

# 林道修建和采伐作业对桉树人工林土壤侵蚀的影响

王一佩<sup>1,2</sup>, 薛雨<sup>1</sup>, 杨钙仁<sup>1,2</sup>, 苏晓琳<sup>1</sup>, 武鹏帅<sup>1</sup>, 温志良<sup>1</sup>, 邓羽松<sup>1,2</sup>

(1.广西大学 林学院, 南宁 530004; 2.广西大学 生态工程研究所, 南宁 530004)

**摘 要:**为研究林道修建和采伐与集材作业对桉树人工林土壤侵蚀的影响,对采伐后 1 年的桉树人工林集水区林道崩塌、路基沟蚀、河道泥沙淤积量等进行了测量,并监测了采伐前后各 1 年间河水泥沙含量和输沙量变化。结果表明:桉树人工林林道密度为 15.1 km/km<sup>2</sup>,集材过程形成的滑木道密度为 11.2 km/km<sup>2</sup>。采伐后 1 年,有 73% 的林道产生路基侵蚀沟,集水区河水泥沙年均含量为 0.57 kg/m<sup>3</sup>,比采伐前高 185%;土壤侵蚀模数为 1 613 t/km<sup>2</sup>,是采伐前的 15 倍,有 61.9% 的侵蚀泥沙输出至集水区外,99.5% 土壤侵蚀发生在雨季。采伐后的桉树人工林土壤侵蚀主要策源地为林道侵蚀沟、林道边坡,分别占侵蚀总量的 28.3%,20.5%,林道修建因素直接贡献率在 48% 以上。构建良好的林道排水沟和边坡稳固系统,可减少桉树人工林采伐后第 1 年 48% 以上的土壤侵蚀。

**关键词:**土壤侵蚀;边坡崩塌;林道侵蚀沟;泥沙含量;桉树人工林

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0001-06

## Effects of Road Construction and Logging on Soil Erosion in *Eucalyptus* Plantation

WANG Yipei<sup>1,2</sup>, XUE Yu<sup>1</sup>, YANG Gairen<sup>1,2</sup>, SU Xiaolin<sup>1</sup>,

WU Pengshuai<sup>1</sup>, WEN Zhiliang<sup>1</sup>, DENG Yusong<sup>1,2</sup>

(1.Forestry College, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2.Eco-engineering Institute, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to better understand the effects of forest road construction and logging on soil erosion in *Eucalyptus* plantation, annual (after timber harvesting) erosion amount of road collapse and ditch, river sediment deposition were measured, the river sediment content and discharge during one year before and after harvesting were observed. The results showed that the road density was 15.1 km/km<sup>2</sup>, skid trail density was 11.2 km/km<sup>2</sup>; there were about 73% of forest roads generating ditches in the first year after harvesting; the annual mean sediment concentration of the river was 0.57 kg/m<sup>3</sup> in the first year after harvesting, it was 185% higher than that of before harvesting; the annual erosion modulus in the first was 1 613 t/km<sup>2</sup>, which is 15 times of before harvesting, and there was about 99.5% of sediment yielding in the rainy season; about 61.9% of sediment output from the catchment was transferred out of the catchment. The major sources of erosion were road ditch and road slopes, the percentages of soil erosion were 28.3% and 20.5%, respectively, more than 48% of erosion was caused by road construction. A good gutter and slope solid system will reduce more than 48% of sediment yields of the first year after harvesting in *Eucalyptus* plantation.

**Keywords:** soil erosion; slope collapse; erosion gully; sediment concentration; *Eucalyptus* plantation

桉树(*Eucalyptus robusta* Smith)因其生长速度快、轮伐周期短等特点而得到快速发展,全球种植面积超过 2 000 万 hm<sup>2</sup><sup>[1]</sup>,在中国,种植面积已达 450 万 hm<sup>2</sup>,轮伐周期一般为 5~7 a<sup>[2]</sup>。广西的桉树人工

林面积为 205 万 hm<sup>2</sup>,占全国总量的 45% 以上。桉树的快速生长主要基于对其频繁抚育(如除草、追肥等)和肥料的大量投入,为高效进行上述抚育工作以及木材采运,需要有一定密度的林道。在过去,我

国林道建设严重滞后,林区路网平均密度不足  $1.5 \text{ m/hm}^{2[3]}$ ,比西方国家尤其是发达国家如德国(集材道密度为  $57.2 \text{ m/hm}^2$ )的低许多<sup>[3]</sup>,严重影响我国人工林的经营效率。

近十多年来,随着我国人工林尤其是短周期人工林经营水平的提高,林道建设得到了快速发展。林道的修建一方面有利于林业经营效率的提高,另一方面,大面积的边坡挖填方、弃方和路面等工程创面,彻底改变了土层结构和土壤理化性质,形成新的面蚀和沟蚀<sup>[4]</sup>。采伐作业也加剧了水土流失,重型机械作业和伐倒的木材收集等,严重破坏林下植被和表土结构<sup>[5]</sup>,使得采伐后土壤流失量大幅度增加。此外,采伐后的再造林或萌芽林的抚育(如炼山、挖坑植苗、松土培肥、除草等)活动,也会加剧土壤侵蚀<sup>[6]</sup>。以往有关桉树人工林土壤侵蚀的研究主要集中在以下几个方面,一是桉树取代乡土次生林对土壤侵蚀的影响,相关研究表明,更替后土壤理化性质发生显著变化,土壤侵蚀加剧<sup>[7]</sup>;二是桉树采伐对土壤侵蚀的影响,研究表明,采伐后产流量增加,同时,地被物遭到破坏,土壤侵蚀加剧<sup>[8]</sup>;三是炼山的影响,炼山改变土壤质地,可能减少土壤有机质含量、改变土壤团聚体稳定性和斥水性<sup>[9]</sup>,同时产流量会增加<sup>[10]</sup>,从而加剧土壤侵蚀<sup>[11]</sup>;四是不同的采伐剩余物处置方式对土壤侵蚀的影响,清理剩余物加剧土壤侵蚀<sup>[12]</sup>。以往研究中,有关桉树人工林的研究主要聚焦某一或某些因子(因素)对土壤侵蚀总量的影响,同时,涉及林道因素的研究少有报道,研究的尺度跨度较大,从集水区<sup>[13]</sup>到径流小区( $100 \text{ m}^2$ 左右)<sup>[12,14]</sup>,而有关各策源地对集水区土壤侵蚀总量的贡献未见有报道。林道修建和采伐作业本质上导致植被覆盖度降低,表土裸露,降雨过程加剧了土壤侵蚀,但针对集水区尺度的研究方法也较为稀缺。本研究的主要目的,一是了解经营活动频繁的桉树人工林的林道特征及其土壤侵蚀状况,二是通过监测河流流量和泥沙输移特征从而揭示桉树采伐后引起的水文变化规律,三是弄清桉树采伐后土壤侵蚀主要来源及其变化规律,以便为今后的桉树人工林水土保持提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 样地概况

研究样地位于广西国有高峰林场界牌分场内,研究区的气候、地形地貌等信息见文献<sup>[15]</sup>。样地为面积为  $28.1 \text{ hm}^2$  的闭合集水区,海拔  $172 \sim 265 \text{ m}$ ,坡度为  $10^\circ \sim 30^\circ$ (沟谷除外),平均坡度  $24^\circ$ 。集水区内有集水线 8 条,小河 1 条。土壤类型为发育较好的赤红

壤,土层厚度  $50 \sim 100 \text{ cm}$ ,山脊地带有小石块(砂页岩)。现为桉树人工纯林,桉树造林前茬为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)—杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)混交林,采伐迹地经过炼山清理后,采用穴垦整地方式造林。2008 年 4 月造林,桉树品种为“广林 9 号”无性系组培苗,苗高  $15 \sim 20 \text{ cm}$ 。造林规格为  $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ ,造林密度为  $1650 \text{ 株/hm}^2$ 。造林前,修建有一宽度约  $3 \text{ m}$  的简易林道,造林后第二年林道弃养,弃养后林道开始冲蚀、崩塌,路基变窄,部分路段中断。2014 年 5 月 1—3 日,为运输木材,对林道进行了扩建和清道。2014 年 5 月 2—7 日,对集水区内的桉树进行皆伐。

集水区内建有自动流量和气象观测站,可观测河流径流量、降雨量、空气温湿度、风速等。

### 1.2 调查与测试方法

为了保证试验监测的时间便于进行比较,林道修建进行采伐作业时,于 2014 年 5 月 6—9 日进行(1)、(2)项测量,林道修建以及采伐作业之后时隔 1 年,于 2015 年 5—8 日进行(3)—(5)项的测量。

(1) 林道、滑木道和河道长度测量。采用高精度 GPS 面积测定仪(KEPLER (Australia) Power Technology Pty. Ltd)长度测量功能(精度  $1.0 \text{ m}$ )测量林道和河道长度,测量时手持面积测定仪沿林道、滑木道或河道匀速行走,面积测定仪自动记录轨迹并计算路径长度。采用皮尺测量滑木道长度及其集水面宽度(测量上、中、下 3 部位),并测量坡度。

(2) 林道土方开挖量测量。在林道上每隔  $80 \sim 100 \text{ m}$  设一个测量断面(近似直角三角形),用卷尺测量林道路堑边坡高度和宽度。测量精度为  $0.001 \text{ m}$ ,共测量断面 48 个。

(3) 林道边坡崩塌、溜坡量测量。用卷尺测量路堑和路堤边坡坍塌的土堆体积,典型土堆为不完整的圆锥体或三角锥体,测量其高度、半径、弦长、弧到弦距离等,上述数据用于计算崩塌土堆体积。同时在崩塌处附近,用环刀( $100 \text{ cm}^3$ )取样(每个测量点 2 个样),测定土壤容重。

(4) 林道路面侵蚀沟侵蚀量测量。对林道上的侵蚀沟,每隔  $60 \sim 100 \text{ m}$  设一个测量断面(半圆形),用卷尺对侵蚀沟的深度、沟面宽度等进行测量。测量精度为  $0.001 \text{ m}$ ,共测量断面 52 个。同时在侵蚀沟附近没有明显被车辆碾压的路面用环刀( $100 \text{ cm}^3$ )取样,共采集 104 个环刀样,测定土壤容重。

(5) 河床泥沙淤积量。因采伐前桉树林地的土壤侵蚀较轻,淤积至河床的泥沙量少,淤积的泥沙主要来自林地表层的熟土,其颗粒细、颜色为灰色,而

采伐作业后,侵蚀至河床的泥沙主要来自新形成的侵蚀面(如林道开挖、木材集运等形成的新创面),颜色较鲜艳(红棕色),因此可通过颜色的不同判断采伐作业后 1 年来淤积在河床上的泥沙分布。于 2015 年 5 月 7—8 日(采伐作业后 368 d)对集水区内河道河床上新淤积的泥沙量进行测量。在河床上,每隔 25~30 m 设置 1 个测量断面(矩形、扇形或梯形),测量河新泥沙层宽度(上下底宽)和厚度,并用环刀(100 cm<sup>3</sup>)取样 3 个,带回实验室测定其容重和水分含量,计算淤积量。

(6) 典型暴雨过程径流泥沙含量。为保证雨强相近监测降雨过程中径流泥沙的含量,分别选择 2013 年 8 月 23 日(采伐前 254 d)和 2014 年 7 月 15 日(采伐后 58 d)的 2 个雨天(降雨量分别为 40.1, 41.2 mm, 降雨历时分别为 2.3, 2.5 h),在集水区内各种径流断面,设置径流泥沙含量采样点,其中滑木道选择 6 条(分别设置上、中和下坡采样点各 1 个);从山脚至山顶,将林道平均划分为下、中和上段,在各段的侵蚀沟设置采样点各 3 个;坡面径流的采样方法见文献[15—16]。在降雨开始 1 h 后,每隔 15 min 采集 1 次水样(采样量 1 000 ml),每个采样点共采集水样 4 次。水样泥沙含量采用烘干法分析<sup>[17]</sup>。

(7) 径流量与输沙量观测。于 2013 年 5 月 6 日(采伐前 366 d)—2015 年 5 月 5 日(采伐后 365 d),进行集水区河流径流量和泥沙含量观测。

径流量观测:在集水区出水口处建有巴歇尔槽流量自动观测设施,在量水堰坝前,建有一长宽深约为 4.0 m×2.0 m×1.5 m 的沉砂池,沉淀推移质泥沙,定期测量(测定方法和项目与河床淤积泥沙的相同)和清理池内泥沙。流量观测时间间隔为 5 min。

泥沙含量监测:于典型的暴雨、中大雨的降雨过程和基流期,分别在产流过程的前段、洪峰段和后段,利用泥沙采样器在出水口处采集河流水样,采用定性滤纸过滤、烘干称重法分析其泥沙含量。重复 4 次。

### 1.3 计算与统计方法

各种断面面积(三角形、梯形、扇形、矩形等)、几何体体积参考相关数学公式计算;

$$V_R = \sum_{i=1}^n S_i \times L_i \quad (1)$$

式中: $V_R$ 为土方开挖量(m<sup>3</sup>); $S_i$ 为第  $i$  断面面积(m<sup>2</sup>)。

$$V_r = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

式中: $V_r$ 为林道崩塌土方总量(m<sup>3</sup>); $V_i$ 为第  $i$  监测点崩塌土方量(m<sup>3</sup>)。

$$V_{Re} = \sum_{i=1}^n S_{ei} \quad (3)$$

式中: $V_{Re}$ 为林道侵蚀沟侵蚀总量(m<sup>3</sup>); $S_{ei}$ 为第  $i$  监测点侵蚀沟断面面积(m<sup>2</sup>)。

$$M_R = \sum_{i=1}^n S_{ri} \times L_{ri} \times C_{bi} \quad (4)$$

式中: $M_R$ 为河床泥沙淤积总量(kg); $S_{ri}$ 为第  $i$  监测点河道泥沙断面面积(m<sup>2</sup>); $L_{ri}$ 为适用第  $i$  监测点的河道长度(m); $C_{bi}$ 为第  $i$  监测点泥沙容重(kg/m<sup>3</sup>)。

$$M_S = \sum_{i=1}^n V_{fi} \times C_{si} \quad (5)$$

式中: $M_S$ 为通过径流输出的泥沙总量(kg); $V_{fi}$ 为适用第  $i$  次监测的径流量(m<sup>3</sup>); $C_{si}$ 为第  $i$  次水样泥沙含量(kg/m<sup>3</sup>)。

$$E_R = M_c + V_{r1} + M_{R1} + M_S \quad (6)$$

式中: $E_R$ 为侵蚀总量(t); $M_c$ 为沉砂池泥沙量(t); $V_{r1}$ 为林道崩塌量(t); $M_{R1}$ 为河床泥沙淤积量(t); $M_S$ 为通过径流输出的泥沙总量(t)。

用 Excel 2013 进行数据处理,用 SPSS 20.0 进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各种界面基本特征和土壤侵蚀量

集水区内林道总长为 4 243 m,林道密度为 15.1 km/km<sup>2</sup>(表 1),修建时开挖土石方总量为 17 369 m<sup>3</sup>,挖掘强度为 61 811 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>(4 082 m<sup>3</sup>/km 林道)。在林道进行扩建和清道作业后 367 d 时间里,林道边坡(包括路堑和路堤边坡)崩塌土石方量为 177.8 m<sup>3</sup>(按土壤容重平均值 1.85 g/cm<sup>3</sup>计算,重量为 329 t/km<sup>2</sup>),占道路修建和清道时开挖土方总量的 0.29%,坍塌主要发生在边坡陡峭、基岩不稳、路堤边坡较厚、有较大径流冲刷等路段。清道后的路面最大宽度为 4.90 m,最窄 2.81 m,平均宽度为 3.26 m,92%的路段不设排水沟;采伐后 367 d,林道侵蚀沟长度为 3 108 m,占道路总长度的 73%,侵蚀沟侵蚀量为 338 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>(按土壤容重平均值 1.35 g/cm<sup>3</sup>计算,重量约为 457 t/km<sup>2</sup>)。

桉树集材作业形成的滑木道总长度为 3 136 m(表 1),滑木道密度为 11.2 km/km<sup>2</sup>,与所在山坡的坡向线平行,呈直线状,平均坡度为 29.6°,比集水区山体平均坡度大 23.3%,平均宽度为 1.9 m,面积占比为 2.1%;滑木道集雨面平均宽度为 15.7 m,其面积占总面积的 17.5%。采伐前后两年的平均降雨量接近,因此通过分析可知,集水区内河道总长度为 701 m,采伐前的 365 d 里,河道沉砂池的泥沙(推移质)淤积总量为 106 t/km<sup>2</sup>(容重为 1.58 g/cm<sup>3</sup>,体积 67 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>);采伐后 368 d 里,沉砂池泥沙淤积量增加至 592 t/km<sup>2</sup>(容重为 1.66 g/cm<sup>3</sup>,体积 357 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>),



后者是前者的 5.3 倍;存在明显淤泥淤积河道总长为 388 m,占河道总长度的 55.3%,淤积量(沉砂池除

外)为 285 t/km<sup>2</sup>(按容重平均值 1.25 g/cm<sup>3</sup> 计算,体积为 228 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)。

表 1 林道修建与采伐作业形成的侵蚀界面基本特征

林道				林道路基侵蚀沟			滑木道							河道		河道沉砂池泥沙/(m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )		
长度/ m	形状	密度/ (km·km <sup>-2</sup> )	开挖量/ (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	崩塌量/ (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	长度/m	侵蚀量/ (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	长度/m	形状	平均 坡度/(°)	密度/ (km·km <sup>-2</sup> )	平均 宽度/m	滑木道面积 占比/%	集雨面 宽度/m	集雨区面积 占比/%	长度/m	淤积量/ (m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	采伐前 365 d	采伐后 368 d
4255	S形	15.14	61811	178	3108	338	3136	坡向直线	29.6	11.16	1.9	2.1	15.7	17.5	701	228	67	357

2.2 采伐前后各种界面径流泥沙含量

由表 2 可知,采伐前 254 d,在典型暴雨过程中,坡上、坡中和坡下的径流泥沙含量差异不显著( $p>0.05$ ),3 个坡位的坡面径流泥沙含量平均值为 0.18 kg/m<sup>3</sup>;林道侵蚀沟径流的泥沙含量则随着汇流的增多(从上段至下段)而逐渐增高,侵蚀沟上、中、下段的泥沙含量平均值 0.56 kg/m<sup>3</sup>;集水区河流不同河段的泥沙含量存在一定差异,其中,出水口的最高,比中断面的大 21.6%,上断面的次之,上、中、下断面的平均含量为 0.41 kg/m<sup>3</sup>。采伐后 58 d,各种界面径流的泥沙含量显著升

高,其中,坡上、坡中和坡下的泥沙含量平均值比采伐前的增加 92.6%;林道侵蚀沟泥沙含量随高程变化而变化的规律与采伐前相反,上段最高,而后逐渐降低,3 的段位的泥沙含量平均值为 3.55 kg/m<sup>3</sup>,是采伐前的 6.3 倍;河流的泥沙含量也呈现出随径流增多而逐渐增高的趋势,3 个断面的泥沙含量平均值为 1.49 kg/m<sup>3</sup>,是采伐前的 3.6 倍。采伐后 58 d,在各种界面中,滑木道的泥沙含量最高,其上坡、中坡和下坡的平均含量达 7.52 kg/m<sup>3</sup>,分别为坡面径流的 21.5 倍、林道侵蚀沟的 2.1 倍和河流的 5.0 倍。

表 2 采伐前后集水区区内各种界面径流的泥沙含量 kg/m<sup>3</sup>

时间	河流			林道侵蚀沟			坡面径流			滑木道		
	出水口	中断面	上断面	下段	中段	上段	坡下	坡中	坡上	下坡	中坡	上坡
采伐前	0.45	0.37	0.40	0.62	0.57	0.48	0.18	0.19	0.17	—	—	—
采伐后	1.35*	1.52*	1.60*	2.51*	2.90*	5.25*	0.36*	0.33*	0.35*	8.12	7.90	6.53

注: \* 代表与采伐前相同部位径流泥沙含量差异显著水平  $p=0.01$ ,“—”代表未发现。

2.3 采伐前后河流流量、泥沙含量和输出量变化

按树采伐前 1 a(2013 年 5 月—2014 年 4 月),降雨总量为 1 595.5 mm,比采伐后 1 a(2014 年 5 月—2015 年 4 月)的降雨总量(1 308.5 mm)多 287.0 mm。采伐前的年产流量为 367.9 mm,产流系数为 0.231,产流主要发生在 5—9 月(图 1),占年总量的 86.6%。采伐后,年产流量为 371.2 mm,产流系数为 0.284,比采伐前的高 22.9%。采伐后河流径流泥沙含量显著增加,其年均值达 0.57 kg/m<sup>3</sup>,比采伐前的(0.20 kg/m<sup>3</sup>)高 185%,其中,采伐后河流径流泥沙含量急剧升高,而后逐渐下降,采伐后第一个月,泥沙含量是采伐前同月含量的 4.2 倍,采伐后 183 d 内,泥沙平均含量是采伐前同时段的 3.7 倍,183 d 后基本恢复至采伐前的水平。采伐后 1 a 河流泥沙输出总量达 407 t/km<sup>2</sup>(约为 315 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>),是采伐前同期(107 t/km<sup>2</sup>)的 3.9 倍,其中,采伐后前 183 d 占其年输沙总量的 99.5%。

2.4 侵蚀总量与组成

假设侵蚀的土壤全部被径流输出集水区外或淤积在河床上(迁移至其他部位的只计林道崩塌,其余忽略),则可估算采伐后各种侵蚀界面对侵蚀总量的贡献。采伐后第一年的侵蚀总量为 1 613 t/km<sup>2</sup>(林道崩塌 329 t/km<sup>2</sup>,河道淤积 285 t/km<sup>2</sup>,河道出

口水口沉砂池沉积 592 t/km<sup>2</sup>,出水口径流输沙 407 t/km<sup>2</sup>),是采伐前的 15 倍。其中,林道路基侵蚀沟占 28.3%,林道崩塌占 20.5%,其他(包括林地坡面、滑木道、细沟、冲沟等)占 51.2%;有 61.9%的侵蚀泥沙(河水悬移质和出水口沉砂)输出集水区。因此,由林道修建直接引起的土壤侵蚀(路基侵蚀沟、林道崩塌、路基边坡侵蚀)占总量的 48%以上。滑木道径流泥沙含量是坡面径流的 21.5 倍,同时,滑木道集雨面积占林地坡面面积的 17.5%,由于仅有 1 次监测数据,尚不能计算其贡献率,但可据此推断滑木道亦为重要的土壤侵蚀策源地。

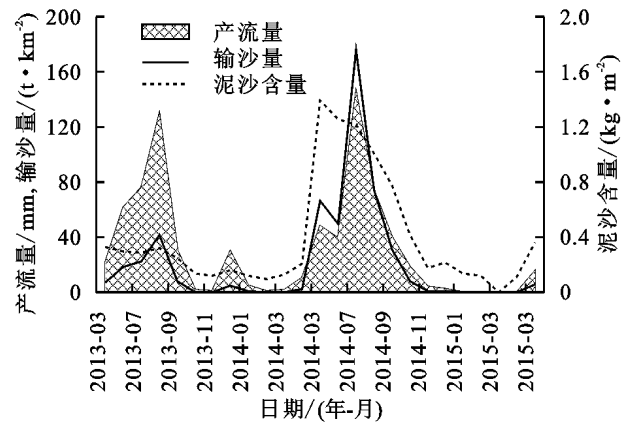


图 1 采伐前后桉树人工林集水区河水的泥沙含量与输沙量

## 3 讨论

### 3.1 林道修建对土壤侵蚀的影响

在有一定坡度的地方修建道路,会形成路堑边坡、路基和路堤边坡3种新的侵蚀界面<sup>[18]</sup>。修建单位长度林道所产生的土石方量主要与林地坡度、林道宽度有关<sup>[19]</sup>,在坡度为70°的地形下修建4 m宽的林道,土石方的产量高达11 300 m<sup>3</sup>/km,本研究中集水区平均坡度为24°,修建的林道较窄(3.26 m),因此产生的土石方量相对较少(4 082 m<sup>3</sup>/km),但由于林道密度高,因此,单位面积的土石方开挖量达61 811 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>,这是由于桉树人工林轮伐周期短,频繁的抚育与采伐对林道密度要求较高。以往研究表明,路堑和路堤边坡是林道土壤侵蚀主要策源地,其中,路堑边坡因其径流系数更大,其侵蚀强度可达161 g/m<sup>2</sup>,是路堤边坡和路基的11~16倍<sup>[20]</sup>,因此,林道的修建会引起严重的水土流失。本研究中,桉树采伐后坡面径流泥沙含量只比采伐前增加92.6%,而集区内河流出口断面泥沙含量则比采伐前高2倍,而以往被忽视的林道侵蚀沟占总量的28.3%,因此,林道侵蚀沟对河流输沙量的增加起主要贡献,这是因为林道改变了林地径流原有的路径,径流被林道隔断后,沿着路面往路基下方流动,如果路堑边坡一侧不建排水沟,汇集的径流巨大的冲刷力会产生新的侵蚀沟,侵蚀沟的密度随着水蚀作用逐渐增大,再次促进土壤侵蚀的发生。本研究中,正是由于简易林道没有设置排水沟,导致了路基严重的土壤侵蚀。

季节是影响土壤侵蚀的重要因素,在雨季由于土壤比较湿润,尤其是在坡度大的部位(如路堑边坡),更容易产生严重的土壤侵蚀<sup>[21-22]</sup>。本研究中,雨季(5—10月)的侵蚀量占全年侵蚀总量的99.5%,其中,又以6—8月最大,是因为在这个时段的雨强和雨量均为最大,土壤最易于水饱和,极易发生土壤蠕动、片状冲刷、下滑等比较严重的侵蚀现象<sup>[23]</sup>,而在路基边坡和路面,则容易发生崩塌、细沟与冲沟侵蚀现象<sup>[21]</sup>,本研究中,林道边坡严重的崩塌(占侵蚀总量的20.4%)均发生在夏季,正是由上述原因引起的。因此,构建良好的林道排水沟和边坡稳固系统,可减少桉树人工林采伐后1年48%以上的土壤侵蚀。

### 3.2 桉树采伐对土壤侵蚀的影响

桉树皆伐作业以及采伐后的林地清理与炼山活动,致使原有植被几乎全被清除,使得水滴到达土面时的动能增加<sup>[24]</sup>;伐木、滑木、木材装载等作业过程

导致78%左右的林地土壤裸露,并使表层与底层土壤混合;机械与木材对土壤的碾压,导致其容重增加、导水孔隙变小<sup>[11]</sup>;采伐后的炼山,减少了土壤有机物含量<sup>[25]</sup>。上述植被与土壤的变化,均会引起林地产流量增加<sup>[26]</sup>,易侵蚀面扩大,从而加剧土壤侵蚀<sup>[12]</sup>。以往研究中,通过径流小区监测发现,桉树采伐后第一年,土壤侵蚀模数一般在0.7~135 t/km<sup>2</sup>,这一数值与本研究中的坡面侵蚀基本相当,随着植被的迅速恢复,其侵蚀模数会迅速降低<sup>[14,26]</sup>。而根据林地裸露率,采用遥感影像—侵蚀模数估算,得出的桉树采伐后侵蚀模数高达8 000~13 000 t/km<sup>2</sup><sup>[27]</sup>,远大于本研究成果的年侵蚀总量(1 613 t/km<sup>2</sup>),这是因为前者仅为采伐后初期的瞬时侵蚀强度。本研究中,滑木道径流泥沙含量高,这是由于木材沿坡面下滑过程中,滑木道表土受到了较强的摩擦,土壤颗粒变小而分散,同时,滑木道地势较低,汇流作用较大,形成了细沟侵蚀的缘故。滑木道随着水蚀作用的增强而侵蚀量逐渐变大,这导致更多的侵蚀物质运移到林道以及河道淤积。通过径流泥沙的监测,对于侵蚀量的监测更准确,也揭示了桉树人工林的土壤侵蚀过程和机理。

## 4 结论

林道修建以及桉树采伐后,人工林土壤侵蚀总量显著增加。土壤侵蚀主要发生在5—10月,侵蚀量占全年总量的99.5%。采伐过程中,林道是最大的策源地,土壤侵蚀总量较大,其主要的侵蚀现象为路基侵蚀沟侵蚀和边坡崩塌,桉树人工林频繁的抚育与采伐,需要高密度的林道,而简易林道又缺乏良好的排水与边坡稳固系统,这是林道土壤侵蚀严重的重要原因。采伐集材作业形成的滑木道是林地坡面水蚀的主要策源地,林道修建、采伐与集材,导致桉树人工林集水区采伐后河水泥沙含量急剧升高,而后逐渐下降,6个月后恢复至采伐前水平。研究结果可为桉树人工林采伐过程中产生的土壤侵蚀问题提供科学依据。

### 参考文献:

- [1] Hubbard R M, Stape J, Ryan M G, et al. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(9): 1714-1721.
- [2] Engler B, Becker G, Hoffmann S. Process mechanization models for improved *Eucalyptus* plantation management in Southern China based on the analysis of currently applied semi-mechanized harvesting operations

- [J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 87: 96-106.
- [3] 白秀萍, 陈绍志, 何友均, 等. 国外林区道路发展现状及启示[J]. 世界林业研究, 2015, 28(1): 85-91.
- [4] Coker R J. Road related mass movement in weathered granitic[J]. Journal of Hydrology, 1993, 31(1): 65-69.
- [5] 满秀玲, 刘吉春. 小兴安岭森林采伐对土壤侵蚀和河流泥沙量的影响[J]. 东北林业大学学报, 1997(4): 35-38.
- [6] Grace J M. Soil erosion following forest operations in the southern piedmont of central Alabama[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 59(4): 160-166.
- [7] Banfield C C, Braun A C, Barra R, et al. Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile[J]. Catena, 2018, 161: 77-84.
- [8] Guzha A C, Rufino M C, Okoth S, et al. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: Evidence from East Africa[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2018, 15: 49-67.
- [9] Arcenegui V, Mataix-Solera J, Guerrero C, et al. Immediate effects of wildfires on water repellency and aggregate stability in Mediterranean calcareous soils[J]. Catena, 2008, 74(3): 219-226.
- [10] Smith H G, Sheridan G J, Lane P N J, et al. Wildfire and salvage harvesting effects on runoff generation and sediment exports from radiata pine and eucalypt forest catchments, south-eastern Australia[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(3): 570-581.
- [11] Rab M A. Soil physical and hydrological properties following logging and slash burning in the *Eucalyptus regnans* forest of southeastern Australia[J]. Forest Ecology and Management, 1996, 84(1/3): 159-176.
- [12] Fernández C, Vega J A, Gras J M, et al. Soil erosion after *Eucalyptus globulus* clearcutting: differences between logging slash disposal treatments[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 195(1/2): 85-95.
- [13] Reichert J M, Rodrigues M F, Peláez J J Z, et al. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 237: 282-295.
- [14] 黄承标, 杨瑶青, 温远光, 等. 不同更新方式巨尾桉人工林的水土流失规律[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 43-46.
- [15] 杨钙仁, 苏晓琳, 蔡德所, 等. 针阔混交林转为桉树林对森林小气候的影响[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 129-134.
- [16] 杨钙仁, 蔡德所, 苏晓琳, 等. 广西主要人工林地坡面径流水质特征[J]. 西南农业学报, 2014, 27(1): 380-386.
- [17] Abrahams A D, Gao P, Aebly F A. Relation of sediment transport capacity to stone cover and size in rain-impacted interrill flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 25(5): 497-504.
- [18] Parsakhoo A, Hosseini S A, Lotfalian M, et al. Soil loss and displacement by heavy equipment in forest road subgrading projects[J]. International Journal of Sediment Research, 2009, 24(2): 227-235.
- [19] FAO. Watershed Management Field Manual: Road Design and Construction in Sensitive Watersheds[Z]. Roma: FAO, 1989.
- [20] Liu Y J, Hu J M, Wang T W, et al. Effects of vegetation cover and road-concentrated flow on hillslope erosion in rainfall and scouring simulation tests in the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. Catena, 2016, 136: 108-117.
- [21] Bochet E, García-Fayos P, Tormo J. Plant establishment and soil erosion in road slopes[J]. Geographical Res. Abs, 2005, 17: 10645-10649.
- [22] Liu Y J, Wang T W, Cai C F, et al. Effects of vegetation on runoff generation, sediment yield and soil shear strength on road-side slopes under a simulation rainfall test in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 485: 93-102.
- [23] Akay A E, Erdas O, Reis M, et al. Estimating sediment yield from a forest road network by using a sediment prediction model and GIS techniques[J]. Building and Environment, 2008, 43(5): 687-695.
- [24] Zhou G, Wei X, Yan J. Impacts of eucalyptus (*Eucalyptus exserta*) plantation on sediment yield in Guangdong Province, southern China: a kinetic energy approach[J]. Catena, 2002, 49(3): 231-251.
- [25] Granged A J P, Jordán A, Zavala L M, et al. Short-term effects of experimental fire for a soil under eucalyptus forest (SE Australia)[J]. Geoderma, 2011, 167: 125-134.
- [26] 梁宏温, 马倩, 温远光, 等. 不同造林抚育干扰下桉树幼林地水土流失特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 26-30.
- [27] 杨静学, 黄本胜, 洪昌红, 等. 水库库区桉树轮伐对水土流失的影响研究: 以广州水库库区为例[J]. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 47(3): 120-126.