

京津水源区坡耕地土壤侵蚀特征分析

赵婷^{1,2}, 谢永生^{1,3*}, 江青龙³

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;

3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 坡耕地是保障粮食安全与经济发展的重要资源。本文利用承德市南山径流场资料对不同坡长下径流深、含沙量及侵蚀量进行对比分析, 结果显示: 坡长和降雨强度都对土壤侵蚀有影响, 随着坡长变化, 导致土壤侵蚀量变化的两个主导因素不断变换。雨强小于 0.25 mm/min 时, 坡面土壤侵蚀模数随坡长的增加而增大; 雨强大于 0.25 mm/min 时, 随坡长的增加先增大后减小, 最大侵蚀量总是出现在 22 m 坡长范围内。径流深均值与侵蚀量增量随坡长变化趋势一致, 含沙量均值变化与雨强关系密切。所以治理京津水源区坡耕地水土流失, 应在 22 m 坡长以内采取等高植物篱等措施, 既可降低工程投入, 又减少坡面土壤流失, 提高土地生产力。

关键词: 坡长; 土壤侵蚀; 坡耕地; 京津水源区

中图分类号: S157.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0227-05

京津水源区作为内蒙古高原向华北平原过渡地带, 山高、坡陡、土薄, 是潮白河密云水库和滦河潘家口水库上游水源区, 近年来水土流失较为严重^[1-3]。作为京津地区重要的生态屏障, 京津水源区水土流失问题日益得到关注, 特别是关系到当地粮食生产的坡耕地, 是当地珍贵的自然资源, 也是发生土壤侵蚀的主要土地利用类型之一^[4]。坡耕地是与当地人民生活密切相关的地带, 如分布在距离村庄较远的坡脚、缓坡山麓等地势低缓的区域, 是保障粮食安全与经济发展的重要区域, 该区域多为薄土坡耕地, 地块面积较小、单产低、水土流失多发, 在一定程度上阻碍了农业的可持续发展。研究该区坡耕地水土流失特征及水源区水土保持与农业发展具有重要的科学意义。本文通过研究天然降雨对不同坡长的坡面侵蚀机理, 以期为进一步遏制坡耕地水土流失提供治理依据, 达到充分利用有限的水土资源, 为水土保持及农业生产实践提供有力支撑。

坡长作为影响土壤侵蚀的重要因素之一, 可以决定坡面水流能量的沿程变化, 国内外众多学者也对坡长与土壤侵蚀的关系进行过大量研究^[5-8]。坡长对土壤侵蚀的影响可随坡长的变化而有所不同, 关于坡长对侵蚀总量的影响, 众多学者展开了深入的研究, 所得出的结论也主要有三种^[9]。一种观点认为随着坡长增加, 水中的含沙量增加, 水流能量多消耗于挟运泥沙, 结果侵蚀反而减弱; 另一种观点认

为由于随着坡长增加径流量增加, 侵蚀量增加, 在侵蚀增加以后, 水流含沙量也增加, 水体搬运泥沙所消耗的能量加大, 侵蚀减弱, 两者相互消长, 结果从上坡到下坡侵蚀没有很大的差异; 第三种观点认为从上坡到下坡, 由于水深逐渐增加, 侵蚀量相应增加。国内的众多研究大多是针对黄土高原, 蔡强国等研究表明, 存在侵蚀量临界坡长, 土壤侵蚀产沙量随坡长增加呈先增加而后逐渐减小趋势^[10]。罗来兴研究表明, 坡地上的侵蚀量随坡长的增加, 先增强后逐渐减弱、再增强的变化过程^[11]。郑粉莉等认为, 坡耕地坡面侵蚀产沙量随坡长变化强弱波状起伏变化^[12]。孙亚平通过模拟降雨试验研究表明单位径流深侵蚀模数随着坡长增加呈指数函数增加^[8]。这些研究结果有所差别, 原因可能与研究区域有关, 同时不同雨强条件下, 土壤侵蚀机理会呈现出不同的形式。特别是在京津水源区, 作为典型的北方土石山区, 下垫面土层较薄, 坡耕地作为当地主要农业生产资源, 研究其土壤侵蚀特征具有一定意义, 而相关研究在京津水源区较缺乏。

1 研究区介绍及数据来源

南山径流场位于承德市南部, 距首都北京 230 km, 距石家庄 540 km, 介于 40°11' ~ 42°40'N, 115°55' ~ 119°15'E 之间。研究区域地处冀北土石山区承德地区, 属燕山沉降带与内蒙古高原过渡地带, 西北部

收稿日期: 2012-06-09

基金项目: 水利部行业公益性专项项目“冀北山区生态输水小流域治理模式与关键技术”(200901051); “十二五”国家科技支撑计划重大项目“农田水土保持与持续利用关键技术研究示范”(2011BAD31B01)

作者简介: 赵婷(1985—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhaoting09@mails.gucas.ac.cn。

* 通信作者: 谢永生(1960—), 男, 研究员, 主要研究方向为水土保持、土地资源及环境评价。E-mail: ysxie@ms.iswc.ac.cn。

为内蒙古高原,东北部为七老图山山脉,中部、南部为燕山山脉,地势西北高,东南低,所属流域内最高山峰海拔 1 800 m,最低山峰海拔 200 m。属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,光照充足,雨热同季,夏季凉爽,昼夜温差大,年平均气温 8.8℃左右,无霜期 140 d,年平均降雨量 560 mm,约 80%集中在 6—9 月。土壤类型主要为褐土、粗骨土,土质极易造成侵蚀,土层厚度 40~60 cm,土壤容重 1.3~1.6

t/m³。

为了研究坡面侵蚀产沙,承德市水土保持科学研究所 1981 年之后建立了标准径流场,本文选取南山 6 个径流场 1987—1991 年的观测资料,6 个径流场位于同一坡面下部,下垫面相同。1987—1991 年的 6 个径流场同期降雨都产流且有记录的降雨有 19 场,采用这 19 场降雨资料进行本文研究。

表 1 南山径流场的基本特征

Table 1 Characteristics of runoff plots in Nanshan

径流场编号 Plot No.	坡型 Type of slope	坡度/(°) Slope gradient	坡长/m Slope length	坡宽/m Slope width	观测年限 Observation duration	地表情况 Surface condition
15	直行坡 Straight slope	22°58'	2	5	1987—1991	人工裸地 Artificial bareland
16	直行坡 Straight slope	22°58'	5	5	1987—1991	人工裸地 Artificial bareland
17	直行坡 Straight slope	23°30'	12	5	1987—1991	人工裸地 Artificial bareland
19	直行坡 Straight slope	24°40'	16	5	1987—1991	人工裸地 Artificial bareland
20	直行坡 Straight slope	24°28'	22	5	1987—1991	人工裸地 Artificial bareland
21	直行坡 Straight slope	24°17'	33	5	1987—1991	人工裸地 Artificial bareland

2 结果与分析

2.1 降雨强度对不同坡长土壤侵蚀量的影响

针对黄土高原的土壤侵蚀因素进行分析时,降雨强度对侵蚀模数的影响,多选取最大 30 min 降雨强度这一数值^[13]。北方土石山区从降雨量和侵蚀模数上与黄土高原相比较,数值都较小,因而本文采用最大 10 min 降雨强度进行研究。相关系数(表 2)的比较表明,15、16、17、21 号径流场最大,10 min 内降雨强度与土壤侵蚀模数的相关性无显著性差异,文章可以选取最大 10 min 降雨强度来表征降雨特征;而 19、20 号径流场最大 10 min 降雨强度与土壤侵蚀相关性较差,其原因另文分析。

表 2 产沙模数 M_s 与最大 10 min 雨强 I_{10} 的回归关系

Fig.2 Regression of sediment yield modulus M_s with maximum 10-minute rainfall intensity

径流场编号 Plot No.	$M_s - I_{10}$ 回归关系 Regression	R^2
15	$y = 21.355x + 0.0283$	0.679
16	$y = 89.549x - 29.352$	0.616
17	$y = 118.13x - 32.686$	0.744
19	$y = 399.56x - 127.13$	0.269
20	$y = 135.43x + 123.28$	0.029
21	$y = 833.41x - 225.32$	0.678

回归结果(图 1)表明,2 m、5 m、12 m 坡长的回归直线斜率较小,且直线斜率随着坡长的增加缓慢

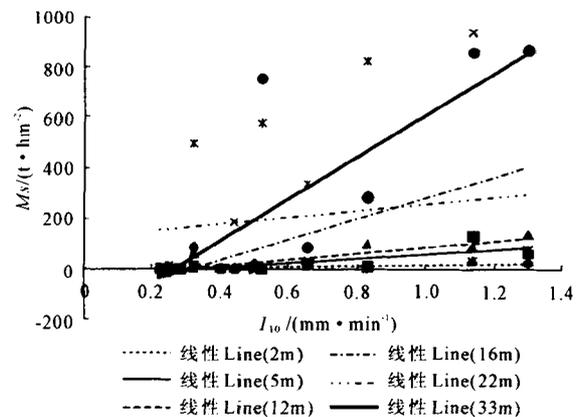


图 1 不同坡长下最大 10 分钟雨强 (I_{10}) 与土壤侵蚀的关系
Fig.1 Relations between maximum 10 minute rainfall intensity (I_{10}) and soil erosion in different slope length

增大;从 12 m 到 16 m 坡长的直线斜率增加较快;22 m 坡长的斜率与 12 m 坡长斜率相近,但 22 m 坡长的初始截距较大;坡长从 22 m 增加到 33 m 时,直线斜率增加较快。分析原因可能是:坡长从 2 m 增加到 16 m 时,径流随坡长不断增大而不断汇集,侵蚀能力相应不断增大,坡长是侵蚀量增加主导因素。坡长从 16 m 增加到 22 m,直线斜率减小,单位雨强内单位侵蚀量增加缓慢,即 20 号径流场土壤侵蚀量数值对最大 10 min 降雨强度响应较差。但 22 m 坡长处初始截距较大,说明在较小雨强条件下,可以产生较大侵蚀量,这一坡长处导致侵蚀量增加的主导因素为降雨强度。坡长从 22 m 增加到 33 m,随坡长

增大,径流深增加,单位雨强增加导致单位侵蚀量大大增加,坡长是侵蚀量增加的主导因素。坡长和降雨强度都对土壤侵蚀有着影响,随着坡长的增加,导致土壤侵蚀量变化的两个主导因素不断变换。

2.2 坡耕地侵蚀的临界坡长

选取南山径流场的 19 场降雨(表 3)分析不同降雨强度对坡面侵蚀量的影响。6 个坡度相同的径流场,可以认为不同径流场单位面积上的降雨量是相同的。在降雨强度一定的情况下,坡面侵蚀量的大小随着坡面的长度变化而变化。

从图 2 可知,当 $I_{10} \leq 0.25 \text{ mm/min}$ 时,坡面土壤侵蚀模数随着坡长的增加而增大,在坡长较小时,侵蚀量增加缓慢,坡长 16~22 m 时,侵蚀量迅速增加;当 $I_{10} > 0.25 \text{ mm/min}$ 时,坡面土壤侵蚀模数随着坡长的增加先增大后减小,16~22 m 坡长侵蚀量增速与小雨强时相同,增加较快。

当 $I_{10} \leq 0.25 \text{ mm/min}$ 时,从 2~33 m,随着坡长增加土壤侵蚀模数逐渐增大。北方土石山区土壤中粗砂含量较大,水流可携带泥沙成分含量低,尤其在雨强较小时,水流主要搬运雨滴击溅的泥沙。从上坡到下坡,水流中可携带悬移质含量虽会慢慢增大,但不会形成高含沙水流,以至于为携带更多泥沙而消耗水流能量,结果随着坡长的增加,径流逐渐增大,侵蚀量也逐渐增大。

当 $I_{10} > 0.25 \text{ mm/min}$ 时,侵蚀量由大变小的转折坡长为 22 m。当雨强较大时,坡面水层相应较大,坡面侵蚀以径流冲刷为主,径流在流动过程中可以获得充足泥沙。随着坡长增加,径流不断汇集,径流动能不断增加,然而随着坡长增加,泥沙不断进入水中,径流能量多消耗于挟运泥沙,结果随着坡长的增加,侵蚀反而减弱。在约为 22 m 的坡长范围内,出现一个侵蚀量急剧增加的区间,即侵蚀量临界坡长。

表 3 不同 I_{10} 条件下不同坡长的次平均侵蚀量

Table 3 Average erosion modules under different slope length and I_{10} conditions

I_{10} /($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	观测次数 Observation times	不同坡长的次暴雨平均侵蚀量/($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$) Average erosion module					
		2 m	5 m	12 m	16 m	22 m	33 m
< 0.25	3	0.20	0.40	0.70	0.75	2.75	3.15
0.25 ~ 0.50	8	2.23	4.26	21.81	25.33	88.30	19.09
0.50 ~ 0.75	2	11.6	24.85	61.6	102.8	457.65	424.05
> 0.75	6	263.92	1746.77	2511.73	3263.40	3778.90	3159.83

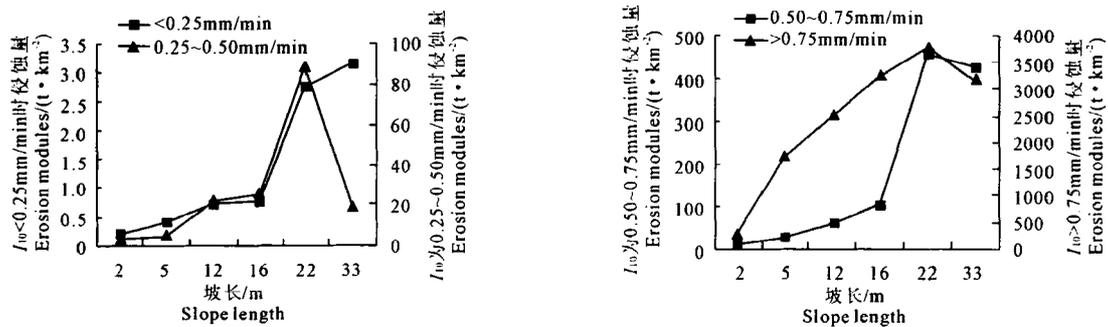


图 2 不同降雨强度下坡长与坡面侵蚀量的关系

Fig.2 Relationship between slope length and erosion module under different rainfall intensities

2.3 径流深、含沙量随坡长的变化

当 $I_{10} \leq 0.25 \text{ mm/min}$ 时,如图 3 可以看出,平均含沙量随着坡长的增大先逐渐增加后逐渐减小,径流深从 5~33 m 一直呈增加趋势,而图 2 中坡面侵蚀量随着坡长的增大而增加。这是因为侵蚀量随径流量增大而增大,但由于雨强较小时,坡面仅有溅蚀发生,入渗对径流产生的损失较小,坡面侵蚀量虽在增大,但其增加的速率没有径流深增大速率快,使平

均含沙量值反而减小。这也是因为在雨强较小时,坡面仅仅发生了溅蚀,由于土壤结皮现象的存在,使得入渗对径流深产生的损失较小。

被研究次降雨中 $I_{10} > 0.25 \text{ mm/min}$ 降雨占 84.2%。当 $I_{10} > 0.25 \text{ mm/min}$ 时,土壤侵蚀量随坡长的增大先增大后减小,16 场降雨事件中 6 个径流场的平均含沙量和径流深的关系见图 4。从 2~22 m 随着坡长增大平均含沙量均值是逐渐增大的,从

22 m 开始随着坡长增大,平均含沙量均值逐渐减小,平均含沙量均值的变化趋势同土壤侵蚀量变化相一致。在较短坡长 2 m 处径流深较大,之后随坡长加长径流减小,因为坡长增长会增加入渗对径流损失的时间,5~22 m 径流深波动变化较小,大于 22 m 坡长时,径流深大大减小,因为在雨强较大时,坡面侵蚀从溅蚀即将发展到沟蚀,雨滴增大了对土壤表层土的扰动,入渗增大。这证实了图 1 中坡长从 16~22 m 侵蚀量增量减小,是因为这一坡长范围内的变化径流深均值变化不大,由于径流能量引发的侵蚀产沙量变异小。

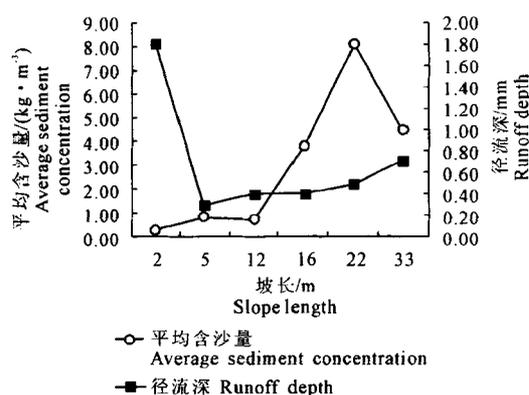


图3 平均含沙量、径流深随坡长的变化

Fig.3 The change of average sediment concentration and runoff depth with the slope length

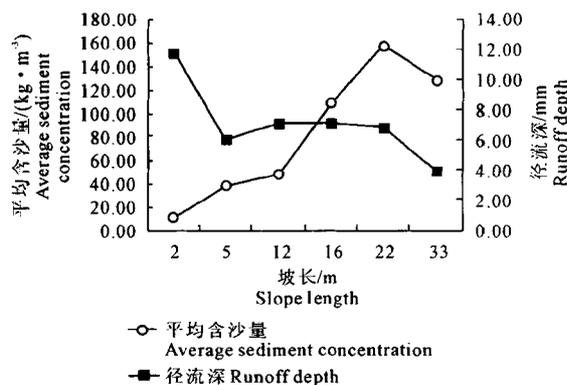


图4 平均含沙量、径流深随坡长的变化

Fig.4 The change of average sediment concentration and runoff depth with the slope length

可见,无论雨强大小,从 2~33 m 坡长的径流中平均含沙量变化同侵蚀量变化趋势一致,即侵蚀量与平均含沙量具有相同的趋势,在减少径流含沙量的同时,即可降低土壤侵蚀;径流深变化同侵蚀量增量变化趋势一致,而径流深变化可以表征降雨强度,当径流深达到最大值时,侵蚀量增量也趋于最大,那么最大侵蚀量值必定比最大径流深滞后出现,从而会形成高含沙水流。

2.4 坡耕地的植物篱防护

京津水源区土石山区,一般在坡地的坡脚、缓坡山麓等地势低缓的区域,多是农民开展农业粮食生产的地区,地块面积较小,土层较薄,水土流失多发。天然降雨难以被人类控制,然而通过对土壤侵蚀影响因素、含沙量和径流深与侵蚀量关系分析的基础上,人类可以通过改变坡面形态或地面粗糙度等,进而高效利用坡地。一个长的坡面被截断成若干段,水土流失可以大大减轻。通过对已有的坡耕地治理工程调查,建设水平梯田的投入远远高于植物篱措施,投入比例愈大,带来的维修费用也显著增大,已有的研究表明,水平梯田的投入是植物篱的 5~10 倍,且投入随着坡度的增加而增大。虽然植物篱的水土保持效益与梯田相比存在滞后性,但植物篱措施只需 3~4 a 就能赶上水平梯田^[14]。

坡耕地上建设植物篱,不受坡度的影响,可根据等高线建设等高植物篱。等高植物篱通过截短径流流线,降低径流流速,消减其冲刷力,同时拦蓄雨水,增加入渗,防止在 22 m 坡长范围内形成高含沙水流。等高植物篱的拦截作用可以使流失的土壤在植物篱基部淤积,使坡地的坡度逐渐降低,最终形成以植物篱为地埂的生物梯田^[15,16],既降低了工程投入,又减少坡面土壤流失,提高土地生产力。

3 结 论

1) 当 $I_{10} \leq 0.25$ mm/min 时,土壤侵蚀模数随着坡长增加而增大。北方土石山区下垫面土壤性质决定了雨强较小时,水流能量主要消耗于搬运雨滴击溅产生的泥沙,在流动中难以获取充足泥沙,不会形成高含沙水流,结果随着坡长的增加,径流逐渐增大,侵蚀量也逐渐增大。

2) 当 $I_{10} > 0.25$ mm/min 时,侵蚀量由大变小转折坡长为 22 m,坡面侵蚀以径流冲刷为主,径流在流动过程中可以获得充足泥沙。随着坡长增加,径流不断汇集,径流动能增加,泥沙不断进入水中,径流能量多消耗于挟运泥沙,结果随着坡长增加,侵蚀反而减弱。约在 22 m 坡长范围内,出现侵蚀量临界坡长。

3) 防治京津水源区坡耕地水土流失时,根据在 22 m 坡长范围内出现最大侵蚀量特征,可将一个长的坡面截断成若干段,每 22 m 左右采用等高植物篱等方法,截短径流流线,降低径流流速,消减其冲刷力,同时拦蓄雨水,使泥沙沉积,增加入渗,逐步形成以植物篱为地埂的生物梯田,既降低工程投入,又减少坡面土壤流失,提高土地生产力。

参考文献:

- [1] 陈家琦,王浩,杨小柳.水资源学[M].北京:科学出版社,2002:25-26.
- [2] 和继军,蔡强国,路炳军,等.密云水库上游石匣小流域水土流失综合治理措施研究[J].自然资源学报,2008,23(3):375-382.
- [3] 李永贵.北京市山区小流域治理及可持续发展示范研究[J].北京水利,2000,(3):9-10.
- [4] 李秀彬,马志尊,姚志友,等.北方土石山区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学,2008,6(1):9-15.
- [5] 刘纪根,雷廷武,潘英华,等.陡坡耕地施加PAM侵蚀产沙规律及临界坡长的试验研究[J].土壤学报,2003,40(4):504-510.
- [6] 胡续礼,姜小三,杨树江,等.豫西山区次降雨侵蚀力简化模型的建立[J].土壤通报,2007,38(1):137-140.
- [7] 陈晓安,蔡强国,张利超,等.黄土丘陵沟壑区不同雨强下坡长对坡面土壤侵蚀的影响[J].土壤通报,2011,42(6):721-725.
- [8] 孙亚平,张科利,唐克丽.坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究[J].水土保持学报,2001,15(2):17-24.
- [9] 陈永宗,景可.黄土高原现代侵蚀与治理[M].北京:科学出版社,1988.
- [10] 蔡强国.坡长在坡面侵蚀产沙过程中的作用[J].泥沙研究,1989,(4):84-91.
- [11] 罗来兴.甘肃华亭粮食沟坡侵蚀量的野外观测及其初步分析结果[M].地理学资料,1958,(2):111-118.
- [12] 郑粉莉,唐克丽,周佩华.坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J].土壤学报,1989,26(2):109-116.
- [13] 廖义善,蔡强国,程琴娟.黄土丘陵沟壑区坡面侵蚀产沙地形因子的临界条件[J].中国水土保持科学,2008,6(2):32-38.
- [14] 陈一兵,林超文,朱钟麟,等.经济植物篱种植模式及其生态经济效益研究[J].水土保持学报,2002,12(6):80-83.
- [15] 尹迪信,唐华彬,朱青,等.植物篱逐步梯化技术试验研究[J].水土保持学报,2001,15(2):84-87.
- [16] 李秀彬,彭业轩,姜臣,等.等高活篱技术提高坡地持续生产力探讨——以三峡库区为例[J].地理研究,1998,17(3):309-315.

Analysis of characteristics of soil erosion on slope land in the water source areas of Beijing and Tianjin

ZHAO Ting^{1,2}, XIE Yong-sheng^{1,3*}, JIANG Qing-long³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Slope land is a kind of important resource which can ensure food security and economic development. Data of Nanshan runoff plots in Chengde was used to study how slope length influenced soil erosion, sediment concentration and runoff depth in different length of plots. The results showed that both the slope length and rainfall intensity had influence on soil erosion. And the two factors changed with the slope length. When I_{10} was less than 0.25 mm/min, with the increase of slope length, soil erosion modulus decreased; when I_{10} was more than 0.25 mm/min, with the increase of slope length, soil erosion modulus increased at first and then decreased, and reached a maximum of 22 m. The change of mean runoff depth against slope length was identical to that of the volume of soil erosion; and the average runoff sediment was changed by rain intensity. So contour hedgerows or other measures can be used to reduce project investment and slope soil erosion and to improve land productivity.

Keywords: slope length; soil erosion; slope land; water source areas of Beijing and Tianjin