

黄土高原幼树对坡面流水力学特性及泥沙颗粒组成的影响

张颖^{1,2}, 郑西来^{1,2}, 张晓晖³, 张健²

(1. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 3. 北京市水务局, 北京 100038)

摘要: 选择黄土高原典型树种侧柏、油松、元宝枫和刺槐的一年生树苗, 将其栽植于土槽中生长 3 a。采用人工模拟降雨的方法, 并与裸地进行对照, 研究了森林幼树冠层及根系层对坡面流水力学特性及流失泥沙颗粒组成的影响。研究表明: (1) 各试验坡面小区径流流量均较大, 坡面流的平均水深均 < 1 mm。裸地坡面坡面流的流态为急流, 其它各小区均为缓流。去除植被地上部分和表层易扰动土后, 刺槐和元宝枫坡面的坡面流已接近临界流, 而且两坡面的减流减沙作用明显变弱, 侧柏和油松坡面的坡面流流态仍为缓流, 减流减沙作用增强。(2) 流失的泥沙中, 有林冠覆盖的坡面流失的黏粒 (< 0.001 mm) 所占的比例比裸地坡面的高出 1.40% ~ 2.00%, > 0.05 mm 粒径的泥沙颗粒所占比例比裸地坡面的小 1.04% ~ 1.26%。试验结束后, 只有裸地坡面有明显的粗化层。(3) 去除植被地上部分和表层易扰动土后, 坡面流失泥沙颗粒的平均粒径大于有林冠覆盖的坡面, 但小于裸地坡面。黏粒的百分含量随试验时间不断波动, 说明森林植被的根系增加了林地的抗蚀力。

关键词: 森林植被; 模拟降雨; 水力学特性; 泥沙颗粒

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)04-0007-05

中图分类号: S157.1

Impacts of Young Trees on Hydraulic Characteristics of Overland Flow and Sediment Particle Size in Loess Plateau

ZHANG Ying^{1,2}, ZHENG Xi-lai^{1,2}, ZHANG Xiao-hui³, ZHANG Jian²

(1. Key Lab of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education,

Qingdao, Shandong 266100, China; 2. Environmental Science and Technology Institute, Ocean

University of China, Qingdao, Shandong 266100, China; 3. Beijing Water Bureau, Beijing 100038, China)

Abstract: The typical trees (one year-old *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis* Carr, *Acer truncatum* Bunge and *Robinia pseudoacacia*) on the Loess Plateau were planted in self designed soil box with adjustable gradient three years ago. The experiments were carried out by a simulated rainfall in laboratory. The effects of forest vegetation canopy and root on the characteristics of overland flow and sediment particle composition were analyzed. The results showed that: (1) Runoff yield was large for all plots. The average overland flow depth of each slope was less than 1 mm. F_r of bare land slope was greater than 1.0, as supercritical flow, for others it was smaller than 1.0, as subcritical flow. After the canopy layer was removed and the topsoil was scrapped off, overland flow of *Robinia pseudoacacia* slope and *Acer truncatum* Bunge slope was close to the critical flow, the function of reducing sediment yield and runoff by *Robinia pseudoacacia* and *Acer truncatum* Bunge was significantly weaker, while the function of *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* Carr slope became stronger. (2) Clay loss ratio of the slope covered with vegetation canopy was 1.40% ~ 2.00% higher than that of bare land slope. The proportion of sediment particles with diameter bigger than 0.05 mm was 1.04% ~ 1.26% lower than the bare land. But there was no apparent coarsening soil layer on soil surface. The obvious rough bedding texture layer appeared on bare slope. (3) After removing the forest canopy layer and the disturbed topsoil, the average particle size of sediment particles was larger than that covered by canopy but smaller than the bare land

收稿日期: 2010-07-25

修回日期: 2010-12-04

资助项目: 国家重点基础研究(973) 发展计划项目“水土流失综合调控原理与治理范式”(2007CB407207)。

作者简介: 张颖(1978—), 女(汉族), 山东省胶州市人, 博士, 主要研究方向为流域水土污染治理及水土保持。E-mail: zhangyingqd@yahoo.cn。

通信作者: 郑西来(1959—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 教授, 博士生导师, 主要从事地下水污染控制研究。E-mail: zhxl@ouc.edu.cn。

slope. And the percentage of the lost clay content with diameter smaller than 0.001 mm fluctuated with the time past. It is suggested that forest root systems could increase anti-erosion capability of forest soil.

Keywords: vegetation coverage; simulated rainfall; hydraulic characteristics; sediment particle size

土壤侵蚀是造成土地退化,生态环境恶化的主要原因^[1],黄土高原是严重的水土流失区。该区严重的水土流失不仅使当地的生态环境变得十分脆弱,而且黄河中游地区流域侵蚀产生的大量泥沙淤积在下游河道,加大黄河下游的洪灾风险,给当地人民生命财产和经济建设造成巨大的威胁。因此,对黄土坡面的水力侵蚀的研究显得尤为重要。

Ellision^[2,3]把土壤侵蚀定义为在侵蚀力的作用下,土壤颗粒的分离和输移过程。在无植被覆盖的裸地坡面上,一旦土壤颗粒与土体分离,很容易就被水流搬运。森林植被能从多个角度影响降雨和坡面流的水力特性,增强坡面土壤抗蚀力^[4,6]。由已有的研究结果可知^[7-10],森林植被加入后,对降雨雨滴动能和坡面流能量都造成了影响,可极大增强坡面土壤的抗分散以及抗冲和抗蚀力,森林这种功能与森林群落的类型与结构特点有密切的关系。以往的研究大都集中在森林对坡面产流量及产沙量的影响效应方面,而且,由于坡面流体力特性和泥沙本身特性的复杂性^[11-14],对坡面侵蚀过程中不同树种对坡面流体力学特性的改变以及侵蚀泥沙的颗粒组成变化方面的研究还相对薄弱。因此,本文采用室内模拟降雨试验,研究森林幼树冠层及根系层对坡面流体力学特性及

坡面泥沙颗粒组成的影响,以期揭示不同树种的防蚀机理,为土壤侵蚀模型的建立提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设施

试验选在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的人工模拟降雨大厅进行。本试验采用实验室内侧喷式降雨器,实际降雨高度为 16 m,可近似地模拟出不同强度的天然降雨。试验模型采用 2 m × 0.5 m × 0.5 m 的自制土槽,土槽放置于可调坡度的小车上,以方便移动。槽后端连接一倒三角形中空通道,用于输出降雨径流泥沙。在土槽的底部均匀凿有多个小孔,保证槽内土壤水分能自由入渗。

1.2 试验材料

1.2.1 供试土壤 试验所用土样取自黄土高原山西吉县蔡家川流域,取样深度为表层 0—80 cm。装土前,将供试土壤先过 10 mm 筛进行预处理。然后,通过称土重法,将土样以 5 cm 为一层,分层装入土槽中,边装边均匀压实,将土槽中的土壤干容重控制在 1.2 g/cm³。每次在填装下一层之前将表土打毛,以消除两层土壤之间的垂直层理,装土深度为 45 cm。试验所用土壤的粒径组成见表 1。

表 1 供试土壤的粒径组成

粒径范围/mm	0.5~1	0.25~0.5	0.05~0.25	0.01~0.05	0.001~0.01	<0.001	质地
所占比例/%	1.53	0.76	12.52	47.00	18.00	20.20	中壤土

1.2.2 树苗 于 2003 年春天,选取黄土高原最具代表性的耐旱树种(阔叶乔木树种为元宝枫和刺槐,针叶树种为侧柏和油松)的一年生树苗,栽植于土槽中,生长 3 a 后供试验之用。

1.3 试验方法

1.3.1 试验条件控制 试验数据为 2006 年 8—10 月所测,试验共采用 5 个土槽,9 种不同处理的坡面(元宝枫、刺槐、侧柏和油松坡面、裸地坡面以及元宝枫、刺槐、侧柏和油松只留根系坡面),坡面底坡较均匀。结合黄土地区多年的实际统计数据,试验选取的平均雨强为 90 mm/h,选取的试验坡度为 10°,试验时间控制在 60 min 左右,水温约为 16°。

为保证室内模拟试验各小区的土壤初始状态相似,试验的前一天,对试验用的土槽进行预降雨,降雨强度为 30 mm/h,持续时间为 15 min。将土槽静置

一夜后,第二天上午开始试验。

1.3.2 测树指标测定 土槽中生长的树种的测树指标情况见表 2。在土槽的上空,用数码相机垂直拍摄槽内树种林冠,所得的照片用 AutoCAD 计算机软件进行处理,得到槽内树种的郁闭度。

1.3.3 根系防蚀试验 由于表层土受人为或降雨溅蚀等的影响,扰动性强,且在土壤表层根系分布较少,根系对表层土的影响很小。因此,为体现根系的防蚀作用,试验前去除坡面上的林冠层和土槽内 0—3 cm 的表层土。

1.3.4 坡面流速、径流和流失泥沙量测定及流失泥沙粒级分析 当坡面产流后,用塑料水桶每隔 3 min 取一次径流泥沙样,同时采用颜色示踪法(高锰酸钾溶液)在坡面上部 0—1 m 和下部 1—2 m 分两段分别测定坡面的流速,由于坡面横断面水流流速不等,直

接测定的是两部分坡面横断面的最大流速,所以将所测流速乘以系数 $0.67^{[15]}$,再取两者的平均值,作为坡

面流平均流速。由于坡面流水深很浅以及坡面的床特性,因此本研究对流速作了平均化处理。

表2 各试验坡面测树指标值

树种	平均基径/ cm	平均树高/ m	平均冠幅/cm				郁闭度/ %	林分密度/ (株·m ⁻²)
			西	东	北	南		
侧柏	2.31	1.21	22.08	20.83	22.50	16.25	87.5	12
油松	2.00	0.86	25.83	21.67	20.42	25.00	81.1	12
刺槐	3.21	1.42	45.00	55.00	63.33	43.33	86.7	3
元宝枫	2.17	1.10	41.15	43.08	36.54	38.85	83.2	13

试验结束后,称径流泥沙样的重量,将其沉淀 24 h 后,倒掉上清液,将剩余泥水样放入烘箱中,至恒重后,称取泥沙样的重量,径流量由径流泥沙样的重量减去泥沙重得到。应用 MS2000 激光粒度分析仪(英国马尔文仪器公司)分析流失泥沙的颗粒粒度。

1.4 数据分析方法

根据实测资料,结合前人研究结果,推求坡面流沿程变化规律,由下式求得单宽流量 q 。

$$Q = qB = uhB \quad (1)$$

平均水深 h 由下式求得

$$h = Q/uhB \quad (2)$$

式中: Q ——流量(m³); u ——平均水流流速(m/s); B ——坡面流过水断面宽(m)。

坡面流的阻力方程可用 Darcy—Weisbach 阻力系数 f 表达^[16],即公式

$$f = \frac{8gRS_f}{u^2} \quad (3)$$

式中: S_f ——阻力坡度,无量纲; R ——水力半径,在

坡面流中,可取 $R \approx h$; g ——重力加速度(Nm/s)。无量纲参数雷诺数 Re ,是水流流动型态的重要判据^[16]。其计算公式为:

$$Re = \frac{uR}{\nu} \quad (4)$$

式中: ν ——水流黏滞系数(cm²/s),是温度的函数,可通过测定坡面水流温度确定,其它参数同上式。

弗劳德数 F_r 综合地反映了流速和水深的对比关系^[16],表达式为:

$$F_r = u/\sqrt{gh} \quad (5)$$

式中各参数同上。

2 结果与分析

2.1 森林植被对坡面流水力学特性的影响

不同坡面的坡面流水力学参数见表3。由于坡面流水深很浅,难以直接测量,因此水深通过公式(2)计算得到。雷诺数 Re ,通过公式(4)计算得到,其中,水流黏滞系数 ν ,取水温为 16 °C 时的值 0.011 18 cm²/s。

表3 不同坡面的坡面流水力学特性

试验小区	流量/ (ml·min ⁻¹)	泥沙流失量/ (g·min ⁻¹)	平均流速/ (cm·s ⁻¹)	平均水深/ mm	雷诺数 Re	弗劳德数 F_r	阻力系数 f	
侧柏	A ₁	1 238.25	22.52	6.35	0.65	36.92	0.80	0.220
	A ₂	1 253.64	18.82	6.74	0.62	37.38	0.87	0.186
油松	A ₁	1 273.14	22.31	6.43	0.66	37.96	0.80	0.218
	A ₂	1 290.87	19.15	6.83	0.63	38.49	0.87	0.184
刺槐	A ₁	1 232.70	21.26	5.87	0.70	36.75	0.71	0.277
	A ₂	1 332.81	23.40	7.53	0.59	39.74	0.99	0.142
元宝枫	A ₁	1 146.78	16.39	5.54	0.69	34.19	0.67	0.307
	A ₂	1 339.20	24.48	7.44	0.60	39.93	0.97	0.148
裸地	1 412.88	35.88	8.41	0.56	42.13	1.14	0.108	

注: A₁覆盖度 80% 的坡面小区; A₂去除林冠只留根系的坡面小区。下同。

由于试验前土壤含水量接近饱和,且坡面没有枯枝落叶等覆盖,所以,土壤入渗部分很少,各坡面小区径流量都较大,在 1 146.78~ 1 412.88 ml/min 之间,裸地坡面的流速最大,其次是只留根系的各坡面小区。各试验坡面的平均水深均 < 1 mm,由公式(4)计算得

出,不同试验坡面的水流 Re 值变化为 34.19~ 42.13,按明渠流的一般标准,可以认为各坡面小区的水流均为层流,此时水流的黏滞力作用较强,而紊动性较弱。

弗劳德数 F_r 是否大于 1.0 被作为判别明渠水流急缓流的标准,由公式(5)计算得出,各试验坡面中,

裸地坡面 F_r 大于 1.0, 按明渠水流急缓流的判别标准为急流; 刺槐和元宝枫去除林冠只留根系的坡面小区, F_r 分别为 0.99 和 0.97, 已接近临界流; 其它各小区 F_r 均小于 1.0, 为缓流。

阻力系数反映了坡面水流在运动中所受的综合阻力大小, 由公式(3)得出, 各坡面小区的阻力系数变化在 0.108~0.307 之间, 均较小, 元宝枫有林冠覆盖的坡面阻力系数最大, 为 0.307, 裸地坡面的阻力系数最小, 为 0.108。因此, 可以看出, 森林植被坡面在没有枯枝落叶等覆盖后, 滞留作用不明显。

植被栽植 3 a 后, 供试树种的坡面的泥沙流失量明显比裸地的泥沙流失量(35.88 g/min)少, 元宝枫坡面的泥沙流失量最少, 为 16.39 g/min, 是裸地泥沙流失量的 45.7%, 其次是刺槐坡面泥沙流失量, 为 23.40 g/min, 是裸地泥沙流失量的 59.3%。这可能是由于坡面小区栽植的树种林龄较小, 树高较矮, 均小于 1.5 m, 因此防蚀作用非常明显, 类似于灌木的防蚀机理。

元宝枫坡面的泥沙流失量、流量和流速均最小, 其次为刺槐坡面, 防蚀作用优于侧柏和油松坡面; 而只留根系部分后, 两坡面的减流减沙作用明显变弱, 元宝枫坡面的泥沙流失量从 16.39 g/min 增加到 24.48 g/min, 增加了 33.0%, 刺槐坡面的泥沙流失量从 21.26 g/min 增加到 23.40 g/min, 增加了 10.1%; 而侧柏和油松坡面小区的防蚀作用规律恰好相反, 泥沙流失量变小, 侧柏坡面泥沙流失量减小了 16.4%; 油松坡面泥沙流失量减小了 14.2%。从试验后挖取各坡面上的树种的根系, 分析可看出, 侧柏和油松坡面比刺槐和元宝枫坡面的根层在较浅土层分布密集, 因此, 两坡面由于根系的作用使防蚀作用变强。

2.2 森林植被对坡面流失泥沙颗粒的影响

2.2.1 泥沙粒径组成在不同坡面的变化 由流失泥沙颗粒分析结果(表 4)可以得出, 树种覆盖后, 泥沙流失量减少。流失的泥沙中, 粗颗粒变少, 平均粒径变小, 有林冠的坡面黏粒流失比例比裸地大 1.40%~2.00%, 比原试验土大 2.61%~3.21%, > 0.05 mm 粒径的泥沙颗粒所占比例比裸地小 1.04%~1.26%, 比原试验土小 3.65%~4.29%。试验结束后观察各试验坡面, 可看出, 裸地坡面出现了明显的粗化层, 而有植被坡面没有出现粗化层。这是由于林冠层对降雨雨滴进行重新分配, 使雨滴动能变小, 减弱了溅蚀作用, 使其仅能携带粒径较小的粉沙黏粒部分, 且流失量比裸地坡面小得多, 所以坡面粗化不明显。而裸地坡面溅蚀作用加剧的是粉沙颗粒和少部分较大颗粒的流失量^[17], 土壤中大颗粒还是留了下来, 因此粗

化现象非常明显。同时, 也可以看出, 虽然林冠层能有效防止溅蚀的发生, 但黏粒还是容易流失, 因为有植被覆盖时, 水流速度减慢, 土壤颗粒与坡面水流充分作用, 其结果有助于径流携带的较粗颗粒沉淀, 而泥沙中细颗粒含量增加。因此, 植被覆盖度的增加有利于径流泥沙中细颗粒的富集。而黄土高原的土壤粒度组成主要为粉沙粒和黏粒, 且极易在水中崩解与分散, 抗蚀力薄弱^[18]。因此, 对于具有这种脆弱土壤结构的黄土, 只依赖林冠单层在防蚀方面的作用, 其抗蚀能力还是比较弱的。

表 4 不同坡面侵蚀泥沙颗粒的机械组成 %

试验小区	< 0.001 mm	0.001~0.05 mm	0.05~0.25 mm	0.25~1 mm
侧柏 A ₁	22.81	66.68	10.02	0.49
侧柏 A ₂	21.77	67.26	10.25	0.72
油松 A ₁	23.15	66.12	10.13	0.60
油松 A ₂	21.54	67.31	10.28	0.87
刺槐 A ₁	23.26	66.22	10.13	0.39
刺槐 A ₂	21.40	67.50	10.34	0.76
元宝枫 A ₁	23.41	66.08	10.11	0.40
元宝枫 A ₂	21.83	67.11	10.40	0.66
裸地	21.41	66.82	10.86	0.91
试验土	20.20	65.00	12.52	2.28

由图 1 可看出, 只留根系的坡面小区, 其泥沙颗粒流失情况与前两者都有所不同, 其泥沙流失量比裸地的少, 因为森林植被根系层, 能长期有效的增大土颗粒之间的黏结力, 使其难以溅散。但与有林冠覆盖的坡面相比, 特别是在侵蚀初始阶段, 坡面流未形成前, 由于雨滴直接打击坡面土壤, 其泥沙流失量比有林冠覆盖的多。

只有根系的坡面与其它坡面比较, 流失泥沙中粉沙含量比例增多, 黏粒百分含量比裸地和有植被覆盖的坡面更少。

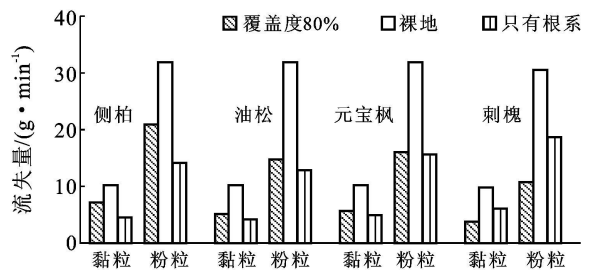


图 1 不同处理小区流失泥沙颗粒中黏粒和粉粒流失量

2.2.2 泥沙粒径组成随时间的变化 植被的加入使泥沙的分散与输移过程变得更加复杂, 本研究的黄土坡面的坡面流处于坡面漫流阶段, 即只发生坡面面状侵蚀, 坡面流的水深和流速都很小, 当坡面没有细沟

发生时,因降雨诱发的径流对土粒的输移方式占主导地位,地表发生不易察觉的降低。各坡面的泥沙颗粒中值粒径随时间变化见图 2,可以看出,在试验的整个过程中,坡面土颗粒床层只到粗化阶段,流失的大部

分是黏粒和粉粒。在整个试验过程中,裸地的泥沙平均粒径最大,其次是只留根系的坡面,有林冠的坡面的泥沙平均粒径最小。所有坡面的流失泥沙颗粒平均粒径在 0.018~0.023 mm 之间波动。

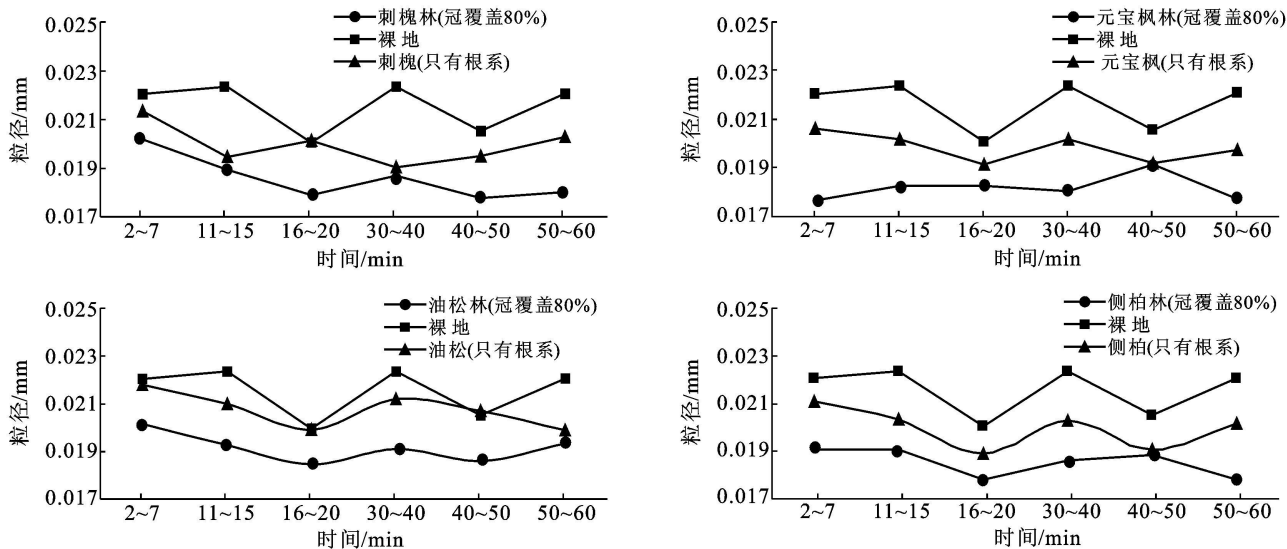


图 2 各试验小区流失泥沙颗粒平均粒径随时间变化

从其流失泥沙黏粒随时间变化图(图 3,以侧柏只留根系小区为例),可看出,去除植被地上部分和土壤表层土的坡面, < 0.001 的黏粒随时间流失百分含量在不断波动,而有林冠坡面和裸地坡面黏粒流失量较稳定。这说明森林植被根系的作用增加了土壤的抗蚀性^[19],雨滴击溅和水流作用于克服泥沙分离损耗的能量较大,降雨—水流系统仅能溅起和输出比裸地坡面更细小的泥沙颗粒,且泥沙流失量也比裸地坡面的少。

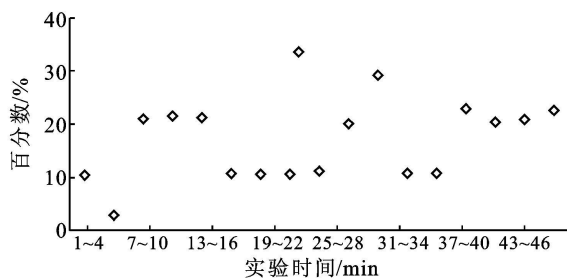


图 3 侧柏只有根系坡面黏粒流失百分比随时间变化

3 结论

(1) 各坡面径流流量都较大,在 1 146.78~1 412.88 ml/min 之间,平均水深均小于 1 mm。各坡面小区的阻力系数变化在 0.108~0.307 之间,均较小,可以看出,森林植被坡面在没有枯枝落叶等覆盖后,滞留作用不很明显,但侵蚀量明显比裸地的侵蚀量少。侧柏和油松坡面比刺槐和元宝枫坡面的根层

在较浅土层分布密集,因此,去除林冠和表层容易扰动的土层后,两坡面的防蚀能力得以增强。

(2) 树种覆盖后,侵蚀的泥沙中,黏粒流失比例比裸地大 1.40%~2.00%,比原试验土大 2.61%~3.21%, > 0.05 mm 粒径的泥沙颗粒所占比例比裸地小 1.04%~1.26%,比原试验土小 3.65%~4.29%。只有根系的坡面,侵蚀泥沙中粉沙含量比例增多,黏粒百分含量比裸地和有植被覆盖的坡面都少。裸地的泥沙平均粒径最大,其次是只留根系的坡面,有林冠的坡面的泥沙平均粒径最小。

(3) 虽然森林植被的林冠层能有效防止溅蚀的发生,根系的作用增加了林地的抗蚀力,但坡面流还是能带走黏粒部分,而土壤有机质及速效 N, P, K 主要是随粉砂和黏粒流失而流失,坡地土壤中细颗粒(包括粉粒与黏粒)随径流的流失也是导致坡地土壤质地沙化与肥力退化的主要原因,因此,只依赖林冠单层在防蚀方面的作用,还远不能达到水土保持的目的,应引起重视。

[参 考 文 献]

[1] 张洪江. 土壤侵蚀原理: 面向 21 世纪课程教材[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999.
 [2] Ellision W D. Soil erosion study part II: Soil detachment hazard by raindrop splash[J]. Aric. Eng., 1947, 28: 197-201.

在蒸散量/降水量)^[12]较大,降水大部分都以蒸散发形式散失,形成的地表径流较少,表现为绿水量大于蓝水量,前者是后者的8.4倍;碧流河流域位于辽西南部沿海地区,气候较卢氏流域湿润,干燥度指数较卢氏流域小,虽然绿水量仍然大于蓝水量,但两者之比减小为1.3。这与王亚平等^[12]研究得出的东北三省自西向东随着气候变湿润,干燥度指数变小的结论是一致的。晋江西流域位于东南沿海最湿润的地区之一,干燥度指数更小,表现为绿水与蓝水之比进一步减小为0.57,因而西流域水资源以蓝水为主。

[参 考 文 献]

- [1] 甄婷婷,徐宗学,程磊,等. 蓝水绿水资源量估算方法及时空分布规律研究:以卢氏流域为例[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1177-1183.
- [2] Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth[C]. Pretoria: Conference of SADC Minister, 1995: 23-24.
- [3] Falkenmark M, Rockstrom J. The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management[J]. Water Resources Plan Management-ASCE, 2006, 132(3): 129-132.
- [4] 陈家琦,王浩,杨小柳. 水资源学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 56-59.
- [5] 程国栋,赵文智. 绿水及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 221-227.
- [6] 吴洪涛,武春友,郝芳华,等. 绿水的多角度评估及其在碧流河上游地区的应用[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 420-428.
- [7] Jurgen S, Karim C A, Raghavan S, et al. Estimating of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(1): 30-49.
- [8] Monireh F, Karim C A, Rainer S, et al. Modeling blue and green water resources availability in Iran [J]. Hydrological Processes, 2008, 23(3): 486-501.
- [9] 吴洪涛,武春友,郝芳华,等. “绿水”的多角度评估及其管理研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2008, 18(6): 61-67.
- [10] 溪县志编纂委员会. 安溪县志[M]. 北京: 新华出版社, 1994: 106-122.
- [11] 王林,张明旭,陈兴伟. 基于SWAT模型的晋江西流域径流模拟[J]. 亚热带资源与环境学报, 2007, 2(1): 28-33.
- [12] 王亚平,黄耀,张稳. 中国东北三省1960—2005年地表干燥度变化趋势[J]. 地球科学进展, 2008, 23(6): 619-627.
- [3] Ellison, W D. Soil erosion study-part V: Soil transport in splash process[J]. Aric. Eng., 1947, 28: 349-353.
- [4] Maía José Marques, Ramón Bienes, Luis Jiménez, et al. Effect of vegetal cover on runoff and soil erosion under light intensity events: Rainfall simulation over USLE plots [J]. Science of the Total Environment, 2007, 378: 161-165.
- [5] Yu X X, Zhang X X, Li J L, et al. Effects of vegetation cover and precipitation on the process of sediment produced by erosion in a small watershed of loess region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 1-8.
- [6] 赵鸿雁,刘向东,吴钦孝. 枯枝落叶层阻延径流速度研究[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1991(14): 64-70.
- [7] 张颖,谢宝元,余新晓,等. 黄土高原典型树种幼树冠层对降雨雨滴特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(4): 70-76.
- [8] 潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 371-377.
- [9] 王占礼,孙全敏,郑粉莉,等. 降雨流动能物理模型研究[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1280-1284.
- [10] 游珍,李占斌,蒋庆丰. 植被对降雨的再分配分析[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(3): 102-105.
- [11] 张光辉. 坡面薄层流水动力学特性的试验研究[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 159-165.
- [12] 刘青泉,李家春,陈力,等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(I): 坡面流[J]. 力学进展, 2004, 34(3): 360-372.
- [13] Kirkby M J. Hillslope Hydrology[M]. UK: John Wiley and Sons, Ltd., 1978.
- [14] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] Li G, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes Landforms, 1996, 21: 509-515.
- [16] 成都科学技术大学水力学教研室. 水力学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
- [17] 肖培青,郑粉莉. 上方来水来沙对细沟侵蚀泥沙颗粒组成的影响[J]. 泥沙研究, 2003(10): 64-68.
- [18] 张翼. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(2): 39-47.
- [19] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 34-37.

(上接第11页)