

# 降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式 径流小区产流产沙的影响

林锦阔, 李子君, 许海超, 姜爱霞

(山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250014)

**摘要:** [目的] 研究降雨量、降雨强度、降雨历时等降雨因子对沂蒙山区小流域不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响, 为该区水土流失防治、水土保持规划、生态建设等提供参考。[方法] 对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区(自然荒坡和荞麦、野生牧草和花生)两两对照并且进行连续 3 a 的定位观测, 对观测数据进行统计分析和显著性检验。[结果] (1) 降雨量与各径流小区产流量的相关性显著( $p < 0.01$ ), 与荞麦小区和花生小区产沙量的相关性显著( $p < 0.01$ ), 与自然荒坡小区和野生牧草小区的产沙量相关性较差。(2) 平均降雨强度( $I$ )与各径流小区的产流量和产沙量的相关性均不显著。10 min 最大降雨强度( $I_{10}$ )和 30 min 最大降雨强度( $I_{30}$ )与各径流小区产流量以及荞麦小区、花生小区的产沙量均具有较好的相关性, 其中 30 min 最大降雨强度( $I_{30}$ )的相关性最好。(3) 降雨历时与荞麦径流小区的产流量和产沙量相关性显著( $p < 0.01$ ), 与其他径流小区的产流量和产沙量虽皆呈正相关但相关性均不显著。[结论] 降雨量( $P$ ), 10 min 最大降雨强度( $I_{10}$ ), 尤其是 30 min 最大降雨强度( $I_{30}$ ), 降雨历时等降雨因子在沂蒙山区坡面产流产沙过程中都起到了不同程度的作用, 不同的土地利用方式也是影响坡面产流产沙的重要因子。

**关键词:** 沂蒙山区; 径流量; 产沙量; 降雨量; 降雨强度; 降雨历时

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0007-06

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 林锦阔, 李子君, 许海超, 等. 降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 007-012. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.009

## Effects of Rainfall Factors on Runoff and Sediment Yield of Runoff Plots with Different Land Use Patterns in Yimeng Mountainous Area

LIN Jinkuo, LI Zijun, XU Haichao, JIANG Aixia

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

**Abstract:** [Objective] The objective of this study is to investigate the effects of rainfall factors such as rainfall, rainfall intensity and rainfall duration on runoff and sediment yield of runoff plots in small watershed of Yimeng mountainous area in order to provide the basis for soil erosion control, soil and water conservation planning and ecological construction in the area. [Methods] Runoff plots with different land use patterns (natural slope land, buckwheat, wild forage and peanut land) in Yimeng mountainous area were monitored for 3 consecutive years. The observation data were statistically analyzed, and the significance test were conducted. [Results] (1) The correlation coefficient between rainfall and the runoff yield of each runoff plot was significant ( $p < 0.01$ ), the correlation coefficient between rainfall and sediment yield of buckwheat and peanut plot was significant as well ( $p < 0.01$ ). Poor correlation was found between the rainfall and the sediment yield in both the natural slope land and wild forage plot. (2) The correlation between average rainfall intensity ( $I$ ) and runoff and sediment yield was not significantly in each runoff plot. The maximum rainfall intensity of 10 min ( $I_{10}$ ) and the maximum the rainfall intensity of 30 min ( $I_{30}$ ) showed significant correlations with runoff yield and sediment yield of the buckwheat plot and the peanut plot. In particular,  $I_{30}$  exhibited

收稿日期: 2015-11-11

修回日期: 2015-12-22

资助项目: 国家自然科学基金项目“沂河流域土地覆被变化和蓄水工程水文效应的分析与模拟”(41101079)

第一作者: 林锦阔(1993—), 男(汉族), 山东省栖霞市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用变化。E-mail: ssdljk@sina.com。

通讯作者: 李子君(1972—), 女(汉族), 山东省莒县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用变化方面的研究。E-mail: lizj@sdjzu.edu.cn。

the greatest correlation with runoff and sediment yield. (3) The rainfall duration was significantly ( $p < 0.01$ ) related with the runoff and sediment yield in the buckwheat plot, while no significant relation was found in other plots. [Conclusion] Rainfall factors including rainfall ( $P$ ), rainfall intensity of 10 min ( $I_{10}$ ), rainfall intensity of 30 min ( $I_{30}$ ) and rainfall duration influence runoff and sediment yield from hill slope of Yimeng mountainous area. Different land use patterns were also important factors that influence runoff and sediment yield on slope land.

**Keywords:** Yimeng mountainous area; runoff; sediment yield; rainfall; rainfall intensity; rainfall duration

20 世纪以来,由水土流失造成的土壤贫瘠、土地生产力低下、生态平衡失调、污染物质迁移等问题已经给全球环境带来了诸多不利影响,给人类社会、经济可持续发展带来严重威胁,而中国的水土流失面积广、强度大,加上成因复杂,区域差异明显,对经济建设造成的危害更为深远<sup>[1-2]</sup>。坡面是地表过程发生发展的基础地理单元,是水土流失的主要发生地<sup>[3]</sup>。深入探讨坡面产流产沙规律及其影响因素,对于区域水土保持综合治理具有重要参考价值。诸多研究表明,影响坡面产流产沙的主要因素是降雨因子和下垫面条件<sup>[4-5]</sup>。降雨及其产生的径流是造成坡面土壤侵蚀的直接动力。次降雨的降雨量、降雨强度、降雨历时等都会对坡面产流产沙产生影响<sup>[6-7]</sup>。通常,降雨强度越大,历时越长,雨量越大,对下垫面提供的侵蚀动能越大,对土壤的侵蚀能力越强<sup>[8]</sup>。此外,产流产沙量的大小也与坡面地形几何特征、植被组成、植被覆盖率、地表岩性和组成物质、土壤理化性质等下垫面因素有关<sup>[9]</sup>。

沂蒙山区是中国北方土石山区的一个重要组成部分,该区坡耕地面积广大,降雨量自东向西递减,且夏秋季降雨集中,多以暴雨形式出现,雨量及强度大,易造成严重的水土流失,因此,降雨因子是沂蒙山区土壤侵蚀的重要原因之一,再加上地形破碎、坡度大、沟壑密度大,土层薄、抗蚀力低,植被覆盖度低,使得该区成为山东省乃至淮河流域水力侵蚀最为严重的区域<sup>[10]</sup>及全国水土保持规划国家级水土流失重点治理区。该区还是沂沭泗水系的发源地和重要水源涵养区。因此,探讨该区土壤侵蚀特征及其影响因素,对于防治水土流失,促进区域社会经济以及生态环境的可持续发展具有重要意义。目前对于沂蒙山区水土流失的研究多是利用 RS 和 GIS 技术分析土壤侵蚀强度及其空间分布<sup>[11-12]</sup>,或者在人工模拟降雨条件下探讨坡面土壤侵蚀规律<sup>[13]</sup>,而利用坡面径流小区观测数据分析天然降雨条件下坡面产流产沙特征的研究并不多。本研究拟基于沂河上游孟良崮小流域内的坡面径流小区历史观测数据,探讨降雨量 ( $P$ )、平均降雨强度 ( $I$ )、10 min 最大降雨强度 ( $I_{10}$ )、

30 min 最大降雨强度 ( $I_{30}$ )、降雨历时等降雨因子在不同土地利用方式下对坡面产流产沙的影响,以期深化对沂蒙山区坡面侵蚀机理和规律的认识,为今后该区水土流失防治、水土保持规划、生态建设等提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

孟良崮小流域位于山东省临沂市蒙阴县垛庄镇 ( $108^{\circ}6'E, 35^{\circ}20'N$ ),总面积为  $16.2 \text{ km}^2$ 。地势东北高西南低,平均海拔高度为  $212.8 \text{ m}$ 。该流域的气候类型为暖温带大陆性气候,多年平均气温  $12.9^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量  $884 \text{ mm}$ ,汛期雨量占全年降水量的  $74.6\%$ ,且暴雨多,强度大。流域内土壤类型以棕壤为主,占流域面积的  $78.4\%$ 。植被以针阔叶混交林、灌木和草本为主,主要树种有油松 (*Pinus tabulaeformis*)、栓皮栎 (*Quercus variabilis*)、侧柏 (*Platycladus orientalis*)、旱柳 (*Salix matsudana*)、杨树 (*Populus tremula*)等,灌木主要有荆条、紫穗槐 (*Amorpha fruticosa*)、酸枣 (*Ziziphus jujuba var. Spinosa*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)等,主要草种为黄草 (*Herba Dendrobii*)、狗皮草、蚊子草 (*Filipendula palmata*)等,森林覆盖率达  $19.6\%$ 。流域的水土流失形式主要为坡面侵蚀和沟道侵蚀,全流域平均年侵蚀模数  $4245 \text{ t/km}^2$ <sup>[14]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 径流小区布设 为了探索沂蒙山区水土流失的一般规律,山东省水利厅于 1981 年筹建了蒙阴县孟良崮水土保持试验站,并布设了一些径流小区,取得了阶段性的水土流失监测资料。1982 年修建了 2 个  $18^{\circ}$ 径流小区,并于 6 月 1 日开始进行自然荒坡与种植荞麦 (*Fagopyrum esculentum*) 的水土流失对比试验观测,1986 年停测。其中自然荒坡小区经多年撂荒后呈现出典型的灌草 2 层结构。1984 年修建了 2 个  $7^{\circ}$ 径流小区,并于 6 月 1 日开始进行野生牧草和种植花生 (*Arachis hypogaea*) 的水土流失对比试验观测,1988 年停测。其中野生牧草径流小区经人工

整理,以野生草本群落为主。根据实地调研和资料反映,所选小区可以基本代表流域典型植被类型。7°和18°径流小区边界都采用45 cm×50 cm水泥板围砌,

埋深30 cm,出露20 cm。1994年,蒙阴县孟良崮水土保持试验站对1982—1990年测验成果资料进行了整编<sup>[14]</sup>。各径流小区概况见表1。

表1 山东省蒙阴县孟良崮水土保持试验站径流小区基本特征

小区类型	坡度/(°)	坡向	坡长/m	坡宽/m	受雨面积/m <sup>2</sup>	覆盖度/%	建立时间	观测年限
自然荒坡	18°	西	20	5	100	50	198206	1983—1985年
种植荞麦	18°	西	20	5	100	50	198206	1983—1985年
野生牧草	7°	东	20	5	100	60	198406	1985—1987年
种植花生	7°	东	20	5	100	60	198406	1985—1987年

1.2.2 观测项目和方法 1982年在业家沟设立雨量点作为自然荒坡和荞麦径流小区的配套雨量站,1984年在横山后设立雨量点作为野生牧草和花生径流小区的配套雨量站。2处雨量站均安装虹吸式自记雨量计只在汛期(6—9月)对每场次降雨的降雨量、降雨强度等降雨因子进行观测。自然荒坡和荞麦径流小区采用薄壁直角三角堰与沉沙池配套观测径流泥沙总量,野生牧草和花生径流小区采用集沙池观测径流泥沙总量。各径流小区均在每次产流之后,收集集沙池或沉沙池里的水量即为该小区该次降雨的产流量。水样经过滤、烘干称重测定产沙量。水文数据的观测和取样均严格按照国际标准进行。

考虑到径流小区建设初期,由于人为作用,土壤翻耕之后较为松散,下垫面变化程度剧烈,因此为了更好的探讨坡面产流产沙特征与降雨因子的关系,本文选取了从小区建成后的第2 a开始连续3 a的观测数据(表1),运用Excel 2010和SPSS 19.0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0.05,0.01的显著水平上进行显著性检验。

## 2 结果与分析

水力侵蚀是降雨与下垫面条件相互作用的结果,其中降雨是水力侵蚀的原动力<sup>[15]</sup>,在降雨因素中,降雨量、降雨强度、降雨历时是主要的影响参数,决定着坡面径流的产生和大小,与坡面产沙有着密切的关系<sup>[16]</sup>。

### 2.1 降雨量对不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响

2.1.1 降雨量对不同土地利用方式径流小区产流的影响 根据蒙阴县孟良崮水土保持试验站的整编资料,自然荒坡和荞麦径流小区1983—1985年汛期降雨次数118次,降雨量为1 817.8 mm,其中产流降雨场次为23场;野生牧草和花生径流小区1985—1987年汛期降雨次数99次,降雨量为1 716.2 mm,产流降雨场次为23场。将上述次降雨量和径流量关系分别绘制成图1—2。

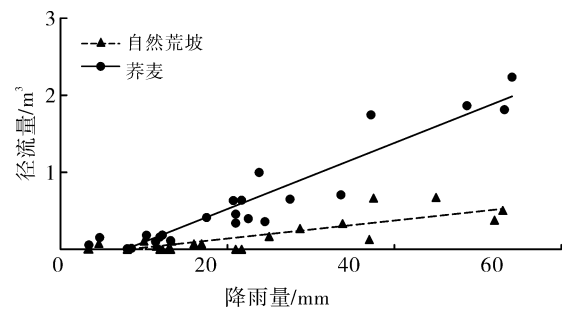


图1 自然荒坡和荞麦地径流小区降雨量—径流量关系

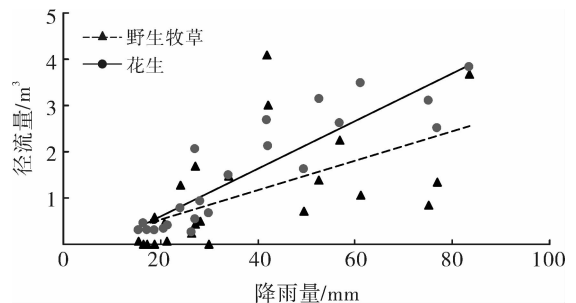


图2 野生牧草地和花生地径流小区降雨量—径流量关系

由图1—2可知,各小区的径流量随着降雨量的增大呈显著增加趋势。图1中2个径流小区观测期间降雨总量均为510.6 mm,在降雨量相同的情况下,荞麦小区的产流量和产流速度明显大于自然荒坡,其中自然荒坡小区在观测期间径流总量为4.78 m<sup>3</sup>,相比荞麦小区径流量减少了74.8%;图2中2个径流小区观测期间降雨总量均为865.7 mm,在降雨量相同的情况下,花生小区产流量和产流速度明显大于野生牧草小区,其中野生牧草小区观测期间径流总量为30.17 m<sup>3</sup>,相比种花生径流小区径流量减少了27%。表明自然荒坡小区相比荞麦小区具有更好的拦蓄降雨的能力,野生牧草小区相比花生小区也具有更好的拦蓄降雨的功能。

以往对降雨量与地表产流的研究中,在不同地区、不同试验条件下,其影响程度存在较大差异。有学者对灌木地、荒草地、裸地3类不同土地利用方式

径流小区的产流与次降雨因子相关分析得出,各径流小区的径流量与降雨量之间都存在很好的相关性<sup>[8]</sup>。但也有学者认为,北方特别是黄土高原区,地表径流主要取决于降雨强度,南方地区则主要取决于降雨量<sup>[17]</sup>。本研究运用 SPSS 软件对不同径流小区观测

期内实测次降雨数据和产流数据进行相关分析得出,各径流小区的产流量与降雨量具有很好的相关性( $p < 0.01$ )(表 2)。虽然每场次降雨的降雨量、降雨强度和降雨历时相同,但是由于不同小区有不同的地表覆盖状况,其产流情况不同<sup>[18]</sup>。

表 2 孟良崮小流域各径流小区产流量—降雨量、产沙量—降雨量、产沙量—产流量的相关性

小区类型	产流量—降雨量		产沙量—降雨量		产沙量—产流量	
	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)
自然荒坡	0.826**	0	0.279	0.198	0.315	0.143
种植荞麦	0.945**	0	0.858**	0	0.860**	0
野生牧草	0.566**	0.005	0.385	0.069	0.876**	0
种植花生	0.899**	0	0.590**	0.003	0.726**	0

注:\*\*表示在 0.01 水平上差异显著。

2.1.2 降雨量对不同土地利用方式径流小区产沙的影响 将自然荒坡和荞麦径流小区 23 场次降雨的次降雨量和相应产沙量,野生牧草和花生径流小区 23 场次降雨的次降雨量和相应产沙量关系分别绘制成图 3—4。

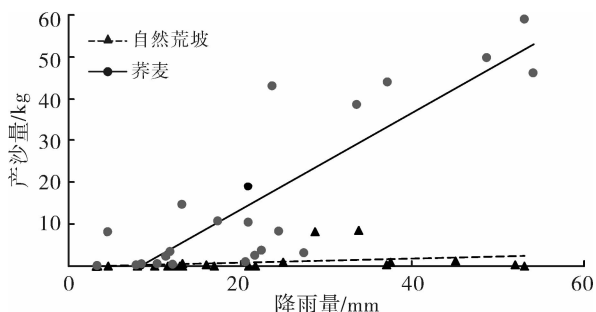


图 3 自然荒坡和荞麦径流小区降雨量—产沙量关系

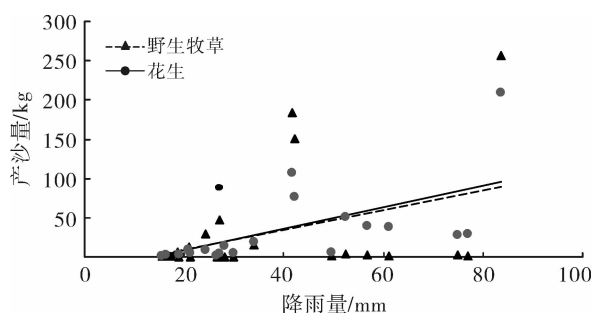


图 4 野生牧草和花生径流小区降雨量—产沙量关系

由图 3—4 可见,各小区的产沙量随着降雨量的增大呈显著增加趋势。图 3 中 2 个径流小区观测期间降雨总量均为 510.6 mm,在降雨量相同的情况下,荞麦小区的产沙量和产沙速度远大于自然荒坡小区,其中自然荒坡小区在观测期间产沙总量为 21.06 kg,相比荞麦小区产沙量减少了 94.2%;图 4 中 2 个径

流小区观测期间降雨总量均为 865.7 mm,在降雨量相同的情况下,花生小区的产沙量和产沙速度略大于野生牧草小区,其中野生牧草小区观测期间产沙总量为 713.66 kg,相比种花生径流小区产沙量减少了 5%。主要原因可能是未经过人类扰动的自然荒坡土壤表层结构良好,地面杂草对土壤有一定保护作用,降雨和径流难以剥离土壤颗粒<sup>[19]</sup>。而径流小区耕垦种植荞麦和花生之后,土壤对降雨和径流的抗冲性和抗蚀性明显减弱,土壤团粒稳定性较差,当降雨量较大时,会直接打击在行与行之间裸露的土地,表层土壤结构被破坏,使更多的土壤颗粒被击碎后随地表径流流走。此外,各径流小区的土壤类型都为棕壤,由于棕壤在经过多次降水后黏粒会随水沉积,加上长期耕作,其底部便会形成紧实的亚表土层,透水性很差。当坡度较大、降雨量较多时,降水来不及渗入土壤,产生了更多的地表径流,导致耕垦小区的产流产沙量增加<sup>[20]</sup>。由图 2 和图 4 可见,野生牧草和花生径流小区之间的产流差异很大而产沙差异不大。原因可能是由于花生径流小区横坡种植,对泥沙起到一定的拦截作用,并且径流的流路延长泥沙沉积,因此花生径流小区的产流较大时产沙却不多;而野生牧草径流小区产流后顺坡而下,当径流较大时,容易集聚成股状水流形成细沟,使侵蚀加剧,由此 2 个径流小区之间的产流虽有差异但产沙的差异并不显著。

有学者研究了不同土地利用方式径流小区的降雨量、径流量和产沙量的关系认为,降雨量与产沙量的相关性并不显著,仅通过降雨量的多少来判断是否产生侵蚀或产生多少侵蚀量是不可靠的<sup>[21]</sup>,而径流量与产沙量的相关性较好<sup>[22]</sup>。本研究对不同径流小区观测期内实测次降雨数据和产沙数据进行相关分

析(表2)发现,降雨量对径流小区产沙的影响程度均小于对产流的影响程度,而且不同土地利用方式径流小区的降雨量与产沙量的相关关系是有差别的。除了荞麦小区和花生小区产沙量和降雨量的相关性显著( $p < 0.01$ )外,自然荒坡小区和野生牧草小区的产沙量与降雨量虽然也呈正相关但相关性较差,这可能与这2个小区的产流量较少有关系。对不同径流小区观测期内实测产流数据和产沙数据进行相关分析(表2)可见,除了自然荒坡小区产沙量与产流量相关性不显著外,其他径流小区相关性均显著( $p < 0.01$ ),且产流量对产沙的影响程度大于降雨量对产沙的影响程度,这一点与前人的研究结论相

似<sup>[22]</sup>。由此看来,产沙量的多少不仅仅与降雨量、降雨强度有关,降雨产生的径流对土壤的冲刷也发挥着重要作用,并且还受到小区内土壤质地、孔隙度等土壤物理性质和植被类型、植被覆盖度等诸多下垫面因子的影响<sup>[22]</sup>,使得不同地表状况的径流小区拦蓄泥沙能力有所不同。

## 2.2 降雨强度对不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响

### 2.2.1 降雨强度对不同土地利用方式径流小区产流的影响

对4个径流小区观测期内实测产流数据和平均降雨强度( $I$ )、10 min最大降雨强度( $I_{10}$ )、30 min最大降雨强度( $I_{30}$ )进行相关分析,结果如表3所示。

表3 孟良崮小流域各径流小区产流量与降雨强度的相关性

小区类型	$I$		$I_{10}$		$I_{30}$	
	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)
自然荒坡	0.260	0.231	0.650**	0.001	0.739**	0
种植荞麦	0.014	0.949	0.583**	0.003	0.766**	0
野生牧草	0.059	0.788	0.444*	0.034	0.450*	0.031
种植花生	0.322	0.134	0.542**	0.008	0.581**	0.004

注: \*表示在0.05水平上差异显著; \*\*表示在0.01水平上差异显著。下同。

降雨强度与径流小区产流的关系比较复杂,有学者研究表明不同植被条件下的最大降雨强度与径流小区产流相关性是不同的<sup>[23]</sup>但也有学者指出,从侵蚀动力学分析, $I_{30}$ 是径流量的关键影响因子<sup>[24]</sup>;由表3可以看出,各径流小区的产流量与平均降雨强度( $I$ )呈正相关但相关性均不显著,与10 min最大降雨强度( $I_{10}$ )和30 min最大降雨强度( $I_{30}$ )都具有较好的相关性,且与30 min最大降雨强度( $I_{30}$ )的相关性最好。这与有关学者的研究结论是一致的<sup>[24]</sup>。在其他条件不变的情况下,坡面产流量将随降雨时间的延长达到一个相对稳定的趋势。但是野外天然降雨的雨强,随着降雨时间的不同而变化,一般先从小到大,持续一段时间后出现从大到小的变化趋势<sup>[8]</sup>,不同的降雨强度导致地表产流时间及产流方式的不同,从而

影响地表径流量的大小。

### 2.2.2 降雨强度对不同土地利用方式径流小区产沙的影响

对各径流小区观测期内实测产沙数据和平均降雨强度( $I$ )、10 min最大降雨强度( $I_{10}$ )、30 min最大降雨强度( $I_{30}$ )进行相关分析,结果见表4。

由表4可知,各径流小区的产沙量与平均降雨强度( $I$ )皆呈正相关但相关性均不显著。荞麦小区和花生小区的产沙量与10 min最大降雨强度( $I_{10}$ )相关性较好( $p < 0.05$ ),与30 min最大降雨强度( $I_{30}$ )的相关性最好( $p < 0.01$ ),说明 $I_{30}$ 是影响这2个小区产沙的主要因子之一。自然荒坡小区和野生牧草小区的产沙量与10 min最大降雨强度( $I_{10}$ )、30 min最大降雨强度( $I_{30}$ )的相关性均不显著,说明这2个小区的产沙受到其他更多因素的综合影响。

表4 孟良崮小流域各径流小区产沙量与降雨强度的相关性

小区类型	平均降雨强度 $I$		10 min 最大降雨强度 $I_{10}$		30 min 最大降雨强度 $I_{30}$	
	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)
自然荒坡	0.009	0.968	0.131	0.553	0.305	0.157
种植荞麦	0.014	0.951	0.524*	0.010	0.685**	0
野生牧草	0.009	0.968	0.259	0.232	0.287	0.184
种植花生	0.157	0.473	0.483*	0.020	0.529**	0.009

### 2.3 降雨历时对不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响

降雨历时和径流小区产流产沙的关系,有学者采用野外天然降雨数据,控制其他因子不变的情况下发现,降雨历时和径流侵蚀的相关性并不显著。但降雨强度不变(如模拟降雨),雨强较小时,降雨历时只与径流的相关性较好;雨强较大时,降雨历时与径流和侵蚀都呈现显著正相关<sup>[21]</sup>。本研究在野外天然降雨的条件下,对不同径流小区观测期内实测降雨历时数据和产流、产沙数据进行相关分析得出相似结论,降雨历时与荞麦径流小区的产流量和产沙量具有很好的相关性( $p < 0.01$ ),与其他径流小区的产流量和产沙量虽皆呈正相关但相关性均不显著(表 5)。

表 5 孟良崮小流域各径流小区产流量、产沙量与降雨历时相关性

小区类型	产流量		产沙量	
	Pearson 相关系数	sig. (双尾)	Pearson 相关系数	sig. (双尾)
自然荒坡	0.122	0.580	0.108	0.625
种植荞麦	0.643**	0.001	0.594**	0.003
野生牧草	0.297	0.169	0.177	0.418
种植花生	0.308	0.153	0.273	0.208

这可能与径流小区的坡度和作物类别有关。一方面,荞麦径流小区的坡度大于野生牧草小区和花生小区,一定范围内坡度的增加会导致径流小区产流量和产沙量的增大。另一方面,荞麦根系不发达,种子顶土能力差,茎秆柔弱且木质化程度低,极易发生倒伏现象,且其生长环境对土层疏松度要求较高<sup>[25]</sup>,因此当降雨历时达到一定长度后,荞麦径流小区便无法有效发挥截留作用,抵御降雨对土壤的侵蚀,使得其产流产沙量快速增加。

## 3 结论

(1) 各径流小区径流量表现为:自然荒坡 < 荞麦小区,野生牧草小区 < 花生小区;产沙量表现为:自然荒坡 < 荞麦小区,花生小区略大于野生牧草小区。

(2) 降雨量对各径流小区产流的影响程度均大于产沙,且相关性显著( $p < 0.01$ );不同土地利用方式下,降雨量与荞麦小区和花生小区产沙量相关性显著( $p < 0.01$ ),与自然荒坡小区和野生牧草小区的产沙量相关性较差;此外小区的产流对产沙也发挥重要作用。

(3) 30 min 最大降雨强度( $I_{30}$ )是影响各小区产流的关键降雨强度因子。自然荒坡小区和野生牧草

小区的产沙量与各降雨强度因子的相关关系均不显著。在今后的研究中,还需结合土壤质地、孔隙度、坡度、植被覆盖度等其他影响因素进一步探讨。

(4) 受径流小区坡度和作物类别的影响,荞麦小区产流量和产沙量与降雨历时相关性显著( $p < 0.01$ ),其他小区与降雨历时相关性较差。

综上所述,降雨量( $P$ )、10 min 最大降雨强度( $I_{10}$ )尤其是 30 min 最大降雨强度( $I_{30}$ )、降雨历时等降雨因子在沂蒙山区坡面产流产沙过程中都起到了不同程度的作用,不同土地利用方式也是影响坡面产流产沙的重要因子。因此,坡面水土流失过程是降雨和不同土地利用方式综合作用的结果。由于该区野外定位试验资料的局限性,对于不同地形、不同土壤特性等下垫面因子和坡面土壤侵蚀的关系还有待结合野外试验进行进一步研究探讨,为该区水土流失防治工作提供参考。

### [参 考 文 献]

- [1] 赵文武,傅伯杰,吕一河,等.多尺度土地利用与土壤侵蚀[J].地理科学进展,2006,25(1):24-33.
- [2] 李占斌,朱冰冰,李鹏.土壤侵蚀与水土保持研究进展[J].土壤学报,2008,45(5):802-809.
- [3] 樊登星,余新晓,贾国栋,等.密云水库上游不同土地利用方式下的土壤侵蚀特征[J].水土保持通报,2015,35(1):5-8,255.
- [4] 周宏飞,王大庆,马健,等.天山山区草地覆被和雨强对产流和产沙的影响研究:以天山天池自然保护区为例[J].水土保持通报,2009,29(5):26-29.
- [5] 唐克丽,史立人,史德明,等.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [6] 肖海,夏振尧,杨悦舒,等.三峡库区小流域产流产沙试验研究[J].水土保持通报,2014,34(4):260-263.
- [7] 张冠华,程冬兵,张平仓,等.紫鹊界梯田区坡面产流产沙特征的模拟试验研究[J].水土保持通报,2013,33(6):9-12.
- [8] 刘栋,刘普灵,邓瑞芬,等.不同下垫面径流小区次降雨侵蚀特征相关分析[J].水土保持通报,2011,31(2):99-102.
- [9] 袁再健,蔡强国,秦杰,等.鹤鸣观小流域不同土地利用方式的产流产沙特征[J].资源科学,2006,28(1):70-74.
- [10] 水利部,中国科学院,中国工程院.中国水土流失防治与生态安全(北方土石山区卷)[M].北京:科学出版社,2010.
- [11] 刘前进,于兴修.北方土石山区土壤侵蚀强度垂直景观格局:以沂蒙山区为例[J].地理研究,2010,29(8):1471-1483.
- [12] 王瑶,刘前进,于兴修.沂蒙山区土壤侵蚀垂直景观格局的分形特征[J].农业工程学报,2010,26(11):304-309.

(下转第 19 页)

- [4] Nannipieri P, Bollag J M. Use of enzymes to detoxify pesticide-contaminated soils and waters[J]. Journal of environmental quality, 1991, 20(3):510-517.
- [5] Bollag J M. Decontaminating soil with enzymes[J]. Environmental Science & Technology, 1992,26(10):1876-1881.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. GB15618-1995 土壤环境质量标准[S].北京:国家环境保护局,1995.
- [7] 费杨,王晓丽. 重金属污染对土壤酶活性的影响[J]. 安徽农业科学,2014,42(1):99-101.
- [8] 文政安. 茶皂素:一种值得注意的天然化工原料[J]. 现代化工,1989,9(6):49-50.
- [9] Mulligan C N. Environmental applications for biosurfactants[J]. Environmental Pollution, 2005, 133 (2): 183-198.
- [10] 蒋煜峰,展惠英,张德懿,等. 皂角苷络合洗脱污灌土壤中重金属的研究[J]. 环境科学学报,2006,26(8):1315-1319.
- [11] Hong K J, Choi Y K, Tokunaga S, et al. Removal of cadmium and lead from soils using aescin as a biosurfactant[J]. Journal of Surfactants and Detergents, 1999, 81(2):247-250.
- [12] 王冰芳,张学武. 响应曲面法优化西兰苔总黄酮的提取工艺条件[J]. 安徽农业科学,2010,38(1):359-362.
- [13] Zhang Hui. A comparison between heavy metals released from soil and its efficient speciation extracted by sequential extraction procedure[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2008,27(1):36-40.
- [14] 刘培亚,李玉姣,胡鹏杰,等. 复合淋洗剂土柱淋洗法修复 Cd,Pb 污染土壤[J]. 环境工程,2015(1):163-167.
- [15] 李光德,张中文,敬佩,等. 茶皂素对潮土重金属污染的淋洗修复作用[J]. 农业工程学报,2009,25(10):231-235.
- [16] 可欣,李培军,张响,等. 利用乙二醇四乙酸淋洗修复重金属污染的土壤及其动力学[J]. 应用生态学报,2007,18(3):601-606.
- [17] 黑亮,胡月明,吴启堂,等. 用固定剂减少污泥中重金属污染土壤的研究[J]. 农业工程学报,2007,23(8):205-209.

(上接第 12 页)

- [13] 王志伟,陈志成,艾钊,等. 不同雨强与坡度对沂蒙山区典型土壤坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(6):17-20,26.
- [14] 蒙阴县孟良崮水土保持试验站. 蒙阴县孟良崮水土保持试验站观测试验及研究资料成果汇编(1982—1990年)[R]. 蒙阴:蒙阴县孟良崮水土保持试验站,1994.
- [15] 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.
- [16] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. 水利学报,2012,43(9):1084-1091.
- [17] 景可,王万忠,郑粉莉. 中国土壤侵蚀与环境[M]. 北京:科学出版社,2005:55-58.
- [18] 彭文英,张科利. 不同土地利用产流产沙与降雨特征的关系[J]. 水土保持通报,2001,21(4):25-29.
- [19] 李广,黄高宝. 雨强和土地利用方式对黄土丘陵区水土流失的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(11):85-90.
- [20] 杨春霞,肖培青,甄斌,等. 野外不同被覆坡面产流产沙特征[J]. 水土保持学报,2012,26(4):28-31,36.
- [21] 卫伟,陈利顶,傅伯杰,等. 半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和下垫面因子影响下的水土流失规律[J]. 生态学报,2006,26(11):3847-3853.
- [22] 艾宁,魏天兴,朱清科. 陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):26-30.
- [23] 江森华,谢锦升,王维明,等. 闽北不同土地利用方式与不同降雨强度对水土流失的影响[J]. 中国水土保持科学,2012,10(4):84-89.
- [24] 樊登星,余新晓,贾国栋,等. 北京山区灌草坡面水土流失特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2014,12(2):24-28.
- [25] 汪灿,阮仁武,袁晓辉,等. 不同荞麦品种抗倒伏能力与根系及茎秆性状的关系[J]. 西南大学学报:自然科学版,2015,37(1):65-71.