放水冲刷条件下坡面植被空间布局对坡沟系统侵蚀产沙的影响研究*

丁文峰[1]　李　勉[2]

（1 长江科学院水土保持研究所，武汉　430010）

（2 黄河水利科学研究院，郑州　467000）

EFFECT OF DOWNSLOPE VEGETATION DISTRIBUTION ON SEDIMENT YIELD OF SLOPE-GULLY SYSTEM EXPOSED TO RUNOFF SCOURING

Ding Wenfeng[1]　Li Mian[2]

(1 *Soil and Water Conservation Department of Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan* 430010, *China*)

（2 *Institute of Hydraulic Research of Yellow River, Zhengzhou* 467000, *China*)

关键词　植被空间分布格局；坡沟系统；侵蚀产沙

中图分类号　S157　　**文献标识码**　A

植被在有效防治水土流失、改善生态环境中具有不可替代的重要作用。研究表明，土壤表面没有植被的降雨侵蚀量是未扰动森林土壤的 16 倍[1]。Zheng 在子午岭林区的研究也发现，当地表植被生长良好时，降雨、地形、坡度等因素对土壤侵蚀量的影响很小。而土壤表层一旦失去植被保护或根系的固结时，降雨和地形等因素对侵蚀的作用则十分明显，侵蚀速率可增至原来的数十倍，乃至更多[1]。鉴于植被在保持水土、减少土壤流失中的重要作用，近几十年来，国内外学者分别从不同角度对植被与土壤侵蚀的关系，特别是对防治水土流失的有效植被盖度[2]、不同植被覆盖度下的侵蚀量差异、不同土地利用格局对水土流失的影响[3-7]、植被截留、拦蓄降雨径流等问题进行了大量研究[8-11]，取得了许多重要研究成果，深化了植被在控制水土流失过程中的研究。但这些研究主要是针对不同植被类型、不同植被覆盖度条件下的坡面侵蚀产沙特征及规律等问题进行研究，尽管对不同植被空间分布格局对侵蚀产沙的影响问题也有涉及，但研究尺度多限于坡面[12-13]，而对介于坡面尺度和集水区尺度之间的坡沟系统较少涉及。实际上，作为坡面和集水区或流域间联系的纽带，坡沟系统侵蚀产沙问题近年来已引起许多研究者的关注[14]。回答此问题也成为如何根据流域或坡面不同部位侵蚀差异来合理布设植被，从而达到最佳的防蚀效果等生态环境整治与恢复问题的重点与难点。因此，本研究将通过模拟实验的方法，以坡-沟系统为研究对象，探讨坡面不同植被覆盖度、不同植被空间布局对坡沟系统侵蚀产沙特征的影响，以期为今后水土保持综合治理提供一定的理论依据。

---

*国家自然科学基金项目（40901135）、国家“十一五”科技支撑项目（2008BAD98B02）、国家重点基础研究发展计划项目（2007CB407203）资助

作者简介：丁文峰（1975—），男，博士，高级工程师，主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail：wenfengding@163.com

收稿日期：　2009-12-03；收到修改稿日期：　2010-07-15

1　材料与方法

1.1　实验设计

实验采用坡面和坡-沟系统两种实体模型进行模拟实验。在结果分析时，将两种模型上的实验结果相比较，就能间接得出坡面植被空间分布对坡沟系统侵蚀产沙的一些基本规律。根据以往数据，土壤侵蚀严重的黄土丘陵沟壑区第一、第二副区坡面坡度大致在 20°左右，沟坡坡度大致在 40°~60°之间分布频率较大，为此，坡沟连续体和单纯坡面试验模型设计时坡面设计坡度选定为 20°，沟坡设计坡度选定为 50°。模型净宽为 2.0 m，中间用 PVC 板将其分隔为四个相同宽度的部分，同时开展实验，以保证重复实验过程中的流量、土壤、地形等条件尽可能一致。坡面模型部分水平投影长 4.0 m，沟坡部分水平投影长 3.0 m。

在每次实验前，首先在坡面上布设不同覆盖度的草本植物，覆盖度选择 0、30％、50％、70％、90％五种。植被的布设根据坡面侵蚀量的空间差异采用上、中、下三种布设方案。实验填土前，将实验用野牛草（*Buchloe dactyloides*）带土 20 cm 移植至坡面不同部位，其他部位分层填入实验土，边填边用力压实，填土结束后，将无草覆盖坡面整平以保证每次实验其边界条件基本一致。实验槽内的坡面、沟坡土壤干容重分别控制在 1.35 g cm^{-3} 和 1.45 g cm^{-3} 左右。为了保证实验的有效性，每场实验均重复进行两次，并于实验后重新布设草被以保证重复实验的覆盖度与前一次实验的覆盖度相同。每次布设好坡面植被后放置 3~5 d，以使植草部分与坡面实验用土紧密结合。当一种覆盖度的实验结束后，将草被换下，重新移植，直至达到设计要求的标准，开始下一轮实验。

1.2　实验方法

实验采用放水冲刷法进行。实验用土为郑州邙山附近果园地表层黄土，其粒径组成如表1所示。在装填实验土之前，将野外运回的土样过10 mm孔径的筛后填入实验土槽，考虑到实验的需要，填土厚度保持在40 cm左右。实验开始前，为了消除土壤前期含水量给实验带来的影响，先在坡面上均匀地降一场小雨，并控制所有实验槽上接受的雨量基本相同，然后采用放水冲刷法进行实验。供水设备采用定水头装置供水，以保证在整个实验过程中供水量稳定。实验开始后，待坡面完全产流后，记录实验土槽的产流时间，并开始采集土槽下端出口的含沙量过程样，为了准确反映实验过程中的侵蚀产沙变化，采样间隔时间均确定为1 min，并且采用全部收集的方式。整个实验过程持续20 min。实验流量按黄土高原不同降雨强度在野外标准径流小区上产生的单宽流量换算到实验土槽上的流量得到，共设计3.2 L min^{-1}和5.2 L min^{-1}两级，约相当于1.5 mm min^{-1}、2.1 mm min^{-1}的降雨强度在实验土槽上产生的径流。为了保证实验的精度，每个实验流量连续重复2次。

表 1　实验土壤的粒径组成

有机质	全氮	全磷	不同粒径土壤颗粒百分比（%）					
(g kg^{-1})	（g kg^{-1}）	（g kg^{-1}）	1~0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm
3.49	0.37	0.45	1.20	35.80	42.80	2.40	6.80	11.00

2　结果分析

2.1　坡面不同植被覆盖度、不同植被空间布局下的坡面侵蚀产沙

由表 2 可知，在相同放水流量和植被空间布局条件下，坡面侵蚀产沙量随植被覆盖度的增大而减小；在相同放水流量和植被覆盖度条件下，坡面侵蚀产沙呈现出草上部侵蚀产沙＞草中部侵蚀产沙＞草下部侵蚀产沙的趋势。经方差分析表明，植被覆盖度和植被空间布局对坡面产沙的影响均在 0.05 水平上显著。对产流量而言，在相同放水流量和植被覆盖度条

件下，3 种不同植被空间布局对坡面产流量的影响不大，而在相同放水流量和相同植被空间布局条件下，坡面产流量随植被覆盖度的增大而减小。经方差分析表明，植被覆盖度对坡面产流量的影响在 0.05 水平上显著，而植被空间布局对坡面产流量的影响不显著。

表 2　不同覆盖度、不同放水流量、不同布设部位下的坡面侵蚀产沙和产流

放水流量（L min^{-1}）	植被覆盖度（%）	布设部位	径流量（L）	产沙量（kg）	放水流量（L min^{-1}）	植被覆盖度（%）	布设部位	径流量（L）	产沙量（kg）
	0	—	68.79	24.91		0	—	115.1	42.38
		上	67.83	23.40			上	114.4	35.25
	30	中	67.56	15.67		30	中	113.5	29.03
		下	65.21	13.87			下	111.1	24.30
		上	61.64	16.72			上	106.9	31.75
3.2	50	中	59.78	12.12	5.2	50	中	103.8	25.52
		下	59.56	11.77			下	103.7	23.79
		上	56.85	15.03			上	111.6	29.24
	70	中	58.82	11.49		70	中	108.2	24.73
		下	58.13	9.37			下	107.9	21.08
	90	—	55.88	5.93		90	—	90.81	15.07

2.2　坡面不同植被覆盖度、不同植被空间布局下坡沟系统的侵蚀产沙及产流

由表 3 可知，在相同放水流量、相同植被覆盖度、不同植被空间布局条件下，坡沟系统侵蚀产沙量及产流量的变化存在如下规律：草上部、草中部、草下部的侵蚀产沙量依次呈下降趋势，产流量变化不大。在相同放水流量、相同植被空间布局、不同植被覆盖度条件下，坡沟系统侵蚀产沙和产流均随植被覆盖度的增大而逐渐减小。经方差分析表明，植被覆盖度和植被空间布局对坡沟系统侵蚀产沙的影响均在 0.05 水平上显著，而植被覆盖度对坡沟系统产流量的影响在 0.05 水平上显著，但植被空间布局对坡沟系统产流量的影响不显著。

对比两种实体模型的产沙和产流，结果表明，产流量的减少幅度随实验放水流量的不同而不同。如当放水流量为 3.2 L min^{-1}、植被布设部位为草上部的情况下，单纯坡面在 5 种不同植被覆盖度下的产流量分别为 68.79 L、67.83 L、61.64 L、56.85 L、56.98 L，减水效益分别为 1.39％、10.39％、17.36％和 17.17％，可以看出，当植被覆盖度从 30％增大至 50％、70％和 90%时，减水效益呈 S 型曲线变化，30％和 70％为实验条件下植被覆盖度减少径流量的两个特征点。对坡沟系统而言，当放水流量为 3.2 L min^{-1}，植被布设部位为草上部的情况下，坡沟系统在 5 种不同植被覆盖度下的产流量分别为 68.17 L、66.37 L、64.77 L、61.05 L、53.08 L。减水效益分别为 2.64％、4.99％、10.44％和 22.14％，当植被覆盖度从 30％增大至 50％、70％和 90%时，减水效益呈增大趋势，并未出现转折。说明在实验条件下，有效减少坡沟系统径流量的有效植被覆盖度大于单纯坡面条件下的有效植被覆盖度。产沙量的变化表现为：在相同放水流量、相同植被覆盖度和相同植被布设坡位条件下，单纯坡面的减沙效益大于坡沟系统的减沙效益；且坡面和坡沟系统的减沙效益均有随放水流量的增大而减小，随植被覆盖度的增大而减小的趋势。

表 3　不同覆盖度、不同放水流量、不同布设部位下的坡沟系统侵蚀产沙及产流

放水流量（L min^{-1}）	植被覆盖度（%）	布设部位	径流量（L）	产沙量（kg）	放水流量（L min^{-1}）	植被覆盖度（%）	布设部位	径流量（L）	产沙量（kg）
	0	—	68.17	26.80		0	—	115.2	58.64
		上	66.37	25.90			上	115.1	53.22
	30	中	66.35	24.65		30	中	114.3	52.82
3.2		下	65.53	20.74	5.2		下	113.7	50.00
		上	64.77	26.95			上	106.2	46.00
	50	中	63.42	24.07		50	中	107.7	37.12
		下	62.68	18.28			下	113.8	36.19

		上	61.05	27.05			上	116.9	38.23
	70	中	60.35	23.99		70	中	113.8	35.09
		下	55.26	17.38			下	103.5	34.16
	90	—	53.08	16.46		90	—	103.3	33.02

2.3 不同坡面植被布设部位下沟坡部分的侵蚀产沙

由表 4 可知，在相同植被覆盖度、相同植被布设部位、不同放水流量条件下，沟坡部分侵蚀产沙随放水流量的增大而增大；在相同放水流量、不同坡面植被覆盖度条件下，沟坡部分侵蚀产沙并不随坡面植被覆盖度的增大而减小，相反表现出增大趋势，且在不同植被布设部位条件下的侵蚀产沙没有明显的规律可循。如当放水流量为 3.2 L min^{-1} 时，沟坡部分在 5 种不同植被覆盖度下（以草上部为例）的侵蚀产沙量分别为 1.885 kg、4.992 kg、10.23 kg、12.02 kg、10.53 kg，坡面植被覆盖度为 90％条件下的沟坡部分侵蚀量大于坡面无植被覆盖条件下的沟坡部分侵蚀量。

表 4　沟坡部分在不同放水流量、不同植被覆盖度、不同植被布设部位下的侵蚀产沙量

放水流量（L min^{-1}）	植被覆盖度（％）	布设部位	沟坡侵蚀产沙量（kg）	放水流量（L min^{-1}）	植被覆盖度（％）	布设部位	沟坡侵蚀产沙量（kg）
3.2	0		1.885	5.2	0		16.26
3.2		上	4.992	5.2		上	23.93
	30	中	6.979		30	中	23.79
		下	6.872			下	26.70
3.2		上	10.23	5.2		上	21.25
	50	中	11.93		50	中	18.60
		下	6.511			下	20.39
3.2		上	12.02	5.2		上	22.99
	70	中	12.50		70	中	19.35
		下	10.01			下	19.07
3.2	90		10.53	5.2	90		22.95

分析出现这种现象的原因，主要是因为在影响沟坡部分侵蚀产沙的 4 个因子中（放水流量、坡面来水含沙量、坡面来水单位水流功率、坡面植被覆盖度），放水流量和坡面来水含沙量以及坡面来水单位水流功率 3 个因子与沟坡部分侵蚀产沙呈显著相关，而坡面植被覆盖度与沟坡部分侵蚀产沙相关性最差（见表 5）。由于坡面来水含沙量与坡面植被覆盖度呈反比，当坡面植被覆盖度由小增大时，坡面部分末端的径流含沙量则由大变小，也就是说对于沟坡部分而言，其上端来水含沙量随坡面部分植被覆盖度的增大而减小，径流含沙量与径流挟沙能力的差值就越大，而径流剥蚀率与径流含沙量和径流挟沙能力的差值成正比[15-16]，因此沟坡部分的侵蚀产沙量也就越大，从而出现尽管坡面部分植被覆盖度增大，但沟坡部分侵蚀产沙量却增加的现象。

表 5　沟坡部分侵蚀产沙量与各影响因子的相关系数

	沟坡部分侵蚀产沙量	坡面来水单位水流功率	放水流量	坡面来水含沙量	坡面植被覆盖度
沟坡部分侵蚀产沙量	1	0.799*	0.91*	-0.875*	0.447
坡面来水单位水流功率		1	0.841*	0.825*	-0.647
放水流量			1	-0.913*	0.314
坡面来水含沙量				1	-0.719*
坡面植被覆盖度					1

*表示在 0.01 水平上显著

3　结论与讨论

1）无论是坡面还是坡沟系统，在相同植被覆盖度、相同放水流量条件下，3 种不同植

被布设坡位下的径流总量间无明显差别，但产沙量表现为在 0.05 水平上差异显著；在相同植被布设部位、相同放水流量条件下，坡面和坡沟系统的径流总量在不同植被覆盖度条件下无明显差异，而产沙量在不同植被覆盖度条件下表现为 0.05 水平上差异显著。

2）对沟坡部分而言，在相同的植被覆盖度、相同植被布设部位、不同放水流量条件下，沟坡部分的侵蚀产沙量随放水流量的增大而增大；在相同的放水流量条件下，沟坡部分侵蚀产沙并不随坡面植被覆盖度的增大而减小，相反呈现出增大的趋势。从而说明，在黄土高原水土流失治理中仅治坡不治沟虽能在一定程度上减少总侵蚀量，但减少的侵蚀量主要集中于坡面部分，对沟坡部分而言，其侵蚀量不但不能减少，反而会引起更大的侵蚀产沙量。

3）本文研究主要是针对坡沟系统中的坡面有植被分布条件下，坡面、沟坡以及坡沟系统产流产沙与无植被布设情况下的对比研究，目的是探讨单纯治坡或治沟对整个坡沟系统侵蚀产沙的影响，从而为黄土高原先治坡或先治沟等治理方针提供一定的理论依据。由于野外开展实验的复杂性和条件限制，本文仅从室内模拟实验的角度对此问题进行了初步探讨，具体能否应用于野外实际尚有待进一步验证。此外，实验结果表明，在今后的水土流失治理工作中应注意植被覆盖度和植被布设部位对侵蚀产沙的双重影响，如果在不能提高植被覆盖度的条件下，将植被布设于坡面下部可起到相对较好的治理效果。

参 考 文 献

[1] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. Pedosphere, 2006, 16(4)：420–427

[2] 焦菊英, 王万忠, 李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析. 植物生态学报, 2000, 24(5)：608–612

[3] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土丘陵沟壑区集水区尺度土地利用格局变化的水土流失效应. 生态学报, 2004, 24(7)：1 358–1 364

[4] 朱连奇, 许叔明, 陈沛云. 山区土地利用/覆盖变化对土壤侵蚀的影响. 地理研究, 2003, 22(4)：432–438

[5] 黄进勇, 严力蛟, 王兆骞. 红壤小流域不同土地利用方式下的水土流失特征. 浙江大学学报：农业与生命科学版, 2002, 28(1)：78–82

[6] 符素华, 段淑怀, 李永贵, 等. 北京山区土地利用对土壤侵蚀的影响. 自然科学进展, 2002, 12(1)：108–112

[7] 倪晋仁, 李英奎. 基于土地利用结构变化的水土流失动态评估. 地理学报, 2001, 56(5)：611–621

[8] Smith D D. Interpretation of soil conservation data for field using. Agricultural Engineering, 1941, 22：173–180

[9] 李占斌, 朱冰冰, 李鹏. 土壤侵蚀与水土保持研究进展. 土壤学报, 2008, 45(5)：802–809

[10] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 等. 森林对水文过程影响研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(1)：113–116

[11] Valente F. Modeling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. Journal of Hydrology, 1997, 190：141–162

[12] Zhou Z C, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall. Catena, 2007, 70：350–355

[13] 游珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被在坡面的不同位置对降雨产沙量影响. 水土保持通报, 2006, 26(6)：28–31

[14] 丁文峰, 李勉, 姚文艺, 等. 坡沟侵蚀产沙关系的模拟试验研究. 土壤学报, 2008, 45(1)：32–39

[15] Baets S D, Poesen J, Gyssels G. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. Geomorphology, 2006, 76：54–67

[16] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et a1. Soil detachment by shallow flow. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2002, 45（2）：351–357