

反坡梯田造林整地工程对坡面产流的作用机制

王进鑫¹, 黄宝龙², 罗伟祥¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 南京林业大学森林资源与环境学院, 南京 210037)

摘要: 从产流、汇流的机制与理论模型出发, 结合理论分析与微型径流小区观测, 对反坡梯田造林整地工程在改变微集水区地形特征, 以及由此而引起坡面产流状况发生变化的内在机制进行了研究。结果表明, 反坡梯田造林整地工程可显著增大微集水区的平均坡度, 其增幅与斜坡水平距成反相关, 与田面水平宽度成正相关。集水区斜坡水平距每减小1 m, 微集水区平均坡度增加 $0.5^{\circ} \sim 7.0^{\circ}$; 集水区斜坡水平距越小, 增幅越大; 田面水平宽度每增加1 m, 平均坡度增加 $2.5^{\circ} \sim 11.5^{\circ}$ 。在斜坡水平距一定时, 微集水区平均坡度虽然随着原地面坡度和田面水平宽度的增加而增大, 但增幅与原地面坡度的增幅基本一致。在造林允许的坡度、坡长范围内, 集水区斜坡水平距对产流总量影响最大, 而地面坡度还具有提高坡面产流率的作用。产流量与坡长、坡度均成正相关。反坡梯田造林整地对坡面产流的作用机制, 在于造林整地缩短了坡长, 改变了坡形, 增大了微集水区的平均坡度, 从而使微区坡面的产流、产沙状况发生了变化。依据传统径流小区观测资料, 不考虑整地对微区地形与产流的影响, 由此设计的造林整地工程, 难以达到预期效果。

关键词: 造林整地; 微地形; 地表径流; 产流机制; 集水

中图分类号: F31

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0292-05

0 引言

坡面的产流、汇流过程与机制, 既是水文学中的重要理论问题, 也是水分运移调控所要研究的基础问题之一。天然降水是黄土高原人工林地水分的唯一来源, 当降水到达林地土壤表面以后, 如同林冠对降水的重新分配一样, 也要进行一次分配, 分为进入土壤的入渗量和不能进入土壤的地表积水量。当积水超过地表最大填注量时, 即沿坡面流动形成地表径流, 而决定这一分配过程的则是土壤入渗能力和降雨强度的对比。当土壤下渗能力大于降雨强度时, 全部降水渗入土壤, 不会产生地表径流; 当降雨强度大于土壤入渗能力时, 就会产生地表径流^[1]。在土壤包气带达到饱和后, 引起的降雨产流称为蓄满产流或饱和表面流 (Saturated overland flow), 而在包气带未饱和之前土壤表面所产生的径流, 则称为超渗产流或 Horton 表面流 (Horton overland flow)^[2]。黄土高原等广大干旱、半干旱地区, 土壤包气带水分亏缺严重, 土壤渗透性能好, 容蓄水量大, 但暴雨多、降雨强度大。因此, 绝大多数产流过程属于 Horton 表面流^[3]。国内外许多学者都对 Horton 表面流进行过研究^[1, 2, 4]。尽管影响土壤入渗能力的因子较多, 但土壤水分物理性质和入渗面的微区地形起着重要作用。

整地作为造林的 8 项基本技术措施之一, 在人工林培育中已得到全面普及。在干旱、半干旱地区, 经过几十年的探索实践, 创造了多种造林整地方法, 如水平沟、反坡梯田 (亦称三角形水平沟)、水平阶、水平槽、鱼鳞坑、

燕翅形整地等等。这些整地方法在设计理念上, 始终体现着地表径流“拦蓄”与土壤改良的思想。从大量有关不同造林整地工程对土壤水分影响的测定成果来看, 反坡梯田整地方式蓄水保墒效果最好。然而关于其作用机理, 特别是其对微区地形、坡面产流和产沙、蓄水面入渗的内在影响, 并未引起人们的足够重视。致使按照一定防御标准设计的整地工程, 达不到相应标准的拦泥蓄水要求^[5]。本应全部拦蓄的径流而未能得以保蓄, 说明造林整地工程除具有被动“拦蓄”之功能外, 必然对微区坡面的产流、产沙性能产生了影响。因此, 探明其影响机制, 不仅可为造林整地工程设计提供理论依据, 确保工程的安全性及高效性, 而且有助于将造林整地工程的“被动拦蓄”作用提升到“集水与拦蓄并重”的新阶段。

1 研究区概况

试验区位于黄土高原南部的淳化县泥河沟流域西北农林科技大学试验基地。土壤为黄壤土, 质地中壤, 多年平均降雨量 600.6 mm, 最多 832.0 mm, 最少 376.0 mm, 降水年变率 14%, 7~9 月降水占全年降水的 53%, 有 50% 的年份降水量在 520 mm 以上, 多年平均气温 9.8℃, 属于暖温带半湿润落叶阔叶林带; 地下水位深 35~60 m, 含水层富水性弱, 林木难以直接吸收利用。该区人工林多分布在沟坡上部, 初植时多采用反坡梯田整地。

2 研究方法

2.1 微区径流监测

采用微型田间径流小区, 对不同坡度、坡长小区的径流量进行了监测。小区宽度 1.5 m, 斜坡水平距分别为 2, 3, 4 和 5 m, 按地面坡度 25°、28°和 31°分为 3 组, 2 次重复。小区下端放置径流桶。径流量观测和计算采用常规法。

2.2 降雨测定

降雨采用 20 cm 口径标准雨量筒与虹吸式自记雨量计, 按常规方法进行测定。

收稿日期: 2003-11-03 修订日期: 2004-03-18

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目 (96-007-01-01-02); 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043602); 西北农林科技大学回国人员科研启动基金 (080804) 资助

作者简介: 王进鑫 (1962-), 甘肃省镇原县人, 副教授, 博士, 主要从事旱区人工生态系统水分运移调控与生物节水理论技术研究。杨凌

西北农林科技大学资源环境学院水土保持系, 712100。

Em ail: jx inw 03@ h o t m a i l . c o m

3 结果与分析

3.1 反坡梯田整地工程对微区地形影响的理论分析

图 1 是反坡梯田^[6]造林整地工程的断面示意图。设集水区斜坡水平距为 L (m), 反坡坡度为 β , 田面内侧坡 $70^\circ \sim 75^\circ$ 。若整地时挖方量与填方量相等, 则整地后集水区坡面由 CB 线变为上凹下凸的 $AGEHO$ 折线。其平均坡度 θ 则为过 AB 和 OC 线段中点的连线 DF 与水平面的夹角。

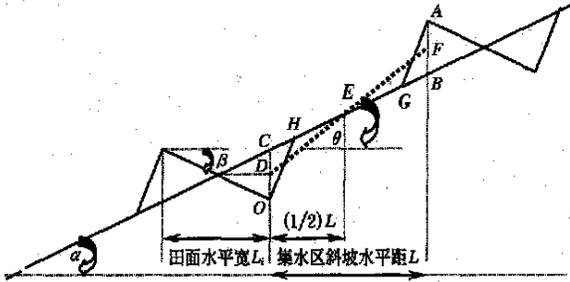


图 1 反坡梯田造林整地工程断面示意图

Fig. 1 Schematic drawing of a cross section of a reversed-slope terrace, showing the gradient change of the original slope after site preparation

由图解法可求得 $OC = \frac{1}{2}L_i(\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta)$, 由于 D 为 OC 线段的中点, 故

$$CD = \frac{1}{4}L_i(\text{tg}\alpha + \text{tg}\beta) \quad (1)$$

$$CE = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{\cos\alpha} \quad (2)$$

由于角 $DCE = 90^\circ + \alpha$, 平均坡度 θ 的余弦, 即:

$$\cos\theta = \frac{1}{2} \cdot \frac{L}{DE} \quad (3)$$

因此, 若能求出 DE , 即可算出平均坡度 θ 。由平面三角中的余弦定理可知

$$DE = \sqrt{CE^2 + CD^2 - 2 \cdot CD \cdot CE \cdot \cos DCE} \quad (4)$$

故

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{L}{2 \cdot \sqrt{CE^2 + CD^2 + 2 \cdot CD \cdot CE \cdot \sin\alpha}} \right] \quad (5)$$

依据(1)、(2)和(5)式, 即可求得不同地面坡度 α 、反坡坡度 β 、集水区斜坡水平距 L 、蓄水区田面水平宽度 L_i 条件下, 微集水区的平均坡度 θ 。通常 β 取 20° ; 蓄水区田面水平宽度 L_i 在 $1 \sim 2$ m 之间。因此, 即可计算出不同集水区斜坡水平距 L 和地面坡度 α 时, 微集水区的平均坡度 θ (表 1)。

从表 1 可以看出, 在地面坡度一定的情况下, 造林整地后微集水区平均坡度 θ 随着集水区斜坡水平距 L 的减小或蓄水区田面水平宽 L_i 的增加而急剧增大。集水区斜坡水平距 L 每减小 1 m, 微集水区平均坡度 θ 增加 $0.5^\circ \sim 7.0^\circ$; 田面水平宽 L_i 每增加 1 m, 微集水区

表 1 不同地面坡度和集水区斜坡水平距条件下微集水区平均坡度 θ 的变化

Table 1 Average slope of bare runoff area under different original surface gradient and slope length of runoff area

蓄水区田面水平宽 L_i /m	集水区斜坡水平距 L /m	不同原地面坡度 α 对应的 θ 值					
		10°	15°	20°	25°	30°	35°
1.0	1.0	24.06	30.28	36.05	41.39	46.34	50.94
	2.0	17.30	23.07	28.63	33.98	39.10	44.02
	3.0	14.92	20.47	25.89	31.16	36.29	41.27
	4.0	13.70	19.13	24.46	29.69	34.80	39.80
	5.0	12.97	18.32	23.59	28.78	33.88	38.89
	6.0	12.48	1.8	23.01	28.17	33.26	38.27
2.0	1.0	35.63	41.98	47.52	52.36	56.64	60.46
	2.0	24.06	30.28	36.05	41.39	46.34	50.94
	3.0	19.62	25.58	31.24	36.61	41.70	46.53
	4.0	17.30	23.07	28.63	33.98	39.10	44.02
	5.0	15.88	21.52	27.00	32.31	37.44	42.40
	6.0	14.92	20.47	25.89	31.16	36.29	41.27

注: 反坡坡度 $\beta = 20^\circ$; θ 值 35° 为带状整地适宜区域, 反之不宜区域

平均坡度 θ 将增加 $2.5^\circ \sim 11.5^\circ$; 集水区斜坡水平距 L 越小, θ 增幅愈大 (图 2)。同样, 在集水区斜坡水平距 L 一定的情况下, 整地后微集水区平均坡度 θ 则随地面坡度 α 和蓄水区田面水平宽 L_i 的增大而增大, 但增幅与原地面坡度 α 增幅基本相同 (图 3)。

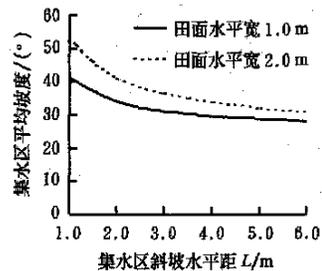


图 2 不同田面水平宽度下微集水区平均坡度与坡长的关系
Fig. 2 Relationship between L and θ under different L_i conditions

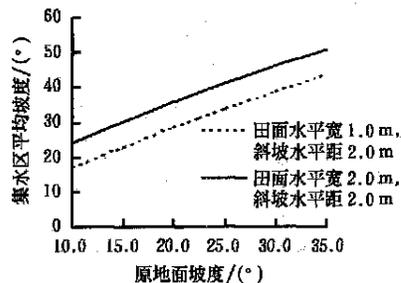


图 3 不同田面宽度下微集水区平均坡度与原地面坡度的关系
Fig. 3 Relationship between α and θ under different L_i conditions

上述分析表明, 造林整地工程对微集水区地形因素, 特别是与产流率密切相关的坡度的影响程度, 不仅与整地规格 (蓄水区田面水平宽度、反坡坡度) 有关, 而且也与造林技术设计中的行距, 即集水区斜坡水平距 L

与田面水平宽 L_i 之和有关。在宜林立地条件(主要是地面坡度)、林分结构(株行距、郁闭度)和整地施工等所能允许的范围,整地可显著改变微集水区的地形特征,特别是微集水区坡度的增加,对提高产流率十分有益。

3.2 微区地形因素对产流的影响

微区地形主要是指微集水区的坡长、坡度和坡形,三者均对坡面降水的再分配产生重要影响。当微集水区面积较小时,坡形可概化为直线型,这样微区地形要素可用坡度和坡长 2 个因子表达。

从目前有关坡面产、汇流过程与机制的理论模型可知^[7-10],流量 Q 或 q 与坡度 θ 成正相关,达到平衡流量的时间 t_e 和平衡流量 q_e 与坡长 L 成正相关。然而,由于自然坡面的异质性、降雨及前期土壤水分的随机性,使得产流、汇流与坡长、坡度之间的关系远比理论公式所表达的要复杂的多^[11-15]。中国自 1941 年在黄土高原设立水土流失监测场(站)以来,尽管曾修建了大量的径流观测场,许多场(站)已连续观测几十年,但有关径流与坡长、坡度的关系至今并未取得一致性的结论。在斜坡水平距一定的情况下。随着坡度的增大,降水入渗明显减小,降水在坡面上发生再分配的临界雨量和临界雨力(雨强与雨量的乘积)降低,流速加快,从而有助于产流;但同时坡面的降雨强度减小,从坡顶到坡脚的径流流程延长,集水坡面的入渗与蒸发损失增大,反过来又对产流产生不利影响。已有对试验径流小区的调查表明,陡坡小区产生的径流大于缓坡,同时也发现径流量随坡长的增加而降低^[16,17]。而以沙漠的调查数据为依

据,表明径流效率 $\eta(\%)$ (单位面积的径流量)随集水面积的增大而减小^[17,18]。即集水面积越大,径流汇集的时间就越长,径流效率 η 就越小。若在坡度一定的情况下,随着坡长加长,不同坡位径流深和入渗水量发生变化,产流、汇流也不相同。由于人工林系统的微集水区坡长不会太长(2~5 m),但坡度较大($> 25^\circ$),而目前有关坡长、坡度对产流的影响研究,除坡度较小外,坡长均在 20~60 m 之间。因而难以说明微区坡长与坡度对产流量的真正影响。

表 2 是一场较为典型的历时 110 min、降雨量 43.7 mm 的暴雨产流情况。其中,最大 15 min 平均雨强达 2.0 mm/min。由表 2 可以看出,微区产流量 M_w (清水)随着斜坡水平距 L 的增大而增大,但平均径流深 h 和产流率 λ 变化似乎并不大。然而,坡度对径流量 M_w 、径流深 h 和产流率 λ 有较大影响。即随坡度增大,3 个指标相应增加。双因素方差分析表明(表 3),在集水区斜坡水平距 2~5 m,常见宜林立地坡度 $25^\circ \sim 31^\circ$ 范围内,坡度 θ 与斜坡水平距 L 对径流量 M_w 、径流深 h 和产流率 λ 均有极显著影响。其中,斜坡水平距对产流量影响最大,而坡度对径流深和产流率影响最大。由于径流效率 η 的概念与传统的径流深 h 一致,从表 2 中可以看出,在集水区斜坡水平距 3~4 m 以下,径流深 h 或径流效率 η 并不是减小,而是随集水区斜坡水平距 L 的增加而增大;超过 3~4 m 则似乎有减小的趋势。当然,这一界限坡长也会因降雨特性和前期土壤含水率的不同而有所变化。

表 2 微集水区坡长与坡度对产流的影响

Table 2 Impacts of gradient and length of slope in micro-catchments area on runoff formation

斜坡 水平距 /m	各坡度产流量与径流深								
	25°			28°			31°		
	产流量 M_w/\bar{L}	平均径流深 h/mm	产流率 $\lambda/\%$	产流量 M_w/\bar{L}	平均径流深 h/mm	产流率 $\lambda/\%$	产流量 M_w/\bar{L}	平均径流深 h/mm	产流率 $\lambda/\%$
2	25.98	8.66	19.82	27.67	9.22	21.10	29.74	9.91	22.68
3	39.57	8.79	20.11	42.46	9.44	21.60	45.46	10.10	23.11
4	53.03	8.84	20.23	56.28	9.38	21.46	60.17	10.03	22.95
5	65.52	8.74	20.0	70.31	9.37	21.44	74.93	9.99	22.86

表 3 坡度与坡长对产流影响的方差分析

Table 3 Variance analysis of gradient and slope length impact on runoff formation

指 标	变异来源	SS	DF	MS	F	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
产流量 M_w	因素 θ	85.8434	2	42.9217	30.53***	5.14	10.90
	因素 L	2998.3755	3	999.4585	710.98***	4.76	9.78
	误差	8.4345	6	1.4058			
	总数	3092.6534	11				
径流深 h	因素 θ	3.1274	2	1.5637	1546.51***	5.14	10.90
	因素 L	0.05676	3	0.0892	18.71***	4.76	9.78
	误差	0.00607	6	0.00101			
	总数	3.19023	11				
产流率 λ	因素 θ	16.37227	2	8.1861	1491.42***	5.14	10.90
	因素 L	0.28987	3	0.09662	17.60***	4.76	9.78
	误差	0.03293	6	0.00549			
	总数	16.69507	11				

由上述分析可以看出,增加坡长可显著提高产流量,而增加坡度还具有增加坡面径流深和提高产流率的显著作用。若蓄水区田面水平宽 L_i 按1m计算,其蓄水区水深随坡度与斜坡水平距的关系如图4所示,蓄水量与降雨量的比例见图5。图4、图5表明,就田面水平宽度1m的植树带来说,在一次43.7mm的产流降雨中,其汇集的水深达17.3~50.0mm,相当于本次降水量的39.6%~114.3%。若以集水量最大的小区(坡度31°;斜坡水平距5m)计算,连同降雨在内蓄水区总水深达93.7mm。按积水型浑水入渗计算,这些水在不到25min的时间内,即可全部渗入根区土壤中(按含沙量4.65%计算,实际含沙量不到1%)。因此,通过改变微区地形,不仅可以对地表径流加以转化利用,而且对缓解人工林根区土壤贮水亏缺具有重要意义。

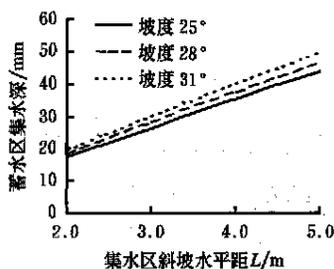


图4 蓄水区田面水平宽度1m时蓄水区集水深与坡度和坡长关系

Fig 4 Relationship among slope, slope length and depth of water in runoff area while the width of terrace is one meter after the rain

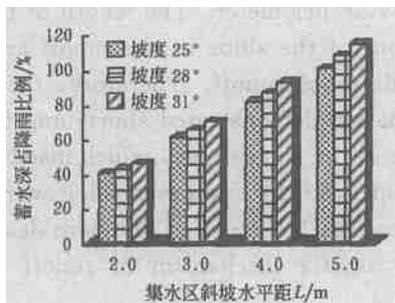


图5 蓄水区田面水平宽度1m时蓄水区集水深占降雨量的比例

Fig 5 Rate of water depth in the runoff area to rainfall while the width of terrace is one meter

3.3 整地对坡面产流的影响机制

通过上述两方面的分析,可以看出整地对微区产流影响的作用机制,一方面在于整地显著增加了微集水区的平均地面坡度,从而使产流率和产流量增大;另一方面,径流量的增加,坡形的改变使得坡面冲刷量增大,增加了蓄水区的泥沙淤积量。特别是坡度增大所引起的产流量增加,可能是依据传统坡面径流观测成果所设计的造林整地工程,在严格按照设计施工,且暴雨不超标的情况下,仍然达不到相应设计标准所预期的拦蓄效果的根本原因。由于自然条件下产流降雨的随机性与坡面产流的复杂性,有关这一问题的全面认识,特别是随着整

地工程使用期限的延长、地表结皮的增厚以及产流降雨类型的不同,产流、产沙与微区地形的关系问题,有待于更进一步的研究。

4 结论与讨论

1) 反坡梯田造林整地工程可显著增大微集水区的平均坡度。其增幅与斜坡水平距成反相关,与田面水平宽度成正相关。集水区斜坡水平距每减小1m,微集水区平均坡度增加 $0.5^{\circ} \sim 7.0^{\circ}$;斜坡水平距越小,增幅越大;田面水平宽度每增加1m,平均坡度增加 $2.5^{\circ} \sim 11.5^{\circ}$ 。在斜坡水平距一定时,平均地面坡度虽然随着原地面坡度和田面水平宽度的增加而增大,但增幅与原地面坡度的增幅基本一致。

2) 在造林允许的坡度、坡长范围内,集水区坡长对产流总量影响最大,而地面坡度还具有提高坡面产流率的作用。产流量与坡长、坡度均成正相关。

3) 反坡梯田造林整地对坡面产流的作用机制,在于整地缩短了坡长增加了坡度,改变了坡形,致使坡面的产流状况发生了变化。这也是依据传统坡面径流小区观测成果所设计的造林整地工程,达不到相应设计标准所预期效果的根本原因。

4) 由于自然条件下产流降雨的随机性与坡面产流的复杂性,有关这一问题的全面认识,特别是随着整地工程使用期限的延长、地表结皮的增厚以及产流降雨类型的不同,产流、产沙与微区地形的关系问题,仍需要作进一步和长期的实验研究。

[参考文献]

- [1] 黄洪峰. 土壤、植物、大气相互作用原理及模拟研究[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [2] 华士乾, 文康. 论流域汇流的数学模型[A]. 南京水文水资源研究所论文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1987, 163-183.
- [3] 王斌瑞, 王百田. 黄土高原径流林业[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [4] Hager W H. A simplified hydrological rainfall-runoff model[J]. J Hydrol, 1984, 74: 151-170.
- [5] 王进鑫. 旱区人工林生态系统水分运移调控机制研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2001.
- [6] 王百田. 干旱半干旱地区集流造林工程设计[J]. 水土保持学报, 1993, 7(4): 60-66.
- [7] 文康, 李碟娟, 金管生, 等. 流域产流计算的数学模型[A]. 南京水文水资源研究所论文集[C]. 北京: 水利电力出版社, 1987, 113-126.
- [8] Bonell M, Gilmour D A. The development of overland flow in a tropical rainforest catchments[J]. J Hydrol, 1978, 39: 365-382.
- [9] Mosley M P. Subsurface flow velocities through selected forest soils, south island, New Zealand[J]. J Hydrol, 1982, 55: 65-92.
- [10] Todini E. Rainfall runoff modeling—past, present and future[J]. J Hydrol, 1988, 100: 341-352.
- [11] Thomas D B, Senga W M, Barrow E G G. Use of mi-

- cro-catchments for tree planting in soil conservation in semi-arid areas [J]. *Soil and Water Conservation in Kenya*, 1983, 324- 332
- [12] Sheikh M I, Shah B H, A leem A. Effect of rainwater harvesting on the establishment of tree species[J]. *Forest Ecology and Management*, 1984, 8(314): 257- 263
- [13] Yair A, Schachak M, Schreiber K F. Hillslope microcatchments: the use surface runoff water to increase primary production in a rocky desert [J]. *Allgemeine Forest Zeitschrift fuer waldwirtschaft und umweltvorsorge*, 1989, 44(22- 26): 642- 647.
- [14] Dunkerley D L, Brown K J. Runoff and runoff areas in a patterned chenopod shrubland, arid western new south wales, Australia-characteristics and origin[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995, 30(1): 41- 55
- [15] Cerda A. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* on runoff and erosion [J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 36(1): 37- 51.
- [16] Shrama K D, Pareek O P, Singh H P. Microcatchment water harvesting for raising Jujube orchards in an arid climate [J]. *Transactions of the ASAE*, 1986, 29(1): 112 - 118
- [17] Critchley W, Siegert K. 孙振玉, 包春云, 符克明, 等译. 径流集蓄技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996
- [18] Ben-Asher J, Berliner P R. Runoff irrigation [A]. In: Tanji K K, Yaron B, et al. *Management of water use in agriculture (Advances in Agricultural Sciences)* [C]. Berlin: Springer-Verlag, 1994, 22: 126- 154

Influence mechanism of reverse-slope terrace site preparation for afforestation on runoff formation of slope

Wang Jinxin¹, Huang Baolong², Luo Weixiang¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China; 2. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract By the way of micro-plot field experimentation and theoretical analysis, micro-relief characteristic and runoff formation under the conditions of site preparation by reverse-slope terrace were studied. The results showed that site preparation by reverse-slope terrace can enlarge the degree of slope where runoff was generated. The range of slope gradient increased was in direct proportion to the width of terrace, which was $2.5^{\circ} \sim 11.5^{\circ}$ per meter, and in the inverse ratio of the slope length, which was $0.5^{\circ} \sim 7.0^{\circ}$ per meter. The length of the slope in runoff area had obvious influence on the total runoff, but the gradient of the slope in the runoff area had the greatest influence not only on the total runoff, but also on the modulus of runoff. Therefore, the regulative mechanism of site preparation by reverse-slope terrace to runoff formation demonstrated shortening the length, increasing the gradient of the slope and changing the form of the slope in the runoff area, which made apparently different formation of runoff and erosion from that of the original slope. So the site preparation work designed according to traditional records of runoff plot with straight slope cannot reach the design standard desired.

Key words: site preparation for afforestation; micro-topography; runoff; mechanism of runoff formation; rainwater harvesting