

红壤坡地柑桔园长期试验下水沙动态变化特征分析

涂安国^{1,2}, 谢颂华¹, 李英¹, 聂小飞¹, 莫明浩¹

(1. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029; 2. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 以红壤清耕柑桔园坡地为对象, 研究其长期定位试验下 2001—2015 年径流和泥沙流失量的动态变化过程以及坡面水沙与降雨关系的变异特征。结果表明: 幼树期是红壤清耕柑桔园水土保持防治的关键期, 该时期的土壤侵蚀程度达到极强烈, 而盛果期侵蚀强度可降低到区域土壤容许流失量以下。柑桔树从幼树期、初果期到盛果期, 坡面年径流量和土壤侵蚀模数均呈显著幂函数下降趋势, 在盛果期趋于稳定。果树坡面水沙与降雨的关系均在第 4 年发生了突变, 而裸露坡面水沙与降雨关系没有发生突变。柑桔园各年的减沙效益均大于减水效益, 减流、减沙效益均随着时间表现出先快速增加后维持相对稳定的指数函数关系, 这表明免耕果树的减流、减沙效益具有很大的时间变异性, 不仅可通过减水来减沙, 而且可通过改变水沙关系来减沙。研究结果将为果园水土保持措施效益评估提供依据, 为水土保持措施的合理配置提供参考。

关键词: 柑桔园; 水土流失; 水沙关系; 变化特征; 红壤坡地

中图分类号: S157; S666

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)02-0160-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.02.023

Dynamic Characteristics of Soil and Water Loss Under Long-term Experiment in Citrus Orchard on Red Soil Slope

TU Anguo^{1,2}, XIE Songhua¹, LI Ying¹, NIE Xiaofei¹, MO Minghao¹

(1. Jiangxi Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029;

2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098)

Abstract: The citrus orchard slope and bare control slope were used as the research objects, the long-term dynamic processes of runoff and sediment yield and the variation of the relationship between runoff and sediment were studied based on the observation data from 2001 to 2015. The results showed that the annual runoff and soil erosion modulus of citrus trees slope decreased significantly from sapling stage, early fruit stage to full fruit stage, and tended to be stable in the full fruit stage. Sapling period was the key period of soil and water conservation in red soil orchard. The soil erosion intensity could be very strong in this period, while the soil erosion intensity could be reduced to below the allowable loss of soil in the full fruit period. The relationships between the runoff and the sediment and rainfall dramatically changed in the fourth year, while the relationships between the runoff and the sediment and rainfall of the bare slope maintained. The benefit of sediment reduction in citrus orchards was greater than that of runoff reducing in each year, and the benefits of runoff and sediment reduction increased rapidly and remained relatively stable over time, showing an exponential function. It meant that the benefits of runoff reduction and sediment reduction of fruit trees were very time variable, reduced sediment by reducing runoff as well as reduced sediment by changing the relationship between runoff and sediment. The results would provide a basis for evaluating the benefits of soil and water conservation measures in orchards, and provide a reference for the rational allocation of soil and water conservation measures.

Keywords: citrus orchard; soil erosion; relationship between runoff and sediment; variation characteristic; red soil slope

南方红壤丘陵地区由于地形起伏大和雨量充沛、集中,区域水土流失严重程度仅次于黄土高原,是我国治理水土流失的重点区域之一^[1]。近 30 年来,地处南方红壤丘陵地区的江西进行了以农业综合开发治理模式为主的水土流失治理,其中建设生态柑桔园是其重要内容之一^[2-3]。据《2015 年江西省统计年鉴》,江西省现有果园面积为 4 040.96 km²,其中柑桔种植面积为 3 278.59 km²,占到了果园面积的 81.13%。该模式开发初期存在较为严重的水土流失现象^[4],但随着果树的生长发育和土壤结构改善^[5],果园水土流失的演变规律如何,目前相关研究还未进行系统观测和分析,需要采用野外自然降雨试验方法长期进行观测和评估。现有研究对该模式的水土保持效应评估多采用单次或短期观测数据,时间尺度小。水土保持措施的减水减沙效果具有明显的时空变异性和时间尺度效应^[6-7],综合评价措施的有效性需要考虑水土保持效应随时间的变化^[8]。同时许多研究表明,增加植被覆盖能减少地表径流和产沙,但是对于地表径流量和产沙量之间的关系是否发生改变仍无定论^[9-10]。本试验采用位于江西省德安县的江西水土保持科技园的免耕裸露柑桔园为研究对象,根据 2001—2015 年的自然降雨下地表产流产沙观测数据,分析坡面径流和泥沙量的产生及水沙与降雨之间的关系随年份的变化趋势,为柑桔园水土保持技术配置提供数据和理论支撑。

1 研究方法

1.1 试验地概况

试验地布设在江西水土保持生态科技园内。该园区

地处江西省北部鄱阳湖流域博阳河水系的德安县城郊,位于115°42′38″—115°43′06″E,29°16′37″—29°17′40″N,属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 16.7℃,年日照时间 1 700~2 100 h,无霜期 245~260 d。试验区多年(2001—2015 年)降水量为(1 393.74±329.10)mm(均值±标准差),其中 3—8 月可占全年降水量的 53.29%~85.08%,年际和年内降雨具有极大的变异性。土壤为第四纪红黏土发育的红壤,质地为黏土,土壤呈酸性至微酸性。

1.2 试验设计

2000 年底,在裸露荒地上建设长×宽为 20 m×5 m 的标准径流小区,其水平投影面积为 100 m²,坡度均为 12°,其土壤理化性状见表 1。柑桔试验小区内由上至下栽植 2 年生柑桔树 6 行,每行 2 株,行距 3.0 m,株距 2.5 m,共计 12 株。栽植的柑桔树在 2004 年后进入成熟期并开始结果。柑桔试验小区每年采用清耕管理模式,即人工去除杂草而不扰动地表土壤,对照裸露试验小区采用相同的方式去除杂草。为阻止地表径流进出小区,周边设置围埂,其埂高出地表 30 cm,埋深 45 cm,用混凝土砖块砌成。小区下面筑有矩形集水槽,承接小区径流及泥沙,并引入径流池。径流池根据当地可能发生的最大暴雨和径流量设计成 A、B、C 三池,每池均按 1.0 m×1.0 m×1.2 m 方柱形构筑。A、B 两池在墙壁两侧装有五分法 60°“V”形三角分流堰,其中 A 池 4 份排出,内侧 1 份流入 B 池。B 池与 A 池一样,其中一份进入 C 池。每个径流收集池池壁均安装有搪瓷水尺以测定池水位。

表 1 试验小区 0—20 cm 土壤理化性状

土地类型	年份	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	最大持水量/%	毛管持水量/%	田间持水量/%	有机质含量/%
裸地	2001	1.31	49.02	41.05	37.13	31.41	22.30	1.35
	2006	1.36	47.91	40.79	35.23	29.99	17.92	1.03
	2014	1.37	45.21	38.17	33.11	27.86	—	0.93
果园	2001	1.31	49.02	41.05	37.13	31.41	22.30	1.35
	2006	1.34	48.46	41.07	36.17	29.75	20.59	1.42
	2014	1.22	51.49	41.69	42.21	34.17	—	2.69

1.3 试验观测

小区试验观测均按水利部颁发的水土保持试验规范(SL 419—2007)进行。试验观测期为 2001—2015 年,重点对次降雨下坡面产流产沙进行长期监测。采用试验场内的 SL3—1 型自记雨量计,对典型试验区内降雨量数据进行长时间序列连续采集。径流小区径流量采用人工和自记观测相结合方法,根据径流池中水位尺的读数由试验站预先率定的水位—体积公式计算径流量。降雨后搅拌均匀径流收集池,

并采取水样过滤烘干测定含沙量,进而根据径流量计算侵蚀泥沙总量。

1.4 数据分析

根据观测的各次降雨事件下的坡面径流量和泥沙量,统计形成月、年径流量和泥沙量的时间序列数据;采用 Manner-Kendall 秩次相关检验法分析径流和泥沙量的变化趋势。依据《水土保持综合治理效益计算方法》(GB/T 15774—2008)计算柑桔的减水效益和减沙效益:

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

$$\eta_s = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η_w 、 η_s 分别为减水效益和减沙效益; W_f 、 W_0 分别为柑桔小区与裸地小区的径流量(mm); S_f 、 S_0 分别为柑桔小区与裸地小区的产沙量(kg)。

2 结果与分析

2.1 坡面产流变化特征

试验区 2001—2015 年最大降雨量为 1 889.7 mm(2015 年), 最小降雨量为 898.5 mm(2011 年), 极值比为 2.10, 表明区域降雨量丰沛但年际间差异较大。年降雨量 Manner-Kendall 秩相关系数为 1.09, 呈上升趋势, 但上升趋势不显著($p > 0.05$)。

柑桔园清耕坡面地表产流年平均为 189.3 mm(图 1a), 年径流量最大值出现在 2002 年, 为 681.9 mm, 最小值出现在 2011 年(年降雨量最小), 为 28.8 mm, 可见坡面径流量年际之间变化较大。与裸地相比, 红壤坡地被开发成果园后, 地表产流量迅速减少, 同时年径流量对降雨量的响应程度也减弱。经统计分析, 柑桔园清耕

坡面年径流量和年径流系数的 Manner-Kendall 秩相关系数分别为 -2.87 和 -2.77, 表明它们均随时间推移呈显著减少趋势($p < 0.05$), 其中径流系数与年限增加呈极显著幂函数减少关系。而裸露坡面的径流量和径流系数的 Manner-Kendall 秩相关系数分别为 -0.29 和 -0.69, 无明显减少趋势。

柑桔园坡面随着柑桔树从幼树期、初果期到盛果期, 坡面产流系数呈逐渐减少(图 1b)趋势。前 4 年的幼树期, 柑桔园径流系数最大, 年平均径流系数约为 0.27, 且年际间变化幅度较大。随着果树树冠、根系的生长, 柑桔树进入盛果期, 该生长期径流系数平均为 0.071, 且年际间径流系数变化不大。地表覆盖度低是导致红壤坡地果园幼树期水土流失的重要因素^[11]。柑桔园在栽植初期, 由于果树幼苗树冠小, 根系不发达, 对降雨的调节能力不强, 涵养水源的能力较弱, 降雨形成径流很容易造成严重的土壤侵蚀问题, 遇到降雨量小的年份, 也很容易形成季节性干旱。随着果树的树冠和根系生长, 地上部分树冠能拦截降雨, 根系可以固定土壤, 水土流失减轻。

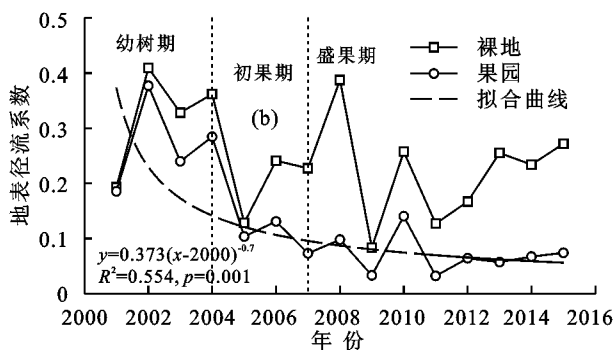
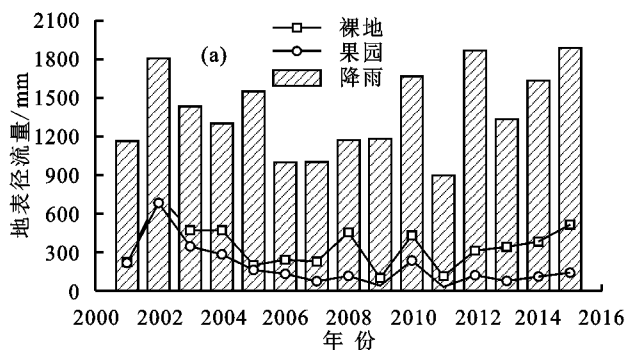


图 1 柑桔园坡地年际演变过程

红壤区果园雨洪资源与季节的关系十分密切, 不同的季节降雨量不同, 同时不同的季节果树生长状况也存在差异, 影响地表径流的大小也不一样。从图 2a 可以看出, 试验区柑桔园平均月产流量最大为 8 月份, 该月平均产流量为 35.9 mm, 其次为 4 月和 5 月, 产流量分别为 34.4, 34.3 mm, 最小为 1 月, 产流量仅为 1.40 mm。3—8 月每年平均地表产流总量为 160.06 mm, 占全年产流量的 87.27%, 主汛期 4—6 月地表产流 87.11 mm, 约占全年产流量的 47.50%。由此可知, 试验区柑桔果园坡面地表产流年内分配不均, 其产流主要集中在梅雨季, 这与荒坡裸地地表产流分配特征一致。

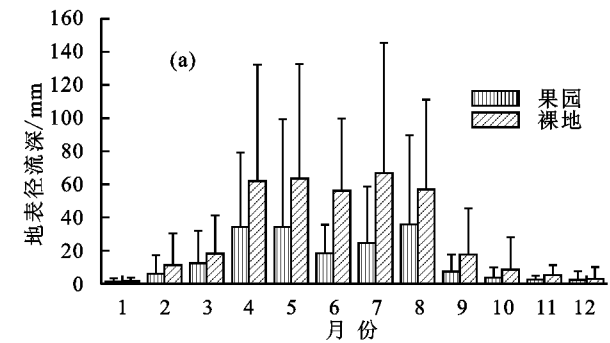
果树在生长期各个物候期的降雨和植被生长不同, 对坡面产流的影响也各不相同。图 2b 为试验区柑桔结果期后 2004—2015 年坡面产流在柑桔各物候期内的分配。由图 2b 可知, 在柑桔树的萌芽催花期和坐果抗逆期, 坡面产流量较大, 降雨量也较大; 而

在柑桔壮果增糖期和成熟期, 坡面产流量却较少, 其相应的降水量也较小。水分是影响柑桔优质高产最重要的生态因子之一。柑桔在年生长周期中需水的关键期是果实细胞分裂期和迅速生长后期, 8—10 月份是柑桔果实膨大期, 又是夏、秋梢抽生期, 但该时期坡面可利用的雨水资源较少, 容易受季节性干旱的影响, 加之其立地条件较一般农作物差, 其生长发育进程中更易受水分逆境的影响。因此, 需要采取有效措施调蓄雨季降雨坡地径流, 合理分配坡面雨洪资源, 形成有效的灌溉条件。

2.2 坡面产沙变化特征

裸地和清耕柑桔园 2001—2015 年平均侵蚀模数分别为 4 745.05, 1 635.84 t/(km² · a), 其中幼树期分别为 6 806.89, 4 907.56 t/(km² · a), 表明清耕措施在果园建设初期存在非常严重的水土流失问题, 需要增加防治措施。 t 检验分析表明, 裸地和清耕柑桔

园间径流量和侵蚀模数差异显著($p<0.05$)。清耕柑桔园坡面土壤侵蚀模数的 Manner-Kendall 秩相关系数为-3.07,表明随着实施年限的增加,土壤侵蚀模数呈显著的幂函数减少趋势。由图 3a 可知,在柑桔园实施后的第 4 年,即果树进入初果期,坡面土壤侵蚀量得到有效控制;在第 7 年,即果树进入盛果期,土壤侵蚀量已控制在红壤区允许量以内($<500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$),流失量也逐渐趋于稳定。由此可知,红



壤坡地果园前 4 年(即幼树期)是果园水土流失防治的关键时期。2001—2015 年坡地各月产沙动态趋势(图 3b)表明,试验坡面侵蚀量年内分布极不均匀,4—9 月是坡面泥沙侵蚀的主要月份,占全年侵蚀量的 64.49%~99.96%,多年平均为 91.62%,与降雨分布基本一致。其中 7 月和 8 月是坡面产沙最大月份。由此可知,7—8 月是强降雨高发期,也是坡地果园水土流失防治的关键期。

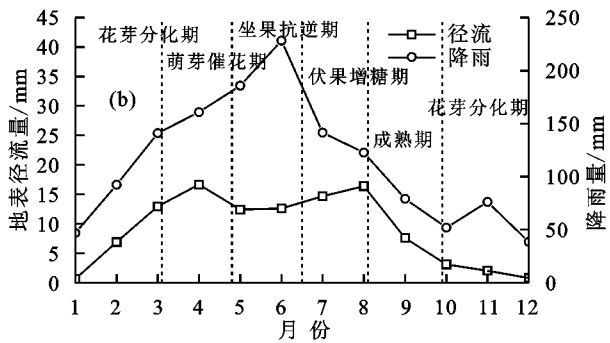
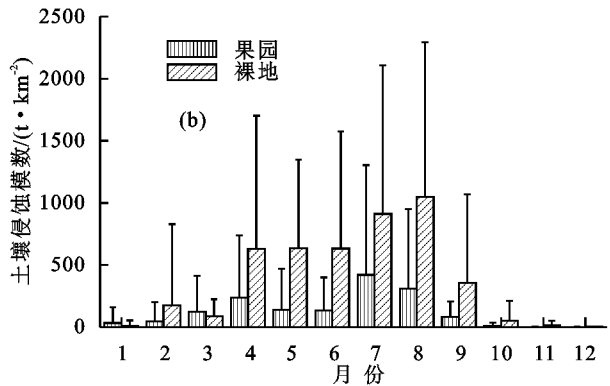
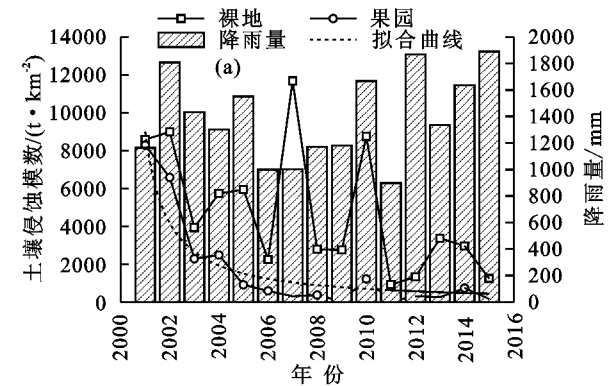


图 2 柑桔坡面地表产流年内分配



注:图(a)中拟合曲线方程为 $y=11.596(x-2000)^{-1.62}$, $R^2=0.592$, $p=0.001$ 。

图 3 坡面产沙年际与年内变化

2.3 水沙突变分析

为了定量确定试验小区坡面水土保持措施对水沙要素作用的突变特征,采用双累积曲线法确定坡面的径流和泥沙的突变年份。由图 4 可知,果园坡面径流量、输沙量与降雨量的双累积曲线的转折点均出现在第 4 年,这与果树在 2004 年后进入成熟期相一致。因此可将 15 年的时间序列划分为 2001—2004 年和 2005—2015 年 2 个阶段。2004 年以前,水沙与降雨的双累积曲线均成一条直线,说明该时期坡面径流量和输沙量主要受降雨影响。该时期果树植株处于快速生长发育阶段,果树对水沙的削减作用虽然在逐渐增加,但仍没有发生突变;2004 年双累积曲线出现转折,说明从 2005 年开始,果树+免耕措施开始显著影响坡面径流量和输沙量。2005 年之后果树的植株没有发生显著改变,但土壤有机质含量得到明显提高(表 1),土壤抗蚀性显著增加^[12-13],输沙量发生了趋

势性减小变化,由此可得出土壤保护措施之一的免耕是坡面产沙量变化趋势发生改变的重要原因。对比裸露坡面,柑桔树显著改变了果园坡面降雨—产流和降雨—侵蚀关系,同时也改变了径流—泥沙关系。

2.4 减流减沙效益变化特征

与裸露小区对比,柑桔树可有效地减少坡面产流量和输沙量,植被措施的减流、减沙效益随时间的推移逐渐得到加强。从图 5 可以看出,坡面柑桔树的减流、减沙效益随时间的变化呈非线性,表现为先快速增加后维持相对稳定的指数函数关系。许炯心等^[7]在无定河的研究结果表明,水土保持措施减沙效益随时间的变化总体趋势上表现出先缓慢增大再急剧增大后保持不变甚至减小的变化过程,与本次研究结果基本一致。这主要是由于该区域降雨量大,特别是在草本植物及枯枝落叶缺乏的情况下,前期果树植被覆盖度增加的减水减沙效益不甚显著。大量的研究证

实,只有当林草覆盖度达到一定程度的时候,才能起到防治土壤侵蚀的作用^[14]。随着果树的生长发育促使植被覆盖度逐渐增大以及土壤结构的改变,其水土保持效果得到逐渐加强。水建国等^[15]对红壤区植被

覆盖度与侵蚀量之间的回归关系表明,土壤侵蚀量与植被覆盖度之间呈良好的负指数关系。因此,果树的减流、减沙效益的时间变异性很大原因是由于其自身生长发育而引起的。

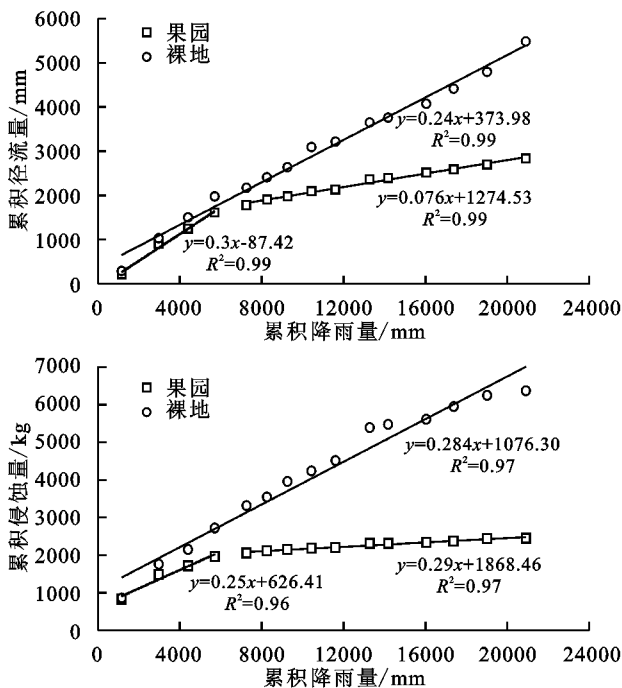


图 4 水沙关系双累积曲线

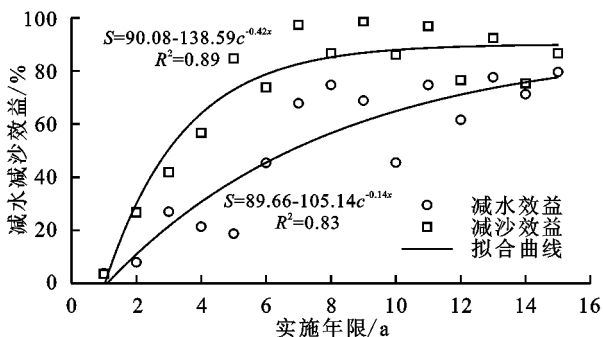


图 5 清耕柑桔园减水减沙效益变化

3 讨论

人为活动是影响红壤丘陵区水土流失的一个重要因素^[16]。如裸露试验小区由于坡地平整使其在前 2 年水土流失非常严重,土壤侵蚀模数达 8 500 t/(km² · a)以上,侵蚀强度为极强度。随着时间的推移,人为活动的影响逐渐减弱,土壤侵蚀强度也逐渐下降,但仍有 61% 的年份达中度侵蚀以上。荒山种植经济果木林既是一种有效的水土流失开发治理措施,同时也是一项促使水土流失的人为活动。山地果园开发初期由于地表被扰动,植被覆盖度低,水土流失普遍比较严重。如本柑桔园试验小区,在果树成年的前 4 年,土壤侵蚀模数平均达 4 908 t/(km² · a),几乎达到强度侵蚀。在果树成年后,由于果树植被覆盖和人为活动影响减弱,坡面水土流失呈逐年下降趋

势,多年平均土壤侵蚀模数仅为 446 t/(km² · a),其中 64% 的年份低于红壤丘陵区土壤允许侵蚀量。由此可知,山地果园开发幼树期是水土流失防治的关键期。山地栽植果树必须在建园初始就要科学规划和兴建水土保持措施,同时尽可能地减少对地表土壤的扰动,采用秸秆覆盖或生草的方式增加幼树期的地表覆盖^[17-18],从而减少山地果园的水土流失,为果树生长发育奠定良好的基础。

与裸露荒坡相比,以果木林开发为主的水土流失治理改善了坡面的下垫面条件,增加了植被覆盖面积,降低了降水产流能力和侵蚀产沙能力,有效地减少了产流量和输沙量。植被发挥水土保持作用存在“量变”与“质变”两个阶段^[19],只有在植被恢复达到一定程度时植被的水土保持功能发生质变,发挥出明显的水土保持功能。研究表明,柑桔树的水土保持作用及水沙关系在栽植后的第 4 年发生了突变,该时期果树进入成熟期,覆盖度达到最大并维持相对稳定。当前有关果木林对坡面产流、产沙的影响机制尚不明确,即它是通过减水而减沙还是通过改变水沙关系来减沙这一问题目前尚不清楚。图 4 结果显示,通过果园开发治理,不仅明显改变了坡面降雨—径流和降雨—泥沙关系,同时也显著改变径流—泥沙关系;图 5 进一步显示果树的减沙效益均优于其减水效益,

表明果树不仅可通过减水来减沙,也可通过改变水沙关系来减沙。但同时也应看到,果树的减水效益远大于减沙效益和减水效益之差,这表明相较于通过改变水沙关系减沙而言,果树主要是通过减水来减沙。廖义善等^[20]研究红壤区坡面桉树、松树和糖蜜草的减沙机制也得出相同的结论。因而,降低柑桔园的土壤侵蚀强度,其关键是提高其减水效益。

4 结论

(1)柑桔树从幼树期、初果期到盛果期,坡面年径流深和土壤侵蚀模数均呈显著下降趋势,在盛果期趋于稳定且其土壤侵蚀强度可降至区域土壤容许流失量以下。幼树期是红壤清耕果园水土保持防治的关键期,该时期土壤侵蚀强度可达极强烈,需要避免人为扰动并采取措施增加地面覆盖。

(2)与裸露试验小区相比,柑桔树有显著的减水减沙效益,且减沙效益优于减水效益。随着实施年限的增加,柑桔树的减水减沙效益呈先快速增加后维持相对稳定的指数函数关系。表明柑桔树的减流、减沙效益随时间的变化呈非线性。因此,评估柑桔树的减流、减沙作用需要考虑其时间变异性。

(3)柑桔树不仅可以通过减水来减沙,也可以通过改变坡面水沙关系减沙,且以通过减水来减沙为主。因而,降低柑桔园的土壤侵蚀强度,其关键是提高其减水效益。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J].生态学报,2013,33(24):7615-7622.
- [2] 王瑞东,姜存仓,刘桂东,等.赣南脐橙园立地条件及种植现状调查与分析[J].中国南方果树,2011,40(1):1-3.
- [3] 张少伟,杨勤科,任宗萍,等.江西省赣南地区土地利用动态分析[J].水土保持研究,2011,18(2):53-56.
- [4] 孙永明,叶川,王学雄,等.赣南脐橙果园水土流失现状调查分析[J].水土保持研究,2014,21(2):67-71.
- [5] 张华明,王昭艳,喻荣岗,等.赣北丘陵区果园不同套种模式对退化红壤理化性质的影响[J].水土保持研究,2010,17(4):258-261.
- [6] 吴晓霞,顾祝军.时间尺度对草地水土保持效应定量研

究的影响[J].水土保持研究,2014,21(5):59-65.

- [7] 许炯心,孙季.无定河水土保持措施减沙效益的临界现象及其意义[J].水科学进展,2006,17(5):610-615.
- [8] Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M. How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? [J]. Earth-Science Reviews,2012,115(1/2):21-36.
- [9] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水土保持措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.
- [10] 原翠萍,雷廷武,张满良,等.黄土丘陵沟壑区小流域治理对侵蚀产沙特征的影响[J].农业机械学报,2011,42(3):36-43.
- [11] 查轩,黄少燕.南方山地果园开发中的水土保持问题[J].水土保持研究,1999,6(2):72-75.
- [12] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):17-22.
- [13] Kadlec V, Holubík O, Procházková E, et al. Soil organic carbon dynamics and its influence on the soil erodibility factor[J]. Soil and Water Research,2012,7(3):97-108.
- [14] 张光辉,梁一民.植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J].水土保持研究,1996,3(2):104-110.
- [15] 水建国,叶元林,王建红,等.中国红壤丘陵区水土流失规律与土壤允许侵蚀量的研究[J].中国农业科学,2003,36(2):179-183.
- [16] 梁音,张斌,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):22-27.
- [17] 潘艳华,王攀磊,郭玉蓉,等.幼龄果园坡耕地保护性耕作的水土保持效果[J].中国水土保持科学,2016,14(3):139-145.
- [18] 王艳廷,冀晓昊,吴玉森,等.我国果园生草的研究进展[J].应用生态学报,2015,26(6):1892-1900.
- [19] 苗连朋,温仲明,张莉.植被变化与水沙响应关系研究:以延河流域为例[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):75-81.
- [20] 廖义善,孔朝晖,卓慕宁,等.华南红壤区坡面产流产沙对植被的响应[J].水利学报,2017,48(5):613-622.