

# 石质边坡枯枝落叶层的水土保持功能研究

韩瑞宏<sup>1</sup>, 赵江<sup>1</sup>, 梁建华<sup>2</sup>, 王明祖<sup>1</sup>, 刘萍<sup>1</sup>, 陈平<sup>1</sup>

(1. 仲恺农业工程学院 园艺园林学院, 广州 510225; 2. 顺德区大良农产品质量监督检查站, 广东 佛山 528300)

**摘要:**为了解石质边坡枯枝落叶层的水土保持功能,对广东省顺德区大睡牛岗石质边坡枯枝落叶的蓄积量,枯枝落叶持水性能,枯枝落叶减少土壤侵蚀量,枯枝落叶层下土壤理化性质等内容进行了研究。结果表明:大睡牛岗枯枝落叶蓄积量为 219.18 g/m<sup>2</sup>。枯枝落叶层最大持水率为 64%~75%。枯枝落叶层厚度及径流深度影响径流流出时间,随着枯枝落叶厚度的增加,径流流出时间延长,随径流深度增大,径流时间缩短。覆盖枯枝落叶层能极显著提高土壤抗冲性,与未覆盖枯枝落叶的模拟边坡相比,坡度 30°,枯枝落叶 2 cm,径流深度 1 cm 条件下,下坡、中坡、上坡枯枝落叶可减少 87.80% 以上的土壤侵蚀量。大睡牛岗豆科植被较多的坡位(下坡与上坡)其枯枝落叶层下土壤理化性质优于豆科植被较少的坡位(平台与中坡)。

**关键词:**大睡牛岗; 石质边坡; 枯枝落叶层; 持水性能; 土壤理化性质

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0149-06

## Studies on Soil and Water Conservation Functions of Litter Layers on Rocky Slope

HAN Ruihong<sup>1</sup>, ZHAO Jiang<sup>1</sup>, LIANG Jianhua<sup>2</sup>, WANG Mingzu<sup>1</sup>, LIU Ping<sup>1</sup>, CHEN Ping<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture and Landscape Architecture, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Shunde Daliang Checkpoint Station of Agricultural Products Quality Supervision, Foshan, Guangdong 528300, China)

**Abstract:** In order to explore the soil and water conservation functions of litter layers on rocky slope, litter storage, water-holding capacity of litter, amount of soil erosion reduced by litter, the soil physical and soil chemical properties under litter layers had been measured on Dashuiniu hilllock in Shunde District of Foshan City in Guangdong Province. The results showed that the litter storage was 219.18 g/m<sup>2</sup> in Dashuiniu hilllock. The saturated water-holding capacity of litter ranged from 64% to 75%. Litter retarding effect on runoff was related to litter thickness and runoff depth, the time of runoff flow retarded by litter increased with the increase of litter thickness, the time of runoff flow retarded by litter decreased with the increase of runoff depth. Litter could increase soil antiscour ability compared with bare simulation slope, the litter of upper-slope, middle-slope and lower-slope could decrease more than 87.80% of soil erosion amount under 30° simulation slope with 2 cm litter and 1 cm runoff depth. On the slope positions with more leguminous plants (lower-slope and upper-slope), the physical and chemical properties of soil were better than those of the slope positions with less leguminous plants (platform and middle-slope).

**Keywords:** Dashuiniu hilllock; rocky slope; litter layer; water-holding capacity; physical and chemical properties of soil

石质边坡是非常特殊而极端的一类生境,石质边坡大多坡度大,建植植被的土壤有限,植物可利用的基质很少,在强降水情况下极易发生水土流失,危害生态安全。枯枝落叶层在石质边坡生态系统中占有重要的地位,枯枝落叶直接覆盖地表,可以防止雨滴打击,增加降水入渗<sup>[1-2]</sup>。同时枯枝落叶能增加地表的粗糙

度,减缓及减少地表径流,防止土壤冲刷<sup>[3]</sup>。枯枝落叶层是生态系统营养物质循环的一个重要环节<sup>[4]</sup>,枯枝落叶的分解产物能改善土壤性状,增加土壤有机质<sup>[5]</sup>,对石质边坡土壤发育和改良具有重要意义。目前,国内外学者对枯枝落叶层蓄积量<sup>[6]</sup>、水土保持效益<sup>[7]</sup>、枯落物的养分含量<sup>[8]</sup>、分解因子<sup>[9]</sup>、枯枝落叶层下土壤养

分等<sup>[7]</sup>进行了系列研究,但目前对人工复绿的石质边坡其枯枝落叶层水土保持功能的研究还未见报道。近年来,随着房地产、水利、公路等施工项目的增加,广东省产生了大量陡峭裸露的岩质边坡,增加了发生次生地质灾害的安全隐患,石质边坡的修复和绿化迫在眉睫。本研究探讨石质边坡枯枝落叶的水土保持功能,以为石质边坡生态恢复提供科学参考依据。

## 1 研究材料及方法

### 1.1 研究地概况

大睡牛岗为石质边坡,位于广东省顺德区大良街道旧寨村,年平均温度为 22.5℃,1 月平均温度为 13.3℃,7 月平均温度为 28.9℃,年均降雨量 1 649.9 mm<sup>[10]</sup>。崩岗区位于大睡牛岗的北侧边坡,坡顶最高点地理位置为 113°16′58″E,22°48′41″N。2009—2010 年先后通过格构梁工程和植物工程措施锚固坡面,复绿 2 a 后植被覆盖率达 98%<sup>[11]</sup>。

### 1.2 试验材料

试验于 2013 年 10 月进行。试验材料取自大睡

牛岗石质边坡,按边坡的格构梁工程特点,根据该护坡工程修筑的四段阶梯将边坡划分为:平台(海拔 4 m,坡度 0°)、下坡(海拔 16 m,坡度 30°)、中坡(海拔 33 m,坡度 45°)及上坡(海拔 47 m,坡度 45°),采样点分布示意图见图 1。每一坡位选取 0.5 m×0.5 m 的样方 15 个,用直尺测定样方内枯枝落叶层厚度,收集样方内的枯枝落叶,装入黑色塑料袋中并封口。在收集完枯枝落叶的样地中取土样(取样方法见 1.3.5)。回到实验室后将每坡位 15 个样方的枯枝落叶混匀后,立即进行相关指标测定。各坡位的主要植被及枯枝落叶层厚度见表 1。

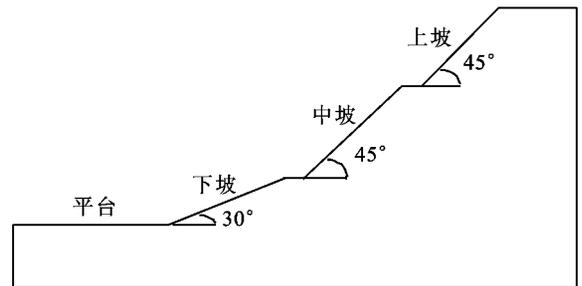


图 1 大睡牛岗采样点分布

表 1 大睡牛岗主要植被

坡位	主要植被	枯枝落叶层厚度/cm
平台	枫香( <i>Liquidambar formosana</i> ),火力楠( <i>Michelia macclurei</i> ),鹅掌柴( <i>Schefflera octophylla</i> ),巴西野牡丹( <i>Tibouchina semidecandra</i> ),红背桂( <i>Excoecaria cochinchinensis</i> ),大叶山蚂蝗( <i>Desmodium gangeticum</i> ),百喜草( <i>Paspalum notatum</i> ),类芦( <i>Neyraudia reynaudiana</i> ),三叶鬼针草( <i>Bidens pilosa</i> ),肾蕨( <i>Nephrolepis auriculata</i> ),白茅( <i>Imperata cylindrica</i> ),蔓生莠竹( <i>Microstegium gratum</i> ),加拿大蓬( <i>Erigeron canadensis</i> )	11.67
下坡	降香黄檀( <i>Dalbergia odorifera</i> ),海南蒲桃( <i>Syzygium cumini</i> ),红花羊蹄甲( <i>Bauhinia blakeana</i> ),阴香( <i>Cinnamomum burmannii</i> ),尖叶杜英( <i>Elaeocarpus apiculatus</i> ),小叶紫薇( <i>Lagerstroemia aindica</i> ),山毛豆( <i>Tephrosia candida</i> ),猪屎豆( <i>Crotalaria pallida</i> ),红背桂( <i>Excoecaria cochinchinensis</i> ),鹅掌柴( <i>Schefflera octophylla</i> ),水鬼蕉( <i>Hymenocallis littoralis</i> ),肾蕨( <i>Nephrolepis auriculata</i> ),台湾相思( <i>Acacia confusa</i> )	3.10
中坡	幌伞枫( <i>Heteropanax fragrans</i> ),阴香( <i>Cinnamomum burmannii</i> ),坡柳( <i>Dodonaea viscosa</i> ),桃金娘( <i>Rhodomyrtus tomentosa</i> ),山毛豆( <i>Tephrosia candida</i> ),鹅掌柴( <i>Schefflera octophylla</i> ),类芦( <i>Neyraudia reynaudiana</i> ),糖蜜草( <i>Melinis minutiflora</i> ),三叶鬼针草( <i>Bidens pilosa</i> ),肾蕨( <i>Nephrolepis auriculata</i> ),水鬼蕉( <i>Hymenocallis littoralis</i> ),红背桂( <i>Excoecaria cochinchinensis</i> ),巴西野牡丹( <i>Tibouchina semidecandra</i> )	5.60
上坡	台湾相思( <i>Acacia confusa</i> ),桃花心木( <i>Swietenia mahogany</i> ),鹅掌柴( <i>Schefflera octophylla</i> ),山毛豆( <i>Tephrosia candida</i> ),红背桂( <i>Excoecaria cochinchinensis</i> ),坡柳( <i>Dodonaea viscosa</i> ),木豆( <i>Cajanus cajan</i> ),糖蜜草( <i>Melinis minutiflora</i> ),水鬼蕉( <i>Hymenocallis littoralis</i> ),翅荚决明( <i>Cassia alata</i> ),降香黄檀( <i>Dalbergia odorifera</i> ),金边黄槐( <i>Cassia bicaapsularis</i> ),大叶山蚂蝗( <i>Desmodium gangeticum</i> )	5.97

### 1.3 试验方法

1.3.1 枯枝落叶吸水速率的测定 参照黄承标等<sup>[5]</sup>的方法加以改进,将烘干的枯枝落叶等重(74 g)置于透水性良好的布袋中并封住袋口,将布袋浸泡于清水中。0~30 min 时段内,每隔 10 min 提起称重;30~120 min(2 h),每隔 30 min 提起称重;2~6 h,每隔 60 min(1 h)提起称重;6~12 h,每隔 2 h 提起称重;

12~24 h,每隔 6 h 提起称重,每组 3 次重复。

1.3.2 枯枝落叶蓄积量与最大持水量的测定 称量枯枝落叶湿样(质量为  $M$ ),称重后置于 80℃ 烘箱内烘干至恒重(质量为  $M_0$ ),根据  $M_0$  计算单位面积枯枝落叶的蓄积量。计算枯枝落叶自然含水率  $M_1$ ,  $M_1 = (M - M_0) / M \times 100\%$ 。将烘干样品置于布袋,放入清水中浸泡 48 h 后提起,待无滴水时称重(质量为

$M_2$ ), 计算枯枝落叶最大净持水量  $M_3$ ,  $M_3 = M_2 - M_0$ , 将最大净持水量换算成体积( $v$ ), 利用单位面积( $s$ )计算出枯枝落叶截留的降水深度  $h$ , 即  $h = v/s$ 。

1.3.3 径流流出时间 参照赵鸿雁<sup>[7]</sup>等、王丹丹等<sup>[12]</sup>的方法加以改进, 采用室内模拟冲刷法, 用白铁皮自制冲刷模拟装置(图2), 给水槽长10 cm、宽10 cm、高10 cm, 给水槽前方设一流水挡板, 挡板底部与给水槽底部有很好的密合性并可以自由取下。流水槽长50 cm、宽10 cm、高10 cm。在流水槽中分次装入不同厚度吸水饱和的枯枝落叶(0 cm, 1 cm, 2 cm, 3 cm), 在30°坡度下, 分别向给水槽中慢慢注入1 mm, 2 mm, 3 mm深径流量(50 ml, 100 ml, 150 ml水量), 注入完毕后拿下流水挡板, 使水流进入流水槽(这样可以保证进入流水槽的水流初速度为0), 在流水槽末端测定出水时间。

1.3.4 土壤侵蚀量测定 模拟冲刷装置同上, 流水槽内装入石质边坡表土, 使土壤容重达到  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , 土层厚度2 cm, 冲刷前在不淹没土样顶部的前提下, 浸泡土样12 h。流水槽上覆盖吸水饱和的枯枝落叶, 枯落物厚度为2 cm。流水槽坡度为30°, 以流水槽径流深度1 cm的水量(500 ml)倒入给水槽, 拿下流水挡板, 使水流进入流水槽, 用杯口直径123 mm, 容量为1 000 ml的大烧杯在流水槽底部收集流出的泥水, 室内静置沉淀, 将泥沙烘干称量, 即流水槽的土壤侵蚀量。

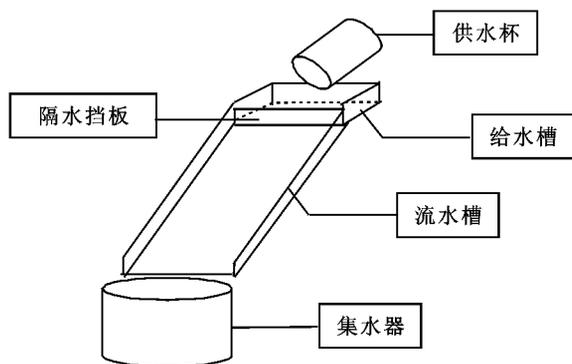


图2 试验模式图

1.3.5 石质边坡土壤理化性质测定 在收集完枯枝落叶的样地中采用环刀法在土层0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm处取样, 重复3次。土壤容重=环刀内干土重/环刀体积; 总孔隙度=(1-容重/比重)×100%, 比重取2.65<sup>[13]</sup>。土壤毛管持水量=环刀内水分重量/环刀内干土质量×100%<sup>[14]</sup>。毛管孔隙度=毛管持水量×容重, 非毛管孔隙度=总孔隙度-毛管孔隙度<sup>[15]</sup>。收集完枯枝落叶的样地中取0—15 cm土样, 并按等体积混合, 风干后按四分法取1 kg左右样品用于测定土壤化学性质, 参照林波等<sup>[16]</sup>的方法测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 枯枝落叶吸水量随时间的变化

由图3可知, 枯枝落叶在浸水的0~10 min吸水速率最快, 吸水量占最大吸水量的52%~60%, 10 min~4 h吸水量达到最大吸水量的80%~88%。浸水18 h后, 枯枝落叶基本达到饱和吸水状态, 吸水量与24 h无明显变化。中坡枯枝落叶吸水量小于其他坡位, 浸泡10 min, 中坡枯枝落叶吸水量为60.9 g, 其他坡位枯枝落叶吸水量均在70 g以上, 浸泡24 h, 中坡枯枝落叶吸水量为101.3 g, 而其他坡位枯枝落叶吸水量为135 g左右。

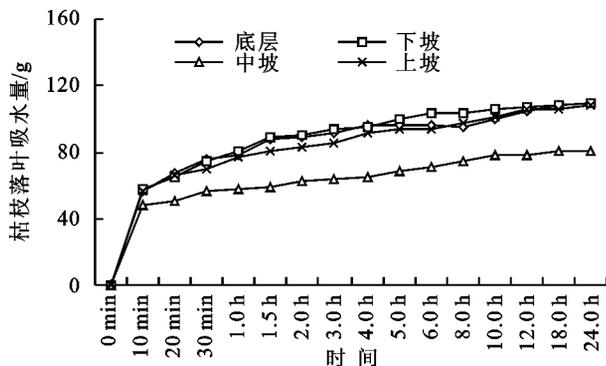


图3 枯枝落叶吸水量随时间的变化

### 2.2 枯枝落叶蓄积量与最大持水量

根据样方内枯枝落叶干重换算各坡位枯枝落叶单位蓄积量, 由表2可知, 下坡枯枝落叶蓄积最大为  $322.33 \text{ g/m}^2$ , 平台次之, 上坡枯枝落叶蓄积量最小为  $117.33 \text{ g/m}^2$ 。由表3可以看出, 中坡枯枝落叶自然含水率最小, 上坡枯枝落叶自然含水率最大。就枯枝落叶最大净持水率而言, 各坡位均高于60%, 其中上坡最大为75.23%。大睡牛岗各坡位枯枝落叶的最大净持水量均在  $350 \text{ g/m}^2$  以上, 其中下坡的最大净持水量最大, 为  $723.40 \text{ g/m}^2$ , 是自身干重的2.2倍, 相当于0.72 mm的降水深度。

### 2.3 枯枝落叶滞缓径流时间

由图4可以看出, 未覆盖枯枝落叶, 流水槽径流流出时间非常短, 小于1 s。而在枯枝落叶覆盖下, 流水槽径流流出时间延长。以径流深度1 mm, 枯枝落叶3 cm为例, 流水槽径流流出时间能达到14 s。总体上, 随枯枝落叶厚度的增加, 径流流出时间增大。以径流深度1 mm, 下坡枯枝落叶覆盖的流水槽为例, 枯枝落叶厚度1 cm, 2 cm, 3 cm, 流水槽径流流出时间分别为未覆盖枯枝落叶流水槽的13倍、21.83倍、23.33倍。总体上, 随径流深度的增加, 径流流出时间变短。以下坡枯枝落叶厚度1 cm为例, 当径流深度从1 mm增至3 mm时, 径流流出时间分别为

7.8 s, 5.8 s 和 5.2 s。在相同径流深度、相同枯枝落叶厚度下,不同坡位的枯枝落叶滞缓径流时间亦不

同。总体上,下坡及中坡枯枝落叶滞缓径流的效果好于平台及上坡。

表2 枯枝落叶蓄积量

项目	平台	下坡	中坡	上坡	平均蓄积量
枯枝落叶蓄积量/(g·m <sup>-2</sup> )	265.20±2.04B	322.33±3.04A	171.86±1.51D	117.33±3.87E	219.18±2.29C

表3 枯枝落叶持水性能

坡位	枯枝落叶自然 含水率/%	枯枝落叶最大 净持水率/%	枯枝落叶最大净 持水量/(g·m <sup>-2</sup> )	枯枝落叶最大 净持水深度/mm
平台	16.41±1.22Bb	63.74±2.51Bc	421.60±47.17CDb	0.42±0.05Bb
下坡	18.66±0.38ABab	69.16±0.53ABb	723.40±20.41Aa	0.72±0.02Aa
中坡	14.78±1.53Bb	73.60±0.21Aa	479.33±10.15BDb	0.48±0.01Bb
上坡	22.33±1.36Aa	75.23±0.74Aa	356.73±9.28Dc	0.36±0.01Bc

注:数值为平均值±标准误;同行不同大写字母表示在0.01水平上差异显著,同行不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。下同。

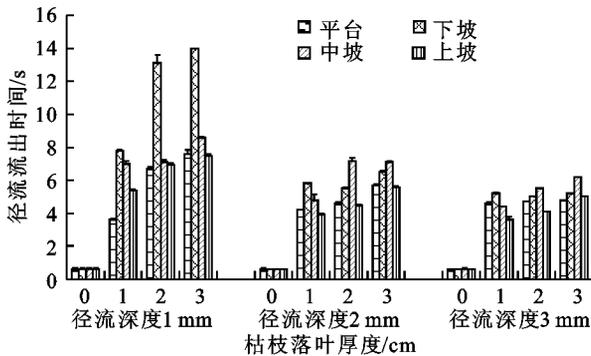


图4 不同径流深度下枯枝落叶层厚度对径流流出时间的影响

## 2.4 枯枝落叶减少土壤侵蚀量

枯枝落叶能极大地削弱雨滴对裸露地表的径流冲刷。由图5可知,径流深度1 cm,坡度为30°时,对照(未覆盖枯枝落叶的流水槽,面积500 cm<sup>2</sup>)土壤侵蚀量达到6.62 g,而覆盖2 cm厚的枯枝落叶可大大减少流水槽的土壤侵蚀,提高抗冲性。与对照相比,平台枯枝落叶可减少62.23%的土壤侵蚀量,下坡、中坡、上坡的枯枝落叶可减少87.80%以上的土壤侵蚀量。

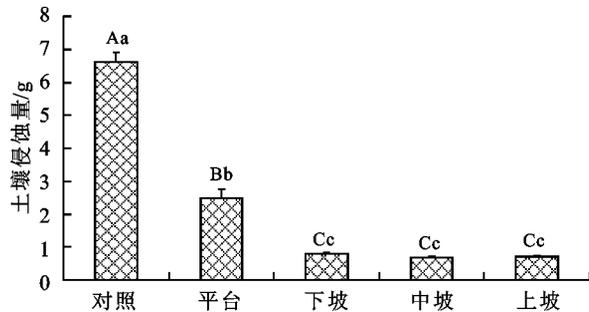


图5 枯枝落叶对土壤侵蚀量的影响

## 2.5 枯枝落叶对石质边坡土壤的改良作用

枯枝落叶使营养物质贮存起来,在微生物作用下,将营养物质不断地归还给土壤<sup>[17]</sup>。大睡牛岗上的土壤为废弃苗圃大田表土与泥炭土按10:1混合的客土,种植植物前土壤的化学性质见表4。种植植被3 a后,由于枯枝落叶的分解,石质边坡土壤的pH、有机质、碱解氮、有效钾含量均有所提高。除中坡外,其他坡位有效磷含量均高于未种植前。不同坡位间相比,上坡和下坡枯枝落叶对土壤的改良效果好于平台和中坡,由表1可知,上坡和下坡豆科植被较多。

由表5可知,同一坡位,总体上随着土层深度的增加,土壤容重增大。不同坡位土壤容重不同,平台和中坡土壤容重高于下坡和上坡。有研究表明,土壤容重值为1.1~1.4 g/cm<sup>3</sup>,土壤松紧程度比较适宜<sup>[18]</sup>。大睡牛岗下坡和上坡土壤容重较适宜,而平台和上坡土壤容重相对较大。

土壤孔隙度是土壤养分、水分、空气和微生物等的传输通道。有研究认为,土壤中总孔隙度在50%左右,其中非毛管孔隙占1/5~2/5时,土壤的通气性、透水性和持水能力比较协调<sup>[19]</sup>。本研究中,除下坡和上坡0—5 cm土壤总孔隙度大于50%,平台10—15 cm土壤总孔隙度小于50%外,其他坡位和土层土壤总孔隙度均在50%左右。除下坡10—15 cm非毛管孔隙较小外,其他坡位和土层非毛管孔隙均占总孔隙度的1/5~2/5(见表5)。总体上,随着土层深度的增加总孔隙度呈下降趋势,而不同坡位间则表现为下坡和上坡土壤总孔隙度和非毛管孔隙高于平台和上坡。

表4 大睡牛岗土壤化学性质

坡位	pH	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )
栽种植物前	4.60	5.07	1.61	2.91	39.78
栽种植物后(平台)	4.96	5.57	1.82	2.92	44.33
栽种植物后(下坡)	4.86	8.51	2.1	5.9	51.28
栽种植物后(中坡)	4.72	5.38	1.82	2.87	43.33
栽种植物后(上坡)	5.95	9.44	3.22	3.29	53.67

表5 大睡牛岗土壤物理性质

坡位	土层深度	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/%	毛管孔隙/%	非毛管孔隙/%
平台	0—5 cm	1.40	53.61	36.35	17.26
	5—10 cm	1.56	46.99	38.45	8.54
	10—15 cm	1.62	37.18	35.15	2.03
下坡	0—5 cm	1.17	58.19	32.85	25.35
	5—10 cm	1.37	50.78	41.75	9.03
	10—15 cm	1.35	48.25	47.70	0.55
中坡	0—5 cm	1.41	49.16	38.00	11.16
	5—10 cm	1.37	49.89	33.90	15.99
	10—15 cm	1.51	48.16	35.40	12.76
上坡	0—5 cm	1.13	63.10	41.50	21.60
	5—10 cm	1.27	56.76	34.55	22.21
	10—15 cm	1.46	45.48	37.15	8.33

### 3 结论与讨论

大睡牛岗枯枝落叶对降水具有较强的吸收作用,枯枝落叶浸泡在水中的前 10 min 吸水量已经达到总吸水量的 50% 以上,这一结果与黄承标等人对桉树林地枯枝落叶层吸水特性的研究结果一致,说明降雨时枯枝落叶层能快速吸收水分<sup>[5]</sup>。而枯枝落叶的吸水过程至 18 h 左右才达到饱和状态,说明枯枝落叶层对降水有较长时间的吸收能力,对于分散、阻滞地表径流的形成,增加水分下渗意义重大。大睡牛岗枯枝落叶具有较大的持水能力,对于保持水土,防止表土蒸发以及水分下渗有着十分重要的作用。中坡枯枝落叶自然含水率小于其他坡,推测可能与中坡种植较多的阴香、鹅掌柴、水鬼蕉等植物有关,阴香的叶片革质,鹅掌柴、水鬼蕉叶片较厚,枯落后分解较慢,阻碍吸水<sup>[20]</sup>。在 4 个坡位中,下坡枯枝落叶的蓄积量及最大净持水量均较大,说明枯枝落叶贮存水量的多少与枯枝落叶的蓄积量有关。

枯枝落叶层能有效滞缓地表径流,其滞缓径流时间与枯落物的厚度、坡度和径流深度等因素有关。本研究中,随枯枝落叶层厚度的增加,枯枝落叶滞缓径流时间延长。随径流深度的增加,枯枝落叶滞缓径流时间减少。

枯枝落叶覆盖能减少石质边坡坡面土壤侵蚀,枯枝落叶减少土壤侵蚀的能力可能与枯枝落叶的形状有关。本研究中,平台枯枝落叶减少坡面土壤侵蚀的效果较差。平台上的灌木和草本植物较多,尤其是白茅、类芦等禾本科草本植物较多,禾本科植物枯落物叶狭窄、细长,与水的接触面积小,导致其保水能力较差,土壤侵蚀量极显著地大于其他坡。

枯枝落叶层和植物根系层直接参与对土壤的改

良。深层的土壤改良主要与植物根系有关,而地表土壤的改良则主要与枯枝落叶层有关,枯枝落叶是森林生态系统养分归还的主要途径<sup>[21-22]</sup>。本研究中,在枯枝落叶作用下,土壤表层(0—15 cm)化学性质改善,有机质、碱解氮、有效钾、有效磷含量提高,土壤肥力增强。本研究未测定种植植被初期石质边坡土壤的物理性质,因此无法对比种植前后枯枝落叶层对土壤物理性质的改良效果,但不同坡位间土壤物理性状差异很大。与平台和中坡相比,下坡和上坡土壤容重小,总孔隙度大,非毛管孔隙大。下坡和上坡除土壤物理性质好于平台和中坡外,土壤的化学性质亦好于平台和中坡。由表 1 可知,下坡和上坡豆科植物较多,豆科植物枯枝落叶中蛋白质含量高,纤维素含量少,分解速率快,能加快有机质等营养物质在土壤中的积累<sup>[23]</sup>,因此,下坡和上坡土壤的有机质、碱解氮等营养物质高于平台和中坡,而土壤有机质含量增加可提高土壤通气性,改良土壤的物理性质。

#### 参考文献:

- [1] 吴钦孝,赵鸿雁,韩冰. 黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性[J]. 西北农林科技大学学报, 2001, 29(5): 95-98.
- [2] 李广,黄高宝. 雨强和土地利用对黄土丘陵区径流系数及蓄积系数的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(10): 2014-2019.
- [3] 薛立,何跃君,屈明,等. 华南典型人工林凋落物的持水特性[J]. 植物生态学报, 2005, 29(3): 415-421.
- [4] 王婧,聂晶,张立敏,等. 昆明树木园枯枝落叶层无脊椎动物群落多样性[J]. 生态学杂志, 2012, 31(12): 3144-3149.
- [5] 黄承标,杨钙仁,魏国余,等. 桉树林地枯枝落叶层的水文特性及养分贮量[J]. 福建林学院学报, 2011, 31(4): 289-294.
- [6] 张冀,汪有科,吴钦孝. 黄土高原几种主要森林类型的凋落及其过程比较研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5):

- 91-94.
- [7] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J].林业科学,2003,39(1):168-172.
- [8] 林德喜,樊后保.马尾松林下补植阔叶树后森林凋落物量、养分含量及周转时间的变化[J].林业科学,2005,41(6):7-15.
- [9] Poll C, Marhan S, Ingwersen J, et al. Dynamics of litter carbon turnover and microbial abundance in a rye detritusphere[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40: 1306-1321.
- [10] 梁红,冯颖竹,王英强,等.广东省顺德古银杏的初步研究[J].中国生态农业学报,2003,11(1):127-129.
- [11] 陈平,梁建华,韩瑞宏,等.顺德裸露石质边坡复绿植物多样性及群落演替分析[J].广东农业科学,2013,17: 155-159.
- [12] 王丹丹,张建军,丁杨,等.晋西黄土区退耕地土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2014,28(3):14-18.
- [13] 马海霞,王柳英.7种混播组合对公路边坡土壤物理性质改善的比较[J].青海大学学报:自然科学版,2007, 25(2):18-21.
- [14] 曹鹤,薛立,谢腾芳,等.华南地区八种人工林的土壤物理性质[J].生态学杂志,2009,28(4):620-625.
- [15] 丁松,应学亮,吕丹,等.赣南飞播马尾松林林下植被盖度对土壤质量的影响[J].水土保持研究,2014,21(3): 31-36.
- [16] 林波,刘庆,吴彦,等.川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响[J].应用与环境生物学报,2003,9(4):346-351.
- [17] 郭继勋,祝廷成.羊草草原枯枝落叶积累的研究:枯枝落叶积累对草原生态环境及生产力的作用[J].草业科学,1994,11(4):15-16.
- [18] 黄进勇,严力蛟,王兆赛.红壤小流域不同土地利用方式下的水土流失特征[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2002,28(1):78-82.
- [19] 赵筱青,和春兰,许新惠.云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J].生态环境学报,2012,21(11):1810-1816.
- [20] 杨曾奖,曾杰,徐大平,等.森林枯枝落叶分解及其影响因素[J].生态环境,2007,16(2):649-654.
- [21] Scott N A, Binkley D. Foliage litter quality and annual net N mineralization: comparison across North American forest sites[J]. Oecologia, 1997, 111(2): 151-159.
- [22] 姜红梅,李明治,王亲,等.祁连山东段不同植被下土壤养分状况研究[J].水土保持研究,2011,18(5):166-170.
- [23] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J].生态学报,2004,23(6):77-83.

~~~~~

(上接第148页)

- [4] 谢元贵,车家骧,孙文博,等.煤矿矿区不同采煤塌陷年限土壤物理性质对比研究[J].水土保持研究,2012,19(4):26-29.
- [5] 甘兵勇.采煤塌陷对生态环境的影响及对策[J].能源环境保护,2003,17(3):46-47.
- [6] 马祥爱,白中科,邵月红,等.黄土丘陵采煤塌陷地非污染生态影响评价:以阳泉煤业(集团)有限责任公司开元矿为例[J].山西农业大学学报:自然科学版,2004,24(1):47-51.
- [7] 栗丽,王曰鑫,王卫斌.采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J].土壤通报,2010,41(5):1237-1240.
- [8] 臧荫桐,汪季,丁国栋,等.采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J].土壤学报,2010,47(2):262-269.
- [9] 麦霞梅,赵艳玲,龚毕凯,等.东滩煤矿高潜水位采煤塌陷地土壤含水量变化规律研究[J].中国煤炭,2011,37(3):48-51.
- [10] 周莹,贺晓,徐军,等.半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性的影响[J].生态学报,2009,29(8):4517-4525.
- [11] 王蓉,康萨如拉,牛建明,等.草原区露天煤矿复垦恢复过程中植物多样性动态:以伊敏矿区为例[J].内蒙古大学学报:自然科学版,2013,44(6):597-606.
- [12] 雷少刚,卞正富.西部干旱区煤炭开采环境影响研究[J].生态学报,2014,34(11):2837-2843.
- [13] 苏敏.采煤塌陷区土壤养分循环及对生态环境的影响研究[D].河北邯郸:河北工程大学,2010.
- [14] 董云中,王永亮,张建杰,等.晋西北黄土高原丘陵区不同土地利用方式下土壤碳氮储量[J].应用生态学报,2014,25(4):955-960.
- [15] 刘伟红.黄土丘陵区露天煤矿复垦土壤有机碳的变化特征及影响因素[D].北京:中国地质大学,2014.
- [16] 周瑞平.鄂尔多斯地区采煤塌陷对风沙土壤性质的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [17] 蔡奎.河北平原区土壤有机碳储量变化控制因素及趋势分析[D].石家庄:石家庄经济学院,2012.
- [18] 孟庆俊.采煤塌陷地氮磷流失规律研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2010.