

文章编号: 1108 - 2786 - (2016) 1 - 46 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000099

燕山土石山区降雨和下垫面条件对坡面 侵蚀产沙的影响

许海超 李子君 林锦阔 姜爱霞*

(山东师范大学地理与环境学院 山东 济南 250014)

摘 要: 为了揭示燕山土石山区水土流失规律,基于坡面径流小区定位观测资料,对坡面尺度一定降雨和下垫面条件下土壤侵蚀产沙状况进行了分析,拟为区域水土流失防治提供参考。研究表明:平均降雨强度和产流降雨量是引起坡面土壤侵蚀的主要因素,降雨历时和坡面土壤侵蚀产沙量之间的相关性不明显;坡面径流小区的土壤侵蚀模数随着坡度的增加呈指数增大趋势,当坡度超过 20.42° 后坡面土壤侵蚀模数呈快速增加趋势;坡面径流小区的侵蚀模数随着坡长的增加呈先增大后减小的趋势,在坡长为 22.26 m 处达到最大值,说明该区域坡面侵蚀可能存在临界坡长,在 22 m 左右;坡面土壤侵蚀模数随着植被覆盖度的增加呈减小趋势,但是覆盖度为 60% 的草地和覆盖度为 90% 的草地的侵蚀模数差别不大,说明水土流失治理中存在着临界植被覆盖度;梯田、鱼鳞坑、水平阶等整地工程由于改变了下垫面条件,能够有效蓄水拦沙,减弱坡面土壤侵蚀。

关键词: 燕山土石山区;降雨因子;地形因子;植被覆盖;整地工程;坡面侵蚀

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

水土流失是导致土地资源退化乃至土壤肥力丧失、加剧洪涝灾害以及水资源供需矛盾等问题的主要原因,是制约人类生存和社会经济可持续发展的重大环境问题,也是各种生态问题的集中反映^[1]。根据第一次全国水利普查数据,我国水土流失面积达到 $294.91 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中水力侵蚀面积达到 $129.32 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[2],每年流失土壤约 $50 \times 10^8 \text{ t}$,损失 N、P、K 元素约 $4\,000 \times 10^4 \text{ t}$ ^[3]。水土流失已成为我国最为严重的生态和环境问题之一。

坡面作为构成山地、丘陵和破碎高原最基本的景观单元,是研究水土流失规律、反映土壤侵蚀强度的主要形态学参数^[4]。深入探讨坡面土壤侵蚀产沙规律及其影响因素,对于有效防治区域水土流失具有重要的科学意义。相关研究表明,影响坡面土

壤侵蚀产沙的因素众多,主要有降雨、坡面地形、坡面径流、植被、整地方式、土壤性质等^[5-10],而且它们之间的关系错综复杂,致使不同的自然地理区域坡面侵蚀产沙规律有所差异。只有根据特定区域的实际情况,对坡面土壤侵蚀影响因素进行综合分析研究,才能探索出适合当地的水土流失防治理论和方法。

燕山土石山区是北方土石山区的一部分,是中度以上土壤侵蚀的主要分布区之一^[11]。该区是潮河、白河和滦河的发源地以及重要水源涵养区,也是京津地区重要的生态安全屏障和水源保护区,还是全国水土保持规划国家级水土流失重点预防区。虽然关于北方土石山区水土流失的研究有很多^[7,11],但是针对燕山土石山区坡面侵蚀产沙的研究非常

收稿日期(Received date): 2015 - 08 - 08; 改回日期(Accepted): 2015 - 09 - 09。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(41101079)。[Supported by the National Natural Science Foundation of China(41101079).]

作者简介(Biography): 许海超(1990 -),男,山东省郯城人,硕士研究生,主要从事土地利用变化方面的研究。[Xu Haichao(1990 -), male, born in Tancheng, Shandong province, master candidate, research in land use change.] E-mail: sdxc@139.com

* 通信作者(Corresponding author): 姜爱霞(1961 -),女,山东省文登市人,高级实验师,主要从事土壤侵蚀试验方面的研究。[Jiang Aixia(1961 -), female, born in Wendeng, Shandong province, senior engineer, research in soil erosion test.] E-mail: jaixia79@sina.com

少^[6,12]。基于燕山土石山区坡面径流小区观测数据,探讨该区坡面土壤侵蚀产沙特征及其影响因素,对于防治水土流失、提高周边地区的生态安全以及促进区域社会经济可持续发展具有重要的理论意义和应用价值。

1 研究区概况

燕山土石山区位于 $E115^{\circ}40' \sim 119^{\circ}50'$ 、 $N39^{\circ}45' \sim 41^{\circ}03'$,广义上指坝上高原以南,河北平原以北,白河谷地以东,山海关以西的山地,包括承德、唐山、张家口、秦皇岛等5市36个县(市、区),总面积 $7.97 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1),地势西北高,东南低。地貌类型包括中山、低山、丘陵和谷地,海拔 $600 \sim 1500 \text{ m}$ 。山体岩性复杂,以花岗岩、片麻岩为主,岩体风化较为严重,地表破碎,土石混杂。该区处于暖温带大陆性季风气候区,年均温 $6 \sim 10^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 $450 \sim 550 \text{ mm}$,集中于6—9月,占全年降水量的 $75\% \sim 85\%$ 。土壤类型以棕壤和褐土分布最广,约占全区总面积的 70% 。燕山地带性植被为落叶阔叶林(以栎类为主),并混生暖性针叶油松林。海拔 700 m 以下为落叶阔叶林,树种有蒙古栎、辽东栎、槲栎、栓皮栎、槲树等; $700 \sim 1500 \text{ m}$ 为针阔叶混交林,树种有臭冷杉、白桦、风桦等; $1500 \sim 2000 \text{ m}$ 为针叶林,树种有华北落叶松、青松等,但以次生林为主;山沟及山前冲积台地上适于果树种植,盛产板栗、核桃、梨、山楂、葡萄、苹果、沙果、杏等干鲜果^[13]。

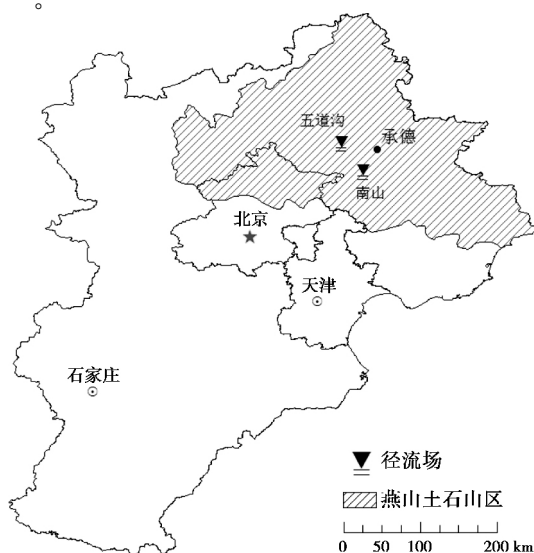


图1 燕山土石山区地理位置

Fig.1 Geographic location of Yanshan rocky mountain area

2 数据与方法

为了揭示燕山土石山区水土流失发生、发展的规律,探讨山区坡面土壤侵蚀量和山区小流域产沙量的定量计算方法,河北省承德市水土保持科学研究所于1981—1993年在承德市布设了南山径流试验场和五道沟径流试验场(图1),进行了比较系统规范的水土流失规律试验研究,为水土保持研究提供了重要的科学数据。

本文根据河北省承德市水土保持科学研究所于1998年前后,对上述两个径流试验场内坡面径流小区的径流泥沙实测数据进行整编后的资料^[14],在对各径流小区布设状况、观测内容及观测时间等进行分析的基础上,选取不同的径流场中不同类别的坡面径流小区作为研究对象,探讨坡面土壤侵蚀产沙特征与降雨因子、地形因子、植被、整地方式等的关系。选取了南山径流场中4组16个径流小区,按坡度、坡长、不同植被覆盖度和不同整地方式进行设置;选取了五道沟径流场中1组2个径流小区,按不同整地方式进行设置(表1)。

在径流场的附近,利用自计雨量计和普通雨量桶收集次降雨数据,包括次降雨量、持续时间和降雨强度等。通过对整编资料进行统计汇总,整理得到南山径流场和五道沟径流场研究时段内所有小区每年产流降雨的总降雨次数、年均产流降雨量和平均降雨强度数据(表2)。

运用 Excel2003 和 SPSS20.0 统计软件进行数据的整理以及统计分析,应用 Pearson 相关系数在 0.01 和 0.05 的显著水平上进行显著性检验,分析总结坡面土壤侵蚀产沙规律。

3 结果与分析

3.1 降雨因子对坡面土壤侵蚀产沙的影响

降雨是导致土壤侵蚀的主要动力因素,研究降雨特征与坡面侵蚀之间的关系,对定量估测土壤侵蚀量、制定科学的水土保持规划具有积极意义^[15]。大量研究表明,次降雨的降雨量、降雨强度、降雨历时等都会对坡面侵蚀产生影响^[5,16]。降雨侵蚀力主要取决于降雨量和降雨强度的大小。研究普遍认为,在一定范围内时,降雨量越大,产沙量就越大;雨强越大,降雨历时越短,产沙量就越大^[16]。

表 1 径流小区基本特征

Tab. 1 Characteristics of study runoff plots

| 小区号 Runoff plots number | 坡度 Slope gradient/° | 坡长 Slope length/m | 坡宽 Slope width/m | 观测年份 Observation Year | 观测类别 Observation category | 地表情况 Surface condition | 径流场名称 Runoff field name | 建立时间 Setup Time |
|-------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| SG 1 | 5.13 | 10.03 | 4.96 | 1987—1993 | 坡度 | 人工裸地 | 南山 | 1987 |
| SG 2 | 11.00 | 10.16 | 5.00 | 1987—1993 | 坡度 | 人工裸地 | 南山 | 1987 |
| SG 3 | 16.33 | 10.34 | 4.97 | 1987—1993 | 坡度 | 人工裸地 | 南山 | 1987 |
| SG 4 | 20.42 | 10.66 | 5.00 | 1987—1993 | 坡度 | 人工裸地 | 南山 | 1987 |
| SG 5 | 24.13 | 10.98 | 5.00 | 1987—1993 | 坡度 | 人工裸地 | 南山 | 1987 |
| SG 6 | 28.42 | 11.36 | 5.00 | 1987—1993 | 坡度 | 人工裸地 | 南山 | 1987 |
| SL 1 | 22.97 | 2.18 | 4.98 | 1987—1991 | 坡长 | 人工裸地 | 南山 | 1986 |
| SL 2 | 23.30 | 11.89 | 4.99 | 1987—1991 | 坡长 | 人工裸地 | 南山 | 1986 |
| SL 3 | 24.47 | 22.26 | 4.94 | 1987—1991 | 坡长 | 人工裸地 | 南山 | 1986 |
| SL 4 | 24.28 | 33.19 | 4.96 | 1987—1991 | 坡长 | 人工裸地 | 南山 | 1986 |
| VG 1 | 28.92 | 11.18 | 5.02 | 1988—1993 | 植被 | 野草 覆盖度 30% | 南山 | 1987 |
| VG 2 | 27.60 | 11.2 | 4.92 | 1988—1993 | 植被 | 野草 覆盖度 60% | 南山 | 1987 |
| VG 3 | 26.13 | 11.22 | 4.95 | 1988—1993 | 植被 | 野草 覆盖度 90% | 南山 | 1987 |
| LE1 | 16.28 | 10.64 | 4.96 | 1988—1990 | 整地工程 | 天然荒坡,鱼鳞坑 1 个/m ² 植被覆盖度 70% | 南山 | 1986 |
| LE2 | 18.18 | 10.66 | 4.96 | 1988—1990 | 整地工程 | 天然荒坡,水平阶,阶宽 0.6 m,阶距 1.2 m 植被覆盖度 70% | 南山 | 1986 |
| LE 3 | 18.38 | 10.66 | 4.98 | 1988—1990 | 整地工程 | 天然荒坡,对照,植被覆盖度 70% | 南山 | 1986 |
| LC 1 | 29.18 | 19.8 | 6.00 | 1981—1986 | 整地工程 | 坡耕地 种植玉米,长势弱,覆盖度 40% | 五道沟 | 1979 |
| LC 2 | 29.18 | 19.8 | 6.00 | 1981—1986 | 整地工程 | 梯田 种植玉米,长势弱,覆盖度 40% | 五道沟 | 1979 |

表 2 径流场产流降雨基本情况

Tab. 2 Rainfall excess data of runoff fields

| 径流场名称 Runoff field name | 年份 Year | 降雨次数 Rainfall times | 降雨量 Rainfall/mm | 平均降雨强度 Average rainfall intensity/(mm/h) |
|----------------------------|------------|------------------------|--------------------|--|
| 南山 | 1987 | 115 | 300.90 | 6.25 |
| | 1988 | 202 | 285.10 | 10.68 |
| | 1989 | 141 | 243.10 | 9.98 |
| | 1990 | 270 | 344.00 | 22.46 |
| | 1991 | 199 | 415.50 | 9.11 |
| | 1992 | 155 | 300.10 | 12.10 |
| | 1993 | 153 | 418.30 | 10.61 |
| 五道沟 | 1983 | 6 | 222.60 | 12.23 |
| | 1984 | 9 | 155.20 | 11.10 |
| | 1985 | 13 | 392.30 | 12.02 |
| | 1986 | 13 | 192.20 | 18.14 |

表 3 不同降雨因子与坡面土壤侵蚀产沙量的相关性
Tab. 3 Correlation between different rainfall factors and eroded sediment yields

| 降雨因子 Rainfall factors | | 降雨历时 Rainfall duration/min | 平均降雨强度 Average rainfall intensity/(mm/h) | 产流降雨量 Rainfall excess/mm |
|------------------------------------|--------------|-------------------------------|--|-----------------------------|
| 侵蚀产沙量/kg Eroded sediment yields | Pearson 相关系数 | 0.052 | 0.371 ** | 0.360 ** |
| | Sig(双尾) | 0.580 | 0 | 0 |

注: 样本数 N = 114; * * 表示在 0.01 水平上显著。

为了探讨各降雨因子对燕山土石山区坡面土壤侵蚀产沙的影响,选取了次降雨和侵蚀产沙观测数据较多的南山径流场 SG4 径流小区,对 1987—1993 年的 114 次降雨特征数据(降雨历时、平均降雨强度、产流降雨量)和侵蚀产沙数据进行了相关分析,其中产流降雨量指产流的单场降雨从降雨开始后计算至降雨结束时的总降雨量,结果如表 3。

由表 3 可见,降雨历时和侵蚀产沙量之间虽呈正相关,但相关性不显著;侵蚀产沙量与平均降雨强度、产流降雨量呈正相关,并且在置信度为 0.01 水平上显著。这表明,平均降雨强度和产流降雨量是引起坡面土壤侵蚀的主要因素。如果降雨未能使坡面形成有效径流,坡面土壤侵蚀不会发生。降雨因子首先通过溅蚀破坏坡面土壤结构,使土壤颗粒搬离原来位置,发生溅蚀;其次降雨会影响坡面径流速度和径流总量的大小。坡面产流后,坡面径流量随着产流降雨量的增大而增加,坡面侵蚀量也随之不断增多。随着雨强的增大,溅蚀强度增加,坡面径流加大,径流冲刷增强,侵蚀产沙量加大。所以,进行坡面水土流失防治时,一方面要设法减少降雨对地面的直接溅蚀,另一方面要设法减少坡面径流量,并采取有效措施减弱坡面径流速度。

3.2 下垫面条件对坡面土壤侵蚀产沙的影响

下垫面条件决定着地面物质与能量的形成和再分配,是影响水土流失的重要因素之一。地形因子尤其是坡度和坡长,通过对坡面产流能力和坡面颗粒稳定程度的影响而影响坡面土壤侵蚀的发生和发展^[17-18];植被通过对降雨进行拦截、增加入渗和减少地表径流量等作用对坡面土壤侵蚀产生影响^[19];整地工程是影响和控制土壤侵蚀产生强度和频率的重要因素,良好的整地方式能够有效防止水土流失^[8-9]。

3.2.1 坡度对侵蚀产沙的影响

坡度是影响坡面土壤侵蚀产沙的主要因子。坡度的变化影响坡面的受雨面积及受雨量,从而影响

坡面径流量及其冲刷能力。随着坡度的增大,坡面入渗量随之减少,产流量增加^[20]。坡度越陡,水流动越快,动力也越大,挟沙能力增大,产生的土壤侵蚀量也就越多。有些研究认为在一定坡度范围内土壤侵蚀量随坡度的增加而增大,但当到达某一坡度后,土壤侵蚀量又随坡度的增加而减小^[18]。因此,坡面土壤侵蚀产沙存在一个临界坡度。但是在不同的地区、不同的降雨条件下,临界坡度值不同^[21-22]。许多野外观测和室内外实验发现,临界坡度一般在 22°~26°之间^[20],部分区域不同降雨条件下的临界坡度可能存在差异^[23]。

燕山土石山区坡度较大,沟壑密集,为土壤侵蚀提供了条件^[12]。为了进一步探讨该区坡度对土壤侵蚀产沙的影响,选取南山径流场 6 个不同坡度的径流小区(SG1~SG6)1988—1991 年的观测数据分析坡面年侵蚀模数与坡度的关系(图 2)。

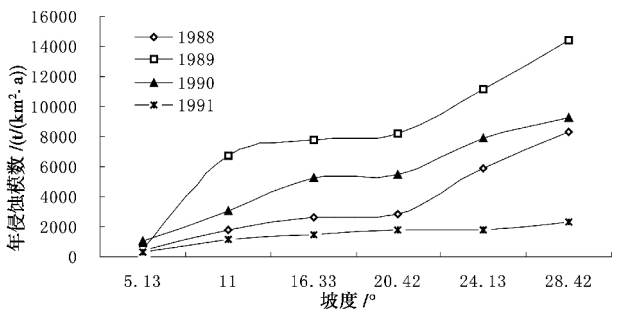


图 2 不同坡度小区的年侵蚀模数

Fig. 2 Annual erosion modulus of plots with different slope degree

由图 2 可见,当坡度小于 5°时,坡面土壤侵蚀模数较小;随着坡度的增加,土壤侵蚀模数也逐渐增大;当坡度超过 20.42°后,随着坡度增加,坡面土壤侵蚀模数有迅速增大的趋势。对 1988—1991 年各年土壤侵蚀模数与坡度的关系进行曲线拟合,结果表明坡面土壤侵蚀模数随坡度增大呈现指数型增大(表 4)。

表 4 年侵蚀模数与坡度的关系

Tab. 4 Relationships between annual erosion modulus and slope gradient

| 年份 Year | 回归方程 Regression equation | 决定系数 R^2 Coefficient R^2 |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1988 | $y = 400.27e^{0.5261x}$ | 0.881 6 |
| 1989 | $y = 959.67e^{0.511x}$ | 0.660 3 |
| 1990 | $y = 1125.2e^{0.3842x}$ | 0.862 1 |
| 1991 | $y = 428.06e^{0.3152x}$ | 0.744 6 |

注: 样本数 $N = 6$, x 为坡度, y 为年侵蚀模数。

上述研究结果表明,在地表无任何植被覆盖,天然降雨情况下,坡面径流小区的年侵蚀模数随坡面坡度的增大(在 $5.13^\circ \sim 28.42^\circ$)呈指数增大的趋势。坡度较小时,坡面径流入渗较多,径流流速较慢,因此坡面土壤侵蚀模数相对较小;随着坡度增加,坡面土层不稳定性增强,同时坡面产流量大,水流速度加快,水流的侵蚀能力、挟沙能力相应增强,导致坡面土壤侵蚀模数迅速增大。由于本研究中坡度范围仅限于 $5.13^\circ \sim 28.42^\circ$,无法探知坡度继续增大后坡面土壤侵蚀模数的变化趋势,所以只能简单认为在研究的坡度范围内,坡面土壤侵蚀模数随着坡度的增大不断增大。

3.2.2 坡长对侵蚀产沙的影响

坡长影响汇流过程以及坡面径流量的多少,从而对土壤侵蚀产沙量产生影响。关于坡长对坡面土壤侵蚀影响的研究较多,但研究结论各异。有些研究认为,坡面土壤侵蚀量的大小与坡长成正比^[24];而有些研究认为,坡长的增加使水流的能量多消耗于搬运泥沙,结果导致坡面土壤侵蚀量随着坡长的增加而减小^[25];还有研究认为,坡面土壤侵蚀产沙量沿坡长先是增加,超过一定坡长后逐渐减少^[26],即存在着临界坡长。

选取南山径流场中 4 个不同坡长的径流小区 (SL1 ~ SL4) 1987—1991 年的观测数据,分析坡面年侵蚀模数与坡长的关系,并绘制成图 3。

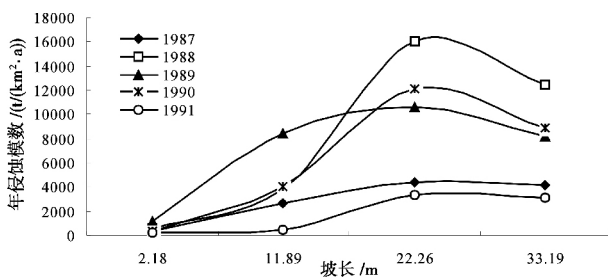


图 3 不同坡长小区的年侵蚀模数

Fig. 3 Annual erosion modulus of plots with different slope length

由图 3 可见,在坡度相差不大,地表无任何植被覆盖,天然降雨情况下,坡面径流小区的年侵蚀模数随着坡长的增加呈先增大后减小的趋势。坡长为 2.18 m 时,坡面土壤侵蚀模数很小;随着坡长增加,坡面土壤侵蚀模数逐渐增大;坡长超过 22.26 m 之后,坡面土壤侵蚀模数开始减小,说明该区域坡面侵蚀存在临界坡长,在 22 m 左右。在坡度大致相同的条件下,坡长较小时,径流小区的集水面积也小,坡面径流量小,侵蚀力也小。随着坡长的增加,径流小区的受雨面积也随着增加,再加上燕山土石山区土层薄,以超渗产流为主,因此坡面径流量及其所具有的能量随着坡长的增加不断增加,导致坡面土壤侵蚀模数也呈增大趋势。但是随着坡长增加,坡面水流流路增长,水流所受的阻力增加,流速减慢,入渗量增加,所以坡面土壤侵蚀模数超过临界坡长后会逐渐减小。

3.2.3 植被覆盖对侵蚀产沙的影响

植被是影响坡面土壤侵蚀的重要因子之一。大量研究表明,植被通过对降雨进行拦截、增加入渗和减少地表径流量等作用对坡面土壤侵蚀产生影响^[27-28]。相关研究表明,植被覆盖度越大,到达地表的雨量就越少,同时降水的动能被减弱,有利于雨水入渗,降低地表径流的侵蚀产沙能力^[28]。

选取南山径流场中 3 个不同草地覆盖度的径流小区 (VG1、VG2 和 VG3) 1988—1993 年的观测数据,分析植被覆盖度对坡面土壤侵蚀模数的影响,结果如图 4 所示。

图 4 的研究结果表明,坡面土壤侵蚀模数随着植被覆盖度增加而减小,但是覆盖度为 60% 的草地和覆盖度为 90% 的草地的侵蚀模数差别不大。其中,1990 年覆盖度为 30% 的草地和覆盖度为 60% 的草地侵蚀模数差别最大,1993 年的次之,这是由于 1990 年的降雨强度和 1993 年的降雨量比其他年

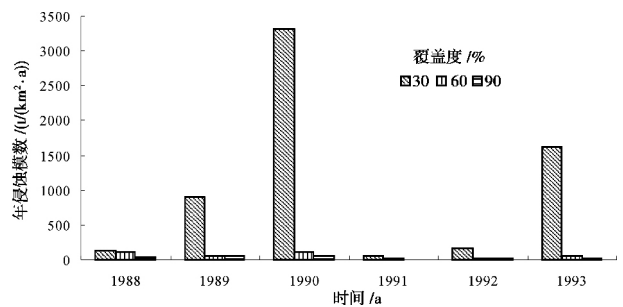


图 4 不同覆盖度草地的年侵蚀模数

Fig. 4 Annual erosion modulus of grassland with different vegetation coverage

份明显偏大,而降雨量和降雨强度又是引起坡面土壤侵蚀的两个重要因素。这说明植被通过对降雨进行拦截、增加入渗和减少地表径流量等作用可以有效保护坡面,增加植被覆盖度亦能有效减少降雨对坡面土壤的侵蚀,但由于临界植被覆盖度的存在,当植被覆盖度超过该值后,侵蚀模数减小并不明显。因此,进行坡面水土流失防治时,可适当增加坡面的植被覆盖度,并控制在临界植被覆盖度左右,既减少了水土保持成本,又能取得最好的水土流失治理效果。

3.2.4 整地工程对侵蚀产沙的影响

整地工程是影响和控制土壤侵蚀产生强度和频率的重要因素,良好的整地方式能够防止水土流失^[8-9]。坡耕地是水土流失的主要策源地。坡改梯后,由于地表径流量大量转为壤中流和地下水,土壤侵蚀产沙量大幅度降低^[29]。鱼鳞坑、水平阶等整地工程措施通过改变一定范围内的小地形,能减缓径流并蓄水拦沙,对于减少土壤侵蚀具有重要的作用^[30]。

选取五道沟径流场中的两个农地小区(LC1、LC2),其中一个为坡耕地小区,另一个为梯田小区。对两个小区1983—1986年的土壤侵蚀模数进行对比分析,结果显示梯田的侵蚀模数极小,远远低于坡耕地(图5)。

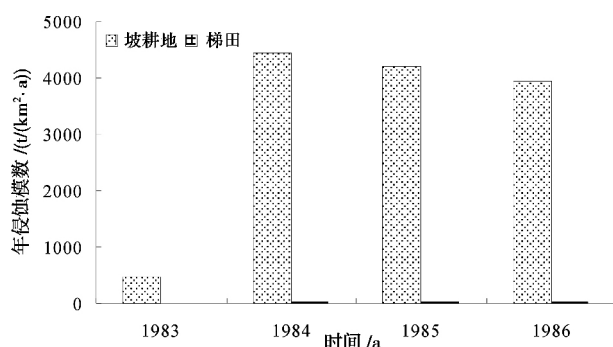


图5 梯田和坡耕地的年侵蚀模数

Fig.5 Annual erosion modulus of terrace and slope farmland

鱼鳞坑和水平阶是坡面土壤侵蚀防治中常用的整地工程措施。选取南山径流场中两个整地工程措施小区(LE1、LE2),LE1采取的工程措施为鱼鳞坑,LE2采取的工程措施是水平阶。另外选取LE3(天然荒坡小区)作为对照。对三个径流小区1988—1990年的坡面土壤侵蚀产沙数据进行对比分析,发现在相同的植被覆盖度和相似的地形条件下,采取

鱼鳞坑、水平阶工程措施的坡面径流小区的土壤侵蚀模数远远低于天然荒坡地(图6)。

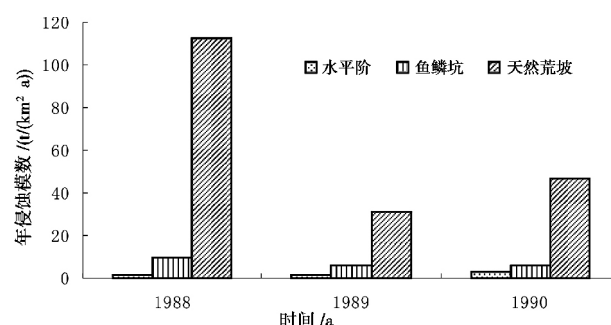


图6 不同整地工程措施小区和天然荒坡的年侵蚀模数

Fig.6 Annual erosion modulus of plots under different land preparation measures (level bench and fish-scale pits) and waste slope

综上所述,梯田、鱼鳞坑、水平阶等整地工程由于改变了下垫面条件,能够有效蓄水拦沙,减弱坡面土壤侵蚀,在控制水土流失方面具有显著作用。

4 结论

通过对燕山土石山区5组18个坡面径流小区1981—1993年不同年份坡面土壤侵蚀程度的变化与降雨因子(产流降雨量、平均降雨强度、降雨历时)、地形因子(坡度、坡长)、植被因子(植被覆盖度)、整地工程(梯田、鱼鳞坑、水平阶)的关系,得出如下结论:

1) 降雨历时和坡面土壤侵蚀产沙量之间的相关性不明显;侵蚀量与平均降雨强度和产流降雨量呈正相关且在0.01水平上显著。这表明在燕山土石山区,平均降雨强度和产流降雨量是引起坡面土壤侵蚀的主要因素。

2) 坡面径流小区的土壤侵蚀模数随着坡度的增加呈指数增大趋势,当坡度超过20.42°,坡面土壤侵蚀量呈快速增大趋势;坡面径流小区的年侵蚀模数随着坡长的增加呈先增大后减小的趋势,在坡长为22.26 m处达到最大值,说明该区域坡面侵蚀存在临界坡长,在22 m左右。

3) 坡面土壤侵蚀模数随着植被覆盖度的增加呈减小趋势,但是覆盖度为60%的草地和覆盖度为90%的草地的侵蚀模数差别不大,说明水土流失治理中存在着临界植被覆盖度。

4) 梯田、鱼鳞坑、水平阶等整地工程由于改变了下垫面条件,能够有效蓄水拦沙,减弱坡面土壤侵

蚀。

然而,坡面土壤侵蚀是地形、植被、降雨、人类活动等因子综合作用的结果。由于野外试验的局限性,对于不同降雨强度、不同土壤特性等因子和坡面土壤侵蚀的关系还有待结合室内试验进一步研究探讨,以期更好地揭示燕山土石山区的土壤侵蚀规律。

参考文献(References)

- [1] 李锐. 中国主要水蚀区土壤侵蚀过程与调控研究[J]. 水土保持通报 2011, 31(5): 1-6 [Li Rui. Research into soil erosion on processes and control in major water erosion regions of China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(5): 1-6]
- [2] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持 2013, 4(10): 2-3+11 [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. The bulletin of the first national water resources survey and the soil and water conservation situation [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013, 4(10): 2-3+11]
- [3] 杨鹏. 防治土壤退化[J]. 国土与自然资源研究 2002, 4(4): 32-33 [Yang Peng. Prevent and control soil degeneration [J] Territory & Natural Resources Study, 2002, 4(4): 32-33]
- [4] 杨明义, 田均良. 坡面侵蚀过程定量研究进展[J]. 地球科学进展 2000, 15(6): 649-653 [Yang Mingyi, Tian Junliang. Research progress in erosion on hillslope quantitatively [J]. Advance In Earth Sciences, 2000, 15(6): 649-653]
- [5] 邱学礼, 段宗颜, 胡万里, 等. 降水特征与农作处理对坡耕地水土流失的动态研究[J]. 水土保持学报 2010, 24(1): 82-85 [Qiu Xueli, Yan Duanzong, Hu Wanli, et al. Dynamic study on soil and water loss in different rainfall pattern and farming measures [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 82-85]
- [6] 李子君, 于兴修. 冀北土石山区坡面尺度径流特征及其影响因素[J]. 农业工程学报 2012, 28(17): 109-116 [Li Zijun, Yu Xingxiu. Characteristics of surface runoff and its influencing factors on slope scale in rocky mountain area of northern Hebei province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(17): 109-116]
- [7] 丛月, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区草本植被覆盖度对降雨减蚀的影响[J]. 水土保持学报 2013, 27(05): 59-62+67 [Cong Yue, Zhang Hongjiang, Cheng Hua, et al. Effects of herbaceous plant coverage rate on rainfall in Rocky mountain area of northern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(05): 59-62+67]
- [8] 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 [Jiang Na, Shao Mingan. Characteristics of soil and water loss of different slope land uses in small watershed on the loess plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(6): 36-41]
- [9] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报 2002, 57(6): 717-722 [Fu Bojie, Qiu Yang, Wang Jun, et al. Effect simulations of land use change on the runoff and erosion for a gully catchment of the loess plateau, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(6): 717-722]
- [10] 张永涛, 杨吉华, 夏江宝, 等. 石质山地不同条件的土壤入渗特性研究[J]. 水土保持学报 2002, 16(4): 123-126 [Zhang Yongtao, Yang Jihua, Xia Jiangbao, et al. Study on soil promotion character under different condition in stone hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(4): 123-126]
- [11] 李秀彬, 马志尊, 姚孝友, 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 [Li Xiubin, Ma Zhizun, Yao Xiaoyou, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for rocky mountain areas in the northern China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1): 9-15]
- [12] 钱金平, 魏立涛, 冯忠江. 河北省山区水土流失现状及其成因分析[J]. 水土保持研究 2003, 10(4): 131-133 [Qian Jinping, Wei Litao, Feng Zhongjiang. Analysis of present situation and causes of soil and ater loss in mountain area of Hebei Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003, 10(4): 131-133]
- [13] 中国大百科全书总编辑委员会,《中国地理》编辑委员会. 中国大百科全书·中国地理[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1993. [General editorial board of the Encyclopedia of China, Chinese Geography Editorial Board. China Encyclopedia - Chinese Geography [M]. Beijing: Encyclopedia of China Press, 1993.]
- [14] 河北省承德市水土保持科学研究所. 燕山土石山区水土流失规律研究-径流泥沙测验资料(1980年-1995年) [R]. 承德: 承德市水土保持科学研究所, 1998. [Research Institute of soil and water conservation in Chengde City, Hebei Province. the law of water and soil loss in Yanshan rocky mountainous area-runoff and sediment test data(1980-1995) [R]. Chengde: Research Institute of soil and water conservation in Chengde City, 1988.]
- [15] 章文波, 谢云, 刘宝元. 中国降雨侵蚀力空间变化特征[J]. 山地学报 2003, 21(1): 33-40 [Zhang Wenbo, Xie Yun, Liu Baoyuan. Spatial distribution of rainfall erosivity in China [J]. Mountain Research, 2003, 21(1): 33-40]
- [16] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报 2011, 25(3): 40-43 [Zhang Huiru, Zheng Fenli. Effect of slope gradients on erosion from a red soil hillslope under different rainfall intensity [J]. Journal of Soil and water Conservation, 2011, 25(3): 40-43]
- [17] 申震洲, 姚文芝, 李勉, 等. 不同下垫面对坡面侵蚀特征的影响[J]. 水土保持研究 2010, 17(01): 6-9 [Shen Zhenzhou, Yao Wenyi, Li Mian, et al. Study on soil erosion sediment under different underlying horizon [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(01): 6-9]
- [18] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报 2015, 46(4): 147-154+182 [Li Guifang, Zheng Fenli, Lu Jia, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hillslope [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 147-154+182]
- [19] 张清春, 刘宝元, 翟刚. 植被与水土流失研究综述[J]. 水土保持研究 2002, 9(4): 96-101 [Zhang Qingchun, Liu Baoyuan, Zhai Gang. Review on Relationship between vegetation and soil and water loss [J]. Research of Soil and Water Conservation. 2002, 9(4): 96-101]
- [20] 胡世雄, 靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. 地理学报 1999, 54(4): 347-356 [Hu Shixiong, Jin Changxing. Theoretical analysis and experimental study on the crit-

- ical slope of erosion [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(4): 347–356]
- [21] 黄志霖,傅伯杰,陈利顶. 黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异[J]. *中国水土保持科学* 2005, 3(4): 11–18+26 [Huang Zhilin, Fu Bojie, Chen Lixiang. Differentiation of soil erosion by different slope, land use pattern and variation of precipitation in loess hilly region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(4): 11–18+26]
- [22] 刘小勇,吴普特. 硬地面侵蚀产沙模拟试验研究[J]. *水土保持学报* 2000, 14(1): 33–37 [Liu Xiaoyong, Wu Pute. Simulated Study on Erosion and sediment yield on hard ground surface [J]. *Journal of Soil and water Conservation*, 14(1): 33–37]
- [23] 陈晓安,蔡强国,张利超,等. 黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀的临界坡度[J]. *山地学报* 2010, 28(4): 415–421 [Chen Xiaonan, Cai Qiangguo, Zhang Lichao, et al. Research on critical slope of soil erosion in a hilly loess region on the loess plateau [J]. *Mountain Research*, 2010, 28(4): 415–421]
- [24] 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(3): 721–725 [Chen Xiaonan, Cai Qiangguo, Zhang Lichao, et al. Impact of slope length on soil erosion under different rainfall intensity in a hilly loess region on the loess plateau [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 721–725]
- [25] 孔亚平,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): 17–20+24 [Kong Yaping, Zhang Keli, Tang Keli. Impacts of slope length on soil erosion process under simulated rainfall [J]. *Journal of Soil and water Conservation*, 2001, 15(2): 17–20+24]
- [26] 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(4): 84–91 [Cai Qiangguo. Role of slope length in the process of slope erosion [J]. *Sediment Research*, 1989, 4(4): 84–91]
- [27] 余新晓,张晓明,武思宏,等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. *山地学报* 2006, 24(1): 19–26 [Yu Xinxiao, Zhang Xiaoming, Wu Sihong, et al. The effect of vegetation and precipitation upon runoff and sediment production in sloping lands of Loess area [J]. *Mountain Research*, 2006, 24(1): 19–26]
- [28] 罗伟祥,白立强,宋西德,等. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. *水土保持学报* 1990, 4(1): 30–35 [Luo Weixiang, Bai Liqiang, Song Xide, et al. Runoff and scouring amount in forest and grass land with different cover rate [J]. *Journal of Soil and water Conservation*, 1990, 4(1): 30–35]
- [29] 刘晓燕,王富贵,杨胜天,等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J]. *水利学报* 2014, 45(7): 793–800 [Liu Xiaoyan, Wang Fugui, Yang Sheng, etc. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly–gully region in the loess plateau [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(7): 793–800]
- [30] 袁希平,雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. *农业工程学报* 2004, 20(2): 296–300 [Yuan Xiping, Lei Tingwu. Soil and water conservation measures and their benefits in runoff and sediment reductions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(2): 296–300]

Influences of Rainfall and Underlying Surface Conditions on Soil Erosion and Sediment Yield in Yanshan Rocky Mountain Area

XU Haichao, LI Zijun, LIN Jinkuo, JIANG Aixia

(School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: Based on the observation data of runoff plots, soil erosion and sediment yield characteristics and its influencing factors on slope scale were analyzed in order to reveal the law of water and soil loss in Yanshan rocky mountain area. This research can provide a reference for regional soil erosion control. The results showed that the average rainfall intensity and rainfall excess for runoff yield were the main factors inducing slope erosion, and the correlation between the rainfall duration and eroded sediment yield was not obvious. The erosion modulus of the runoff plots show exponential growth with the increasing slope gradients, and the erosion modulus showed a rapid increasing trend when the slope gradient was over 20.42° respectively. The critical slope length is about 22 m, when the slope length is less than 22.26 m, the soil erosion modulus increases with the increase of slope length, but after the slope length exceeds 22.26 m, the erosion modulus decreases gradually. The erosion modulus decreased as vegetation coverage increased. However, there was little difference between the erosion modulus of the grassland runoff plots with vegetation cover of 60% and 90%, which indicated that there was a critical vegetation coverage in soil loss control. Land preparation measures such as terrace, fish-scale pit and level bench can effectively store water and retain sediment as well as reduce slope erosion by changing underlying surfaces.

Key word: Yanshan rocky mountain area; rainfall factors; topographic factors; vegetation cover; land preparation measure; slope erosion