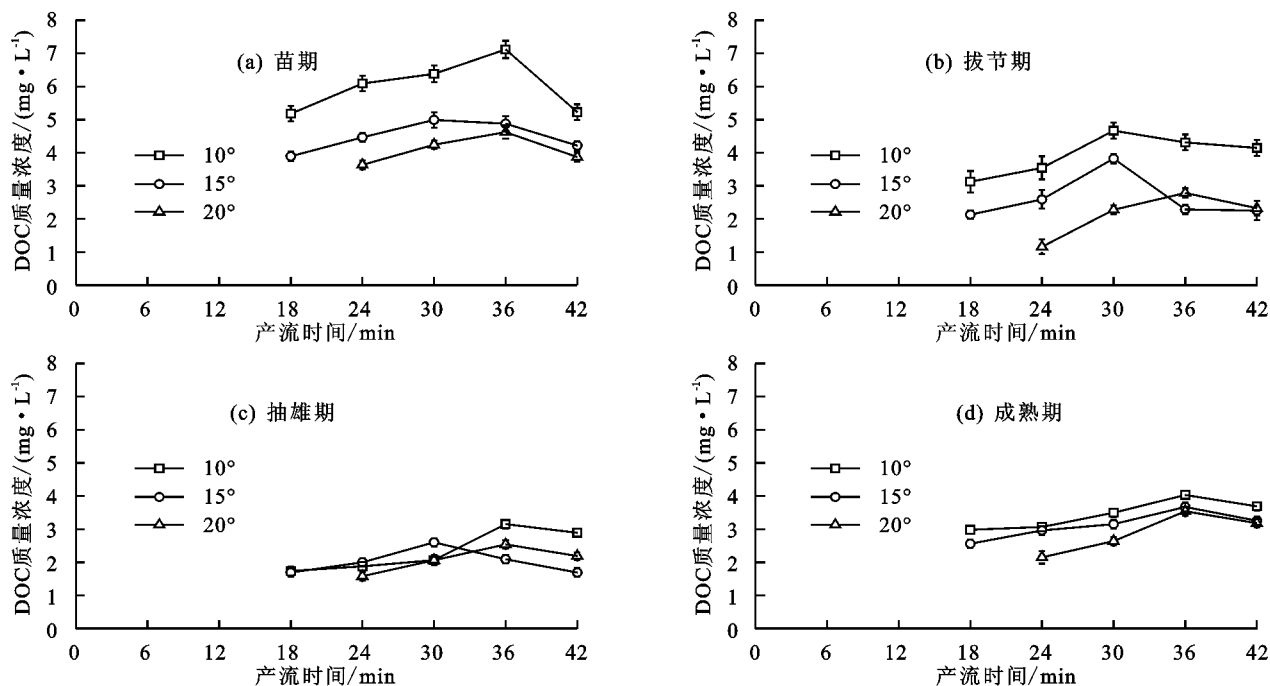
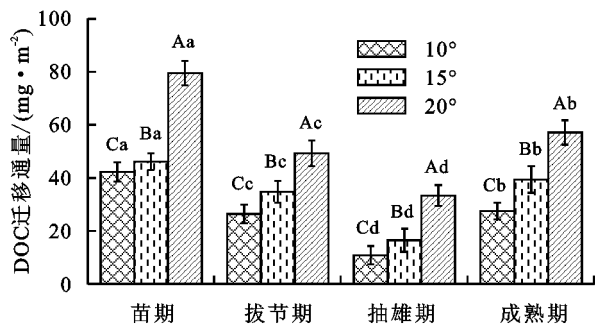


图 4 不同坡度下玉米各生育期壤中流 DOC 质量浓度变化特征



注: 图中大写字母表示坡度对地表径流 DOC 迁移通量的影响, 小写字母表示玉米生育期对地表径流 DOC 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 ($p < 0.05$), 下同。

图 5 不同坡度下玉米各生育期地表径流 DOC 迁移通量变化特征

由图 6 可知, 自产流开始 42 min 内玉米各生育期壤中流 DOC 迁移通量大小均表现为 10° > 15° > 20°, 且 10° 坡度下壤中流 DOC 迁移通量显著高于其他坡度。壤中流 DOC 迁移通量的变化范围在 19.86 ~ 188.92 mg/m², 10°, 15°, 20° 坡度下玉米生育期壤中流 DOC 迁移通量分别为 498.04, 282.77, 163.23 mg/m²。随玉米生育期推进, 不同坡度下壤中流 DOC 迁移通量均表现为苗期 > 成熟期 > 拔节期 > 抽雄期。玉米各生育期, 不同坡度下地表径流 DOC 迁移通量间差异显著; 同一坡度下, 玉米各生育期地表径流 DOC 迁移通量间差异显著, 且成熟期迁移通量显著低于其他生育期。

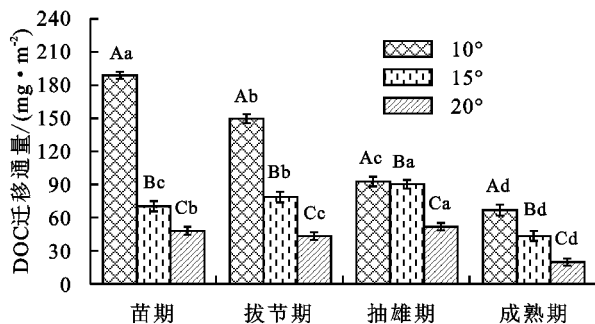


图 6 不同坡度下玉米各生育期壤中流 DOC 迁移通量变化特征

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^[11]。本研究表明, 玉米各生育期, 20° 坡度下地表径流量较 10° 和 15° 坡度下径流量大, 这与王全九等^[16] 研究结果相一致, 在坡度为 20° 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, 相对长垄沟控蚀效果较差, 导致垄沟内大量积水顺垄坡细沟流下, 使得径流量增加^[17]; 壤中流则表现为 10° 坡度下径流总量最大有 2 方面原因: (1) 该坡度下壤中流产流时间相对较早; (2) 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, 壤中流径流量大小不仅与坡度有关, 而且产流时间一定程

度影响其径流量的大小。不同坡度下,玉米生育期径流量大小总体表现为苗期>成熟期>拔节期>抽雄期,而壤中流径流量大小整体则表现为抽雄期>拔节期>苗期>成熟期,这表明玉米种植条件下,地表径流和壤中流的多少不仅与坡度有关,而且也与玉米生育期密切相关。前期研究^[18]表明,玉米拔节期和抽雄期,由于玉米生长旺盛,叶面积增加,对降雨截留等分配能力最强,故导致地表径流量较低;而在玉米苗期,叶片较小,在成熟期,叶片开始逐渐枯萎弯曲玉米冠层截留降雨能力明显降低,故地表径流量较大。由于降雨总量一定,在降雨过程中,壤中流径流量与地表径流量呈相反的变化趋势。

玉米生育期不同坡度下地表径流 DOC 质量浓度随坡度的增大而增大,且 20°坡度 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 DOC 浓度增大;而壤中流 DOC 质量浓度则表现为随着坡度的增大而减小,且 10°坡度 DOC 质量浓度显著高于其他坡度,这可能与表层土壤 DOC 迁移及大颗粒土壤被破坏其中部分 DOC 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^[19]。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。玉米生育期 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^[15]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。主要原因为:(1)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;(2)与其紫色土特殊土壤—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^[19],同时壤中流也是紫色土坡耕地径流的主要组成方式。不同坡度下玉米各生育期地表径流 DOC 质量浓度表现为苗期>拔节期>成熟期>抽雄期,可能原因为:(1)玉米株高、叶面积一定程度影响了径流的产生和发育,进而影响 DOC 质量浓度;(2)受温度影响,DOC 主要组成为简单的碳水化合物、有机酸及氨基酸^[20],DOC 的吸附能力对土层

温度的变化较为敏感^[21],升温有利于土壤对可溶性有机酸的吸附能力^[22],本研究区随着玉米生育期推进,温度呈不断升高的变化。壤中流 DOC 质量浓度表现为苗期>拔节期>成熟期>抽雄期,抽雄期是研究区玉米全生育期温度最高的一个时期,温度的升高一定程度增强了土壤对 DOC 的吸附能力,淋洗作用减弱,故导致壤中流 DOC 质量浓度降低。地表径流 DOC 迁移通量表现为苗期>成熟期>拔节期>抽雄期,这是因为地表径流 DOC 迁移通量主要由地表径流量和 DOC 质量浓度大小共同决定,两者随玉米生育期推进受降雨再分配作用明显,使得降雨到达地表的时间延长,进而减少了地表径流量大小及降雨与土壤表面接触的面积和时间^[23],导致 DOC 质量浓度降低。壤中流 DOC 迁移通量也表现出同样的变化特征,主要与玉米生育期推进冠层截留等作用有关,同时坡度对其作用也较为明显。

4 结论

(1)随着坡度的增大,地表径流量整体呈现逐渐增大的趋势,且坡度对径流量大小变化影响差异明显;玉米生育期对径流量大小影响明显,表现为苗期最大,抽雄期最小;壤中流产流时间相对地表径流较晚,其径流量大小随坡度的增大而减小,玉米生育期表现为抽雄期最大,成熟期最小。

(2)地表径流 DOC 质量浓度随着降雨历时延长呈逐渐降低的趋势,且 20°坡度下 DOC 质量浓度初值较高,而壤中流 DOC 质量浓度表现为先增大后减小的趋势。

(3)地表径流 DOC 迁移通量随着坡度的增大而增大,玉米生育期表现为苗期最大,抽雄期最小,而壤中流 DOC 迁移通量随坡度的增大而减小。因此通过增加植被盖度,延缓径流的产生,控制径流及改变径流的方式,来减少径流可溶性有机碳的流失。

参考文献:

- [1] 岳遥,倪晋仁,李天宏. 中国典型侵蚀区小流域水力侵蚀引发的 CO₂ 通量特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(2): 219-229.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004, 304 (5677): 1623-1627.
- [3] 李忠武, 陆银梅, 聂小东, 等. 基于坡面径流输沙模型的湘中红壤丘陵区土壤有机碳流失模拟研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(12): 115-124.
- [4] Fröberg M, Dan B, Bo B, et al. Concentration and fluxes of dissolved organic carbon (DOC) in three norway spruce stands along a climatic gradient in Sweden [J].

- Biogeochemistry, 2006, 77(1): 1-23.
- [5] 郭太龙, 谢金波, 孔朝晖, 等. 华南典型侵蚀区土壤有机碳流失机制模拟研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(8): 1266-1273.
- [6] 黄倩, 吴靖霆, 陈杰. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(3): 446-452.
- [7] Shi Z, Yue B, Wang L, et al. Effects of mulch cover rate on interrill erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on steep slopes [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(1): 257-267.
- [8] Ma W, Li Z, Ding K, et al. Effect of soil erosion on dissolved organic carbon redistribution in subtropical red soil under rainfall simulation [J]. Geomorphology, 2014, 226: 217-225.
- [9] 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.
- [10] 聂小东, 李忠武, 王晓燕, 等. 雨强对红壤坡耕地泥沙流失及有机碳富集的影响规律研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 900-908.
- [11] 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.
- [12] Lin C, Tu S, Huang J, et al. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple-soil area of China [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 105(2): 307-312.
- [13] 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.
- [14] 马波, 吴发启, 陈宇, 等. 玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 118-123.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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): 954-963.
- [20] Kalbitz K, Solinger S, Park J H. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. Soil Science, 2000, 165(4): 271-277.
- [21] Kaiser K, Kaupenjohann M, Zech W. Sorption of dissolved organic carbon in soils: Effects of soil sample storage, soil-to-solution ratio and temperature [J]. Geoderma, 2001, 99(3/4): 311-317.
- [22] 喻艳红, 张桃林, 李清曼, 等. 温度和水土比对红壤吸附低分子量有机酸的影响[J]. 土壤, 2011, 43(1): 42-50.
- [23] 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, 51(4): 172-180.
- (上接第90页)
- [8] 费良军, 刘显, 王佳, 等. 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 219-228.
- [9] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [10] 裴青宝, 赵新宇, 张建丰, 等. 容重对红壤水平入渗特性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 111-114.
- [11] 脱云飞, 费良军, 董艳慧, 等. 土壤容重对膜孔灌水氮分布和运移转化的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 6-11.
- [12] 刘小刚, 朱益飞, 余小弟, 等. 不同水头和土壤容重下微润灌溉体内水盐分布特性[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 189-197.
- [13] 曾健, 费良军, 裴青宝. 土壤容重对红壤水分垂直入渗特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(12): 1081-1087.
- [14] 康金林, 杨洁, 刘窑军, 等. 初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 122-126.
- [15] Liang W L, Kosugi K, Mizuyama T. Soil water redistribution processes around a tree on a hillslope: The effect of stemflow on the dry in process [J]. Ecohydrology, 2016, 8(8): 1381-1395.
- [16] Guhr A, Borken W, Spohn M, et al. Redistribution of soil water by a saprotrophic fungus enhances carbon mineralization [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(47): 47-51.
- [17] 刘乐, 费良军, 曾健, 等. 土壤容重对土壤水氮垂直运移影响特征研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 网络优先出版.
- [18] 郭华, 樊贵盛. 考虑土壤结构变形的 Kostiakov 入渗模型参数非线性预报模型[J]. 节水灌溉, 2015(12): 11-15.
- [19] S A 泰勒. 物理的土壤学[M]. 华孟, 陈志雄, 杨苑璋, 等译. 北京: 农业出版社, 1983: 27-86.