

文章编号:0559-9350(2017)05-0613-10

华南红壤区坡面产流产沙对植被的响应

廖义善^{1,2}, 孔朝晖³, 卓慕宁¹, 李定强¹

(1. 广东省生态环境与土壤研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650;

2. 中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275; 3. 广东省五华县水土保持试验推广站, 广东 梅州 514471)

摘要: 植被对坡面水蚀具有重要影响, 其减水、减沙效益广受关注。以广东省五华县源坑水小流域2011—2014年的径流小区次降雨水沙观测数据为基础, 分别在次降雨、月、年及不同降雨区间讨论植物类型差异、月际植被盖度变化、年际植物生长及不同次降雨量对坡面产流、产沙的影响。研究结果表明: (1)在次降雨尺度, 植物小区平均减沙效益、减水效益分别为24.77%、12.95%, 其减沙效益大于减水效益; (2)在各降雨区间, 相较于裸土小区, 桉树、松树和糖蜜草小区分别在次降雨量为20~30 mm、20~40 mm和20~50 mm的降雨区间具有较为显著的减沙效益。松树和糖蜜草在次降雨量为10~50 mm的降雨区间均具有显著的减水效益。但在次降雨量>50 mm的降雨区间植物的减沙、减水效益均不显著。 (3)在月尺度上, 各径流小区产流、产沙量均无显著差异。但由于月际植被盖度的变化, 不同月份植物减沙效益数值顺序存在一定变化, 但植物减水效益数值顺序较为稳定均呈现为糖蜜草>松树>桉树。 (4)在年尺度上, 桉树、松树和糖蜜草的减沙、减水效益区间分别为7.00%~38.66%、2.98%~8.76%、7.74%~37.30%、6.67%~19.67%和8.35%~45.33%、10.00%~23.36%。各径流小区年均次降雨产流、产沙数值顺序均呈现裸土小区>桉树小区>松树小区>糖蜜草小区。各植物小区的减水效益与减沙效益相一致, 表明相较于植物通过改变水沙关系减沙而言, 植物主要是通过减水来减沙。

关键词: 坡面水蚀; 植被; 减水; 减沙; 降雨量**中图分类号:** S157**文献标识码:** A**doi:** 10.13243/j.cnki.slxb.20160912

1 研究背景

华南红壤区降雨量大且集中^[1], 低山和丘陵交错, 地形破碎, 坡度大, 母岩抗蚀力弱, 发育的红壤可蚀性高, 水土流失范围全国最广、水土流失严重程度仅次于黄土高原^[2]。近几十年来, 华南红壤区进行了大规模的生态自然恢复及人工林种植^[3], 通过植物改变下垫面微观格局^[4-5], 增加了土壤中水稳性大团聚体含量^[6], 提高了土壤的抗蚀和抗冲能力^[7], 同时也降低地面水的流量和流速^[8], 有效减少了土壤侵蚀量^[9-10], 并改善了生态环境^[11]。但也有研究发现, 桉树(*Eucalyptus*)等速生人工林, 林下水土流失依然较大^[12], 某些桉树林地多年平均水土流失量甚至可以达到混交林的100倍左右^[13]。究其原因, 可能与桉树林植被种群单一, 林下植被匮乏^[14], 加之较高的树冠使得林冠穿透水的侵蚀力会大于林外降水的侵蚀力有关^[15-17]。但当前桉树对坡面产流、产沙的影响机制尚不明确, 相较于混合林植物, 桉树林下侵蚀量较大, 是由于其减水效益有限, 还是由于水沙关系的改变^[18]较小, 目前尚不清楚。

收稿日期: 2016-05-12; 网络出版日期: 2017-01-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170112.1648.003.html>

项目名称: 广东省自然科学基金研究团队项目(S2012030006144); 广东省水利厅委托项目(GPCGD112197FT141F1); 国家自然科学基金项目(41171221, 41471020); 广东省科学院青年科学研究基金项目(qnjj201404); 广东省中国科学院全面战略合作项目(2013B091500077); 省院创新平台建设专项(2016GDASPT-0105)

作者简介: 廖义善(1980-), 男, 广西桂林人, 博士生, 助研, 主要从事水土保持研究。E-mail: yishan_liao@163.com

通讯作者: 李定强(1963-), 男, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与非点源污染的研究。E-mail: dqli@soil.gd.cn

为此，笔者利用2011年1月—2014年12月的野外径流小区水沙观测数据，对华南红壤坡面桉树、松树(*Pinus massoniana* Lamb.)、木荷(*Schima superba* Gardner & Champ.)等常见人工林植物的减水、减沙效益进行分析，以期对相关植物水保效益综合评价提供参考。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区域 研究区位于韩江上游，东经115°37'27.9"，北纬24°5'14.9"，广东省五华县境内，地属亚热带海洋季风气候区，降雨量大且集中。多年平均日照时数为1 969 h，平均气温20.5 ℃，年平均降雨量1 496.5 mm(见图1)，次平均降雨量10.3 mm。区域地貌以低山丘陵为主，地形复杂多样，沟壑密布，相对高程50~200 m。区域内普遍存在深厚的花岗岩风化壳，一般可达数米、数十米，甚至百米，土壤主要为花岗岩风化物母质发育的红壤，含沙量较高，pH值为4.5~6，土壤结构松散，抗冲、抗蚀性

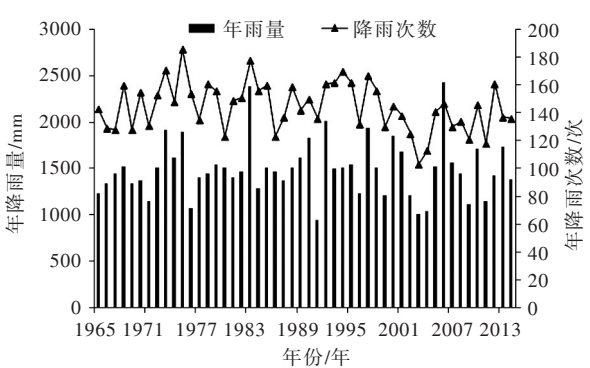


图1 研究区降水情况

均较差，绝大部分表土已被蚀去。地表植物主要有马尾松、桉树、桃金娘、芒萁、蔗鹧草等。山脚、沟谷等水分条件较好的地方有木荷、黎索、樟树等分布，覆盖度一般在10%~30%，少数阴坡植被覆盖度可达60%~80%。

2.2 研究方法

2.2.1 径流及泥沙测算 径流小区由五华县水土保持试验推广站兴建于2009年6月，位于五华县华城镇源坑水小流域，包括25°、30°两种坡度小区。其中25°小区为植物措施、耕作措施小区，30°小区包括裸土小区和植物措施小区(见表1)，本研究仅选取30°小区进行植物减水、减沙分析。小区建设之初，桉树、松树、木荷植株高分别为15 cm、35 cm、20 cm，其减水减沙效益十分有限。故本研究分析的起始数据时间为植被小区建成1年之后。当前经测定裸土坡面仅有零星杂草生长，植被盖度在10%以下；桉树、松树的植被覆盖率均为40%左右；糖蜜草(*Melinis minutiflora* P. Beauv.)、木荷的植被覆盖度为60%(由于监测时段内该小区植被覆盖以糖蜜草为主，以下均简称糖蜜草小区)。在次降雨事件中，各径流小区的地形、土壤及降雨条件近似一致，其产沙差异可认为主要受植被差异影响。

采用水泥浇筑的固定径流桶(集流桶、分流桶)收集小区降雨径流及泥沙(如图2)。每次降雨过后读取径流桶中的水沙体积，并用铁锹将水沙充分搅匀，再分别用容积为1 L的塑料瓶采集搅匀的泥沙水样。将采集水样带回实验室称重后静置，去除上层清液，将沉淀泥沙移至铝盒，并放至烘箱，在105 ℃条件下将泥沙烘干6~8 h后，称量、计算获得1 L泥沙水样中所含泥沙重量及水的体积，再通过径流桶中的水沙体积，换算出每个径流小区单次降雨的产流、产沙总量。具体径流小区构建及日常监测、采样情况详见参考文献[19]。本研究对径流小区的监测时段为2011年1月—2014年12月，期间年均降雨量为1 420.9 mm，次平均降雨量为10.3 mm，均与近50年的降雨情况近似一致。

表1 径流小区概况

小区名称	坡长(m)×宽度(m)	坡度/度	坡向	植被类型
裸土小区	20×5	30	西南	无
桉树小区	20×5	30	西南	桉树
松树小区	20×5	30	西南	松树
糖蜜草小区	20×5	30	西南	糖蜜草、木荷

*桉树小区建设时布设植物为桉树和松树，后由于物种竞争，在本监测时段基本只剩下桉树。

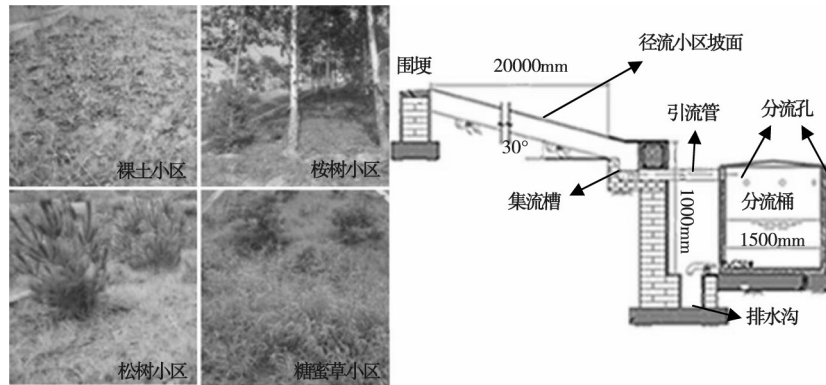


图2 径流小区照片及设计图

2.2.2 土样采集及测试分析 分别于2013年1月16日和2014年11月10日,采集各径流小区表层0~20 cm土样,测试分析及统计指标包括黏粒、粉粒及砂粒含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、有机质含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)、入渗率($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$),其中采用比重计法测量土壤机械组成、采用重铬酸钾容量法测量土壤有机质、采用双环法测量土壤入渗、采用环刀法测量土壤容重及水分,其土壤采集及测试方法详见参考文献[20]。

2.2.3 数据分析及计算 采用SPSS 17.0软件对数据进行统计分析,不同植被类型间产流、产沙差异显著性采用方差分析(ANOVA)检验,当各组数据方差齐性时采用LSD法,方差不齐次时采用非参数检验方法Dunnett's T3,两两比较时的显著性水平,为0.05。变量间的相关关系采用Pearson相关统计方法进行分析。采用Williams等人在EPIC(Erosion-Productivity Impact Calculator)模型中发展的土壤可蚀性因子K值估算方法^[21],测算各径流小区的土壤K值。依据《水土保持综合治理效益计算方法》(GB/T 15774-2008)^[22]计算减水效益(式1)和减沙效益(式2)。

$$\eta_w = \frac{(W_0 - W_s)}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta_s = \frac{(G_0 - G_s)}{G_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η_w 、 η_s 分别为减水效益和减沙效益; W_s 、 W_0 分别为植物小区与裸土小区的径流量(m^3); G_s 、 G_0 分别为植物小区与裸土小区的产沙量(kg)。

3 结果与讨论

现有研究表明,植物对坡面水蚀具有重要影响,其不仅能对雨滴及降雨径流进行消能^[23],而且能改变土壤理化性质,提高其抗蚀、抗冲能力^[7],并增加入渗。本研究将在同等降雨条件下分析各径流小区不同时间尺度及降雨区间的水蚀差异,并探讨其原因。

3.1 次降雨坡面水蚀差异 不同次降雨事件涵盖了植被不同生长阶段及季节性覆盖变化,可综合反映不同植被小区间的水蚀差异。2011年1月—2014年12月间共发生降雨552次,其中发生坡面产流的降雨次数及其降雨量分别为166次、29.67 mm,径流小区监测指标包括降雨量、产流量及产沙量。由表2可知,在同等降雨条件下,4个径流小区的平均次降雨产沙模数、产流量及径流系数均呈现:裸土小区>桉树小区>松树小区>糖蜜草小区。裸土小区、桉树小区、松树小区和糖蜜草小区的次降雨产沙区间分别为:0.19~125.89 kg、0.15~116.99 kg、0.10~107.14 kg和0.08~105.87 kg。而平均次降雨径流含沙量呈现为:裸土小区>桉树小区>糖蜜草小区>松树小区,除径流系数外,4个小区间的产流、产沙量无显著差异。3种植物中松树改变水沙关系作用最强,而糖蜜草减水、减沙作用最优。其不同小区减水的差异,主要源于地表入渗和植被截留等因素影响。据2014年的土壤测试结果,各小区土体入渗能力表现为裸土小区>糖蜜草小区>松树小区>桉树小区,其对应土壤孔隙度分别

为 52.32 %、52.24 %、50.51 %、47.86 %。此外，已有研究表明地表覆被及表层枯枝落叶与地表径流截留率密切相关^[24]，其径流小区的地表覆被及表层枯枝落叶的数量表现为糖蜜草小区>松树小区>桉树小区>裸土小区。各径流小区的产流量及径流系数的数值大小顺序恰与各小区的地表覆被及表层枯枝落叶的数量顺序相反，表明地表覆被及枯枝落叶对产流具有重要影响，且其影响大于土体入渗对产流的影响。另据 2014 年的土壤可蚀性因子(K 因子)测试分析结果表明，其 K 因子数值呈现桉树小区>松树小区>糖蜜草小区>裸土小区，其数值分别为 0.2480、0.2404、0.2400、0.2308，而土壤侵蚀外部驱动力之一的降雨径流量数值顺序表现为裸土小区>桉树小区>松树小区>糖蜜草小区。可见，各径流小区产流和产沙顺序相一致，外部驱动力对产沙的影响大于土体 K 因子影响，这也是通过减水减沙的作用要强于通过改变水沙关系减沙的原因。

植物小区均呈现不同程度的减水、减沙效益，相较于裸土小区，桉树，松树和糖蜜草的减水、减沙效益分别为 6.67 %、12.19%，12.22 %、19.27 %，15.56 %、21.33 %，植物的减沙效益均优于其减水效益，表明此 3 种植物不仅可通过减水来减沙，也可通过改变水沙关系来减沙。其中桉树、松树及糖蜜草平均径流含沙量分别为 6.14、5.92、5.96 kg·m⁻³，3 种植物中桉树单位径流量对产沙的贡献率最大，也即桉树的减水效益对减沙效益的影响最大。可见，桉树产沙模数较大源于其减水效益有限。其减水效益较小的原因有二：(1)根据表层土样分析桉树小区土体孔隙度最小，致使桉树小区入渗率降低；(2)桉树林的冠层雨水截留率小于针叶林等天然林^[25]，加之桉树小区林下枯枝落叶对降雨的保蓄能力较其它植物小区要小，有研究表明松树地被物及枯枝落叶的雨水截留量占总降水量的 25 % ~ 28 %，桉树的地被物及枯枝落叶的雨水截留率为 4 % ~ 10 %^[24]，使得其产流率为 3 个植物小区中最大。因而，降低桉树林的土壤侵蚀强度，其关键是提高其减水效益。恢复、保护好乔木林下草灌植被及其枯枝落叶，使之减水固土，是解决华南地区“远看绿油油，近看水土流”的关键所在。

表 2 次降雨尺度坡面水蚀情况

小区	次平均产沙模数/(t·km ⁻² ·d ⁻¹)	次平均径流量/m ³	次平均径流系数/%	次平均含沙量/kg·m ⁻³
裸土小区	88.51±169.00a	0.90±0.89a	28.94±9.29a	6.84±6.01a
桉树小区	77.72±158.95a	0.84±0.85a	26.79±8.58ab	6.14±5.44a
松树小区	71.45±150.31a	0.79±0.81a	24.73±7.69b	5.92±5.39a
糖蜜草小区	69.63±146.47a	0.76±0.78a	23.67±7.25c	5.96±5.49a

*同列不同小写字母表示小区间差异显著(P<0.05)。

3.2 各雨量区间坡面水蚀差异 在次降雨尺度，其降雨量参差不齐，未能直观反映降雨量对不同植被产流、产沙的影响。故将次降雨量划分为 10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50、>50 mm 等 5 个降雨区间(小区产流的降雨量下限为 10 mm)。如表 3 所示，虽然在不同降雨区间各径流小区的平均次降雨产沙模数、径流量、径流系数及径流含沙量数值大小顺序与次降雨尺度相同，但其差异性显现。由表 3 可知，相较于裸土小区，桉树、松树和糖蜜草小区分别在次降雨量为 20 ~ 30、20 ~ 40、20 ~ 50 mm 的降雨区间具有较为显著的减沙效益，而在次降雨量为 10 ~ 20、>50 mm 的降雨区间减沙效益均不显著。相较于裸土小区，桉树在整个降雨区间的减水效益均不显著，松树和糖蜜草小区在次降雨量为 10 ~ 50 mm 的降雨区间均具有显著的减水效益，在次降雨量>50 mm 的降雨区间减水效益均不显著。且 3 个植物小区仅在次降雨量为 20 ~ 30 mm 的降雨区间内，其径流含沙量均与裸土小区存在显著差异，表明植物在该降雨区间主要通过改变水沙关系减沙，在其它降雨区间，主要通过减水来减沙。在降雨量较小的次降雨事件，降雨的溅蚀及径流的冲刷作用有限，植物对雨滴及径流的消能作用不明显，植物的减沙效益不显著。而在降雨量较大的次降雨事件，由于植被小区的覆盖度均在 60% 以下，加之雨量较大时林下雨的溅蚀作用较强，使得植物的减水、减沙效益未能发挥。特别就桉树而言，如表 3 所示，次降雨量超过 30 mm，桉树已不具备显著的减水、减沙效益，使得 3 种植物只有在特定的降雨区间才呈现显著的减水、减沙效益。综上分析，裸土小区与植被小区的次降雨产沙模数能在某些降雨区间内存在显著差异，在次降雨量>50 mm 的降雨区间差异不显著。而在各降雨区间中，次降雨量>50 mm 的降雨事件产流、产沙量均为最大，其产流、产沙量分别占总降雨事件产

表3 各雨量区间坡面水蚀情况

水蚀指标	降雨区间/mm	裸土小区	桉树小区	松树小区	糖蜜草小区
次均产沙模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot d^{-1}$)	10 ~ 20	18.22±30.15a	13.93±23.18a	12.78±22.79a	12.49±24.31a
	20 ~ 30	34.92±12.47a	27.27±10.53b	23.82±9.36bc	22.32±9.78c
	30 ~ 40	73.55±32.61a	59.57±23.01ab	55.62±21.65b	55.42±22.12b
	40 ~ 50	134.36±68.85a	117.46±55.65ab	103.41±43.06ab	98.10±39.89b
	>50	433.66±334.88a	402.90±320.91a	376.56±309.51a	369.81±298.16a
径流量/ m^3	10 ~ 20	0.43±0.15a	0.39±0.15ab	0.36±0.13bc	0.34±0.12c
	20 ~ 30	0.67±0.21a	0.63±0.19ab	0.58±0.15b	0.55±0.14b
	30 ~ 40	0.96±0.24a	0.89±0.22ab	0.84±0.14b	0.80±0.14b
	40 ~ 50	1.15±0.24a	1.08±0.23ab	1.00±0.20b	0.96±0.17b
	>50	2.79±1.58a	2.64±1.51a	2.52±1.44a	2.46±1.36a
径流系数/%	10 ~ 20	28.81±9.29a	26.42±8.59ab	23.91±7.57bc	22.69±6.97c
	20 ~ 30	27.94±8.26a	25.85±7.15ab	24.01±5.54b	22.92±5.19b
	30 ~ 40	27.04±7.22a	25.17±6.78ab	23.63±4.53b	22.57±4.23b
	40 ~ 50	26.48±5.86a	24.79±5.79ab	22.86±4.71b	22.06±3.98b
	>50	36.67±13.04a	34.41±12.08a	32.74±12.43a	32.12±11.61a
含沙量/ ($kg \cdot m^{-3}$)	10 ~ 20	3.97±6.40a	3.24±4.88a	3.18±5.01a	3.22±5.14a
	20 ~ 30	5.19±1.33a	4.48±1.55b	4.09±1.28b	4.03±1.42b
	30 ~ 40	7.72±2.70a	6.87±2.57a	6.76±2.64a	7.09±3.11a
	40 ~ 50	11.50±4.19a	10.83±3.68a	10.41±3.47a	10.22±3.33a
	>50	14.37±5.73a	14.01±5.85a	13.59±5.82a	13.69±5.91a

*同行不同小写字母表示小区间差异显著($P<0.05$)。

流、产沙量的34.38 %、56.02 %。由于次降雨量>50 mm的降雨事件对产流、产沙的显著贡献,而在该降雨区间植物的减水、减沙效益不显著,使得在次降雨尺度各径流小区的产流、产沙量差异均不显著。

3.3 月坡面水蚀差异 植物在不同月份间进行着从萌芽、抽枝、展叶到叶落归根的自然演替,在月尺度上进行坡面产流、产沙分析,能较好的反映植物季节性覆盖变化对坡面水蚀的影响。各小区的不同月份平均次降雨产沙模数数值顺序有所差异(见图3),其中1月为裸土小区>松树小区>桉树小区>糖蜜草小区;2月为裸土小区>糖蜜草小区>桉树小区>松树小区;3月为裸土小区>松树小区>糖蜜草小区>桉树小区;4月、6月为裸土小区>桉树小区>糖蜜草小区>松树小区;5月、7—12月为裸土小区>桉树小区>松树小区>糖蜜草小区。其中1—3月间各小区平均次降雨产沙模数数值顺序均不相同,而7—12月其数值顺序均一致。在同等降雨条件下,各小区平均次降雨产沙模数数值顺序变化主要受到植物盖度月际不同步变化的影响。在亚热带,马尾松从12月至翌年2月均处于休眠期,地上部分增长基本停止^[26],但月际间植被覆盖变幅不大。而糖蜜草在2—4月处于从枯萎到萌芽的过程,其中2月份植被盖度最小,而2月份糖蜜草小区产沙模数要大于其它小区,亦印证了各径流小区植物盖度月际不同步变化对坡面产沙差异具有一定影响。但对其进行统计分析发现,在月尺度上,除1月外,各径流小区的产沙量均无显著差异(见图4)。此外在各月份间,各径流小区次降雨产流量均无显著差异,且其产流顺序均表现为裸土小区>桉树小区>松树小区>糖蜜草小区,可见,相较于前面分析的降雨量而言,植被盖度月际不同步变化对水蚀产流产沙的影响较小。这与研究区植被落叶或枯萎时间短,降雨量分布和植物盖度变化一致有关。

虽然在月尺度,各径流小区的产沙、产流量基本无显著差异,但不同植物小区的减水、减沙效益还是有所不同。其中各植物小区的减沙效益呈现:1月为糖蜜草>桉树>松树;2月为松树>桉树>糖蜜草;3月为桉树>糖蜜草>松树;4月、6月、10月为松树>糖蜜草>桉树;5月、7—9月、11—12月为糖蜜草>松树>桉树。各月份间,桉树、松树及糖蜜草的减沙效益区间分别为7.00 % ~ 38.66 %、

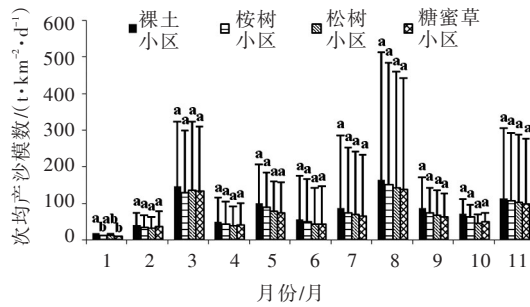


图3 月尺度小区平均次降雨侵蚀模数

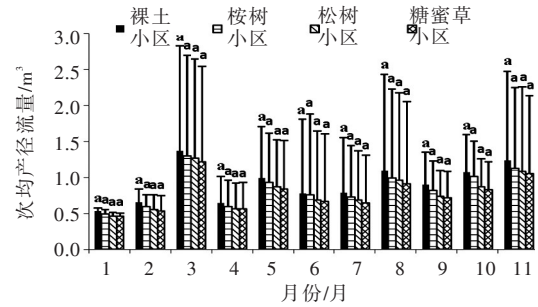


图4 月尺度小区平均次降雨产流量

注：图3-4中同组字母为LSD(最小显著差异法)比较结果，相同字母表示没有显著性差异($P>0.05$)，不同字母为存在显著性差异($P<0.05$)。

7.74 % ~ 37.30 %和8.35 % ~ 45.33 %。3个植物小区各月份的减水效益数值大小顺序较为一致，均表现为糖蜜草>松树>桉树。各月份间，桉树、松树及糖蜜草的减水效益区间分别为2.56 % ~ 9.09 %、7.30 % ~ 19.44 %和10.95 % ~ 23.15 %。植被减沙效益要大于减水效益，且减沙效益的变化幅度要大于减水效益，植物的减水效益要比减沙效益稳定。其原因主要为植被冠层和枯枝落叶层的减水量与减水效益呈线性关系，而与降雨侵蚀力呈指数关系^[27]，使得植物的减沙变幅要大于减水的变幅。

3.4 年坡面水蚀差异 乔灌植物在生长过程中其植被覆盖度及植株高度会相应的增长，在年尺度上，能较好的反映不同植物年际变化对坡面水蚀的影响。在同等降雨条件下，4年的年均次降雨产流、产沙数值顺序均呈现裸土小区>桉树小区>松树小区>糖蜜草小区(如表4)。表明在较大的时间尺度内，与植被交互作用的产流、产沙影响因素此消彼长，一些诸如径流小区降雨不一致的偶然性影响因素被平滑掉，各小区间植被的本质差异显现，使得各径流小区产流、产沙的数值顺序稳定。如表4所示，4个径流小区间次降雨平均产沙模数、径流含沙量均无显著差异；次降雨平均产流量除2011年裸土小区与糖蜜草小区存在显著差异外，其余小区间均无显著差异。由前分析可知，次降雨量>50 mm时，各径流小区产流、产沙量无显著差异，且在年尺度内产流、产沙量主要由降雨量>50 mm的降雨事件贡献，因而在年尺度上，各径流小区产流、产沙无显著差异。相较以上几个水蚀指标，各年份间径流系数变化有所差异，其中2011年各小区间均存在显著差异；2012年仅裸土小区与松树小区、糖蜜草小区存在显著差异；2013、2014年仅裸土小区与糖蜜草小区存在显著差异。随着植物生长年限的增加，各径流小区产流系数呈现减小趋势，且其数值大小趋于一致。其径流系数减小与土壤机械组成的变化有关，裸土小区、桉树小区、松树小区和糖蜜草小区的砂粒含量由2013年1月的40.2 %、36.6 %、40.7 %、41.3 %，分别上升到2014年11月的46.2 %、47.3 %、46.0 %、43.7 %。

表4 年尺度坡面水蚀情况

水蚀指标	年份	裸土小区	桉树小区	松树小区	糖蜜草小区
次均产沙模数/ ($t \cdot km^{-2} \cdot d^{-1}$)	2011	69.08±89.66a	52.00±71.62a	42.56±55.95a	40.77±57.10a
	2012	65.67±99.79a	57.67±94.75a	55.54±94.14a	55.47±90.28a
	2013	126.45±261.39a	112.85±245.56a	104.89±233.28a	102.20±226.38a
	2014	86.95±139.21a	83.27±137.90a	77.38±129.08a	74.50±128.26a
径流量/ m^3	2011	1.01±0.51a	0.92±0.47ab	0.80±0.44ab	0.76±0.44b
	2012	0.73±0.63a	0.68±0.58a	0.66±0.59a	0.64±0.56a
	2013	0.92±1.02a	0.86±0.94a	0.82±0.92a	0.79±0.88a
	2014	0.97±1.20a	0.94±1.24a	0.89±1.13a	0.86±1.11a
径流系数/%	2011	40.00±5.07a	36.37±4.56b	31.48±3.91c	29.44±3.69d
	2012	25.16±5.37a	23.06±4.90ab	22.19±5.16b	21.57±5.08b
	2013	26.26±9.63a	24.59±9.03ab	23.23±9.09ab	22.47±8.56b
	2014	25.47±6.88a	24.20±7.47ab	22.70±7.39ab	21.75±7.50b

*同行不同小写字母表示小区间差异显著($P<0.05$)

小区水土流失后表层砂粒及土体大孔隙数量增加，加之植物根系改善土壤孔隙状况，致使入渗增加，产流系数减小。从水沙关系上看，2011—2014年间平均次降雨径流含沙量呈现：裸土小区>桉树小区>糖蜜草小区>松树小区，但各小区间无显著差异。降雨为坡面产沙的最主要外部驱动力，裸土、桉树、松树及糖蜜草小区次降雨产沙模数与次降雨量的相关系数分别为0.802**、0.803**、0.794**、0.801** ($n=166$)。如图5所示，各小区年均次降雨径流含沙量与年降雨量的变化趋势近似，而不随年际植被盖度及植株高度而变化，亦表明降雨对坡面产沙的影响要强于植被的影响。此外，由于糖蜜草在年尺度内存在从枯萎到萌芽的往返演替，单从水沙关系上看，其水沙关系稳定性不如桉树和松树，其改变水沙关系的效能不及松树。

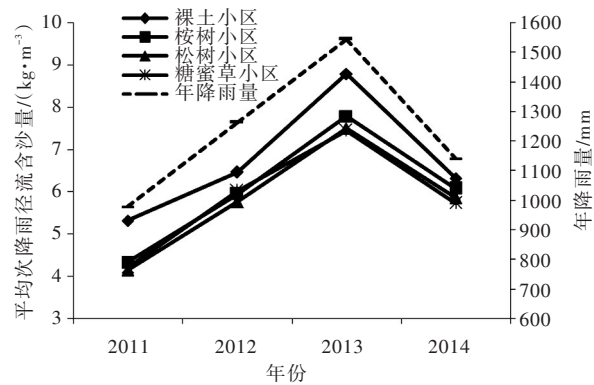


图5 年降雨量与次均含沙量关系

4年间，相较于裸土小区而言，植物小区的减沙、减水效益亦呈现减小的趋势。年尺度上，桉树、松树和糖蜜草小区的减沙效益区间分别为4.23 % ~ 24.73 %、11.00 % ~ 38.39 %和14.32 % ~ 40.98 %。植物的减沙效益均呈现糖蜜草>松树>桉树，相较而言糖蜜草具有较好的减沙效益。而植物减沙效益减小，究其原因有三：(1)随着土体表层细颗粒被优先侵蚀搬运，其表层砂粒含量增加，裸土小区、桉树小区、松树小区和糖蜜草小区的K值分别由2013年1月的0.2494、0.2627、0.2618、0.2480减小为2014年11月的0.2308、0.2480、0.2404、0.2400。各径流小区的土壤可蚀性K因子的数值及差异性减小，致使植物的减沙效益有所下降。(2)2011—2014年各径流小区降雨量>50 mm的降雨事件产沙量占全年总产沙量的比重分别为30.04 %、36.14 %、70.60 %、64.59 %。而由前分析可知，在降雨量>50 mm的降雨事件中各径流小区的产沙量无显著差异，因而随着降雨量>50 mm降雨事件的产沙量所占比重加大，裸土小区与植物小区产沙量差异减小，植物小区的减沙效益减小。(3)桉树、松树林下杂草较少，多为裸露，致使林下地表对降雨及径流的消能作用较差。加之随着植物生长年限的增加，乔木植株不断增高，林下雨的溅蚀作用也随之增强。可见在降雨作用下，坡面产沙除受植物覆盖度影响外，其植株高的影响亦不容忽视。桉树、松树和糖蜜草小区的减水效益区间分别为3.09 % ~ 8.91 %、8.24 % ~ 20.79 %和11.34 % ~ 24.75 %。相较裸土小区而言，不同年份植物小区的减水效益均呈现糖蜜草>松树>桉树，各植物小区间的减沙效益与减水效益数值顺序一致，而植物小区间的减沙效益数值顺序与径流含沙量数值顺序不一致，表明植物通过减水来减沙，是植物减沙的重要途径。譬如糖蜜草改变水沙关系的效能虽不及松树，但由于其优于松树的减水效能，使得糖蜜草小区的产沙强度仍小于松树小区。由表4可知，2011—2014年间各植物小区的减水效益亦出现减小趋势。其植物减水效益减小的原因有二：(1)一方面随着植物的生长，植物根系生物量的增加，更利于降雨地表径流的入渗，且植物冠层对降雨的截蓄能力加强亦使植物小区的径流系数减小，而另一方面裸土小区表土由于无植被保护，其红土层消失殆尽，砂土层的透水性优于红土层，致使裸土小区径流系数的减幅要大于植物小区，使得植物小区减水效益相对下降；(2)由前分析可知，当次降雨量达到50 mm以上时，各径流小区产流量间无显著差异，而2011—2014年各径流小区降雨量>50 mm的降雨事件产流量占全年总产流量比重分别为17.27 %、21.59 %、45.24 %、50.48 %。随着降雨量>50 mm降雨事件产流量比重增加，裸土小区与植物小区的产流差异性减小，植物小区的减水效益趋于减小。

综上所述，在研究区桉树、松树和糖蜜草均具有一定的减水、减沙效益。但由于区域降雨量大，加之植被盖度不高，特别是在桉树、松树林下草本植物及枯枝落叶缺乏的情况下，植物的减水、减沙效益不甚显著。相较于其它区域，与研究区五华县毗邻的兴宁县松树，糖蜜草的减水、减沙率分别为0.71 %、34.98 %，8.06 %、58.98 %^[28]；福建长汀县松树的减水、减沙率分别为25 %、

90%^[29]；云南牟定县桉树的减沙率为39.88%^[30]。相较于本研究区，其它区域亦出现植物减沙率大于减水率的情况，且其它区域的减水率略低于本研究区，而减沙率要大于本研究区，其减水、减沙差异受不同区域的下垫面条件(地形、植被盖度)差异影响。

当前一些地区，桉树通常被认为是高耗水植物，会降低地下水位，被冠之为“抽水机”^[31]。亦有研究表明桉树人工林相较于天然草地，基流量减少27%^[32]；桉树造林9 a后，河川径流从常年不断流，变为季节性断流^[33]；余作岳^[34]在广东电白调查发现，相较于阔叶混交林和光板地，桉树纯林的地下水位最低，为9~11 m，据此认为桉树人工林导致地下水下降。而本研究表明，由于桉树的减水效益较差，大量降雨转化为降雨地表径流流失，桉树林区降雨对土壤水及地下水的补给相对较小。其是致使桉树种植区基流减小甚至季节性断流的原因之一。此外，有研究表明桉树人工林年蒸发量为614.4 mm，约为混交林的60%^[35]，桉树林的水分利用效率比天然林更高^[25]。依据桉树林区河流径流减小，而认为桉树是“抽水机”的结论，还值得商榷。

4 结论

(1)桉树、松树及糖蜜草均具有一定的减水、减沙效益，且减沙效益均优于其减水效益。植物不仅可以通过减水来减沙，也可以通过改变水沙关系减沙。此外，各植物小区的减水效益与减沙效益相一致，相较于植物通过改变水沙关系减沙而言，植物主要是通过减水来减沙。

(2)在不同时间尺度上，各径流小区产沙、产流基本无显著差异。但在不同降雨区间，裸土小区分别与桉树、松树、糖蜜草小区可呈现显著的产沙差异，裸土小区分别与松树、糖蜜草小区能呈现显著的产流差异。各小区间产流、产沙的差异主要受降雨的影响。

(3)总体而言，各植物小区次降雨产流、产沙数值顺序均呈现桉树小区>松树小区>糖蜜草小区。糖蜜草的减水、减沙效益最优，桉树最差，桉树林减蚀的关键是提高其减水效益。此外，桉树减水效益差是致使桉树种植区基流减小甚至季节性断流的原因之一。

参 考 文 献：

- [1] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].农业工程学报,2015,31(2):124-132.
- [2] 唐克丽,史立人,史明德.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] 李桂静,崔明,周金星,等.南方红壤区林下土壤侵蚀控制措施水土保持效益研究[J].水土保持学报,2014,28(5):1-5.
- [4] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2):232-237.
- [5] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J].水科学进展,2011,22(2):229-234.
- [6] 黄茹,黄林,何丙辉,等.三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究[J].环境科学,2013,34(7):2800-2808.
- [7] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J].农业工程学报,2009,25(2):56-61.
- [8] 潘欣,王玉杰,张会兰,等.官厅水库上游典型植物措施特性及在侵蚀性降雨下的水沙效应分析[J].北京林业大学学报,2015,37(7):76-84.
- [9] WANG Z Y, WANG G J, LI C Z, et al. A preliminary study on vegetation-erosion dynamics and its applications [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2005, 48(5): 689-700.
- [10] SCHÖNBRODT S, SAUMER P, BEHRENS T, et al. Assessing the USLE crop and management factor C for soil erosion modeling in a large mountainous watershed in Central China[J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(6): 835-845.

- [11] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P . The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J] . Catena, 2007(70): 350–355 .
- [12] MORRIS J, ZHANG N N, YANG Z J, et al . Water use by fast-growing Eucalyptus urophylla plantations in southern China[J] . Tree Physiology, 2004, 24(9): 1035–1044 .
- [13] 任海, 彭少麟, 刘鸿先, 等 . 小良热带人工混交林的凋落物及其生态效益研究[J] . 应用生态学报, 1998, 9(5): 458–462 .
- [14] 于福科, 黄新会, 王克勤, 等 . 桉树人工林生态退化与恢复研究进展[J] . 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 393–398 .
- [15] CHAPMAN G . Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a Red Pine plantation[J] . Transactions of American Geophysical Union, 1948(29): 664– 670 .
- [16] CALDER I R . Canopy processes: implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources[J] . Plant Ecology, 2001(153): 203 – 214 .
- [17] GEIBLER C, KÜHN P, BÖHNKE M, et al . Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China [J] . Catena, 2012, 91(5): 85–93 .
- [18] 郑明国, 蔡强国, 王彩峰, 等 . 黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植物对流域尺度水沙关系的影响[J] . 水利学报, 2007, 38(1): 47–53 .
- [19] 中华人民共和国水利部 . SL277–2002 水土保持监测技术规程[S] . 北京: 中国水利水电出版社, 2002 .
- [20] 鲁如坤 . 土壤农业化学分析方法[M] . 北京: 农业科技出版社, 2000 .
- [21] WILLIAMS J R . The erosion–productivity impact calculator (EPIC) model: a case history [J] . Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 1990, 329(1255): 421–428 .
- [22] 国家质量监督检验检疫总局 . GB/T 15774–2008 水土保持综合治理效益计算方法[S] . 北京: 中国标准出版社, 2008 .
- [23] 余新晓, 张学霞, 李建牢, 等 . 黄土地区小流域植被覆盖和降水对侵蚀产沙过程的影响[J] . 生态学报, 2006, 26(1): 1–8 .
- [24] WILLIAM M P, IAN C . Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to Pinusradiata[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2000(100): 59–72 .
- [25] ALMEIDA A C, SOARES J V . Comparison of water use in Eucalyptus grandis plantations and Atlantic Rainforest in eastern coast of Brazil[J] . Revista Árvore, 2003, 27(2): 159–170 .
- [26] 黄儒珠, 李机密, 郑怀舟, 等 . 福建长汀重建植被马尾松与木荷光合特性比较[J] . 生态学报, 2009, 29(11): 6120–6130 .
- [27] RICHARDSON C W, FOSTER G R . Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J] . Trans of ASAE, 1983, 26(1): 153–157 .
- [28] 罗作济 . 糖蜜草水土保持效果的初步试验研究[J] . 中国水土保持, 1987(4): 13–14 .
- [29] 孙佳佳, 于东升, 史学正, 等 . 植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J] . 土壤学报, 2010, 47(6): 1060–1066 .
- [30] 王震洪 . 桉树作为云南省水土保持林主要树种的思考[J] . 中国水土保持, 1992(1): 31–34 .
- [31] YIRDAW E, LUUKKANEN O . Indigenous woody species diversity in Eucalyptus globulusLabill . ssp. globulus plantations in the Ethiopian highlands[J] . Biodiversity and Conservation, 2003(12): 567–582 .
- [32] SHARDA V N, SAMRAJ P, SAMRA J S, et al . Hydrological behaviour of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds[J] . Journal of Hydrology, 1998(211): 50–60 .
- [33] SCOTT D F, MAITRE D L, FAIRBANKS D . Forestry and streamflow reductions in South Africa: A reference system for assessing extent and distribution[J] . Water SA, 1998, 24(3): 187–199 .
- [34] 余作岳, 皮永丰 . 广东热带沿海侵蚀地的植被恢复途径及其效应[J] . 热带亚热带森林生态系研究, 1985(3): 97–108 .
- [35] 周国逸, 余作岳, 彭少麟, 等 . 小良试验站 3 种生态系统中蒸发散的对比研究[J] . 生态学报: A 卷, 1995, 15(S): 230–236 .

Response of runoff and sediment reductions to plants in red soil region of southern China

LIAO Yishan^{1, 2}, KONG Chaohui³, ZHUO Muning¹, LI Dingqiang¹

(1. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Environment Pollution Integrated Control,

Guangdong Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Wuhua Soil and Water Conservation expanding Station of Guangdong Province, Meizhou 514471, China)

Abstract: Vegetation has important influences on water erosion, thus its effects on water and sediment reduction have received great attention. The observed data for runoff and sediment yields from field runoff plots between 2011 and 2014, the impacts of vegetation types, inter-month vegetation coverage variation, inter annual vegetation growth and rainfall at different time scales (individual rainfall, monthly and yearly) on the slope runoff and sediment yield were carefully investigated. The results showed that: (1) In comparison to the plots with bare soil, the vegetation on the runoff plots can decreased sediment yield and runoff by 24.77% and 12.95%, respectively. (2) In respect of the plots with bare soils, the eucalyptus, pine trees and *Melinis minutiflora* can significantly reduce sediment yields when the rainfall were within the ranges of 20–30 mm, 20–40 mm and 20–50 mm. The pine trees and *Melinis minutiflora* showed great water conservation benefit when the individual rainfall amounts varied at 10–50 mm. However, the soil and water conservation benefit of the vegetation were insignificant when the individual rainfall was greater than 50 mm. (3) At monthly scale, the runoff and sediment yields showed no significant difference for the runoff plots. However, due to changes of vegetation coverage, their sediment control benefits varied for different months. Whereas their water conservation benefit kept the a constant rule with the highest control benefit for *Melinis minutiflora* tree and the lowest benefit of eucalyptus. (4) At yearly scale, the soil and water conservation benefits were 7.00 %–38.66 % and 2.98 %–8.76 %, 7.74%–37.30 % and 6.67 %–19.67 %, 8.35%–45.33% and 10.00%–23.36%, for the eucalyptus, pine trees and *Melinis minutiflora*, respectively. The annual yields of runoff and sediment for individual rainfall were both in a sequence of bare soil > eucalyptus > pine trees > *Melinis minutiflora*. The agreement between soil and water conservation benefits for different plants indicated that their sediment reduction effect was mainly achieved by reducing runoff.

Keywords: sloping water erosion; vegetation; runoff reductions; sediment reductions; precipitation

(责任编辑: 祁 伟)

(上接第 612 页)

Scale effect of spatial variability of cropland soil water content in black soil region

KONG Da¹, WANG Liquan¹, LIU Jilong², FU Qiang²

(1. College of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal the scale effect of spatial variability of soil water content in black soil region, the change rules of spatial variability of soil water content with the sampling area were analyzed by the methods of traditional statistics, geostatistics and multifractality on the basis of soil water content measured with TDR in 32 m×32 m, 48 m×48 m, 64 m×64 m, 80 m×80 m and 96 m×96 m sampling areas. The results show that the mean values of soil water content from different sampling areas range in 31.13%–33.57%, existing variations caused by scales less than the sampling one and experimental errors, with spatial correlation scope between 25.80–123.60 m, and spatial correlation degrees within 16.742%–29.874% and spatial variability degrees ranged 0.0292–0.1026 in different sampling areas. With the increase of sampling areas, the mean content and spatial variation degree of soil water content decrease, and the variations and spatial correlation range decreased firstly and then increased, its spatial correlation degree increased firstly and then decreased, and local information that caused its spatial variability in different sampling areas are different.

Keywords: black soil region; soil water content; spatial variability; scale effect

(责任编辑: 李福田)