

文章编号: 1008-2786-(2006)1-019-08

黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响

余新晓, 张晓明, 武思宏, 魏天兴, 张学培

(水土保持与荒漠化教育部重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要: 在一定地形地貌基础上, 林草植被与降水是决定坡面产流产沙量的主要因素, 而这些因素各因子之间合作用于坡地产流产沙, 增加了影响机制的复杂性。为深入分析降水因子与林分结构因子对坡地降雨产流产沙的影响, 为黄土区植被建设提供理论依据, 对蔡家川流域典型样地的实验资料进行分析。结果表明, 刺槐和油松林场降雨产流、产沙量与降雨量和降雨强度有较好相关性, 但相关性随着林分郁闭度的增大而减小; 当油松林林分郁闭度 < 0.6 时, 产流、产沙量与 I_0 的相关性要更显著于与 I_{10} 的相关性, 而林分郁闭度在 0.6 以上时, 则相反。在林分结构因子对坡面产流产沙的影响中, 当林分覆盖度 $> 40\%$ 时, 林分减水减沙效益显著。林地枯落物和草本植物通过截持降水、增加地表糙率来削减坡面产流产沙量, 刺槐和油松林地的枯落物年截流量占降雨总量的 $13.5\% \sim 22\%$ 。刺槐和油松林的稳渗速率随林分密度的增加而增大, 但不与密度的增加幅度成正比, 当刺槐、油松林的密度超过 $3000 \text{株}/\text{hm}^2$ 时, 稳渗速率增加缓慢, 从防蚀角度考虑, 可将其作为林分密度的上限。在林分生物量 $> 14.51 \text{t}/\text{hm}^2$ 时, 植被具有极好的防护功能。通过对影响坡面产流产沙的影响因子的灰色关联分析, 林分郁闭度和草本、枯落物生物量对坡面产流产沙影响显著, 关联度值均 > 0.6 。

关键词: 林草植被; 降水; 产流产沙; 灰色关联分析; 黄土区

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

黄土区沟壑纵横, 表层土体疏松易蚀, 水土流失十分严重。影响黄土区水土流失的因素主要有: 降雨、植被、坡面等因子。降雨是水土流失的原动力, 植被、坡面等因素对水土流失有重要影响。由于植被对降水再分配过程的影响, 对于黄土区特定的地貌, 通过改善植被是水土流失治理的主要措施。正如 Schumm 和 Langbein 所指出的, 降雨和植被共同作用使流域产沙量随降雨变化出现临界现象^[1,2]。因此, 研究降雨以及降雨与植被合作用对坡面侵蚀的影响是研究的关键。

从气象学角度来看, 降雨主要由雨量、雨强、降雨历时等特征值来反映, 这些因子无疑都会影响水土流失, 但作用并不相同, 并且有些因子之间有相关

性^[3,4]。研究表明, 不同雨量区之间水土流失强度有差异^[5], 因而总雨量是研究的前提条件。从降雨与土壤侵蚀的关系研究中看, 关于侵蚀性降雨标准、降雨的侵蚀力、侵蚀能量及侵蚀动态过程以及降雨因子和土壤侵蚀量间的关系都有较多研究^[6-10]。例如, 贺康宁等人认为, 在晋西黄土残塬沟壑区降雨量与地表径流量关系不明显, 地表径流的发生决定于雨强和土壤性质^[11]; 黎四龙对张家口次生黄土研究认为, 雨强与地表径流关系不密切, 且在小雨强时, 地表径流量与雨强呈负相关关系^[12]; Wischmeier W. H 提出以降雨总动能 E 和最大 30mm 雨强 I_0 的乘积 $E I_0$ 作为降雨侵蚀力指标^[13]。植被保持水土机理、功能也历来是水土保持研究的一项重要内

收稿日期 (Received date): 2005-10-11; 改回日期 (Accepted): 2005-12-20.

基金项目 (Foundation item): 国家重大基础研究发展规划资助项目 (2002CB111502) 和国家攻关课题 (2001BA510B01) [Supported by Key Program of National Science Foundation of China (2002CB111502) and Key Program of National Science and Technology Research of China (2001BA510B01)]

作者简介 (Biography): 余新晓 (1961-), 男, 甘肃平凉人, 教授, 博导, 主要从事水土保持、森林生态水文和景观生态等的研究, 发表论文 90 余篇, 出版专著 20 余部。[Yu Xiniao (1961-), male (Han Nationality), Pingliang County of Gansu Province Professor major in soil and water conservation forest ecological hydrology and landscape ecology et al He has already published 90 papers and 20 monographs at least E-mail yuxinxiao@bjlu.edu.cn]

容^[14-19]。林分结构因子的减蚀作用主要表现为: 植被茎、枝、叶对降雨动能的消减作用, 对降雨的截流作用; 植物茎及枯枝落叶对径流流速的减缓作用; 植物根系对提高土壤抗冲抗蚀作用; 改良土壤结构, 增加水分入渗。

鉴于目前在黄土区实施的植被建设政策, 以及以往对黄土区植被减蚀的定性描述较多, 对林分结构因子防蚀功能的定量研究较少, 并且对降雨量和降雨强度与林分结构因子对径流侵蚀交互影响机理研究不多, 因此选取蔡家川流域不同林分结构的径流小区和典型标准地, 深入研究了降水与林草植被对坡面径流侵蚀的影响。

1 研究区概况及研究方法

1.1 试验区概况

研究区为山西省吉县蔡家川流域, 位于黄土高原西南部, 地理坐标为 35°53′~ 36°21′N, 110°27′~ 111°07′E。年平均降水量为 579.5 mm, 集中于 7~ 9 月。属于暖温带、半湿润地区, 为落叶阔叶林与森林草原地带。土壤类型为褐土, 沙壤。吉县总面积 1 777 km², 水土流失面积为 95 300 hm², 占总土地面积的 53.6%, 年侵蚀量为 2 100 × 10⁴ t。侵蚀模数为 11 818 t/(km² · a⁻¹)。试验区主要为刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*) 等树种组成的人工林及天然草本植被, 以及山杨 (*Populus davidiana*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、绣线菊 (*Spiraea thunbergii*)、黄

刺玫 (*Rosa xanthina*) 等组成的天然次生灌草植被。

1.2 研究方法

1 降水在流域不同部位布设 8 台翻斗式自计雨量计, 常年记录降雨量和降雨过程。

2 林冠截流量采用雨量筒收集法。在待测林分的林下和林外空地安放雨量筒作为对照。每次降雨后, 同时测算林内和林外降雨量。

3 枯落物持水量。7~ 8 月测定, 在待测定的林分标准样地上沿对角线设置 3 个面积为 1 m × 1 m 的样方, 全部收集其枯落物并称重, 混合后取一部分烘干取其干重, 计算林地蓄积量, 另一部分分三个重复, 在清水中浸泡 24 h, 求其饱和持水率和持水量。

4 径流、泥沙量。采用径流筒收集法, 每次产流后测定径流总体积, 并取均匀径流样, 测定泥沙体积, 计算径流量和产沙量。

2 结果与分析

2.1 降水与土壤侵蚀的关系

降雨是水土流失的原动力, 与坡面径流及产沙有密切关系。黄土区关于降雨与土壤侵蚀的关系研究中, 降雨量和雨强是研究的主要影响因子。选择 3 块刺槐林、3 块油松林和 1 个荒坡地的径流小区作为对照, 收集了 2001~ 2003 年的 20 场侵蚀性降雨的产流产沙资料。表 1 为对照林分基本概况, 表 2 为对照林分降雨量和降雨强度与不同郁闭度的林分产流量、产沙量的回归方程, 图 1 为不同郁闭度的油松林和荒坡地场降雨产流产沙对照。

表 1 人工径流小区的基本情况

Table 1 The natural condition of the artificial runoff plots

小区 编号	面积 (m ²)	植被种类		林龄 (a)	郁闭度	覆盖度 (%)	枯落物 厚 (mm)	坡度 (°)	坡向	土壤 质地	土壤容 重 (g/cm ³)	土壤孔 隙 (%)
		主要乔木	次要植被									
刺槐 1	20 × 5	刺槐	柠条	6~ 7	0.7	100	3.5	21	NW	中壤	1.21	53.13
刺槐 2	20 × 5	刺槐	柠条	9~ 11	0.8	100	5.2	21	NW	中壤	1.15	45.02
刺槐 3	20 × 5	刺槐	柠条	16~ 18	0.9	100	6.1	20	W	中壤	1.12	41.46
油松 1	20 × 5	油松	荆条	18	0.4	80	3.4	24	N	中壤	1.16	44.6
油松 2	20 × 5	油松	荆条	22	0.6	87	4.3	22	N	中壤	1.11	53.5
油松 3	20 × 5	油松	荆条	30	0.8	93	5.2	20	N	中壤	1.05	52.13
荒坡	20 × 5	-	柠条、艾蒿	-	-	50	-	21	NW	中壤	1.39	44.75

从图 1 可知, 油松径流小区的场降雨产流、产沙量显著小于对照荒坡径流小区, 后者比前者的平均产流量和产沙量大 3.2 和 22.3 倍, 且产流量和产沙量显著相关。对照的 3 块油松林, 任意一林分的产流产沙量并不随着降雨量级的增大而增大, 只是郁闭度大林分的场降雨产流产量总体上小于郁闭度小

的林分, 同时随着降雨量级的增加, 对照荒地油松林的径流量和泥沙量的比值呈递增趋势。参照表 2 的回归方程分析可知, 各林分降雨产流、产沙量与降雨量和降雨强度有很好的相关关系, 但随着林分郁闭度的增大, 相关性在减小。对于刺槐林, 当林分郁闭度从 0.7~ 0.8 增加到 0.9 时, 产流和产沙回归方

程的相关系数分别从 0.858 和 0.76 降到 0.799 和 0.66。对于油松林, 当林分郁闭度在 0.6 以下时, 产流和产沙量与降雨量和降雨强度的相关系数随着林分郁闭度的增大而增大, 且产流、产沙量和 I_{30} 的相关性要显著高于和 I_{10} 的相关性; 当林分郁闭度 >

0.6 时, 相关系数随着林分郁闭度的增大而减小, 且产流、产沙量和 I_{30} 的相关性小于和 I_{10} 的相关性。显然对于荒坡地, 场降雨产流、产沙量与降雨量、降雨强度的相关性极显著。

表 2 刺槐、油松径流小区产流产沙特性回归分析表

Table 2 Regressive Formulae of runoff and sediment products on the Robinia and Pinus plots

小区编号	产流回归方程	产沙回归方程	样本数
刺槐 1	$Q = 14.38 + 0.88P + 27.41I_{15} \quad (R^2 = 0.858^*)$	$S = 0.36 - 0.003P + 0.655I_{15} \quad (R^2 = 0.76^*)$	$n = 20$
刺槐 2	$Q = 14.08 + 0.72P + 19.61I_{15} \quad (R^2 = 0.81^*)$	$S = 0.40 - 0.003P + 0.55I_{15} \quad (R^2 = 0.69^*)$	$n = 20$
刺槐 3	$Q = 11.02 + 0.63P + 17.87I_{15} \quad (R^2 = 0.799^*)$	$S = 0.37 - 0.003P + 0.47I_{15} \quad (R^2 = 0.66^*)$	$n = 20$
油松 1	$Q = 15.3 - 1.91P + 86.7I_{10} + 102.1I_{30} \quad (R^2 = 0.92^*)$	$S = 0.21 - 0.015P - 0.055I_{10} + 1.057I_{30} \quad (R^2 = 0.95^*)$	$n = 20$
油松 2	$Q = 4.6 - 0.10P - 20.13I_{10} + 171.05I_{30} \quad (R^2 = 0.94^*)$	$S = 0.04 - 0.0036P - 0.39I_{10} + 1.03I_{30} \quad (R^2 = 0.96^*)$	$n = 20$
油松 3	$Q = 8.01 - 1.16P + 99.44I_{10} + 48.28I_{30} \quad (R^2 = 0.84^*)$	$S = 0.21 - 0.01P + 0.44I_{10} + 0.053I_{30} \quad (R^2 = 0.79^*)$	$n = 20$
荒坡	$Q = 18.94 - 1.57P - 156.1I_{10} + 624.6I_{30} \quad (R^2 = 0.95^*)$	$S = 1.035 - 0.07P - 1.16I_{10} + 12.36I_{30} \quad (R^2 = 0.94^*)$	$n = 20$

其中: 产流量 Q 单位为 l, 产沙量 S 单位为 kg, 降雨量 P 单位为 mm, 雨强 I_{10} , I_{15} , I_{30} 单位分别为 mm/10min, mm/15min, mm/30min, where Q is runoff yield (l), S is sediment yield (kg), P is precipitation (mm), and I_{10} , I_{15} , I_{30} is average rainfall intensity in 10, 15, 30 min respectively.

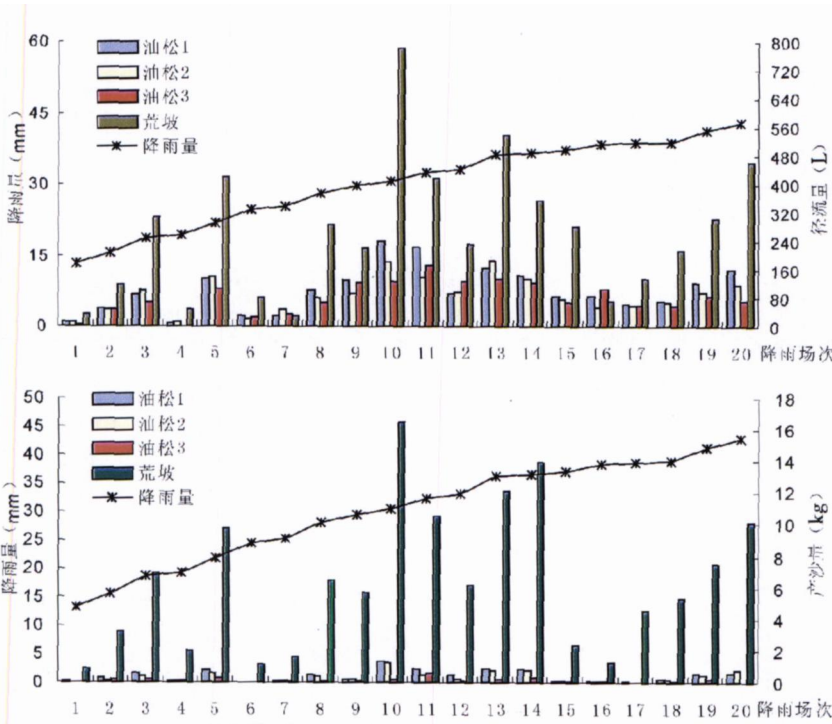


图 1 场降雨油松林地和荒坡人工径流小区径流量、产沙量对比分析

Fig. 1 Comparative analysis of runoff and sediment from Pinus and badlands plots in individual rainfall

2.2 林草植被与土壤侵蚀的关系
2.2.1 林分覆盖度与土壤流失量

通过以上对降雨和土壤侵蚀的关系分析可知, 由于林分郁闭度和灌草盖度对降雨的截持、吸收和下渗作用, 场降雨产流、产沙量并不随降雨量和降雨强度的增大而相应增加, 乔灌植被覆盖度与水土保持效益有密切关系。选择不同覆盖度的油松林调查发现 (表 3), 随着林分覆盖度的增加, 林地土壤侵蚀

量急剧降低。林分覆盖度由 10% 增加到 90%, 林地土壤侵蚀模数则由 507 t/km² 减少到 29 t/km², 随着林分覆盖度的增加, 林地水土保持效益愈加显著, 土壤侵蚀量越来越小。当林分覆盖度超过 40% 时, 林分减少土壤侵蚀量的作用显著, 其侵蚀量小于坡面允许侵蚀量 (200 t/km²)^[20]。因此, 从水土保持角度而言, 40% 的林分覆盖度可定为林分的有效覆盖度。从防蚀角度看, 低于 60%, 则林分防止土壤

侵蚀的作用甚低。

2.2.2 林地枯枝落叶物的防蚀作用

黄土区林地枯枝落叶物截留降雨是林地降水分配的重要组成部分,雨量在枯落物中的分配以及降雨的入渗率取决于枯落物层厚度。通过试验得出,林分枯枝落叶物年截留雨量占降雨总量的比值范围分别是:刺槐林地 13.5% ~ 17.9%,油松林地 15.4% ~ 22.0%,沙棘 17.6% ~ 18.7%,虎榛子 17.3% ~ 17.5%。表 4 是不同林地枯落物量及浸泡试验情况,不同林分的枯枝落叶物具有很强的吸水率和持水力。根据试验发现,林分场降雨截留量最大值分别是:刺槐 80 mm,油松 164 mm,沙棘 110 mm,虎榛子 100 mm,可见林地具有很强蓄水能力。枯枝落叶物除通过对降雨的截留来减小降雨对土壤的直接击溅作用,减少地表径流量,同时通过改变林地表面的糙度来减小地表径流流速,减弱径流冲击能量。

2.2.3 不同密度的林分的水土保持作用

研究不同密度林分的水土保持作用对确定水土保持型林草植被的密度有重要意义。为此,我们选

择了不同密度的刺槐和油松林地,利用人工降雨研究了其渗透和产流。不同密度林地的渗透测定结果见表 5。

表 3 油松林不同覆盖率及土壤侵蚀量

Table 3 The relationship between soil erosion amount and different cover density of Pinus

覆盖率(%)	10	25	35	40	50	60	75	85	95
侵蚀量 (t/km ²)	507	483	410	183	97	57	48	45	29

表 4 林地枯枝落叶物蓄积及容水量

Table 4 The relationship between cumulation and water capacity for litter

林分	枯落物厚度 (cm)	现存蓄积 (t/hm ²)	浸泡 24h 容水量 (mm)	吸水率 (%)
刺槐	1.5~3.0	12.875	4.1	321
油松	2.0~4.0	16.450	2.0	343
沙棘	1.1~2.6	14.000	5.8	414
虎榛子	2.0~2.8	15.440	7.0	453
油松×刺槐	1.7~2.7	13.420	3.3	386
油松×沙棘	2.3~3.8	10.730	3.7	436

表 5 不同密度林地的渗透测定结果表

Table 5 Result of penetrating of different stand density

编号	植被类型	开始产流时间	前 40m 内产流量 (mm)	前 40m 内入渗量 (mm)	降雨强度 (mm/h·in)	稳渗速度 (mm/h·in)	密度 (株/hm ²)
1	油松	25"	74.6	21.26	2.4	0.6	750
2	油松	1'	70.9	25.9	2.4	0.9	1500
3	油松	1'	62.5	46.5	2.7	1.0	2025
4	油松	130"	63.3	38.9	2.6	1.2	2250
5	油松	7'	21.1	77.7	2.5	2.1	3000
6	油松	250"	24.7	82.5	2.7	2.0	8490
7	刺槐	40"	63.3	40.2	2.6	0.4	495
8	刺槐	55"	68.2	44.1	2.8	0.8	1200
9	刺槐	20"	51.4	52.4	2.6	1.4	1500
10	刺槐	1'	48.2	42.4	2.3	1.2	2475
11	刺槐	120"	43.4	50.2	2.3	2.0	3000
12	刺槐	2'	29.9	76.4	2.7	2.2	3750
13	裸地	16"	87.9	17.8	2.6	0.3	
14	草地	330"	47.3	63.8	2.8	2.2	

由上表可知,油松林地的稳渗速率随林分密度的增加而增大,但并不与密度的增加幅度成正比。当密度在 3000 株/hm²以下时,如 1 号到 5 号标准地,林地的稳渗速率随密度的增加而增大,即从 0.6 mm/h·in 增大到 2.0 mm/h·in,但林分密度从 5 号的 3000 株/hm²到 6 号的 8490 株/hm²,稳渗速率前者却比后者略大。对于 40 m 内的累计入渗量,当密度从 750 株/hm²增大到 3000 株/hm²时,累计入渗

量由 21.3 mm 增加到 77.7 mm,增加了 2.67 倍;密度由 3000 株/hm²增大到 8490 株/hm²时,累计入渗量只由 77.7 mm 增加到 82.5 mm,增加了 0.06 倍。因此,从改良土壤渗透性能的角度来说,油松林的密度在 3000 株/hm²以下为宜。

刺槐林地的稳渗速率与油松林有相似之处,也是随林分密度的增加稳渗速率递增。如刺槐林密度为 3000 株/hm²时稳渗速率为 2.0 mm/h·in,在密度

达到 3 750株 /hm²时, 稳渗速为 2 2 mm /m in, 增加幅度不大, 这与油松林地的稳渗速率较为接近。可见, 从林分稳渗速率的角度考虑, 刺槐林地密度也应该在 3 000株 /hm²以下。

从表 5可以看出, 油松林、刺槐林密度越大, 林地的入渗性能越好。这是因为密度越大, 林地枯落物越厚, 使得表层土壤中增加的有机质越多, 从而改善了土壤结构。因此, 较大林分密度的林地土壤具有较大的孔隙度和较强的通气透水能力。但对于干旱半干旱的黄土区, 考虑到水土保持林能持续稳定的发挥防护功能, 油松和刺槐林的密度都不宜超过 3 750株 /hm^{2[21]}。

另外, 草地的稳渗速率达 2 2 mm /m in, 与密度为 3 000株 /hm²的油松、刺槐林地相近。可见, 草本植物与乔木一样, 也具有改善土壤渗透性能的作用。

因此, 在干旱、半干旱地区, 大力种植草本植物, 同样也能起到增加入渗, 减少地表径流的作用。

2 2 4林分生物量与防蚀效果

表 6为不同林分的径流小区林分生物量与年平均侵蚀量调查表, 从表中显示, 各林地均具有较强的防止土壤侵蚀作用。比较不同郁闭度的林分, 其防止土壤侵蚀的差异不明显, 比如刺槐 3与刺槐 4、刺槐 5, 密度和郁闭度相差较大, 但土壤流失量差异不明显, 这是因刺槐 3林地伴生有大量灌木, 林地总生物量达到 117. 10 t/hm², 具有较强的防蚀作用。同时从表中可看出, 坡面乔木生物量大于 14 51 t/hm²时, 林地就具有很强的水土保持效益, 其年侵蚀量小于允许侵蚀量。乔木林、灌木林、草地与农地和荒草地相比, 侵蚀量不到坡耕地的 2%, 因此林草均有很强的拦沙滤水功能。

表 6 坡面径流小区植被及年平均侵蚀量调查表
Table 6 Average annual erosion amount of the runoff plots

编号	主要植被	密度 (株 /hm ²)	总生物量 (t/hm ²)	草本重量 (t/hm ²)	枯落物重量 (t/hm ²)	郁闭度	草本盖度 (%)	土壤流失量 (t/hm ²)
1	刺槐	2 800	28. 6	3. 50	1. 25	0. 8	30	12. 37
2	刺槐	3 200	61. 3	3. 89	1. 37	0. 9	20	8. 98
3	刺槐	1 300	117. 1	3. 67	3. 86	0. 5	75	3. 17
4	刺槐	700	75. 2	4. 03	3. 88	0. 4	92	3. 36
5	刺槐	3 100	109. 4	1. 63	0. 53	0. 7	20	10. 12
6	刺槐	2 300	96. 7	6. 17	1. 35	0. 65	43	14. 32
7	油松	6 800	123. 6	0. 72	11. 24	0. 85	10	10. 56
8	油松	1 100	18. 38	1. 23	10. 67	0. 52	15	16. 31
9	油松	1 800	24. 28	1. 89	9. 67	0. 60	20	18. 25
10	油松	5 100	42. 8	2. 17	0. 35	0. 60	47	3. 97
11	刺槐 ×油松	1 800×600	31. 5×12. 4	—	—	0. 60	50	4. 29
12	沙棘	2 900	22. 78	1. 76	3. 12	0. 89	60	12. 34
13	虎榛子	37 500	23. 60	—	6. 53	0. 98	—	5. 89
14	虎榛子	3 700	14. 51	4. 33	7. 67	0. 88	10	12. 91
15	荒草地	—	0. 32	9. 67	2. 34	—	60	54. 87
16	裸地	—	—	—	—	—	—	167. 98
17	坡耕地	—	—	—	—	—	—	1 325. 74

2 3 影响坡面产流产沙的主导因子判析

影响坡面径流小区产流产沙量的因子除降水因子和林分结构因子外, 地形因子也在起着作用, 且这些影响因子之间又相互关联。现剔除降水因子的影响, 选取不同林分的产流量和产沙量分别作为母因素集, 以坡度、坡向、坡位、林分密度、林分郁闭度、灌草层盖度、草本生物量和枯落物生物量等 7个因子为子因素集, 以不同土地利用类型的径流小区在

2001~ 2003 年降雨产流产沙的实测数据进行灰色关联度分析, 结果见表 7。

灰色关联度值越大, 说明比较数列对参考数列影响越大。对于产流量, 影响因子参数的灰色关联度大小依次为: 枯落物生物量 (林分郁闭度) > 草本盖度 > 林分密度 > 坡向 > 草本生物量 > 坡度。对于产沙量, 草本生物量 > 枯落物生物量 > 草本盖度 > 林分郁闭度 > 林分密度 > 坡度 > 坡向。

表 7 影响坡面产流产沙的各因子灰色关联度值

Table 7 Value of each factor of gray correlation degree impacted sloping surface producing runoff yield and sediment yield

母系列 mother series			子系列 daughter series					
产流量 Runoff yield (L/m ²)	产沙量 Sediment yield (g/m ²)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	密度 Density (tree/hm ²)	郁闭度 Canopy density	草本盖度 Herb density (%)	草本生物量 Herb biomass (g/m ²)	枯落物生物量 Litter biomass (g/m ²)
灰色关联度 Gray correlation degree(λ_{ij})								
产流量 Runoff yield (L/m ²)		0.555	0.571	0.609	0.639	0.629	0.565	0.639
产沙量 Sediment yield (g/m ²)		0.416	0.401	0.452	0.531	0.548	0.786	0.693

从此结果可看出,各影响因子对坡面产流和产沙的影响程度并不一致,对产流影响最大的是枯落物生物量和林分郁闭度,对产沙影响最大的是草本生物量;而坡向因子通过影响林地土壤水分而影响各林分结构因子,所以对坡面产流有重要相关性;在此分析的坡度的影响作用,并不与前人所得结论相悖,因为此分析数据中各径流小区坡度值相差不大而对比度较差。林分密度、灌草层盖度、草本和枯落物生物量等影响因子,无论对坡面产流还是产沙,其灰色关联度都>0.5,说明这些因子对坡面林分的水保功能影响都很大。多层次的混交林因有较高的灌草层盖度、草本和枯落物生物量,因此有较强的水保功能,这与许多研究结论是一致的^[22,23]。

3 结果

1 坡面林分场降雨产流产沙量并不随降雨量级的增大而增大,但荒地及油松林的径流量和泥沙量的比值呈递增趋势。由于林分结构因子的防蚀作用,对照荒地比油松林地平均产流量和产沙量大3.2和22.3倍。刺槐和油松林地场降雨产流产沙量与降雨量和降雨强度有较好的相关性,但随着林分郁闭度的增大,相关性在减小。刺槐林在郁闭度>0.7时,相关系数随郁闭度的增大而减小;油松林在郁闭度<0.6时,相关系数随着郁闭度的增大而增大,>0.6时,相关性随郁闭度的增大而减小。对于降雨强度,当油松林郁闭度<0.6时,林地产流、产沙量与 I_0 的相关性更显著于与 I_5 的相关性,当>0.6时则反之。

2 林草植被对坡面降雨侵蚀的影响中,当林分覆盖度>0.4时,林分减水减沙效益显著;<0.6时,从防蚀角度看,林分防治土壤侵蚀作用甚低。刺槐和油松林地的枯落物年截流量占降雨总量的13.5%~22%,场降雨截留量最大值分别是:刺槐8.0mm,油松16.4mm,沙棘11.0mm,虎榛子10.0mm。刺

槐和油松林地的稳渗速率随林分密度的增加而增大,但并不与密度的增加幅度成正比,当刺槐、油松林的密度超过3000株/hm²时,稳渗速率增加缓慢,从防蚀角度考虑,可将其作为林分密度的上限。在林分生物量大于14.51t/hm²时,植被具有极好的防护功能。

3 对影响坡面产流产沙的因子分析中,林分郁闭度和草本、枯落物生物量影响最显著,其灰色关联度值均>0.6,坡向、坡度因子对场降雨径流影响显著,灰色关联度值>0.5。因此黄土区坡地应经营多层次的混交林,提高植被覆盖度和林下地被物生物量,可大大降低水土流失量。

参考文献 (References)

[1] S. A. Schumm. The fluvial system. John Wiley & Sons, Inc, 1977.

[2] Langbein, W. B. & Schumm, S. A. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation[J]. *Transaction, American Geophysical Union*, 1958, 39: 1078~1084.

[3] Lu Baohong, Shang Youguang, et al. Lu Xiaoming. Method for identifying appropriate rainfall intensity duration frequency models[J]. *J. Hehai Univ.*, 2001, (4): 109~114 [陆宝宏, 汤有光, 陆晓明, 等. 识别合适的降雨强度-历时-频率模型的方法[J]. *河海大学学报*, 2001, (4): 109~114].

[4] Chang Fuxuan, Din Jing, Yao Jian. Scaling property of the rainfall variation in relation with duration[J]. *Yangtze Basin Resour Environ*, 2002, (1): 79~83 [常福宣, 丁晶, 姚健. 降雨随历时变化标度性质的探讨[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, (1): 79~83].

[5] Tian Guangjin, Zhang Zengxiang, Zhao Xiaoli, et al. The soil erosion distribution characteristics and ecological background of Chinese cultivated land[J]. *Acta Ecol Sin*, 2002, (1): 10~16 [田光进, 张增祥, 赵晓丽, 等. 中国耕地土壤侵蚀空间分布特征及生态背景[J]. *生态学报*, 2002, (1): 10~16].

[6] Ye Zhifa, Liu Baoyuan, Zhang Wenbao, et al. Study on rainfall erosivity and its spatial distribution in Beijing[J]. *Sci Soil Water Cons*, 2003, 1(1): 16~20 [叶芝菡, 刘宝元, 张文波, 等. 北京市降雨侵蚀力及其空间分布[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(1): 16~20].

[7] Fenu V, Porro P, Yu B. A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeast Australia[J]. *J. Hydro Sci*

- 1999, 44(1): 3~24
- [8] Lu Jinfu, Huang Xinhua. Thresholds in variation of sediment yield in the middle yellow river basin[J]. *J. MounSci*, 2004, 22(2): 147~153[卢金发, 黄秀华. 黄河中游地区流域产沙中的地貌临界现象[J]. 山地学报, 2004, 22(2): 147~153]
- [9] Yang Zisheng. A study in erosive force of rainfall on sloping cultivated land in the northeast mountain region of Yunnan Province[J]. *Acta Geogr Sci*, 1999, (3): 265~270[杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究[J]. 地理科学, 1999, (3): 265~270]
- [10] Jiao Juying, Wang Wanzhong, Hao Xiaoping. Precipitation and erosion characteristics of rainstorm in different pattern on Loess Plateau[J]. *Arid Land Resour Environ*, 1999, 13(1): 34~42[焦菊英, 王万中, 郝小品. 黄土高原不同类型暴雨的降水侵蚀特征[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(1): 34~42]
- [11] He Kangning, Zhang Jianjun, Zhu Jinzhao. The hillslope surface flow of the forests for soil and water conservation in Western Shanxi Loess Plateau region[J]. *J. Beijing For Univ*, 1997, 19(4): 2~6[贺康宁, 张建军, 朱金兆. 晋西黄土残塬沟壑区水土保持林坡面径流规律研究[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 2~6]
- [12] Li Sibing, Cai Qianguo, Wu Shu'an. Effect of slope length on runoff and soil erosion[J]. *Arid Land Resour Environ*, 1998, 12(1): 29~35[黎四龙, 蔡强国, 吴淑安. 坡长对径流及侵蚀的影响. 干旱区资源与环境, 1998, 12(1): 29~35]
- [13] Wschmeier W. H. . A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation[J]. *Soil Sci Am Proc*, 1959, 23(3): 246~249
- [14] Wang Youmin. Summary of researches on water and soil conservative function of litter in forest land in China[J]. *J. Soil Water Cons*, 2000, 14(4): 108~113[王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108~113]
- [15] Yin Zhongdong, Zhou Xincheng, Zhu Jinzhao. Study on the factors affecting soil erosion[J]. *Res World For*, 2003, 16(3): 32~37[尹忠东, 周心澄, 朱金兆. 影响水土流失的主要因素研究概述[J]. 世界林业研究, 2003, 16(3): 32~37]
- [16] Tang Zhenglong, Cai Qianguo, Chen Ning *et al*. Soil erosion and sediment yield models of different land types in small basins in the Hilly Loss region[J]. *J. MounSci*, 2001, 19(2): 120~124[唐政洪, 蔡强国, 陈宁. 等. 黄土丘陵沟壑区小流域不同地类的侵蚀产沙模型[J]. 山地学报, 2001, 19(2): 120~124]
- [17] Walling D. E. & Webb B. W. Erosion and sediment yield: a global overview[A]. In *Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives*[C]. Proc. Exeter Symp. 1996, 236, 3~19
- [18] Jiao Juying, Wang Wanzhong, Li Jin. The soil erosion reducing benefit of soil and water conservation of plantation on the Loess hilly and gully region[J]. *Sci Silvae Sin*, 2002, 38(14): 87~94[焦菊英, 王万忠, 李靖. 黄土丘陵沟壑区水土保持人工林减蚀效应研究[J]. 林业科学, 2002, 38(14): 87~94]
- [19] Wu Faqi, Zhao Xiaoguang, Lin Bingzheng. Relation between rainfall and soil erosion in the gentle slope land in the south part of Loess Plateau[J]. *Res Soil Water Cons*, 1999, 6(2): 53~60[吴发启, 赵晓光, 刘秉正. 黄土高原南部缓坡耕地降雨与侵蚀的关系[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 53~60]
- [20] Sun Lida, Zhu Jinzhao. Evaluation and study on comprehensive benefits of soil and water conservation forest[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1995[孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系效益研究与评价[M]. 北京: 中国科技出版社, 1995]
- [21] Zhang Jianzhun, Bi Huaxing, Wei Tianxing. Function of soil and water conservation of forest stands with different densities in Loess area in western Shanxi[J]. *J. Beijing For Univ*, 2002, 24(3): 50~53[张建军, 毕华兴, 魏天兴. 晋西黄土区不同密度林分的水土保持作用研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(3): 50~53]
- [22] Chen Yunming, Hou Xili, Li Wenzhao. Soil and water conservation function and ecological benefits of different types of vegetation in semi-arid Loess hilly region[J]. *J. Soil Water Cons*, 2000, 14(3): 6~9[陈云明, 侯喜禄, 刘文兆. 黄土丘陵半干旱区不同类型植被水土保持生态效益研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 6~9]
- [23] Zhang Xiaoming, Sun Zhongfeng, Zhang Xuepei. Analysis on the function of different stand affecting runoff and sediment from rainstorm in gullied Loess hill of Jixian[J]. *Sci Soil Water Cons*, 2003, 1(3): 37~42[张晓明, 孙中峰, 张学培. 晋西黄土残塬沟壑区不同林分对坡面暴雨产流产沙作用分[J]. 中国水土保持科学, 2003, 1(3): 37~42]

The Effect of Vegetation and Precipitation upon Runoff and Sediment Production in Sloping Lands of Loess Area

YU Xinxiao ZHANG Xiaoming WU Sihong WEI Tianxing ZHANG Xuepei

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education;

College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, 100083 Beijing, China)

Abstract Without regard to the function of terrain, vegetation and precipitation both are the main factors who determine runoff and sediment amount, and the mechanism of runoff and sediment yielding is becoming more complex for daughter factors from vegetation and rainfall act on together. In order to study the effect of precipitation and vegetation on runoff and sediment production, experimental data from typical sample plots of Caijiachuan watershed were analyzed, which will provide theoretical basis for vegetation construction in Loess area. The results showed as follows: 1) Better correlative relationship between rainfall and rainfall intensity and runoff and sediment production from Robinia pseudoacacia forest and Pinus tabulaeformis forest were testified by multiple regression, but the correlation decreased gradually with the increase of canopy density. When canopy density of Pinus tabulaeformis forest was less than 0.6, the correlative relationship between runoff and sediment production and I_{30} were more dramatic than that of I_{60} . While it was more than 0.6, the result was contrary to the former. 2) Effect of forest stand in decreasing runoff and sediment production was dramatic when coverage of forest stand was more than 40%, however, it was weaker when coverage not exceeding 60%. 3) Runoff and sediment production from sloping lands were cut down because of the function of litter and herb in intercepting rainfall and promoting roughness. To Robinia pseudoacacia forest or Pinus tabulaeformis forest, interception amount was about 13.5~22 percent of all precipitation. 4) Ultimate infiltration capacity increased with the increase of the density of forest stands, but the increasing range of the former was not direct ratio to the latter. And it increased very slowly when the density of Robinia pseudoacacia forest or Pinus tabulaeformis forest exceed 3 000 trees/km². Therefore, the density of 3 000 trees/km² may be regarded as upper limit of stand density while the function of preventing erosion is only taken into account. 5) The forest stand with biomass of 14.51 t/hm² had dramatic effect in preventing erosion. 6) Based on gray congruence analysis to kinds of factors affecting runoff and sediment production in sloping land, the factors of stand canopy density and herb and litter biomass were the most significant ones, whose gray incidence degrees all exceeded 0.6.

Key words forest vegetation; precipitation; runoff and sediment production; gray congruence analysis; loess area