

模拟降雨条件下林木裸露根系分布方式对坡面土壤侵蚀的影响

杨秀超¹, 方 乾¹, 尹晓爱¹, 方发永¹, 赵龙山^{1,2,3}

(1.贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2.中国林业科学研究院林业研究所,
北京 100091; 3.贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 为探究喀斯特地区林木根系分布方式对坡面土壤侵蚀的影响, 采用人工模拟降雨方法, 研究林木根系 3 类分布方式: 根系横坡方向局部裸露(横向)、根系顺坡方向局部裸露(顺向)、根系垂直坡面(垂直)的土壤侵蚀特征。降雨强度为 75 mm/h, 降雨历时为 90 min, 坡度为 25°。结果表明: (1) 降雨过程中, 横向和垂直生长根系影响土壤入渗, 壤中流和地下径流产流时间表现为顺向>横向>垂直; 顺向坡面地表径流初始产流时间比横向和垂直坡面略有提前, 但差异不显著 ($p>0.05$); (2) 横向、顺向及垂直坡面地表径流总量大小表现为顺向>垂直>横向, 壤中流与地下径流产流速率在降雨过程中缓慢增加, 降雨停止后急剧减小; (3) 林木根系 3 类分布方式坡面间的地表减沙效益表现为横向>垂直>顺向。综上所述, 顺向坡面的汇流作用促使地表产流产沙增加, 垂直坡面增加土壤降雨入渗并减少侵蚀, 横向坡面对坡面径流泥沙的拦蓄作用最为明显。研究结果对认识喀斯特石漠化坡地土壤侵蚀机理和水土流失防治措施提供了参考。

关键词: 模拟降雨; 喀斯特坡地; 根系分布方式; 地表径流; 地下径流

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0007-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.002

Effects of Distribution Patterns of Tree Bare Roots on Slope Soil Erosion Under Simulated Rainfall

YANG Xiuchao¹, FANG Qian¹, YING Xiaoi¹, FANG Fayong¹, ZHAO Longshan^{1,2,3}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 3. Research Centre for Soil Erosion & Eco-Restoration Sciences, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: In order to explore the effects of tree root distribution pattern on slope soil erosion in karst area under rainfall conditions, using artificial rainfall simulation methods, soil erosion characteristics of three types of tree root distribution were studied. And the three tree root distribution patterns were partial bare surface in the direction of root transverse slope (Horizontal), partial bare surface of root along slope (Oblique) and unexposed surface of root vertical slope (Vertical). The rainfall intensity was 75 mm/h, the rainfall duration was 90 min, and the slope was 25°. The results showed that: (1) During rainfall, roots of trees growing horizontally and vertically both affected soil infiltration. The generation time of mid-soil flow and underground runoff followed the order of Oblique>Horizontal>Vertical. The initial runoff generation time of surface runoff on Oblique slope was slightly earlier than that on Horizontal and Vertical slope, but the difference was not significant ($p>0.05$). (2) The total amount of surface runoff on Horizontal, Oblique and Vertical slopes followed the order of Oblique>Vertical>Horizontal. The flow velocity rate of the mid-soil flow and underground runoff increased slowly in the process of rainfall and decreased sharply after rainfall stopped. (3) The surface sediment reduction benefits of three types of forest root distribution patterns followed the order of Horizontal>Vertical>Oblique. In conclusion, the confluence effect of Oblique slope promoted the increasing of surface runoff and sediment yield, while the Vertical slope increased soil rainfall infiltration and reduced erosion, and the Horizontal slope had the most obvious effect on the retention

收稿日期: 2021-12-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(41867014); 贵州省科技计划项目(黔教合支撑[2002]一般 202); 贵州省高等学校科技拔尖人才项目(黔教合 KY 字[2021]025); 中国博士后科学基金项目(2020M670527)

第一作者: 杨秀超(1993—), 男, 贵州平塘人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: jay815@qq.com

通信作者: 赵龙山(1985—), 男, 甘肃古浪人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: longshanzh@163.com

of runoff and sediment on the slope. The results could provide a reference for understanding soil erosion mechanism and soil erosion control measures of karst rocky desertification slope land.

Keywords: simulated rainfall; karst slope; root distribution pattern; surface runoff; underground runoff

土壤侵蚀是影响全球生态和农业可持续发展的重要问题之一,由此引发的土地退化、生产力降低、河流泥沙淤积等问题突出^[1]。在喀斯特广泛分布的西南地区,严重的土壤侵蚀导致该区的土地石漠化问题加重^[2]。为了防治该区严重的土壤侵蚀,植被恢复措施^[3]被普遍用于治理土壤侵蚀与生态重建上。

对植被措施防治水土流失作用进行的大量研究主要表现在植被地上部分削减降雨动能^[4]、根系^[5]增加降雨入渗和提高土壤抗蚀性^[6]方面。Weaver 等^[7]的研究认识到根系在控制土壤侵蚀方面的重要性,根系作为土壤优先流^[8]的积极影响因素,在提高降雨入渗的同时也能有效固持水土。在喀斯特坡地水土流失治理中,基于根系与土壤形成的结合体能提高土壤抗冲性,有效减缓坡面土壤侵蚀^[9]。刘定辉等^[10]的研究表明,植物地上部分可直接调节并吸收地表径流,植物地下部分间接影响水土流失,在根系影响土壤物理性质的作用下土壤的透水性发生改变。

植被根系分布情况影响土壤水力学性质,其中包括根系密度、分枝特性和空间分布等。在生态恢复坡地上由于降雨侵蚀及人类活动作用下,根系空间分布发生改变,坡面浅土层被搬运、剥离,导致根系不断裸露地表^[11]。孙丽萍等^[12]的研究表明,在不同侵蚀强度下,林木根系裸露地表差异大,呈现出浅埋、局部裸露及完全裸露的形态。此外,Malik 等^[13]的研究指出,根系分布方式有垂直分布、斜向分布和水平分布,受土壤侵蚀的影响,林木根系在斜向及水平方向上裸露长度达 0.4~1.4 m。可见,在植被根系生长过程中,受根系分布方式^[14]多样化和土壤侵蚀作用的影响,根系裸露地表形成坡面空间差异性。但是,根系分布方式对坡地土壤侵蚀的影响并没有被定量研究,其侵蚀特征仍不清楚。

因此,本文通过人工模拟降雨的方法,将坡面林木根系 3 类分布方式作为研究对象,即沿坡面顺向生长局部裸露在地表的林木根系、坡面横向生长局部裸露在地表的林木根系和垂直坡面生长的林木根系进行人工模拟降雨试验,为认识喀斯特坡地水土流失过程与机理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

土壤类型为黄壤,呈酸性,黏性较石灰土强,取自贵州省花溪区(26°28′32″N,106°42′02″E)坡地 0—20 cm 的表土。试验土样取回,经自然风干,去除土壤中

的砾石、动植物残体等杂物,用 5 mm 孔径筛子筛取。试验土壤容重为 1.2 g/cm³,土壤含水率为 10%,通过测定得出土壤机械组成为:黏粒 31.05%,砂粒 41.37%,粉粒 27.58%,有机质含量 33.94 g/kg。

1.2 试验设计与装置

模拟降雨试验于 2021 年 6—8 月在贵州大学南校区水土保持降雨大厅内完成。设置的降雨强度为 75 mm/h,降雨历时 90 min。喀斯特地区坡地土壤浅薄,林木根系分布方式空间异质性高,在岩石表面的浅薄土层区,表现出林木根系穿插在岩石裂隙、攀附锚固在岩石上;由于多年降雨的因素致使林木部分根系裸露地表的现象相对普遍。试验设计 3 种坡面根系布置处理,分别为根系横坡方向局部裸露(横向)、根系顺坡方向局部裸露(顺向)和根系垂直坡面(垂直)。

降雨仪器使用下喷式降雨机,仪器组成有:降雨喷头、供水管道、供水电泵和电脑控制器。通过电脑控制器调控降雨喷头上的电磁阀控制开度来调节降雨强度的大小,该仪器降雨强度的变化为 20~150 mm/h,降雨高度为 4 m,降雨均匀度>80%,可实现有效降雨面积为 4 m×4 m。

模拟降雨试验所用土槽规格(长×宽×高)为 1 m×0.5 m×0.3 m 的钢槽见图 1。本研究试验坡度为 25°。钢槽下部设置 3 个集流口,上、中、下分别接取地表径流、壤中流及地下径流。钢槽底部有 5 条 0.46 m×0.005 m(长×宽)用于模拟喀斯特地区地表裂隙^[15],发育等级为轻度发育(2.3%),地下径流从裂隙流出,通过下端集流口收集。在钢槽旁边左右两侧木凳上各放置 5 个带刻度的塑料杯(1 000 mL),用于校对降雨强度。

试验土槽中林木根系通过挖掘法^[16]得到,确保根系完整性。林木根系 3 类分布方式的土壤体积为(长×宽×深)100 cm×50 cm×20 cm,根长密度为 0.001 cm/cm³;根系径级为粗根(15~20 mm),根体体积密度为 7.770 mm³/cm³,横向、顺向及垂直坡面上根系数量分别为 8,4,20 根。林木根系分布方式见图 1。处理模拟为:(1)针对根系横坡方向局部裸露(横向)的处理,在土壤装填完毕后,将根于横坡方向半埋入土表中,根系左右两端接触钢槽内壁为防止因降雨形成坡面流产生的动能迫使根系位置改变;(2)对于根系顺坡方向局部裸露(顺向)的处理,方法同上,根于顺坡方向半埋入土表,根系上下两端接触钢槽上下

内壁,横向和顺向坡面均为模拟喀斯特地区林木根系因多年土壤侵蚀而裸露地表的情况;(3)在根系垂直坡面(垂直)的处理上,方法与前两者不同,20 根粗根系分为 5 份,均匀竖直放置于 5 条裂隙上,每条裂隙 4 根根系,分层填装土壤,部分树干保留于土表上。本研究中林木根系 3 类分布方式坡面处理,土槽的土壤容重均为 1.2 g/cm^3 ,土层深度为 20 cm,土壤填装过程为分层(5 cm)填土,各层填完后刮毛处理后继续填土。

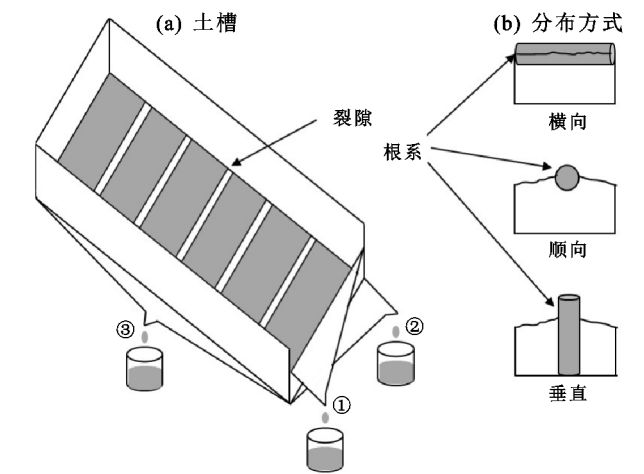


图 1 试验土槽及林木根系不同分布方式坡面布设示意

1.3 模拟降雨试验

土壤填装、根系布设完成后,进行试验前的预降雨,降雨历时 30 min,降雨强度为 20 mm/h,预降雨结束后,静置 12 h,以减少土壤填装及根系布置对研究结果的影响。

模拟降雨试验开始前,先对降雨强度进行校对,在电脑控制器端将降雨强度设定为 75 mm/h,保证误差低于 5%。观察每个集流口,出现产流时记录初始产流时间,同时收集径流泥沙样,间隔 2 min 更换样品收集瓶(1 000 mL),降雨历时 90 min。地表集流口无产流时不再接取,为观察降雨停止后壤中流和地下径流的产流变化,在降雨结束后继续接取 20 min。模拟降雨结束后,对样品称重并记录。样品静置 12 h 后,倒去上清液,将底部泥沙用滤纸过滤,放于烘箱(100 ℃,8 h)烘干后称重。

1.4 数据处理

平均产流时间、平均产流率、径流总量及产沙量等数据经 Excel 2019 处理,产流时间对比、径流率及产沙量变化情况通过 Origin 2021 软件制图,采用 SPSS 20.0 软件进行数据单因数方差分析。

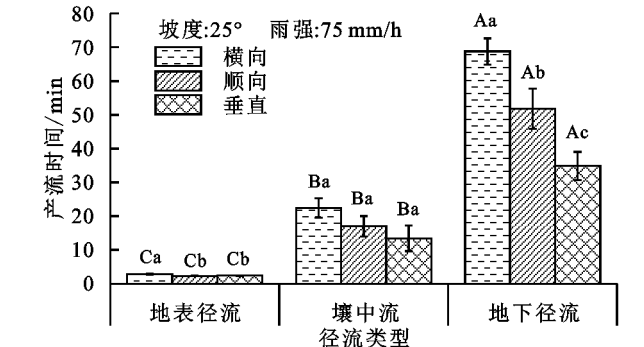
2 结果与分析

2.1 林木根系分布方式对坡面初始产流时间的影响

初始产流时间是喀斯特坡地土壤侵蚀过程的响应指标,受林木根系分布空间异质性和土壤初始含水

量影响。在降雨起始阶段,降雨主要转化为土壤入渗,坡面无径流产生。当坡面土壤含水量达到饱和时,坡面产流开始。从图 2 可以看出,在模拟降雨条件下,受坡面林木根系不同分布方式的影响,坡面不同径流类型产流时间存在显著差异($p<0.05$)。

顺坡根系局部裸露时减少坡面汇流时间,然而横坡根系局部裸露时增加坡面汇流时间。顺向地表径流初始产流时间相对较短,为 2.3 min,垂直和横向坡面相对滞后 10%~12%。坡面入渗的降水沿着土壤中不透水层界面流动形成壤中流,壤中流优先产流的垂直坡面为 13.4 min,顺向和横向产流相对延后,是垂直坡面的 1.3~1.7 倍。当土壤入渗性能降低,含水量达到饱和,部分土壤水分继续向下运移通过裂隙流出形成地下径流。根系 3 类分布方式坡面地下径流产流时间达到 35~70 min,优先产流的为垂直坡面 35 min,相对滞后的横向为 69 min。



注:不同小写字母表示同种径流类型根系不同分布方式初始产流时间差异显著($p<0.05$);不同大写字母表示同种根系分布方式不同径流类型初始产流时间差异显著($p<0.05$)。

图 2 林木根系不同分布方式坡面径流初始产流时间

2.2 林木根系分布方式对地表径流速率的影响

林木根系不同分布方式坡面径流量和产沙量随降雨历时呈现差异变化,因此本研究试验将降雨前期、中期、后期和降雨停止结束后,划分阶段为:第 1 阶段(0~30 min)、第 2 阶段(30~60 min)、第 3 阶段(60~90 min)和降雨停止阶段(90~110 min)进行数据描述性分析^[17]。

坡面水土流失的重要因素为降雨产生的坡面径流,探究坡面林木根系不同分布方式的径流变化规律,为了解坡面侵蚀过程提供指导方向。由图 3 可知,在第 1,2 阶段,横向和垂直坡面的地表径流产流速率相对稳定,无显著差异($p>0.05$),顺向坡面地表径流产流速率是垂直和横向坡面的 2.71~2.97 倍。在降雨第 3 阶段,横向地表径流产流速率开始增长,增幅仅为 11.7%;垂直坡面增幅为 80.1%,相对横向坡面稍高,但远低于顺向坡面。通过分析整场降雨发现,顺向坡面地表径流产流速率随降雨历时而增加,从初始地表径流产流速率递增到峰值,增幅达到 3.83

倍。顺向坡面地表径流平均产流速率分别是垂直和横向坡面地表径流平均产流速率的 2.95,3.37 倍。

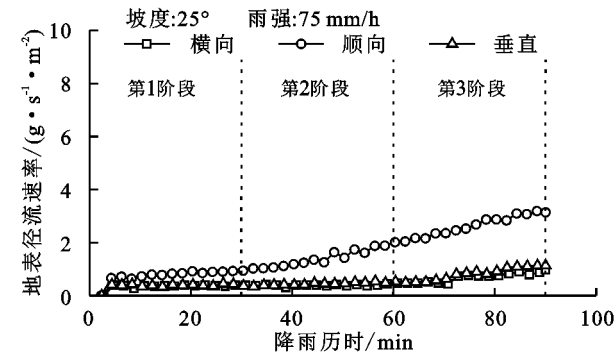


图 3 林木根系不同分布方式坡面地表径流产流速率

2.3 林木根系分布方式对壤中流速率的影响

林木根系不同分布方式坡面壤中流产流速率变化过程见图 4。在降雨第 1 阶段,横向坡面壤中流速率高于顺向和垂直坡面,是顺向和垂直坡面的 1.76~15.24 倍;降雨第 2 阶段时,垂直坡面的壤中流速率开始增长,但横向和顺向壤中流速率是垂直坡面的 4.07~5.98 倍;在降雨前 3 个阶段,垂直坡面的壤中流速率显著增加($p<0.05$),增幅达 72.32 倍,横向和顺向坡面增幅分别为 3.88,4.14 倍。降雨过程中,3 个类型坡面壤中流速率呈上升后趋于稳定,横向、顺向和垂直坡面壤中流峰值速率趋同,无显著差异($p>0.05$)。降雨停止后,因缺乏降雨补充导致壤中流速率逐渐下降,垂直坡面下降较为明显。根系 3 类分布方式壤中流平均产流速率大小表现为顺向略高于横向,无显著差异($p>0.05$),但两者都显著高于垂直坡面($p<0.05$)。

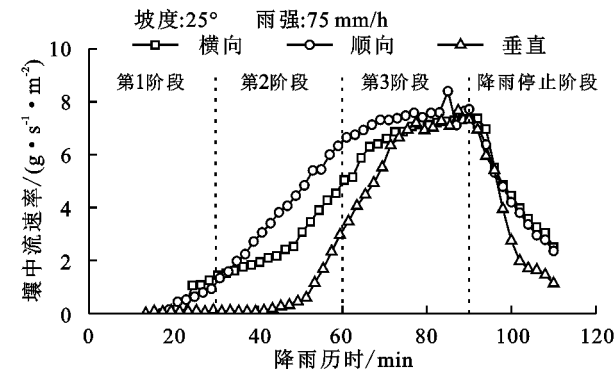


图 4 林木根系不同分布方式坡面壤中流产流速率

2.4 林木根系分布方式对地下径流速率的影响

从图 5 可以看出,降雨第 1 阶段,根系 3 类分布方式坡面产流类型为地表径流和壤中流,地下径流未形成。通过降雨第 2 阶段可以发现,土壤优先流表现在垂直方向的林木根系上较为明显,为降雨入渗提供一定的下渗通道。垂直坡面的地下径流产流速率显著高于顺向和横向坡面($p<0.05$),第 2 阶段横向坡面地下径流未形成。降雨第 3 阶段,垂直坡面地下径流产流速率达到峰值,横向和顺向产流速率峰值为垂

直坡面的 92.07%,75.50%。降雨停止后,坡面无外来供水,根系 3 类分布方式地下径流产流速率急剧下降后趋于缓和,顺向地下径流产流速率下降高达 80 倍,横向次之,为 50 倍,垂直不超过 4 倍,表现出显著差异($p<0.05$)。

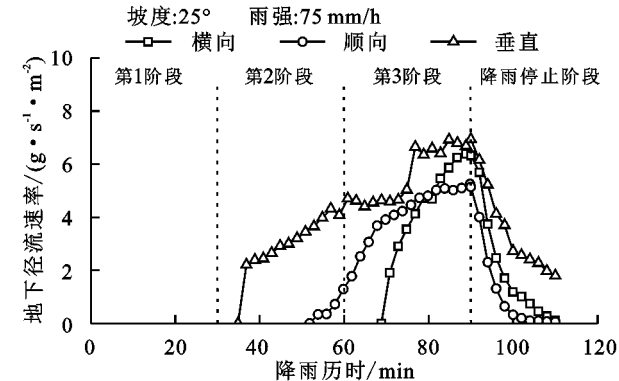


图 5 林木根系不同分布方式坡面地下径流产流速率

2.5 林木根系分布方式对坡面径流分配的影响

人工试验模拟降雨条件下,林木根系 3 类分布方式坡面径流分配存在显著差异($p<0.05$)。从图 6 可以看出,根系 3 类分布方式地表径流的分配比例较小,仅为 6.62%~19.46%,其中顺向地表径流为 19.46%,显著高于横向和垂直坡面($p<0.05$)。顺向和横向壤中流分配比例为 59.20%,66.78%,垂直坡面低于前两者为 42.33%。垂直坡面生长的林木根系促进地下径流的发生,分配比例为 50.06%,显著高于根系横坡方向局部裸露和根系顺坡方向局部裸露的地下径流分配比例($p<0.05$)。根系 3 类分布方式坡面径流分配主要贡献在壤中流和地下径流上,横向和顺向坡面分配比例均高于 80%,而垂直坡面分配比例超过 90%。

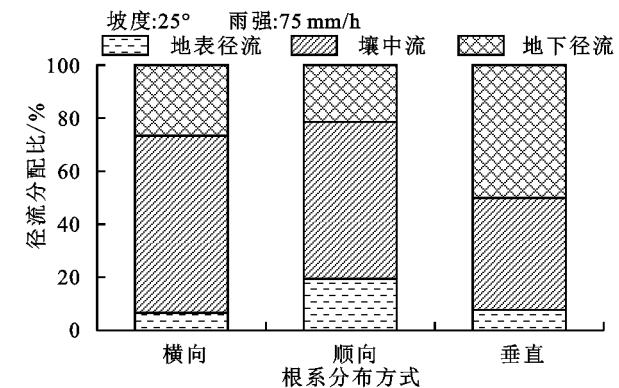
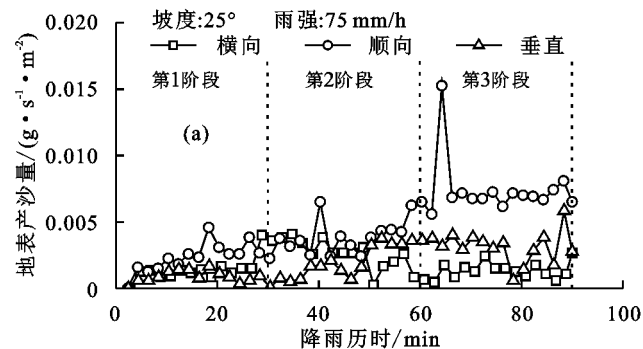


图 6 林木根系不同分布方式坡面径流分配比例

2.6 林木根系分布方式对坡面产沙的影响

坡地产沙曲线是描述林木根系分布方式坡面地表侵蚀过程的重要参数特征,作为坡面地表径流对坡地土壤流失的重要体现。通过图 7a 分析地表产沙量变化特征,降雨第 1,2 阶段,顺向坡面地表径流挟沙能力大于横向和垂直坡面,顺向地表产沙量为其他 2

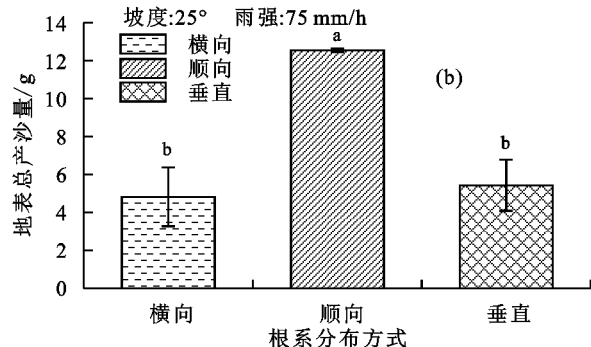
类分布方式的 1.62~2.18 倍。降雨第 3 阶段,顺向坡面地表径流产流速率增加,导致径流搬运泥沙的能力提高,顺向地表产沙量显著高于其他 2 类分布方式 ($p<0.05$),分别是垂直和横向坡面的 2.39,5.41 倍。通过分析整个降雨阶段认识到坡地产流产沙过程受林木根系分布方式的影响,坡面林木根系 3 类分布方



注:(b)图中不同字母表示不同根系分布方式间差异显著($p<0.05$)。

图 7 林木根系不同分布方式坡面地表产沙量变化及地表产沙总量

式地表产沙量表现为顺向>垂直>横向。根据图 7b 说明,坡面林木根系不同分布方式的地表产沙总量存在差异($p<0.05$),顺向增加坡面水土流失;横向对于坡面径流和泥沙具有削减效益;垂直方向增加降雨入渗,削弱径流挟沙能力。顺向、垂直和横向 3 个坡面的地表产沙量分别为 12.54,5.44,4.83 g。



3 讨论

研究^[18]表明,土壤中存在根系能改善土壤结构,从而提高土壤稳定性,为此本研究开展了坡面林木根系 3 类分布方式对坡面土壤侵蚀的影响研究。结果表明,随着降雨历时的增加,坡面地表径流量和产沙量呈先增加后趋于稳定的趋势;坡面壤中流和地下径流呈增加趋势;降雨停止后坡面产流速率急剧减少,其中坡面地表停止产流产沙,但壤中流和地下径流保持产流呈减少趋势。并且顺向坡面的地表产流时间相对横向和垂直坡面略有提前,垂直坡面的壤中流和地下径流产流时间相对低于横向和顺向坡面。总体上表现为顺向坡面地表产流显著高于横向和垂直坡面($p<0.05$),后两者产流分配主要表现在壤中流和地下径流上。在喀斯特地区的生态恢复过程中,植被根系^[19]分布方式对坡面产流形成一定的影响。

根系裸露地表增加了地表糙度,一定程度上起到减缓坡面水土流失的作用。本研究发现,受降雨前期土壤含水量、土壤孔隙度和坡面根系分布方式影响,降雨优先入渗到土壤中去,使得坡面地表径流产流分配比例较低,与相关的研究^[20-21]结果相一致。根系不同分布方式坡面径流类型之间的产流时间差异显著($p<0.05$),地表径流产流时间不超过 5 min,壤中流和地下径流产流时间分别是地表径流的 3~5,7~12 倍。

降雨过程中,坡面土壤受雨滴机械打击和消散作用,细小土壤微粒在土壤表面的沉积使得土壤表面形成地表结皮,从而促进地表径流的形成^[22]。根系顺坡方向局部裸露对坡面降雨汇流及导流作用加速坡面地表径流的发生,使得地表产流分配比例为 19.46%,显

著高于横向和垂直坡面($p<0.05$);邵一敏等^[23]的研究指出,根系垂直坡面增加土壤坡面的孔裂隙。本研究表明,坡面径流分配表现出壤中流和地下径流分配比例分别为 42.33%,50.06%,显著高于地表径流分配比例。根系横坡方向局部裸露形成微型洼地,对坡面降水起到蓄积和土壤入渗作用,使得径流发生相对滞后,在坡面径流分配比例上表现出地表径流仅为 6.62%,壤中流分配比例最高达到 66.78%。

坡面局部裸露和地下垂直生长的根系在调控坡面水土流失方面发挥着不同作用,各自的相对贡献也呈现差异^[8-10]。在坡面降雨侵蚀作用下,根系横坡方向局部裸露能够抑制坡面产流产沙,地表产沙量和产沙总量低于垂直和顺向坡面,地表产沙总量仅为 4.83 g。垂直根系与土壤间的孔裂隙形成水路通道有助于土壤水的向下运移,抑制坡面径流泥沙的发育,地表产沙总量略高于横向,差异不显著($p>0.05$)。而根系顺坡方向局部裸露和前两者相反,加速地表径流的形成,增强径流挟沙能力,顺向坡面的地表产沙总量是横向和垂直坡面的 2 倍以上。

西南喀斯特坡地的土壤侵蚀规律受坡度、降雨及植被等影响,还与坡地根系分布方式密切联系。坡面侵蚀的主要因素为降雨造成的水土流失,而坡地根系分布方式对降雨侵蚀的响应可以作为坡面水土流失治理的科学依据。本试验为探究降雨条件下喀斯特地区坡地根系方式对坡面土壤侵蚀的影响时,仅设计部分坡面林木根系分布方式对降雨侵蚀的响应,未能考虑到根系系统^[24]的复杂性和空间异质性对坡面降雨形成的土壤侵蚀规律研究。为此,在今后的科学研究中,需要增设不同的降雨梯度以及根系分布方式,

为达到更加系统、综合分析降雨条件下喀斯特地区坡地根系分布方式对坡面土壤侵蚀的影响。

4 结论

(1)降雨前期受坡地根系分布方式和土壤含水量的影响,壤中流和地下径流产流时间表现为垂直>横向>顺向。顺向地表径流发生时间较短,横向和垂直坡面地表径流略微滞后。

(2)坡地根系分布方式对降雨侵蚀的响应特征表现出差异性,横向和垂直坡面地表径流产流速率显著低于顺向($p<0.05$),顺向地表产沙量和产沙总量显著高于横向和垂直坡面($p<0.05$)。

(3)横向、顺向及垂直坡面的地表径流分配比例显著较低($p<0.05$),顺向坡面地表径流显著高于两者为19.4%。横向和顺向坡面壤中流和地下径流分配比例总和均高于80%,而垂直坡面分配比例总和超过90%。

由此可见,在全球气候变化的背景下,各地极端降雨高度频发,喀斯特坡地土壤侵蚀可能因此增加。对此,在喀斯特地区根系分布方式坡面土壤侵蚀规律的研究需要引起重视,从而为喀斯特地区水土保持工作提供科学依据。

参考文献:

[1] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.

[2] 王世杰,李阳兵,李瑞玲.喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J].第四纪研究,2003,23(6):657-666.

[3] 穆兴民.黄土高原土壤水分与水土保持措施相互作用[J].农业工程学报,2000,16(2):41-45.

[4] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) [M]. United States: Agricultural Research Service,1997.

[5] 杨青,杨广斌,赵青松,等.喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J].水土保持通报,2020,40(1):9-16.

[6] Morgan R P C, Rickson R J. Slope stabilization and erosion control: A bioengineering approach [M]. London: Taylor and Francis,2003.

[7] Weaver J E, Kramer J. Relative efficiency of roots and tops of plants in protecting the soil from erosion[J].Science,1935,82(2128):354-355.

[8] 张英虎,牛健植,朱蔚利,等.森林生态系统林木根系对优先流的影响[J].生态学报,2015,35(6):1788-1797.

[9] 沙小燕,李魁,王文龙,等.黄土高原沟壑区草地沟头立壁土

壤抗冲性特征[J].应用生态学报,2022,33(1):133-140.

[10] 刘定辉,李勇.植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J].水土保持学报,2003,17(3):34-37,117.

[11] 屈东旭,吕刚,翟景轩,等.科尔沁沙地南缘不同林草措施根系对土壤抗冲性的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):21-25.

[12] 孙丽萍,王小丹.基于根系解剖结构的金沙江干热河谷土壤侵蚀速率估算[J].地理科学,2012,32(4):492-498.

[13] Malik I, Matyja M. Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over the last 100 years (BíláOpava River-Czech Republic) [J]. Geomorphology, 2008, 98(1):126-142.

[14] Mawodza T, Burca G, Casson S, et al. Wheat root system architecture and soil moisture distribution in an aggregated soil using neutron computed tomography [J].Geoderma,2020,359:113988-113998.

[15] 李焱秋,戴全厚,甘艺贤,等.喀斯特裸坡地径流对降雨强度与坡度的响应[J].水土保持学报,2019,33(5):28-33.

[16] 张小全,吴可红, Dieter M.树木细根生产与周转研究方法评述[J].生态学报,2000,20(5):875-883.

[17] Rodrigo-Comino J, Seeger M, Iserloh T, et al. Rain-fall-simulated quantification of initial soil erosion processes in sloping and poorly maintained terraced vineyards: Key issues for sustainable management systems[J].Science of the Total Environment,2019,660:1047-1057.

[18] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.

[19] 欧阳帅,项文化,陈亮,等.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J].水土保持学报,2021,35(5):1-9.

[20] 秦东远,肖培青,郝仕龙,等.黄丘区野外坡面产流产沙过程对不同植被覆盖结构的响应[J].水土保持学报,2019,33(2):73-78.

[21] 李建兴,何丙辉,谌芸.不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2013,33(5):1535-1544.

[22] Assouline S. Rainfall-Induced soil surface sealing[J]. Vadose Zone Journal,2004,3(2):570-591.

[23] 邵一敏,赵洋毅,段旭,等.金沙江干热河谷典型林草地植物根系对土壤优先流的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):725-734.

[24] Kajimoto J. Root system development of larch trees growing on Siberian Permafrost [M].Permafrost Eco-systems,2010:303-330.