

坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响

王全九^{1,2}, 穆天亮¹, 王辉²

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 2. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过田间模拟降雨试验, 分析了坡度对坡面物质迁移特性的影响。结果显示, 坡度对坡面物质迁移的影响十分显著; 降雨强度一定时, 坡度达到 15°左右时, 径流量达到最大; 坡度对径流养分流失量的影响是通过径流量起主导作用, 径流量大相应径流携带养分流失总量增加。利用幂函数对径流溶质浓度变化过程进行了拟合, 结果显示幂函数可以很好反映田间坡面溶质随地表径流变化过程, 说明在侵蚀环境下径流溶质浓度变化过程符合幂函数。

关键词: 降雨径流; 径流溶质; 黄土坡面

中图分类号: S153.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)04-0176-04

土壤溶质随地表径流迁移是一个复杂过程, 国内外学者对此进行了广泛研究^[1-8]。地形对坡面物质流失的影响包括两个方面: 一是地形通过对光、热、水等的再分配影响物质流失, 也可以认为是影响坡面物质流失的间接作用。二是坡面组成物质的稳定程度、径流动能增减等, 在其它条件相对不变的情况下, 主要受制于坡度和坡长的作用, 所以, 坡度与坡长的作用可以认为是地形影响坡面物质流失的直接作用。坡度的改变, 土表单位面积受雨量相应发生变化, 坡度对土壤侵蚀的影响主要表现为, 坡度影响着降雨入渗的时间, 对坡面的入渗产流特征具有明显的效应。在降雨产流情况下, 坡度与径流的速度有关, 从而影响到坡面表层土壤颗粒起动、侵蚀方式和地表径流的挟沙能力。因此, 坡度对坡面土壤流失和养分迁移有重要的影响作用。国内外学者为了研究坡度对土壤溶质随地表径流迁移特征影响, 大都通过室内模拟实验, 分析坡度对径流溶质迁移的影响程度。由于田间土壤和植被特征与室内模拟实验有较大差别, 为了进一步深入揭示坡度和植被对坡面径流、土壤侵蚀以及养分流失的影响, 本文通过野外模拟降雨试验, 研究不同坡度条件下径流养分迁移规律。王全九等^[9]建立了描述土壤溶质随地表径流迁移过程的数学模型, 该模型显示径流溶质浓度与时间呈指数函数。本文利用田间试验资料进一步验证该模型是否反映田间坡面溶质径流变化过程, 为坡地土壤养分流失过程的模拟、合理配置坡面植被种植密度和调控坡面水土资源提供参考。

1 试验点概况与试验方法

试验在山西省水土保持科学研究所野外试验小区进行。该试验区位于吕梁市离石区王家沟流域官道梁, 土壤类型为黄绵土, 地处吕梁市离石区中纬度偏南的晋西黄土高原, 气候属温带大陆性季风气候, 无霜期 110 ~ 170 d。年平均气温 8.9℃, 最低为 -25.5℃(1971年1月22日), 最高温度为 38.9℃(1966年6月21日)。年日照时数为 2 633.8 h, 平均日照率为 60%, 有效积温达 3 298℃, 年蒸发量为 1 850.8 mm。年平均降水量为 450 ~ 550 mm。据 1954 ~ 1990 年统计, 年降水量 300 mm 以下占 8.3%, 300 ~ 400 mm 占 30.6%, 500 ~ 600 mm 占 13.9%, 600 mm 以上占 27.8%。该流域是黄土高原土壤侵蚀最严重地区之一, 生态环境退化严重, 其自然条件在黄土丘陵地区有较强的代表性。野外降雨试验区土壤为黄绵土, 属于轻粉质土。其基本理化性质见表 1 和表 2。

野外模拟降雨采用侧喷人工降雨装置, 由中科院水土保持研究所自行研制, 其装置包括降雨系统和供水系统两部分。降雨系统由多个单一降雨支架组成, 降雨支架主要包括侧式喷头、喷头支架和压力控制部分。降雨喷头由喷头体、碎流挡板、出流孔板等部分组成。更换不同直径的孔板, 调整压力表读数, 可获得不同的降雨强度。喷头安装在由三角架固定的降雨支架上, 支架高 5 m, 加上水流喷出高度, 降雨高度可达 6 ~ 6.5 m, 绝大多数雨滴能够达到终点速度。

收稿日期: 2009-02-10

基金项目: 中国科学院“流域水土工程”创新团队; 中国科学院“百人计划”

作者简介: 王全九(1964—), 男, 内蒙古丰镇人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤物理与溶质运移方面研究。E-mail: wquanju@163.com。

表 1 供试土壤的主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

田间持水量 Field moisture holding capacity (%)	饱和含水量 Saturated water content (%)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)	有机质 O. M. (g/kg)	pH
25.05	35.65	0.67	1.25	25.83	6.45	8.3

表 2 供试土壤的机械组成 (%)

Table 2 Mechanical composition of tested soil

粒级 Particle class		
< 0.001 mm	0.001 ~ 0.05 mm	1 ~ 0.05 mm
16.7	62.8	20.5

试验场地在山西省水土保持科学研究所官道梁试验场东北阴坡耕地。坡度小区 10 个,分 5°、10°、15°、20°、25°五个坡级,种植苜蓿,小区宽为 2 m,长 7 m,面积 14 m²,边界用混凝土板围成。每个降雨区平行布设两个试验小区,中间留 0.6 m 宽的隔离带,两边各留 0.2 m 保护带,两小区边砌有安放降雨器的水泥平台,径流池采用水泥砂浆砌砖并抹面。每次降雨同时降两个小区,在两边各放两个降雨器,同一平台两降雨器间距 2.75 m,距小区边界 1.5 m。

由于野外降雨受风的影响较大,一般降雨在凌晨 5:00 左右进行,降雨前 12 h 施肥,具体施肥量 KNO₃ 为 30.08 g/m²,KH₂PO₄ 为 12.75 g/m²,KBr 为 26.77 g/m²。将肥料溶解于 12 L 水中,用喷雾器均匀喷施于小区土壤表层,再用 3 L 清水进行喷洒以便将植被表面的肥料淋洗到土壤地表。在两小区中间的隔离带由坡上至坡底摆放 3 个雨量筒。在试验过程中,根据产流强度变化快慢设置不同采样间隔时间和径流样品收集时间。一般产流前 10 min 内,每 2 min 径流收集于桶内,10 ~ 30 min 每 5 min 径流收集于桶内,同时测量泥沙和水总重及体积,采集上清水样,倾倒入至泥沙稍干采集泥沙样。径流水溶性磷采用钼蓝比色法紫外分光光度计测定,硝态氮采用紫外分光光度计测定,溴离子采用溴离子选择性电极结合离子计测定,钾离子采用原子吸收分光光度计测定。

2 结果与分析

2.1 坡度对径流总量和土壤流失量的影响

图 1 显示了降雨强度为 50 mm/h、降雨历时 30 min 的单次模拟降雨条件下,不同坡度径流小区的径流总量和泥沙流失量。由图 1 可以看出,坡度为 5°、10°时的径流量较小;当坡度在 15°和 20°时,其径流总量比较相近,比坡度为 5°、10°的径流量增加

30%多;当坡度为 25°时,径流量急剧减少,其值比坡度 5°、10°的值小;当坡度大于 25°时,径流量迅速增大。由此可见,随着坡度增大,径流量并非线性增加。由图 1 可看出,坡度为 5°至 30°之间,除了坡度为 25°时,泥沙流失量仅为 0.92 kg,泥沙流失量随坡度增大而有增大趋势。在坡长恒定的条件下,坡度变化,导致实际承雨面积变化;坡度不同,改变了坡面土壤颗粒的稳定条件,坡面水流动力特性也不同。随着坡面坡度增大,入渗时间缩短,入渗量减小,径流量增加;产流时刻提前,坡面流速加快,土壤颗粒稳定性差,土壤随径流流失的几率增大;但是,随着坡度增加,坡面实际承雨面积减少,坡面实际降雨量减少;因此,坡度增加促使坡面物质流失量是多项因素共同作用的综合表现。在坡度为 20°时,坡面的径流量和土壤流失量均达到较大值,随后,径流量和土壤流失量随坡度增加而减少,在坡度为 25°时存在拐点,这一结果与一些学者研究成果相一致^[10]。在坡度为 30°时,径流量和土壤流失量又迅速增大。众多研究表明,坡面土壤侵蚀具有坡度界限,且土壤侵蚀的界限坡度是一个变量,随颗粒粒径、容重、坡面糙率、径流长度、降雨入渗差值(净雨量)以及土壤摩擦系数等因素的不同而改变。试验小区种植苜蓿,植被盖度较好,研究结果与裸地条件存在差异。

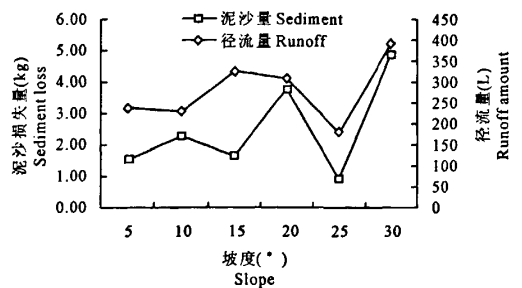


图 1 不同坡度下径流总量和泥沙流失量

Fig. 1 The total runoff and erosion amount for different slope treatments

2.2 坡度对径流养分迁移过程的影响

图 2a、b、c 和 d 分别描述了降雨条件下不同坡度径流溴、硝态氮和溶解态钾和磷浓度随时间变化过程。由图可知,径流溶质浓度总体表现随时间呈

现递减过程。王全九等^[9]通过室内模拟实验,分析了黄土坡面径流溶质浓度变化过程,并提出了等效对流传递模型,该模型认为径流溶质浓度随时间呈现幂函数过程,可以表示为 $y = at^b$, 其中 y 为径流溶质浓度, t 为产流时间, a 和 b 为参数。利用该公式分别模拟径流溶质(溴、硝态氮、钾和磷)浓度值与时间关系,其参数 a 和 b 以及 R^2 的值见表 3。由图 2 和表 3 可见,除了在坡度为 30° 时,径流硝态氮浓度值随时间变化不符合幂函数关系 ($R^2 = 0.16$) 之外,各溶质浓度变化在不同坡度条件下均可用幂函数描述,且大多数相关系数 (R^2) 很高。总体来看,坡度对坡面径流溶质的初始浓度影响最大;坡度大

小与径流初始溶质浓度大小并非线性关系,坡度为 15° 和 20° 的初始径流溶质浓度值最高(溴除外);其次是 5°, 其余坡度的初始溶质浓度大小因溶质种类不同而存在差异。溴和硝态氮均随水容易流失,二者在土壤中运移规律基本相同。但是,在坡度为 30° 时,径流硝态氮流失规律明显不同于相应条件溴的流失规律,硝态氮的初始浓度较低,导致这现象的原因可能是:由于坡度较大,产流快,径流量较大,导致硝态氮浓度低;其二是由于降水本底值中硝态氮含量较高,也可能造成测定误差较大,这需要进一步试验验证。

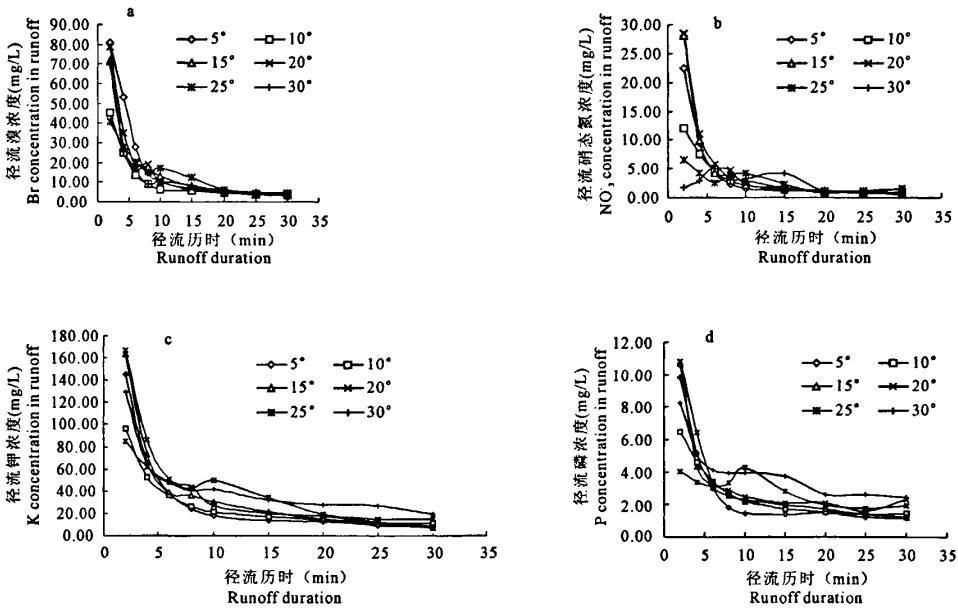


图 2 不同坡度下不同溶质浓度随时间的变化

Fig.2 Variation of solutes concentration for different slope treatments

表 3 不同坡度径流溶质浓度变化过程模拟参数

Table 3 Fitted results of solute concentration in runoff

坡度(°) Slope	溴 Br			硝态氮 NO ₃ ⁻			钾 K			磷 P		
	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
5	214.86	-1.25	0.97	43.31	-1.27	0.94	263.07	-1.07	0.98	12.99	-0.78	0.89
10	75.25	-0.93	0.95	27.43	-1.07	0.98	155.76	-0.81	0.99	9.72	-0.60	0.98
15	147.80	-1.10	0.98	64.42	-1.36	0.99	335.78	-1.08	0.98	13.26	-0.72	0.95
20	168.30	-1.15	0.98	61.33	-1.29	0.93	357.29	-1.06	0.99	13.23	-0.63	0.86
25	87.91	-0.84	0.94	16.32	-0.89	0.75	160.50	-0.67	0.90	5.55	-0.30	0.67
30	105.36	-0.99	0.95	4.31	-0.26	0.16	164.51	-0.61	0.95	9.74	-0.41	0.93

径流溶质浓度变化过程直接反映了坡面土壤溶质向径流释放的动态过程,并不能全面反映坡面溶质流失量,坡面溶质流失多少还取决于径流量的大

小。根据溶质浓度及相应径流量大小,可推求出在同一降雨历时内,不同坡度下各溶质随径流的流失总量(见图 3)。随着坡度增大,径流溶质流失总量

大体呈先增加后减少,然后又增大的趋势;在坡度为25°时,溶质流失量最少。坡面溶质流失量规律与坡面径流量和泥沙流失量规律大致相同,表明土壤溶质迁移到径流中的多少,与径流和泥沙流失过程关系密切。同时也发现,在坡长恒定条件下,随着坡度的增大,坡面物质流失量并非增大,而是呈一定波动过程。溶质流失量的多少取决于径流中的溶质浓度和坡面径流量。因此,坡度对径流养分流失量的影响是通过径流量起主导作用。

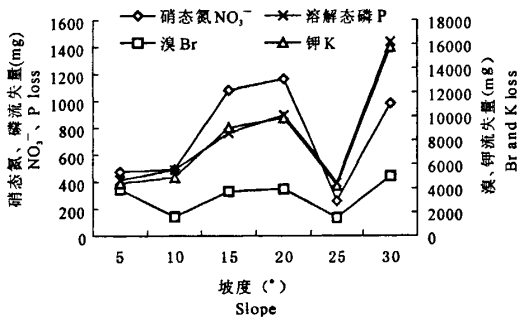


图3 不同坡度下径流溶质流失量

Fig.3 The total solute loss amount for different slope treatments

3 结论

试验结果显示坡度对坡面的影响最终是通过坡面径流量和流速而体现的。雨强一定时,坡度达到15°左右时,径流量最大。坡面土壤侵蚀具有坡度界限,当坡度 $\geq 15^\circ$ 时,侵蚀量增加,在20°时达到最大值,之后侵蚀量随坡度增加而减少。坡度对径流养

分流失量的影响是通过径流量起主导作用,径流量大相应径流携带养分流失总量增加。同时利用幂函数对径流溶质浓度变化过程进行了拟合,结果显示幂函数可以很好反映田间坡面溶质随地表径流变化过程,为进一步发展描述径流溶质变化过程的数学模型提供指导。

参考文献:

- [1] 王全九,沈晋.降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移试验研究[J].水土保持学报,1993,7(1):11—17.
- [2] Ahuja L R, Sharpley A N, et al. Effect of soil slope and rainfall characteristics on phosphorus in runoff[J]. J Environ Qual, 1982, 11: 9—13.
- [3] 张兴昌, 邵明安, 黄占斌. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1038—1044.
- [4] 张兴昌, 刘国彬, 付会芳. 不同植被覆盖度对流域氮素径流流失的影响[J]. 环境科学, 2000: 16—19.
- [5] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 85—88.
- [6] Ahuja L R. Characterization and modeling of chemical transfer to runoff[J]. Adv Soil Sci, 1986, 4: 149—188.
- [7] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with polyacrylamide and surfactants: applications for irrigated agriculture[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 58(5): 290—300.
- [8] McDowell R W, Sharpley A N. The effect of antecedent moisture conditions on sediment and phosphorus loss during overland flow: Mahantango Creek catchment, Pennsylvania, USA [J]. Hydrol Process, 2002, 16: 3037—3050.
- [9] 王全九, 王文焰, 沈冰, 等. 降雨—地表径流—土壤溶质相互作用深度[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 41—46.
- [10] 唐克丽, 张仲子, 晓玲, 等. 黄土高原水土流失与土壤退化的研究[J]. 水土保持通报, 1987, 18(6): 12—18.

The effects of slope on solute concentration in runoff on the loess slope

WANG Quan-jiu^{1,2}, MU Tian-liang¹, WANG Hui²

(1. Xi'an University of technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Key Lab of Soil Erosion and Dry-land Farming on loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Serious soil erosion reduce the amount of nutrient in soil losses, and the slope degree is one of the main factors of effect soil solute transporting into runoff. In the paper the effects of slope degree on the soil solute transport into runoff was further analyzed through the experimental data in field. The results indicate that runoff amount and velocity may inflect the effect of slope on the runoff formation. The runoff amount reaches to the maximum value when the slope degree is 15 for the fixed rainfall intensity. The effect of sole degree on the soil solute transport into runoff may be infected by the runoff amount, and the amount of solute in runoff increases as the runoff amount increases. The power function was used to fit the experimental data of the solute concentration in runoff. The results indicate that the power function may be used to fit the experimental data of the solute concentration in runoff, and the results may provide some guidance for analysis of the features of the soil solute transport with runoff.

Key words: rainfall-runoff; solute in runoff; loess slope