

# 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响

朱燕琴<sup>1</sup>, 赵志斌<sup>2</sup>, 齐广平<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学水利水电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省水利厅水土保持局, 兰州 730030)

**摘要:** 基于定西市安家沟流域 2014—2016 年连续 3 年侵蚀性降雨产流产沙资料, 研究了植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响。结果表明, 侵蚀性降雨可分为 3 类: A 雨型(短历时、中高雨强)、B 雨型(中雨量、小雨强)和 C 雨型(大雨量、小雨强), 产流产沙频次为 B 雨型 > C 雨型 > A 雨型。径流系数油松林(6.915%~9.379%)、小麦地(5.838%~9.034%)和苜蓿地(6.610%~9.671%)分别是冰草地(2.724%~5.246%)的 1.7~2.5 倍, 是沙棘林(2.296%~3.863%)的 2~3 倍。A 雨型的径流系数大于 B 雨型和 C 雨型, B 雨型和 C 雨型是产流的主要降雨类型。年均土壤流失量为小麦地(1.478~3.478 t/hm<sup>2</sup>) > 苜蓿地(0.558~2.079 t/hm<sup>2</sup>) > 油松林(0.459~0.887 t/hm<sup>2</sup>) > 冰草地(0.097~0.253 t/hm<sup>2</sup>) > 沙棘林(0.012~0.038 t/hm<sup>2</sup>)。小麦地的土壤流失量分别是油松林的 3~5 倍, 是冰草地的 14 倍, 在坡度 10°, 15°, 20° 年均土壤流失量分别是沙棘林的 123, 130, 92 倍。C 雨型对油松林产沙量的贡献率最大, B 雨型次之, A 雨型最小。A 雨型对沙棘林产沙量的贡献率高达 79%~86%, 高强度、短历时降雨是沙棘林产沙的主要雨型。A 雨型对小麦地和苜蓿地产沙量贡献率随着坡度的增大而增大, 在坡度 20° 中、高雨强是小麦地和苜蓿地产沙量增加的主要雨型。小麦地、苜蓿地、油松林、冰草地的径流深与土壤流失量之间呈极显著线性正相关关系( $P < 0.01$ ), 土壤流失量的增速为小麦地 > 苜蓿地 > 油松林 > 冰草地, 随着坡度的增大产沙速度加快。研究结果可为坡面侵蚀预报模型的建立提供重要的理论依据, 同时对科学指导坡面水土保持措施配置有重要的实践意义。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 植被类型; 坡面; 侵蚀

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0009-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.002

## Effects of Vegetation Types and Rainfall Regimes on Slope Erosion and Sediment Yield in Loess Hilly and Gully Region

ZHU Yanqin<sup>1</sup>, ZHAO Zhibin<sup>2</sup>, QI Guangping<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2. Soil and Water Conservation Bureau, Gansu Provincial Water Resources Department, Lanzhou 730030)

**Abstract:** Based on the observed data on runoff plots of Anjiagou watershed in 2014—2016 in Dingxi City, Gansu Province, the effects of vegetation types and rainfall regimes on slope erosion and sediment yield were studied. The results showed that: the erosive rainfall could be classified into three patterns: pattern A was an aggregation of rainfall events with short duration and medium to high intensity, pattern B with moderate rainfall and low intensity, and pattern C with heavy rainfall and low intensity. The rainfall frequency of runoff and sediment generation was pattern B > pattern C > pattern A. The runoff coefficients of pine forest (6.915%~9.379%), wheat field (5.838%~9.034%) and alfalfa land (6.610%~9.671%) were 1.7~2.5 times than that of ice grassland (2.724%~5.246%) and 2~3 times of seabuckthorn forest (2.296%~3.863%) respectively. The runoff coefficient of pattern A was greater than those of pattern B and C. Pattern B and C were the main rainfall patterns of runoff generation. Annual average amount of soil loss was as followed: wheat field (1.478~3.478 t/hm<sup>2</sup>) > alfalfa land (0.558~2.079 t/hm<sup>2</sup>) > pine forest (0.459~0.887 t/hm<sup>2</sup>) > ice grassland (0.097~0.253 t/hm<sup>2</sup>) > seabuckthorn forest (0.012~0.038 t/hm<sup>2</sup>). The amount of soil loss of wheat fields was 3~5 times than that of pine forest, and 14 times of ice grassland,

收稿日期: 2018-10-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016Yfc0400307); 甘肃农业大学青年教师科技创新基金项目(SLSDXY-QN2018-10)

第一作者: 朱燕琴(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事农业水利工程研究。E-mail: zhuyq@gsau.edu.cn

通信作者: 齐广平(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉及农业生态研究。E-mail: qigp@gsau.edu.cn

reached 123, 130 and 92 times of that of seabuckthorn forest at the slope gradient of  $10^\circ$ ,  $15^\circ$  and  $20^\circ$ , respectively. The contribution rate of pattern C to sediment yield of pine forest was the largest, pattern B was the second, and pattern A was the smallest. The contribution rates of pattern A to sediment yield of seabuckthorn forest reached 79%~86%. So high intensity and short duration rainfall was the main rainfall pattern causing soil loss in seabuckthorn forest. The contribution rates of pattern A to sediment yield increased with the increases of slope gradients in wheat field and alfalfa land. At the slope gradient of  $20^\circ$ , rainfall with medium to high rain intensities was the main rainfall pattern causing soil loss. There was a very significantly positive linear correlation ( $P < 0.01$ ) between the runoff depth and the amount of soil loss in wheat field, alfalfa land, pine forest and ice grassland, and the increment speed of soil loss was: wheat fields > alfalfa land > pine forest > ice grassland. At the same time, the increment speed of sediment yield was accelerated as the slope gradients increased. These findings could provide theoretical basis for building the soil erosion prediction model and important practical significance to scientifically guide the allocation of soil and water conservation measures on slope land.

**Keywords:** loess hilly and gully region; vegetation types; slope; erosion

黄土高原不仅是水土流失最为严重的地区,同时也是生态环境最脆弱的地区之一,虽经多年治理,但尚未得到有效控制,严重限制着该区域经济发展和人们生活水平的提高<sup>[1]</sup>。造成土壤侵蚀的因素有很多,其中包括土壤因素、气候因素、地质因素、地形地貌因素、植被因素、耕作方式及水土保持措施<sup>[2]</sup>。而在诸多影响因素中,气候因素中的降雨因素是导致土壤侵蚀产流产沙最主要也是最直接的动力因子,植被对降雨进行再分配,通过改善植被是防止水土流失的主要措施<sup>[3-4]</sup>。为了改善西部地区恶劣的生态环境,国家推出一系列退耕还林还草的治理方略。李森等<sup>[5]</sup>和姜娜等<sup>[6]</sup>在黄土高原不同坡地利用方式的水土流失研究表明,草灌林等植被类型在保持水土的作用方面明显高于坡耕地;徐佳等<sup>[7]</sup>对黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益进行对比分析,得出减流减沙效益表现为林地 > 灌木林 > 草地 > 耕地的结论。通过植物改变下垫面微观格局,增加土壤中水稳性大团聚体含量,提高土壤的抗蚀和抗冲能力,降低坡面水流的流量和流速,有效减少土壤侵蚀量<sup>[8-10]</sup>。

土壤侵蚀的程度、分布规律和发生频率等特征都与降雨特性存在着极为密切的关系。雨强、降雨动能、降雨类型和降雨量等均是降雨的特征因子<sup>[11]</sup>。在植被覆度较低的黄土丘陵区,产流、产沙量与雨强呈正相关关系,降雨强度是产流产沙的主控因子<sup>[12]</sup>。寇馨月等<sup>[13]</sup>采用逐步回归法建立产流产沙量与降雨量、降雨历时、 $I_{30}$ (30 min 雨强)、雨量×历时等多因子的回归方程,其模型达到极显著水平。通过分析降雨类型与产流产沙的关系可以全面揭示产流产沙的影响因素和机制<sup>[14]</sup>。Wei 等<sup>[15]</sup>对土地利用方式及雨型对产流量和产沙量的影响进行对比分析,发现雨强

较大、历时较短的雨型 > 雨强中等、历时中等的雨型 > 雨强较小、历时较长的雨型。尽管现阶段关于降雨特征、植被类型和地形影响的产流产沙的研究<sup>[16-18]</sup>较多,但同时考虑植被类型、降雨类型和坡度对侵蚀产沙影响的研究较少,由于区域降雨存在时空差异,不同区域侵蚀性降雨类型的划分依据和方案均有所不同,针对每个特定区域应根据具体情况具体分析研究,提出有效的防治措施。为此,本研究在以往研究<sup>[19-20]</sup>的基础上,对黄土丘陵沟壑区安家沟流域 1985 年建植的 5 种不同植被类型 3 个坡度梯度共 15 个径流小区,2014—2016 近 3 年侵蚀性降雨产流产沙资料,运用统计方法分析降雨和产流产沙特征,以及不同植被类型和不同坡度条件降雨量、降雨强度等与产流产沙的关系,以期对坡面侵蚀预报模型的建立提供重要的理论依据,同时对科学指导坡面水土保持措施配置具有重要的实践意义。

## 1 研究区概况

安家沟流域是黄河流域祖厉河水系的一级支沟,流域紧邻定西市区( $35^\circ 33' 02'' - 35^\circ 35' 29'' N$ ,  $104^\circ 38' 13'' - 104^\circ 40' 25'' E$ ),面积  $8.56 \text{ km}^2$ ,海拔  $1\ 900 \sim 2\ 250 \text{ m}$ 。水土保持区划属黄土丘陵沟壑区第 V 副区,为典型的半干旱黄土丘陵沟壑区。该流域内年均气温  $6.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降水量  $427 \text{ mm}$ ,其中 60% 以上集中在 7—9 月,且多暴雨,流域蒸发量  $1\ 510 \text{ mm}$ ,干燥度 1.15,属于中温带半干旱气候。

本流域内所见土壤类型,主要是发育在沟间地黄土上的黄绵土和沟道盐渍土,坡面黄土层深厚,质地属粉壤,0—200 cm 土壤容重  $1.09 \sim 1.36 \text{ g/cm}^3$ ,平均容重  $1.2 \text{ g/cm}^3$ ,土壤孔隙率平均为 55%,有机质含量

0.37%~1.34%。流域土地总面积为 8.56 km<sup>2</sup>,其中梯田 387.63 hm<sup>2</sup>,占总面积 45.28%;坡耕地 32.64 hm<sup>2</sup>,占总面积 3.81%;荒地 74.72 hm<sup>2</sup>,占总面积 8.73%;草地 46.08 hm<sup>2</sup>,占总面积 5.38%;乔木林 93.57 hm<sup>2</sup>,占总面积 10.93%;灌木林 165.00 hm<sup>2</sup>,占总面积 19.28%。全流域共有野生植物 23 科、79 种,栽培植物 23 科、64 种。乔木树种主要有油松、侧柏和山杏等,灌木有沙棘和柠条,草本植物为紫花苜蓿、红豆草和本氏针茅。主要的农作物有马铃薯、春小麦、玉米、胡麻以及豌豆等。流域土壤侵蚀严重,多年侵蚀模数 3 280

t/(km<sup>2</sup>·a)。径流小区为 1985 年建植,植被类型分别为耕地、草地、荒地、乔木林油松和灌木林沙棘 5 种类型,能够代表该流域的植被类型。乔木林油松已有 30 年林龄,灌木林沙棘种植于 2007 年,至 2014 年已有 7 年的树龄,植被覆盖度乔、灌木分别达到 80%和 90%以上,油松林、沙棘林、苜蓿地和冰草地水平投影面积均为 10 m×10 m,小麦地为 10 m×5 m,坡度为 10°,15°和 20°(表 1)。为保证各小区下垫面条件基本一致,各径流小区采用相同的管理方式,小区内定期进行人工除草和清理积流池杂物。

表 1 径流小区参数

径流 小区	处理 代号	坡度/ (°)	坡长/ m	坡宽/ m	植被 类型	植被	植被 盖度/%
1	Y10	10	10	10	乔木林	油松	85(郁闭度)
2	S10	10	10	10	灌木林	沙棘	94
3	M10	10	10	5	农地	小麦	18
4	X10	10	10	10	人工草地	苜蓿	55
5	B10	10	10	10	荒地	冰草	87
6	Y15	15	10	10	乔木林	油松	81(郁闭度)
7	S15	15	10	10	灌木林	沙棘	95
8	M15	15	10	5	农地	小麦	25
9	X15	15	10	10	人工草地	苜蓿	52
10	B15	15	10	10	荒地	冰草	85
11	Y20	20	10	10	乔木林	油松	86(郁闭度)
12	S20	20	10	10	灌木林	沙棘	92
13	M20	20	10	5	农地	小麦	13
14	X20	20	10	10	人工草地	苜蓿	53
15	B20	20	10	10	荒地	冰草	85

## 2 研究方法

本研究对安家沟流域 15 个径流小区 2014—2016 年连续 3 年测定的侵蚀性降雨产流产沙资料进行分析研究。径流小区观测内容主要有降雨观测和径流泥沙观测。利用研究区内标准气象观测站内的 SM<sub>1</sub> 型雨量计和 SJ<sub>1</sub> 型虹吸式雨量计监测降雨量和降雨的全过程,记录降雨持续时间和各时段降雨量,并根据需要测算降雨强度。径流量(m<sup>3</sup>)的测定在径流产生后,利用水尺读取各试验小区集流池水深,再根据集流池底面积计算径流总量(m<sup>3</sup>)。含沙量(g/L)的测定采用比重瓶法,先将池内的水和泥沙充分搅拌均匀,用取样瓶在不同区域取水样 3 个,体积均为 500 mL,将水样过滤后烘干称重,计算水样的泥沙含量,取平均值。径流深(mm)为径流量(m<sup>3</sup>)与径流小区面积(m<sup>2</sup>)之比;径流系数(%)=径流深(mm)/同时段内降雨量(mm)×100%;土壤流失量(t/hm<sup>2</sup>)=(径流量(m<sup>3</sup>)×含沙量(g/L)/1000)/(小区面积(m<sup>2</sup>)/10000)。

试验数据均来自自然降雨事件,2014—2016 年

共有 15 次降雨发生产流,降雨量范围 7.7~40.9 mm。按照气象学的雨量标准进行分级,发生产流的降雨(本研究称为有效降雨)共 15 次,其中小雨(≤10 mm)2 次、中雨(10~25 mm)9 次、大雨(25~50 mm)4 次。中雨和大雨占有效降雨总次数的 87%,累计降雨量占侵蚀性降雨总量的 96%,是黄土区发生产流的主要降雨类型,这与以往的测定结果<sup>[21]</sup>相一致,降雨雨强均<10 mm/h,发生 2 次径流的小雨事件(9.1,7.7 mm),降雨历时均较短(19,10 min),降雨雨强分别达到 28.7,46.2 mm/h,属中型和高型雨强,小雨产生径流与时段雨量的集中程度有关。根据侵蚀性降雨特征可将有效降雨分为 3 类,分别为 A 雨型(短历时、中高雨强)、B 雨型(中雨量、小雨强)和 C 雨型(大雨量、小雨强)(表 2)。15 个处理在观测时段产流产沙频次为 B 雨型>C 雨型>A 雨型,B 雨型和 C 雨型是黄土丘陵地区产流的主要雨型。15 个径流小区共计 207 组有效观测数据。使用 SPSS 20.0 软件进行数据处理,使用 Excel 2016 软件绘图。

表 2 降雨雨型分类结果及产流产沙次数

雨型	平均雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	累计 降雨量/mm	次降 雨量/mm	次降雨强度/ (mm·h <sup>-1</sup> )	次降雨 历时/h	累计产流 次数/次	累计产沙 次数/次
A	37.47	16.8	7.7~9.1	28.70~46.20	0.2~0.3	30	30
B	2.54	143.8	11.2~23.8	0.86~5.13	3.5~17.2	123	111
C	3.80	132.3	26.4~40.9	0.69~8.13	3.3~38.0	54	51

### 3 结果与分析

#### 3.1 植被和雨型对径流的影响

3.1.1 不同植被类型的径流系数 降雨是产流发生的源动力,植被对降雨进行再分配,不同的植被类型产流过程不同。由表 3 可知,油松林(6.915%~9.379%)、小麦地(5.838%~9.034%)和苜蓿地(6.610%~9.671%)的径流系数较为接近,冰草地(2.724%~5.246%)次之,沙棘林(2.296%~3.863%)最小。15 个处理在坡长和土壤类型基本一致的情况下,径流系数产生差异主要与植被种类、盖度和坡度有关。在坡度相同的情况下,5 种植被类型的径流系数并未产生显著性差异,但是冰草地和沙棘林的减流效果较明显,油松林、小麦地和苜蓿地的径流系数是冰草地的 1.7~2.5 倍,是沙棘林的 2~3 倍。经过 30 年的植被恢复,油松林的郁闭度达到 80%,冠层对降雨起到一定的截留作用,但缺少林下植被和地面残留物,单一的油松林结构产流系数略高于小麦地,这可能与油松林地表层土壤较宽的斥水性等级有关<sup>[22]</sup>;经过 7 年植被恢复沙棘林的植被盖度达到 95%,高覆盖度对减少产流汇流发挥了重要作用,水土保持效果最好。小麦地和苜蓿地均在 4 月初采用人工撒播的方式种植,植被盖度苜蓿地高于小麦地,但是对小麦地进行翻耕等农业措施,使得地表结构疏松,土壤的入渗能力增强,径流系数小麦地略低于苜蓿地。

3.1.2 雨型和坡度对径流系数的影响 A 雨型 15 个处理各产流 2 次,B、C 雨型油松林、小麦地、苜蓿地和冰草地分别产流 9,4 次,沙棘林产流 5,2 次,沙棘林在中雨和大雨产流次数明显减少,减流效果最好。由表 3 可知,在 10°~20°坡度范围内,不同植被类型平均径流系数随坡度的增大呈缓慢增大趋势,同种植被在 A、B、C 雨型下径流系数也随坡度的增大而增大,这是因为在相同降雨条件下,随着坡度的增大,坡面水流速度加快,入渗能力减弱,多余的雨水转化为地表径流,径流系数增大。土坡的入渗能力是一个动态的物理量,其值受降雨强度、雨型、土坡的初始水分状态等因子的影响。对降雨量、降雨强度与产流量、产沙量进行 Pearson 相关分析(表 4),可知不同植被类型的径流系数与雨强呈极显著正相关( $P<0.01$ ),雨强越大,径流系数越大,A 雨型的径流系数均大于

B、C 雨型。这是因为 A 雨型虽然雨量小,只有 7.7, 9.1 mm,但 2 场降雨的历时短,分别为 10,19 min,降雨强度在所有产流降雨中最大,为短历时、中高强度的降雨,地表来不及下渗,转化为径流的雨量比例增大,径流系数也较大。

表 3 各处理的平均径流系数

处理 代号	平均径流 系数/%	径流系数/%			产流 样本数
		A 雨型	B 雨型	C 雨型	
Y10	6.915abc	13.74	5.44	6.82	15
Y15	8.165ab	15.30	6.97	7.30	15
Y20	9.378a	19.74	8.12	8.12	15
M10	5.838abc	18.91	4.45	2.42	15
M15	7.599abc	27.40	5.19	3.11	15
M20	9.034a	33.54	5.99	3.64	15
S10	2.296c	6.67	0.90	1.41	9
S15	2.834bc	7.32	1.51	1.66	9
S20	3.863abc	8.20	1.99	4.23	9
X10	6.610abc	21.61	5.12	2.46	15
X15	6.995abc	19.26	5.83	3.50	15
X20	9.671a	32.65	7.09	4.00	15
B10	2.724bc	5.67	2.63	1.46	15
B15	4.353abc	10.67	3.90	2.21	15
B20	5.246abc	13.05	4.73	2.50	15

注:表中同列数据不同小写字母表示不同处理间的差异显著( $P<0.05$ ),统计方法为 Duncan 法。

不同植被类型对降雨的响应不同,B、C 雨型均为小雨强,但 C 雨型雨量更大,小麦地、苜蓿地和冰草地的径流系数与降雨量呈显著负相关( $P<0.5$ ),相关系数分别在 -0.516 以上,随着雨量的增大,入渗能力增强,转化为径流的雨量比例减小,B 雨型的径流系数大于 C 雨型的径流系数。乔灌木油松和沙棘通过冠层和树干对降雨的截留以及根系对土壤的固结作用,对降雨的再分配过程和对土壤的入渗过程产生影响,产流过程不同于草地和农地,与雨量的相关性不显著,C 雨型径流系数略高于 B 雨型。研究中还发现,径流系数受到降雨历时的影响。15 个处理降雨历时越大,径流系数越小,对径流系数(%)与降雨历时( $h$ )进行回归分析(图 1),可知冰草地、苜蓿地和小麦地的径流系数( $R_c$ )与降雨历时( $t$ )之间呈幂函数关系: $R_c = a \cdot t^{-b}$ ( $a, b$  为常数,  $P<0.01$ );油松林和沙棘林的径流系数与降雨历时之间呈对数函数关系: $R_c = a \cdot \ln(t) + b$ ( $a, b$  为常数,  $P<0.01$ ),决定系数  $R^2$  在 0.6 以上,植被对径流系数的影响随着降雨历时的变化产生了差异,不同植被类型对产流过程的影

响不同,但总体来看,径流系数随降雨历时的延长逐渐减小,并趋于稳定,短历时降雨径流系数更大。

### 3.2 植被类型和雨型对土壤流失量的影响

3.2.1 不同植被类型的土壤流失量 由表 5 可以看出,不同植被类型年均土壤流失量由大到小依次为小麦地(1.478~3.478 t/hm<sup>2</sup>)>苜蓿地(0.558~2.079 t/hm<sup>2</sup>)>油松林(0.459~0.887 t/hm<sup>2</sup>)>冰草地(0.097~0.253 t/hm<sup>2</sup>)>沙棘林(0.012~0.038 t/hm<sup>2</sup>)。小麦地进行的人为翻耕等农业措施使得地表土壤结构疏松,抗蚀性减弱,土壤流失量最大,分别是油松林的 3~5 倍,是冰草地的 14 倍,在坡度 10°,15°,20°年均土壤流失量分别是沙棘林的 123,130,92

倍,随着沙棘林树龄的增大盖度高于 90%,水土保持效果非常显著;在黄土丘陵沟壑区冰草地盖度高,保持其长期良好的水土保持能力,仅次于沙棘林;单一的油松林结构减流效果较差,但其减沙效果较苜蓿地更好,主要是其根系固结土壤,增强土壤结构的稳定性,加之郁闭度较高,林冠层的有效拦截作用,削弱降雨到达地面的动能,保护了土壤,减轻土壤流失。由此可见,在黄土丘陵区不同植被类型表现出的水土保持功效差异很大,种植苜蓿并不能起到减流减沙的作用,单一的油松林经过 30 年的植被恢复,减沙效果较农地好,灌草林的蓄水保土功效最好,尤其是建植 7 年的沙棘林显示出其优越的水土保持功能。

表 4 不同植被类型、不同坡度条件下径流系数和产沙量与降雨因子的 Pearson 相关系数

植被类型	坡度/ (°)	径流系数 与雨量	径流系数 与雨强	土壤流失量 与雨量	土壤流失量 与雨强	土壤流失量与 径流深
油松	10	-0.240	0.740**	0.551*	-0.121	0.975**
	15	-0.304	0.676**	0.483	0.142	0.962**
	20	-0.313	0.692**	0.506	0.163	0.940**
苜蓿	10	-0.524*	0.886**	-0.105	0.635*	0.857**
	15	-0.584*	0.913**	-0.203	0.838**	0.882**
	20	-0.568*	0.960**	-0.337	0.979**	0.930**
小麦	10	-0.545*	0.779**	-0.078	0.462	0.945**
	15	-0.533*	0.884**	-0.230	0.763**	0.949**
	20	-0.516*	0.828**	-0.278	0.862**	0.947**
沙棘	10	-0.505	0.951**	-	-	-
	15	-0.539	0.967**	-	-	-
	20	-0.157	0.829**	-	-	-
冰草	10	-0.584*	0.645**	0.030	0.380	0.879**
	15	-0.583*	0.832**	0.083	0.575*	0.838**
	20	-0.630*	0.869**	0.159	0.604*	0.824**

注: \*\* 表示在 0.01 水平极显著相关; \* 表示在 0.05 水平显著相关; - 表示样本数较少,未进行相关性分析。

表 5 各处理的土壤流失量及雨型对土壤流失量的贡献率

处理 代号	A 雨型		B 雨型		C 雨型		年均土壤流失量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	产沙 样本数
	土壤流失量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	贡献率/%	土壤流失量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	贡献率/%	土壤流失量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	贡献率/%		
Y10	0.214	15.530	0.356	25.835	0.808	58.636	0.459	15
Y15	0.317	15.795	0.658	32.785	1.032	51.420	0.669	15
Y20	0.446	16.761	0.924	34.724	1.291	48.516	0.887	15
M10	1.577	35.574	1.480	33.386	1.376	31.040	1.478	15
M15	3.527	47.765	1.910	25.867	1.947	26.368	2.461	15
M20	5.691	54.543	2.368	22.695	2.375	22.762	3.478	15
S10	0.030	85.714	0.002	5.714	0.003	8.571	0.012	4
S15	0.050	86.207	0.005	8.621	0.003	5.172	0.019	4
S20	0.090	78.947	0.014	12.281	0.010	8.772	0.038	4
X10	0.530	31.680	0.580	34.668	0.563	33.652	0.558	15
X15	1.487	42.693	0.940	26.988	1.056	30.319	1.161	15
X20	3.709	59.458	1.190	19.077	1.339	21.465	2.079	15
B10	0.075	25.685	0.115	39.384	0.102	34.932	0.097	15
B15	0.145	28.155	0.180	34.951	0.190	36.893	0.172	15
B20	0.236	31.135	0.231	30.475	0.291	38.391	0.253	15

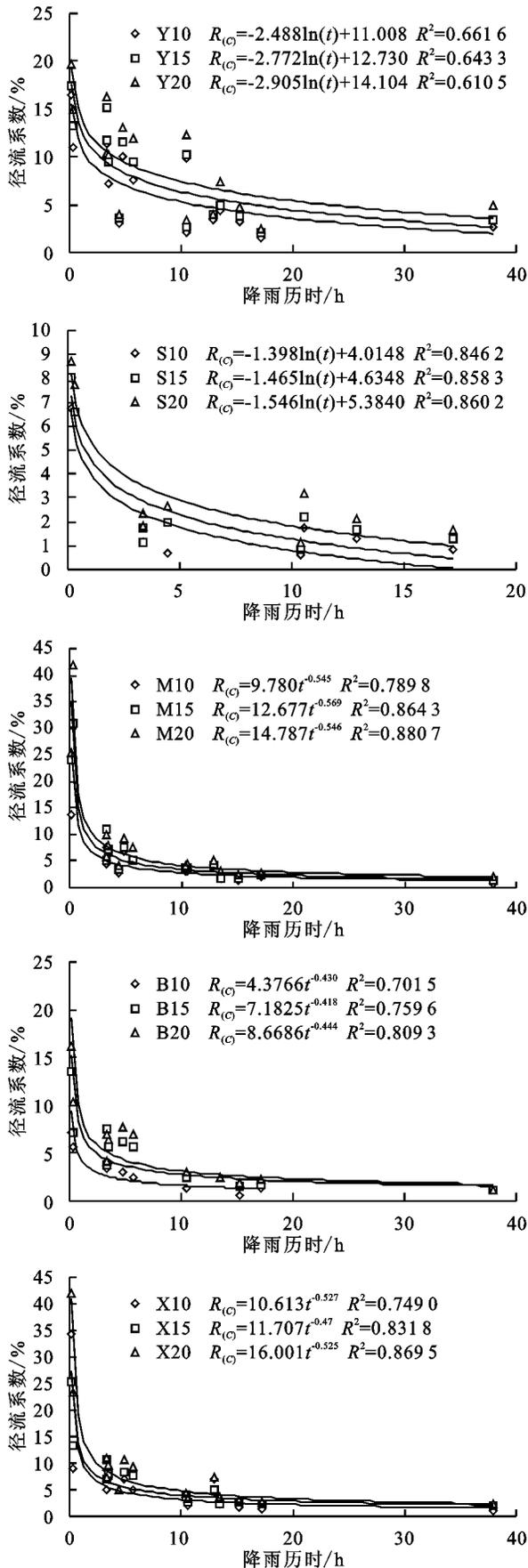


图 1 各处理径流系数与降雨历时的散点图及拟合曲线

3.2.2 雨型和坡度对土壤流失量的影响 坡度对产沙量的影响相对较小,在  $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$  随着坡度的增大,产沙量缓慢增加。不同植被类型在坡度和降雨的共

同作用下,土壤流失量变化规律不同。由表 5 可知,不同植被类型的土壤流失量受到雨型的影响产生了差异,A 雨型 15 个处理各产沙 2 次,B、C 雨型油松林、小麦地、苜蓿地、冰草地分别产沙 9,4 次,沙棘林产沙各 1 次,沙棘林在中雨和大雨产沙频次明显减少,产沙量最小。A、B 雨型土壤流失量为小麦地 > 苜蓿地 > 油松林 > 冰草地 > 沙棘林,这与年均土壤流失量的变化顺序一致,C 雨型土壤流失量为小麦地 > 油松林 > 苜蓿地 > 冰草地 > 沙棘林,说明油松林对大雨更为敏感,在大雨条件下产沙量增多。本研究中采用贡献率表示雨型对产沙量的影响程度,贡献率(%) = 不同雨型的土壤流失量/土壤流失总量  $\times 100\%$ ,C 雨型对油松林产沙量的贡献率最大,B 雨型次之,A 雨型最小。Pearson 相关系数表明,油松林的土壤流失量与雨量的相关系数(表 4)高于其他植被类型,在坡度  $10^{\circ}$  条件下相关性达到显著性水平( $P < 0.05$ ),油松林与降雨量的关系更为密切,降雨量越大,油松林产沙量越多。在不同坡度下雨型对油松林产沙量影响的程度不同,随着坡度的增大,A、B 雨型对产沙量的贡献率逐渐增大,C 雨型的贡献率减小,产沙量受到雨型与坡度的交互作用,大雨事件应对  $10^{\circ}$  油松林采取有效的水土保持措施。沙棘林与油松林的产沙规律不同,在监测时段内沙棘林产沙仅 4 次,样本数少,因此未对沙棘林土壤流失量与降雨因子进行统计学相关性分析。由表 5 可知,A 雨型对沙棘林产沙量的贡献率最高,达  $79\% \sim 86\%$ ,在监测时段仅 2 场降雨,累计降雨量只有 16.8 mm,占侵蚀性降雨总量的 6%,但其贡献率最高,这是因为 A 雨型径流系数高,且雨强大,雨滴的击溅力大,更多的土壤颗粒被分散,在径流量增大的同时携带出更多的泥沙,产沙量增多,而 B、C 雨型分别产沙各 1 次,且径流系数较低,雨强较小,携带出的泥沙量较少,贡献率低于 A 雨型,可见在黄土丘陵区沙棘林的产沙量主要由发生频次较少的高强度、短历时降雨所引起。Pearson 相关系数(表 4)表明,苜蓿地  $10^{\circ}$  和冰草地  $15^{\circ}, 20^{\circ}$  坡度下土壤流失量与雨强呈显著正相关( $P < 0.05$ ),苜蓿地和小麦地在  $15^{\circ}, 20^{\circ}$  坡度下土壤流失量与雨强呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与雨量相关性均不显著,产沙量受到雨强的影响程度随着坡度的增大而增大,小麦地和苜蓿地对于 A 雨型更为敏感,除 X10 其他 5 个处理 A 雨型的产沙贡献率均最高,且随着坡度的增大,产沙量增大,在坡度  $20^{\circ}$  中、高雨强是小麦地和苜蓿地产沙量增加的主要雨型。

### 3.3 产流量与产沙量

降雨导致坡面产流,又与地面形成的薄层水流一

起,使表层土壤不断被剥蚀和搬运,土壤侵蚀的产生与降雨和地表径流有着密切的联系。在水力侵蚀区,地表径流是导致土壤发生侵蚀的源动力,Pearson 相关系数(表 5)表明,油松林、苜蓿地、小麦地和冰草地的径流深与土壤流失量之间呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),绘出油松林、苜蓿地、小麦地和冰草地的土壤流失量( $t/hm^2$ )与径流深(mm)的散点图(图 2)可以看出,不同植被类型产沙量均随着径流量的增大而增大,产沙量( $S$ )与产流量( $R$ )呈线性函数关系: $S=aR+b$ ,拟合方程式见表 6。油松林和小麦地的  $R^2$  在 0.88 以上,因此油松林和小麦地

的产沙量 88% 以上是由径流量所决定,通过采取减流措施可以起到有效减沙的目的。冰草地和苜蓿地的  $R^2$  分别在 0.67 和 0.72 以上。 $a$  值反映土壤流失量随径流量增加的速度,其由大到小依次为小麦地 > 苜蓿地 > 油松林 > 冰草地,小麦地产沙量随产流量增速最快,苜蓿地和油松林次之,冰草地产沙量增速最小,水土保持效果相对较好。比较不同坡度的  $a$  值,发现同种植被的  $a$  值随着坡度的增大逐渐增大,说明在  $10^\circ \sim 20^\circ$  范围坡度越大,产沙量增速越快,产沙和产流的相互关系受到不同植被类型特征和所处坡度的影响。

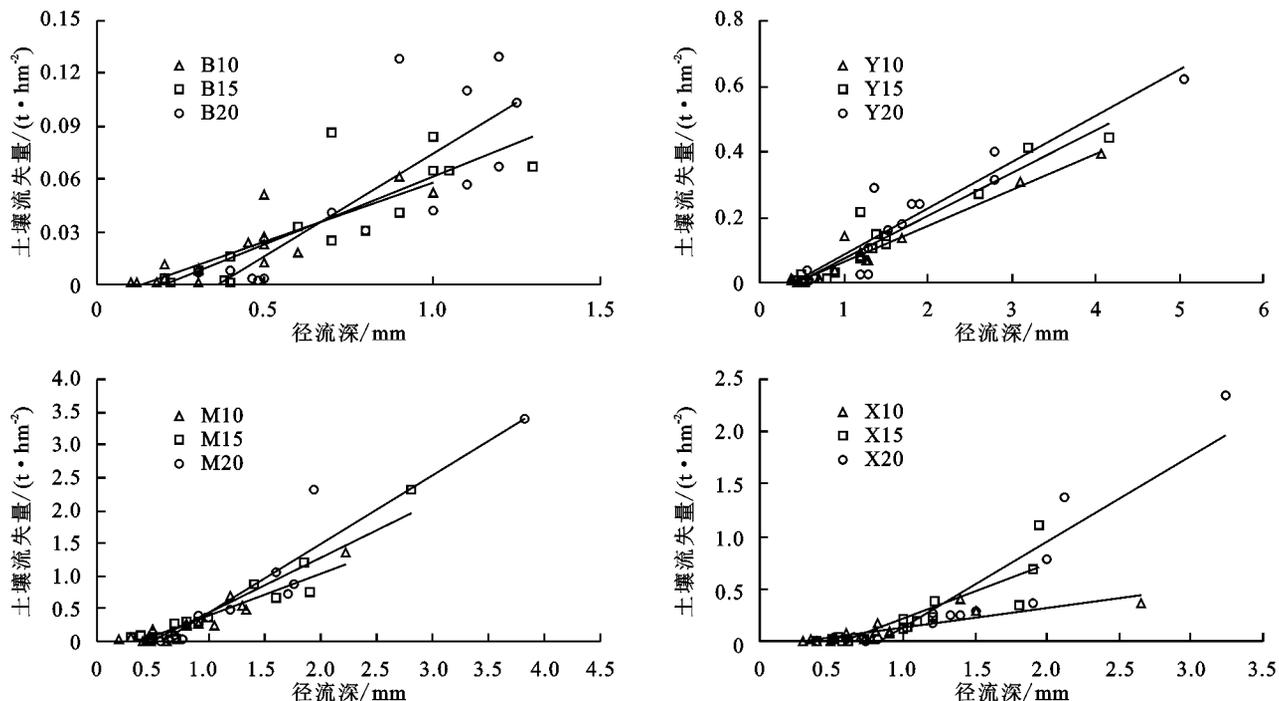


图 2 各处理径流深与土壤流失量的散点图

表 6 不同处理的产沙量与产流量的模型方程

处理代号	模型方程	决定系数 $R^2$	$P$ 值	处理代号	模型方程	决定系数 $R^2$	$P$ 值
Y10	$S=0.1085R-0.0439$	0.9505	$<0.01$	X10	$S=0.1909R-0.0589$	0.7355	$<0.01$
Y15	$S=0.1289R-0.0535$	0.9250	$<0.01$	X15	$S=0.5287R-0.3155$	0.7745	$<0.01$
Y20	$S=0.1412R-0.0582$	0.8841	$<0.01$	X20	$S=0.8178R-0.6806$	0.8629	$<0.01$
M10	$S=0.6425R-0.2422$	0.8945	$<0.01$	B10	$S=0.0664R-0.0084$	0.7716	$<0.01$
M15	$S=0.8317R-0.3949$	0.9009	$<0.01$	B15	$S=0.0764R-0.0155$	0.7032	$<0.01$
M20	$S=1.0483R-0.6139$	0.8993	$<0.01$	B20	$S=0.1153R-0.0409$	0.6806	$<0.01$

注: $S$  为产沙量( $t/hm^2$ ); $R$  为产流量( $m^3$ )。

## 4 讨论与结论

基于定西市安家沟流域 2014—2016 年连续 3 年侵蚀性降雨产流产沙资料,研究植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响,得出主要结论为:

(1)油松林、小麦地和苜蓿地的径流系数是冰草地的 1.7~2.5 倍,是沙棘林的 2~3 倍。年均土壤流

失量为小麦地 > 苜蓿地 > 油松林 > 冰草地 > 沙棘林。小麦地的土壤流失量分别是油松林的 3~5 倍,冰草地的 14 倍,在坡度  $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  年均土壤流失量分别是沙棘林的 123, 130, 92 倍。

(2)在黄土丘陵区产流产沙频次为 B 雨型 > C 雨型 > A 雨型。中雨和大雨是发生侵蚀性降雨的主要类

型,但 A 型降雨的径流系数均大于 B、C 型。C 雨型对油松林产沙量的贡献率最大,B 雨型次之,A 雨型最小。A 雨型对沙棘林产沙量的贡献率达 79%~86%,高强度、短历时降雨是沙棘林产沙的主要雨型。小麦地和苜蓿地对于 A 雨型较为敏感,在坡度 20°中、高雨强是小麦地和苜蓿地产沙量增加的主要雨型。

(3)降雨—产流—产沙、地表径流是导致土壤发生侵蚀的源动力,小麦地、苜蓿地、油松林、冰草地的径流量与产沙量之间呈极显著线性正相关关系( $P < 0.01$ )。土壤流失量的增速为小麦地>苜蓿地>油松林>冰草地,且随着坡度的增大,产沙速度加快。产沙和产流的相互关系受到不同植被类型特征和所处坡度的影响。

从研究结果可以看出,在黄土丘陵区不同植被类型表现出的水土保持功效差异较大,种植苜蓿并不能起到减流减沙的效果,灌木林沙棘在高盖度条件下水土保持功效最好,尤其是减沙效益明显高于减流效益,冰草地水土保持能力仅次于沙棘林。建设初期油松林的郁闭度低,产流量高于草地和农地<sup>[23]</sup>,本研究中油松林经过 30 年的植被恢复,郁闭度 80%以上,但减流效益仍不明显,说明在黄土区单一的油松林不具有减流功效。根据雨型对不同植被类型产沙量的贡献,可形成侵蚀预警机制,C 雨型 10°油松林,A 雨型沙棘林和 20°小麦地和苜蓿地均应采取一定的水土保持措施,减少产沙量。

本文研究了黄土区的 5 种植被类型和 3 类雨型对侵蚀产沙的影响,并不能代表黄土区的所有植被类型的影响作用,后续应选取更多的植被类型,建立乔灌草搭配的多层次植被恢复模式,并以试验资料为基准建立数学模型,更好地预测黄土区的水土流失规律,为黄土区水土保持工作提供参考。

#### 参考文献:

[1] 袁晓波,尚振艳,牛得草.黄土高原生态退化与恢复[J].草业科学,2015,32(3):363-371.

[2] 马鹏.降雨因素对坡面产流产沙影响的研究[D].重庆:西南大学,2013.

[3] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12.

[4] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30.

[5] 李森,宋孝玉,孟彩侠.黄土沟壑区不同下垫面条件对产流产沙的影响[C]//周孝德.水与社会经济发展的相互影响及作用:全国第三届水问题研究学术研讨会论文

集.北京:中国水利水电出版社,2005:144-148.

[6] 姜娜,邵明安.黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J].农业工程学报,2011,27(6):36-41.

[7] 徐佳,刘普灵,邓瑞芬.黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J].地理科学,2012,32(11):1391-1396.

[8] 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.

[9] 韩加强,高晓飞,路炳军,等.水保措施对褐土水稳性大团聚体的影响研究[J].水土保持研究,2012,19(6):50-53.

[10] 王库.植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J].土壤与环境,2001,10(3):250-252.

[11] 江森华,黄荣珍,谢锦升,等.不同雨强对裸露坡地水土流失的影响研究[J].亚热带资源与环境学报,2011,6(4):24-28.

[12] 牛俊,赵西宁,吴普特,等.典型黄土坡面天然草地产流产沙规律试验[J].中国水土保持科学,2009,7(4):88-93.

[13] 寇馨月,姜学兵,黄俊.红壤区小流域次降雨产流产沙因素分析及模型构建[J].水土保持通报,2017,37(6):34-42.

[14] 李赛.鲁中山地天然降雨对径流小区产流产沙的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2016.

[15] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(1):247-258.

[16] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):195-201.

[17] 陈众,田丰,董俊.不同土地利用方式对丘陵山区坡面侵蚀产沙量的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(1):186-192.

[18] Mohr C, Bronstert A, Huber A, et al. Influence of different forest management practices and vegetation cover on runoff generation and sediment flux in the Coastal Range of Southern Chile[J]. European Geosciences Union, 2010, 57(4):209-213.

[19] Cerdà A, Morera A G, Bodí M B. Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin [J]. Earth Surface Processes and Land Forms, 2010, 34(13):1822-1830.

[20] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.

[21] 陈杰,刘文兆,王文龙,等.长武黄土高塬沟壑区降水及侵蚀性降雨特征[J].中国水土保持科学,2009,7(1):27-31.

[22] 李金涛,刘文杰,卢洪健.土壤斥水性研究进展[J].西南林学院学报,2010,30(5):82-87.

[23] 李广,黄高宝.雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):85-90.