

渭河流域降雨侵蚀力时空分布特征

陶望雄¹, 马亚鑫², 张杰², 刘招³, 贾志峰³

(1. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410019;

2. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 3. 长安大学 水与发展研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: [目的] 揭示渭河流域降雨侵蚀力的时空变化特征, 为区域水土保持规划提供依据。[方法] 根据渭河流域及其周边范围 30 个气象站点 1957—2014 年逐日降雨资料, 采用章文波日降雨量侵蚀模型计算各站点的降雨侵蚀力, 分析其空间分布规律和年内分布特征。[结果] 渭河流域多年平均降雨侵蚀力值分布范围为 806.25~3 510.81 MJ·mm/(hm²·h), 平均值 1 798.97 MJ·mm/(hm²·h), 与多年平均侵蚀性降雨的空间分布基本一致, 总体呈现西北低东南高的趋势。渭河流域降雨侵蚀力年内变化呈单峰型, 主要集中在 7—9 月, 占全年降雨侵蚀力的 63.91%。北部黄土高原地区和关中平原发生水土流失的时期集中在 7—9 月, 而秦岭北麓地区 5—10 月均有可能发生较大的水土流失, 侵蚀风险由西北向东南递增。流域降雨侵蚀力年际波动较大, 年际变率 C_v 值在 34%~56% 之间, 整体而言, 流域西北部地区的降雨侵蚀力年际变化幅度大于东南部地区。除洛川、长武、环县、平凉 4 个站点降雨侵蚀力在研究时段内有所增大外, 其余地区降雨侵蚀力呈不同速率的减小趋势。[结论] 渭河流域降雨侵蚀力时空分布差异显著, 尽管流域降雨侵蚀力呈减弱趋势, 由于流域地处黄土高原, 水土保持与水源涵养工作仍需高度重视。

关键词: 渭河流域; 侵蚀性降雨; 降雨侵蚀力; 时空分布; 年际分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0110-05

中图分类号: S157.1, TV141

文献参数: 陶望雄, 马亚鑫, 张杰等. 渭河流域降雨侵蚀力时空分布特征 [J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 110-114. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.018

Spatial and Temporal Variations of Rainfall Erosivity in Weihe River Basin

TAO Wangxiong¹, MA Yaxin², ZHANG Jie², LIU Zhao³, JIA Zhifeng³

(1. Changsha Engineering & Research Institute Ltd. of Nonferrous

Metallurgy, Changsha, Hu'nan 410019, China; 2. College of Environmental Science and

Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Research

Institute of Water and Development, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: [Objective] To study the temporal variability and spatial distribution of rainfall erosivity in Weihe River basin in order to provide a reference for soil and water conservation. [Methods] Based on the daily rainfall data from 1957 to 2014 in 30 meteorological stations in Weihe River basin, the rainfall erosivity model proposed by Zhang Wenbo was used to calculate the rainfall erosivity, and its temporal variability and spatial distribution were analyzed. [Results] The range of annual rainfall erosivity in Weihe River basin was 806~4 017.81 MJ·mm/(hm²·h) with an average value of 1 798.97 MJ·mm/(hm²·h). The average annual erosivity decreased from the northwest to the southeast in general. There was strong correlation between the average annual erosive rainfall and the rainfall erosivity, and they had similar spatial distribution. The rainfall erosivity from July to September account for 63.91% of the total annual rainfall erosivity, showing an unimodal annual variation. Soil water loss was found mainly concentrated from July to September in the northern of the Loess Plateau and Guanzhong region. Great soil erosion might potentially occurred from May to October in Qinling Mountains. The risk of erosion increased from the northwest to the southeast; The inter-annual

收稿日期: 2015-07-24

修回日期: 2015-09-23

资助项目: 中央高校基本科研业务专项“土壤凝结水形式机制研究”(310829161003); 中央高校基本科研业务费专项(310850151100); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM5256); 中央高校基本科研业务专项“西北地区节水灌溉模式对地下水的影 响”(310829161010)

第一作者: 陶望雄(1991—), 男(汉族), 湖南省益阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水文学及水资源。E-mail: 741821194@qq.com。

change of rainfall erosivity in Weihe River basin was obvious with the C_v value ranging from 34% to 56%. C_v value of rainfall erosivity in northwest region was larger than that in southeast region in general. The annual rainfall erosivity of most areas in Weihe River basin showed upward trend with different rates, except for the decline trends of Luochuan, Changwu, Huanxian and Pingliang stations. [Conclusion] There were significant differences of rainfall erosivity in spatial and temporal distribution. Although rainfall erosivity in Weihe River basin showed a decreasing trend, soil and water conservation work is still very important.

Keywords: Weihe River basin; erosive rainfall; rainfall erosivity; spatial distribution; inter-annual distribution

降雨是导致土壤侵蚀的主要动力因素^[1],在全球气候变化的背景下,降雨变化对土壤侵蚀过程产生着深刻的影响。降雨侵蚀力反映由降雨引起的土壤侵蚀的潜在能力,是建立通用土壤流失方程(USLE)中的一个基本因子^[2],也是表征降雨引起土水流失的重要指标^[3]。因此,研究降雨侵蚀力的时空分布特征,对认知水土流失规律、流域综合治理、优化水土保持措施等具有重要意义。1958年美国学者 Wischmeier^[4]首次提出,以次降雨总动能 E 与 30 min 最大降雨强度 I_{30} 的乘积作为衡量降雨侵蚀能力大小的指标。但是由于次降雨资料的获取难度大,且计算过程繁琐,国内学者在此基础上先后提出了降雨侵蚀力的简易算法和模型,王万忠等^[5-12]以全国 125 个站点资料为基础,通过计算多年平均降雨特征参数得到全国降雨侵蚀力空间分布情况。章文波等^[12]建立了利用日雨量直接估算逐年半月降雨侵蚀力的简易算法模型。

渭河流域位于黄土高原地区,是黄河流域水土流失最为严重的地区之一,渭河也是黄河来沙量最多的一级支流。目前,已有学者对黄土高原不同区域的降雨侵蚀力进行了相关研究,如吴德勇等^[6]以陇东地区 8 个区县气象站日降雨量资料为基础,分析了该区域侵蚀性降雨和降雨侵蚀力的时空变化特征;穆兴民等^[7]对陕北黄土高原区降雨侵蚀力的季节性差异、时间和空间分布进行了研究。尽管关于渭河流域降雨的研究很多^[8-9],然而涉及整个渭河流域降雨侵蚀力的相关研究尚未见报道,因此,本研究基于 ArcGIS 软件平台和渭河流域各气象站日降雨量资料,采用章文波提出的降雨量侵蚀力模型计算渭河流域的降雨侵蚀力,分析渭河流域降雨侵蚀力的时空分布特征和演变规律,旨在为渭河流域进一步开展土壤侵蚀评价和水土保持工作提供科学依据。

1 研究区概况及数据获取

1.1 研究区概况

渭河是黄河第一大支流,发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧,于陕西省潼关处流入黄河,流域面积 $1.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。流域北部为黄土高原,南部为秦岭山区,地形差异较大,表现为西高东低,地貌主要有黄土丘陵区、黄土塬区、土石山区、黄土阶地区、河谷

冲积平原区等。流域处于干旱地区和湿润地区的过渡地带,多年平均降水量 572 mm,降水量变化趋势是南多北少,山区多而盆地河谷少,年际变化较大,年内时程分布不均匀^[9]。该区土壤侵蚀强度大,全流域侵蚀模数大于 $5000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的强度水蚀面积 $4.88 \times 10^4 \text{ km}^2$,占黄土高原地区同类面积的 25.5%,水土流失面积 $1.04 \times 10^5 \text{ km}^2$,占渭河流域总面积的 76.9%。

1.2 数据来源

利用渭河流域及其周边范围 30 个气象站点 1957—2014 年的 20~20 h 降雨量(24 h 降雨量)数据资料,数据来源于中国气象局,对站点的缺测数据采用相邻 7 d 滑动平均,进行插补延长。以日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 作为侵蚀性降雨的划分标准^[10-11],计算流域各个站点侵蚀性降雨及降雨侵蚀力。

2 研究方法

2.1 降雨侵蚀力计算

采用章文波等^[12]提出的降雨量侵蚀力模型进行计算,该模型主要利用日降雨量进行计算,且已在中国大部分地区成功运用。计算时,将全年划分为 24 个半月时段,半月时段的划分以每月 15 日为界,每月前 15 d 作为一个半月时段,剩下部分则作为另一个半月时段。模型计算公式为^[12-14]:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (D_j)^\beta \quad (1)$$

式中: R_i ——第 i 个半月时段内的降雨侵蚀力 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})]$, $k = 1, 2, 3, \dots, m$, 表示该半月时段内侵蚀性降雨的天数; D_j ——半月时段内第 j 天的日降雨量,该降雨量按照侵蚀性降雨标准,要求 $D_j \geq 12 \text{ mm}$,否则记为 0; α, β ——模型参数,与研究区域的降雨特征有关,其计算公式为:

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (2)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (3)$$

式中: P_{d12} ——日降雨量 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日平均降雨量(即 1 a 中日降雨 $\geq 12 \text{ mm}$ 的降雨量总和与相应天数之比); P_{y12} ——日降雨量的年平均降雨量(即全年中 $\geq 12 \text{ mm}$ 的日降雨量年累加值的多年平均)。利用公式(1)~(3)计算逐年各半月的降雨侵蚀力,累积即可得到年降雨侵蚀力。

2.2 气候倾向率

利用气象要素的时间序列,建立其与相应时序之间的一元线性回归方程,该方法可以用来判断水文气象序列变化的趋势性^[13-14]。设 Y 为某一气象变量, t 为时间,建立 Y 与 t 之间的回归方程为:

$$Y_i = a + bt_i \quad (4)$$

式中: Y_i ——气象时间序列; t_i ——时间; b ——线性趋势项(即斜率); a ——截距。把 $b \times 10$ 称为气象要素每 10 a 的气候倾向率(10 a)。 b 大于 0 时,气候要素序列随时间递增,否则递减。且 b 的绝对值越大,趋势越明显,否则无明显变化趋势。

3 结果分析

3.1 侵蚀性降雨特征分析

基于 30 个气象站点的日降雨资料,汇总得到每

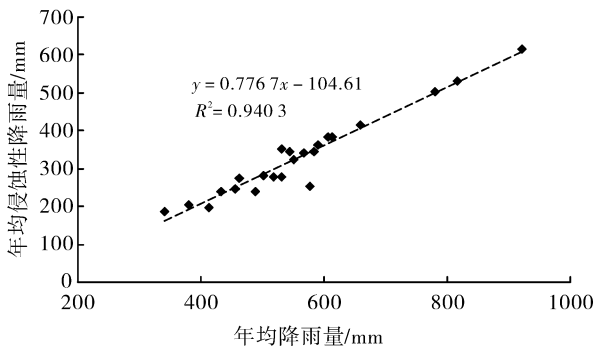
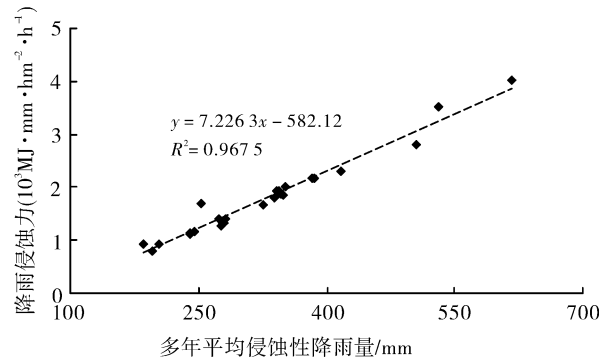


图 1 渭河流域多年平均侵蚀性降雨、降雨侵蚀力、多年平均降雨量相关关系

个站点的年均降雨量和年均侵蚀性降雨量,采取线性回归法构建侵蚀性降雨量与降雨量之间的相关关系,由图 1 可知,两者相关系数为 0.940 3($p < 0.01$),正相关性显著。因此本文着重研究侵蚀性降雨的空间分布特征。

利用 ArcGIS 工具采用反距离权重法^[15-16]将 30 个站点的多年平均侵蚀性降雨量进行空间插值,得到渭河流域多年平均侵蚀性降雨空间分布图(图 2)。从图 2 可以看出,渭河流域年平均侵蚀性降雨呈现从东南向西北递减的趋势,变化于 532.4 mm(华山)到 196.1 mm(西吉)之间。吴旗—平凉—天水及其西北部的上游地区年均侵蚀性降雨量在 300 mm 以下,宝鸡—铜川一线南部的关中平原地区侵蚀性降雨在均 400 mm 以上,中部地区侵蚀性降雨位于 300~400 mm 之间。



3.2 降雨和侵蚀性降雨的年内分布特征

降雨的年内分布特征是流域水土流失一个重要影响因子^[15],图 3 为渭河流域降雨量和侵蚀性降雨量及其各自降雨日数的年内分配情况。从降雨量来看,渭河流域多年平均降雨量为 539.26 mm,多年平均降雨量年内分布呈单峰型,主要集中在 7—10 月,该时段的降雨量达到 349 mm,占到年均降雨量的 64.89%。流域侵蚀性降雨主要集中在 6—9 月,占全年总侵蚀性降雨量的 77.26%,在 6—9 月中,侵蚀性降雨量在当月降雨量中所占的比例也超过了 60%,最大为 80.39%,最小为 67.74%。说明渭河流域 6—9 月降水较为集中,且大于等于 12 mm 的降水事件占较高的比例,使得该时期降水对土壤的侵蚀较为严重,这也是渭河流域汛期径流泥沙较大的原因之一。年内降雨日数分布特征与降雨量分布一致,仍然呈现单峰型,最大降雨日数出现在 8 月,最小降雨日数出现在 12 月,7—10 月降雨日数占全年降雨日数的 46.39%。侵蚀性降雨日数主要集中在 7—9 月,占全年侵蚀性降雨日数的 58.57%。

通过计算分析发现,渭河流域年侵蚀性降雨量占全年总降雨量的 60.82%,但年侵蚀性降雨日数仅占全年总降雨日数的 13.73%,说明降雨量和降雨强度较大、发生频次较小的降雨事件是引起该区域土壤侵蚀的主要原因之一。

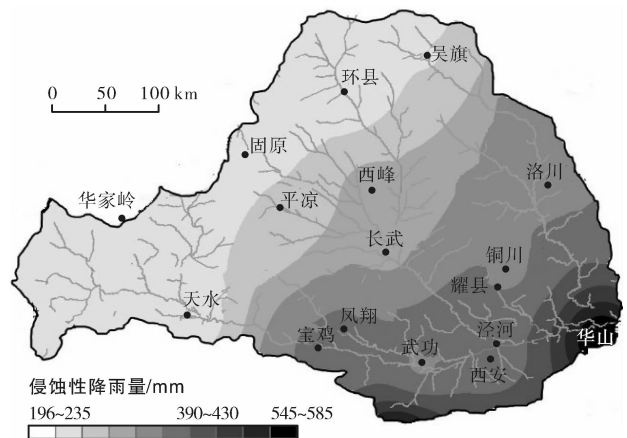


图 2 渭河流域 1967—2014 年侵蚀性降雨空间分布

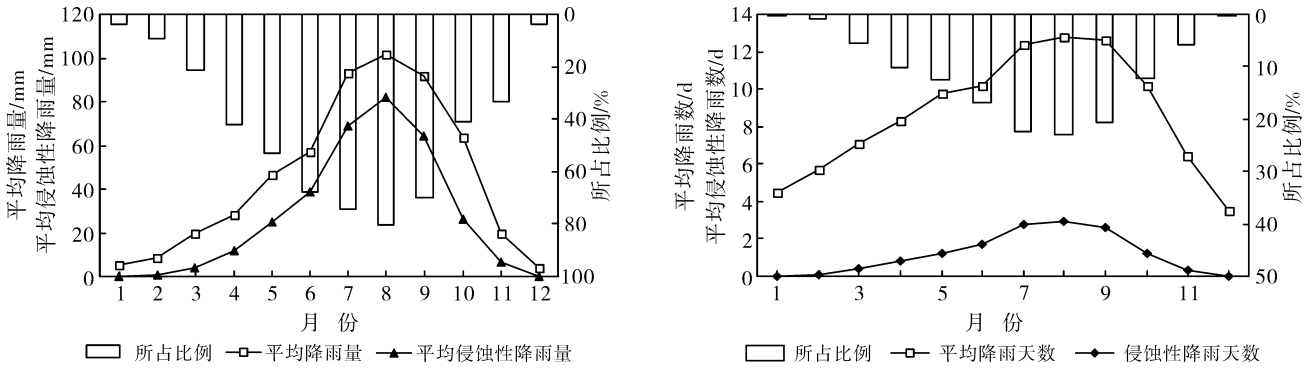


图 3 渭河流域 1957—2014 年多年平均侵蚀性降雨量及降雨日数的月分布

3.3 降雨侵蚀力空间变化分布特征

利用公式(1)—(3)式计算逐年 24 个半月时段的降雨侵蚀力,得到渭河流域各个站点多年平均降雨侵蚀力,通过反距离权重空间插值法得到流域多年平均降雨侵蚀力空间分布图(图 4)。

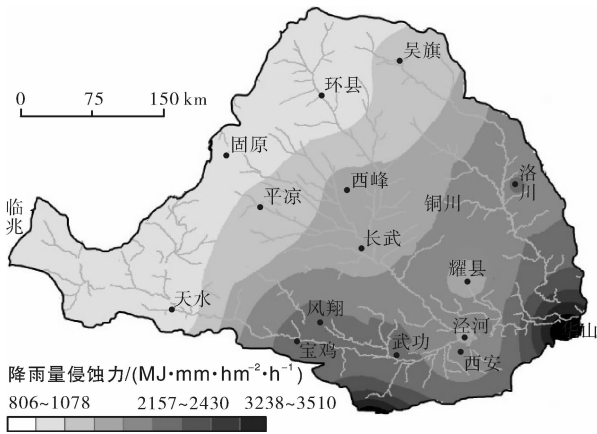


图 4 1957—2014 年渭河流域降雨侵蚀力空间分布

由图 4 可见,降雨侵蚀力与侵蚀性降雨具有相似的空间分布特征,渭河流域降雨侵蚀力值的分布范围

为 806.25~3510.81 MJ·mm/(hm²·h),平均值为 1 798.97 MJ·mm/(hm²·h),标准差为 768.69 MJ·mm/(hm²·h),表明降雨侵蚀力空间差异较大。流域多年平均降雨侵蚀力从东南往西北呈现逐渐递减趋势,在华山和佛坪两地形成高值区,分别为 3 509.51,4 017.81 MJ·mm/(hm²·h)。其中,靠近秦岭北麓地区的降雨侵蚀力平均在 3 000 MJ·mm/(hm²·h)以上,关中平原在 2 000~3 000 MJ·mm/(hm²·h)之间,渭北黄土高原地区降雨侵蚀力小于 2 000 MJ·mm/(hm²·h)。

从表 1 可以看出,渭河流域降雨侵蚀力年际波动较大,年际变率 C_v在 34%~56%之间,波动最大的站点是平凉站,C_v值为 55.74%,降雨侵蚀力极值比达到了 11.48 倍;华山的年际波动最小,降雨侵蚀力最大值与最小值比值为 5.51 倍。渭河流域降雨侵蚀力 C_v值的变化规律与年降雨侵蚀力的空间变化规律相反,C_v值由流域的西北部向东南部递减,说明流域西北部的降雨侵蚀力年际变化幅度大部东南部,随着侵蚀性降雨的增加,降雨侵蚀力年际变化幅度增大。

表 1 渭河流域部分气象站点降雨侵蚀力的年际变化特征

气象站点	降雨侵蚀力			极值比	年际变率/%
	年平均值	最小值	最大值		
环县	1 194.2	356.6	2 821.9	7.91	55.33
平凉	1 409.5	369.8	4 245.0	11.48	55.74
长武	1 753.0	378.3	4 252.2	11.23	41.68
洛川	2 163.7	880.7	4 189.3	4.75	37.20
天水	1 220.1	305.1	2 785.3	9.12	46.38
宝鸡	2 197.6	629.6	4 920.2	7.81	39.43
华山	3 509.5	1 157.9	6 383.4	5.51	34.08
华家岭	994.9	198.8	3 324.3	16.71	53.04
固原	1 155.6	215.8	2 606.3	12.07	50.93
吴旗	1 403.1	254.6	2 899.9	11.39	40.45
武功	2 138.3	430.3	4 395.5	10.21	48.44
西安	1 921.2	493.5	3 835.3	7.77	43.49
西峰	1 679.0	686.3	3 215.7	4.68	38.98
西吉	806.49	141.1	1 966.5	13.93	55.84

将渭河流域各个站点的降雨侵蚀力序列与时间建立线性相关关系,计算出序列与时间拟合的趋势线斜率,利用 ArcGIS 软件把结果反映到空间上,得出渭河流域降雨侵蚀力变化速率空间分布特征和规律(图 5)。图 5 表明,渭河流域年降雨侵蚀力的变化速率存在明显的空间差异,流域内除洛川、环县、长武、平凉 4 个站点年降雨侵蚀力呈上升趋势以外,其余站点均呈现下降趋势,其中,流域西北部地区以及渭南地区下降速率最快,主要集中在临兆、华家岭和华山站点附近,其余地区的年降雨侵蚀力呈缓慢下降的变化趋势。究其原因,除极端降水对降雨侵蚀力的影响之外,主要原因在于渭河流域 1957—2014 年降雨量大幅度减少,降雨量的大小是影响降雨侵蚀力的主要因素,在西北地区降雨量呈减少趋势的大背景下,降雨对渭河流域土壤的侵蚀作用会有所减弱,但是由于渭河流域 70% 的面积为黄土地区,易遭受雨水的冲刷,因此,仍不能放松流域的水土保持与涵养工作。

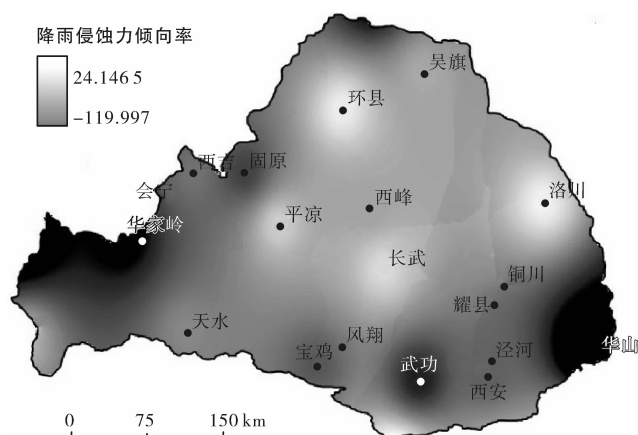


图 5 渭河流域降雨侵蚀力变化速率空间分布

3.4 降雨侵蚀力年内分布特征

由图 6 可以看出,流域年内降雨侵蚀力的分布特征与降雨量、侵蚀性降雨量基本一致,随季节变化明显,夏秋季节降雨侵蚀力较大,冬春季节较小,且均呈现单峰型,降雨侵蚀力在 7—8 月达到峰值,7—9 月的降雨侵蚀力占到了全年的 63.91%,而 12 月到次年 2 月这 3 个月的降雨侵蚀力总和仅占全年的 0.29%,可见降雪与融雪形式产生的降雨侵蚀力非常微弱,可以不计。另外,不同区域降雨的集中程度不同,使得降雨侵蚀力的集中程度也有差别,渭北黄土高原地区和关中地区 8 月份降雨侵蚀力最大,7—9 月分别占到全年降雨侵蚀力的 74.71% 和 65.99%,靠近秦岭北麓 7 月份降雨侵蚀力最大,7—9 月占全年降雨侵蚀力的 59.23%,而 5—10 月占到了 88.06%。以渭北环县站与秦岭北麓华山站为例,华

山站的降雨量和侵蚀性降雨量远远高于环县站,环县站峰值月(8 月)降雨侵蚀力占全年的 31.65%,而华山站峰值月(7 月)降雨侵蚀力仅占全年的 23.25%,由此可见,夏季降雨尤其是汛期极端降雨时导致降雨侵蚀力数值偏大的主要原因,渭北黄土高原地区降雨量偏少但降雨相对集中,使得发生水土流失的时期较为集中,其次是关中平原,秦岭北麓因降雨相对分散,5—10 月均可能发生较大的水土流失。

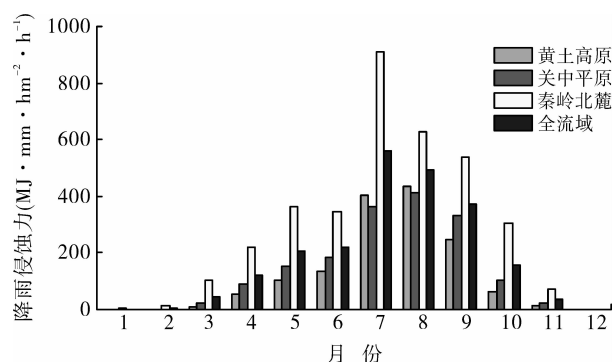


图 6 渭河流域 1957—2014 年降雨侵蚀力年内分配特征

4 结论

(1) 渭河流域多年平均降雨侵蚀力与侵蚀性降雨空间分布特征基本一致,其空间变化的总体趋势呈现西北低东南高。流域降雨侵蚀力多年平均值变化范围在 806~3 510 MJ·mm/(hm²·h) 之间,靠近秦岭北麓最高,关中次之,渭北黄土高原最低,降雨侵蚀危险性由西北向东南逐渐增大。

(2) 渭河流域降雨侵蚀力年际波动较大,年际变率在 34%~56% 之间,整体而言,流域西北部的降雨侵蚀力年际变率大于东南部区域,随着侵蚀性降雨量增大,降雨侵蚀力的年际变化幅度增大;除洛川、长武、平凉、环县 4 个站点降雨侵蚀力有增大外,其余气象站的降雨侵蚀力均呈现不同速率的减小趋势,表明 1957—2014 年研究区域降雨侵蚀力呈减弱态势,但渭河流域 70% 的面积处在黄土高原,易受雨水侵蚀,因此仍不能放松流域的水土保持与涵养工作。

(3) 渭河流域降雨侵蚀力主要集中在夏、秋两季,年内分布均呈现单峰型,峰值多出现在 7 和 8 月,与降雨和侵蚀性降雨分布相似。渭北黄土高原和关中平原大部分地区土流失主要发生在 7—9 月,造成水土流失的主要原因是降雨集中,而靠近秦岭地区从 5 月开始至 10 月,均有可能发生较大的水土流失,因该区域降雨量较大,且降雨相对分散。

(下转第 120 页)

三峡库区不同坡度石灰土坡耕地磷素流失特征

赵绍林, 李晔, 赵培培, 李波

(武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: [目的] 研究石灰土坡耕地在不同坡度下的磷素流失规律, 以期为三峡库区农业面源污染的防治和水资源保护提供基础数据。[方法] 在三峡库区香溪河流域坡耕地修建径流小区进行原位人工降雨试验, 在雨强 1.5 mm/min 时, 分析 10°, 15° 和 20° 这 3 种坡度下坡耕地的径流量、泥沙浓度, 以及地表径流中总磷、颗粒态磷, 泥沙中总磷、速效磷浓度的变化趋势, 并对径流泥沙进行无机磷分级试验。[结果] 坡度越大, 地表径流量、径流总量、泥沙流失量越大, 初始产流时间越短, 但坡度对径流中泥沙流失浓度的影响不显著; 不同坡度下径流中总磷(TP)、颗粒态磷(PP)浓度都随着产流时间逐渐变小最后趋于平衡, 其中径流中 TP 主要以 PP 形式流失, 达到 80% 以上; 泥沙中磷素流失主要以无机态磷为主, 无机磷分级试验表明被植物高效利用的有效态磷和缓效态磷占无机磷总量的 54.1%~57.8%。[结论] 坡度主要通过影响地表径流总量和径流携带的泥沙总量而影响磷素流失总量, 石灰土坡耕地磷素流失主要以径流泥沙携带为主。

关键词: 三峡库区; 石灰土; 坡度; 磷素; 无机磷分级

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0115-06

中图分类号: S157.2

文献参数: 赵绍林, 李晔, 赵培培, 等. 三峡库区不同坡度石灰土坡耕地磷素流失特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 115-120. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.019

Characteristics of Phosphorus Loss in Sloping Farmland of Limestone Soil Under Different Gradients in Three Gorges Reservoir Area

ZHAO Shaolin, LI Ye, ZHAO Peipei, LI Bo

(Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: [Objective] In order to provide basic data for the prevention of agricultural nonpoint source pollution and the protection of water resources in the Three Gorges Reservoir area, the phosphorus loss in regular lime slope farmland under different gradient was researched. [Methods] A sloping farmland in Xiangxi watershed of Three Gorges Reservoir area was selected and an artificial rainfall experiment with rainfall intensity of 1.5 mm/min was conducted. The variations in surface runoff, sediment concentration, total phosphorus(TP) concentration and other forms of inorganic phosphorus were studied. [Results] As the increase of slope, total runoff and sediment increased, whereas, the initial runoff time decreased. However, no significant impact on the sediment concentration was observed. As runoff continued, both TP and particulate phosphorus(PP) decreased and reached a steady concentration under all slope gradients. PP was the primary form of phosphorus loss, accounting for over 80% of that. The inorganic phosphorus suffered the most severe loss for the phosphorus loss of sediment. The inorganic phosphorus grading tests showed that effective phosphorus and slowly available phosphorus accounted for 54.1%~57.8% of the total amount of inorganic phosphorus. [Conclusion] Slope gradient influenced the phosphorus loss through the impacts on surface runoff and sediment loss. The phosphorus of sloping farmland of limestone soil was mainly removed with the sediment.

Keywords: Three Gorges Reservoir; limestone soils; slope; phosphorus; grading of inorganic phosphates

收稿日期: 2016-04-29

修回日期: 2016-06-06

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“库区小流域磷污染综合治理及水华控制研究与示范”(2012ZX07104-002)

第一作者: 赵绍林(1990—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染与水污染控制。E-mail: 18627737379@163.com。

通讯作者: 李晔(1963—), 男(汉族), 湖北省武汉市人, 博士, 教授, 主要从事水处理工程和固体废物资源化技术研究。E-mail: whly1218@126.com。

土壤为植物的生长提供必要的矿物质元素,其中磷素是植物生长发育不可或缺的营养元素之一,在植物根茎叶等不同部位均发挥重要的营养和生理作用^[1]。土壤中磷素以无机态磷为主,其含量占总磷的60%~80%,且无机态磷在土壤中的分布和转化将直接影响土壤有效磷的含量,不同形态磷素含量作为评价土壤有效磷库大小和土壤磷素供应能力的指标^[2],广泛用于研究不同管理措施下坡耕地土壤磷素的耗竭和分布情况。农民为了增产增收,大量施用磷肥,但由于施肥结构不合理、施肥方法不科学,导致坡耕地磷素流失严重。研究^[3-4]表明,当石灰性土壤中施用化学磷肥时,导致磷肥形成多种形态的难溶性磷酸盐而被固定,对农作物的吸收利用产生严重影响,致使当季施用的化学磷肥利用率大多不到20%。也有研究^[5]表明,长江等河流有60%~70%的泥沙源自坡耕地,说明长江等河流中的泥沙主要源自坡耕地的土壤侵蚀和水土流失。三峡库区香溪河流域山高坡陡,土层较为浅薄,在雨水充沛且多暴雨出现的条件下,水土流失非常严重^[6],致使大量未被植物吸收利用的氮磷营养元素随水土流失进入库区,经常引起库区水体发生富营养化,对周边水资源保护造成极大的威胁^[7]。长期以来,国内外学者^[8-9]针对红壤、黄棕壤、紫色土坡耕地的养分流失开展了大量研究,但针对石灰土坡耕地养分流失的研究相对较少,且通常以土壤中有效磷量为研究对象,而对径流泥沙中无机磷的形态分布研究较少。本研究在三峡库区湖北段最大支流香溪河流域坡耕地上修建径流小区,采用人工模拟降雨试验,查明地表径流产流和产沙,分析在大雨强时不同坡度下石灰土磷素流失规律,并进一步研究不同形态无机磷在径流泥沙中的流失关系。以期三峡库区农业面源污染的防治和水资源保护提供基础数据,从源头控制石灰土坡耕地磷素流失和治理水体富营养化提供科学参考,并对农业的可持续发展和农作物肥料的高效利用提出建设性意见。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及试验点布设

香溪河流域为三峡库区湖北省境内的最大支流,地形地貌为丘陵低山区,流域内坡度小于15°的土地面积占18.3%,大于25°占51.2%,坡耕地为当地农业种植的主要利用类型,且以石灰性土壤为主。该流域地处亚热带大陆性季风气候区^[11],年均降雨量900~1 200 mm,年平均气温16.8℃。本试验地点位于三峡库区香溪河流域兴山县峡口镇建阳坪村陈家湾内(31°7'22"N,110°47'60"E)。由于流域内地形坡度较大,该地区农民多采用坡改梯的种植模式,使

当地大部分的农业用地坡度在10°~20°之间。本试验结合当地实际情况,在原始坡耕地上顺坡修建10°,15°和20°的径流小区,四周采用单砖浆砌抹面将小区封闭,防止雨水外渗及外来进水,单个小区面积为24 m²。空心砖地下埋深40 cm,地上20 cm,小区下方修筑集水池收集地表径流和泥沙。3个不同坡度的试验小区顺坡种植当地优势农作物大豆和花生,植被覆盖度均为45%~50%,土壤类型为石灰土,通过常规分析方法测定其理化性质^[12],得出土壤背景pH值为7.83,容重为1.35 g/cm³,有机质含量15.7 g/kg,全磷0.647 g/kg,有效磷19.9 g/kg。

1.2 试验材料与样品采集

2015年9月下旬,在小区内采用人工降雨器(BX-1型便携式野外降雨器)进行人工模拟降雨试验,降雨高度4.5 m,均匀系数不低于80%,降雨用水采用试验区自来水,经试验分析其理化性质与天然雨水相似,确保人工降雨特性接近自然降雨。

1.2.1 雨强设定 通过调查香溪河流域兴山县近5 a的降雨特征发现,降雨量小于10 mm的天数约占降雨总天数的76.86%,而降雨量仅占总量的17.80%;降雨量大于30 mm的天数占降雨总天数的10.75%,但对降雨总量的贡献却高达58.76%,表明该流域降雨类型主要以长期小雨强为主,但短期暴雨普遍存在,是非点源输出的高发时期。为了更好地模拟暴雨对坡耕地的侵蚀作用,本研究降雨强度(雨强)定为1.5 mm/min,符合香溪河流域降雨集中、雨量大的实际情况。模拟试验前检测降雨状况,当均匀度和降雨强度符合标准时开始试验。

1.2.2 样品采集 模拟降雨开始后,记录地表径流产流时间,当集水池中有地表径流产生时开始计时取样,前10 min每1 min取1个样,10~30 min每2 min取1个样,30~60 min每3 min取1个样,共30个样。由于收集到的泥沙量少不便于后续试验,将每5个泥沙样混合成1个样。每场降雨持续60 min,在坡上、坡中、坡下3个位置分别采集降雨前后的土壤样品。降雨结束后,将每个收集桶中的径流和泥沙充分搅匀,取50 ml样品测定其泥沙浓度,剩余样品沉淀30 min后,用量筒取水样约120 ml,加少许硫酸,酸化至pH值小于2.0,然后在4℃下密封冷藏,以备后续试验分析。

1.2.3 样品分析 参照蒋柏璠等对土壤无机磷的分级方法^[13],分别测定Ca₂-P, Ca₈-P, Al-P, Fe-P, O-P(闭蓄态磷)和Ca₁₀-P在径流泥沙中的含量;根据《土壤农业化学分析》中的常规法分别测定泥沙中有机质、全磷和速效磷含量^[12];采用国标法测定径流中的总磷和颗粒态磷含量。

2 结果与讨论

2.1 不同坡度下坡耕地水沙流失特征

人工模拟降雨试验中,当单位时间内的降水量高于土壤的渗透量时,坡面开始有径流产生,表层疏松土壤在径流的裹挟作用下向坡下迁移,从而出现水土流失现象。

已有大量文献研究了降雨量和土壤产流产沙的关系,均表明相同雨强条件下,径流量随坡度的变化是一个复杂的过程,坡面土壤的类型、植物覆盖率、生物量及有效承雨量等因素都对地表径流量产生一定影响^[14]。

本次研究发现在大雨强(1.5 mm/min)条件下,石灰土坡耕地在不同坡度下的产流和产沙规律如图 1 所示。由图 1 可以看出,不同坡度下径流量随时间的

变化趋势基本相同,产流初期均呈现逐步上升趋势,在 40 min 左右均趋于稳定。但不同坡度下的降雨径流产流和产沙特征也存在着较大的差异,由表 1 可以看出,20°坡耕地的径流量是 15°,10°的 1.13 和 1.64 倍,泥沙流失量是 15°,10°的 1.12 和 1.63 倍。不同坡度径流中泥沙浓度的变化趋势如图 1 所示,随着降雨时间的持续,径流携带表层疏松土壤向坡下迁移,土壤入渗量逐渐稳定,侵蚀强度逐渐减小,导致泥沙浓度降低^[15]。

对 3 种坡度下的径流量、径流泥沙浓度与产流时间进行非线性拟合,结果发现径流量与产流时间呈现指数关系,相关系数均高于 0.94;径流泥沙浓度与产流时间呈现对数关系,且相关系数均高于 0.83,说明这些拟合方程具有较高的可靠性,且显著性检验值 p 均小于 0.001(表 1)。

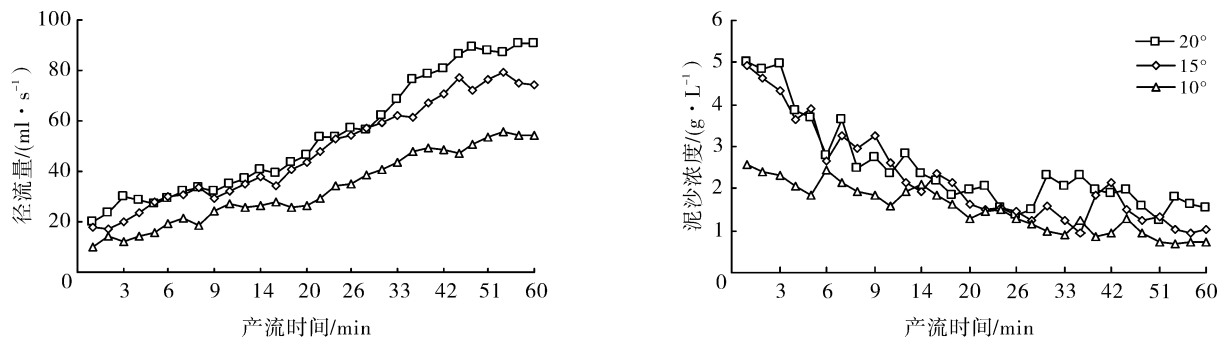


图 1 不同坡度下地表径流产流与产沙过程变化

试验过程中观察地表径流发现,当坡度较大时,在植物的空隙区间会产生明显的细沟侵蚀现象,说明植物对径流的产生有一定的截留效果,且坡度越小,植物对径流阻滞的效果越明显,10°小区内初始产流时间为 11 min 左右,而在 15°和 20°小区内,径流产生时间分别为 7 和 5 min,同样,降雨结束后,尾流时间还是以 10°小区最长,这与张小娜等^[16]采用室内人工模拟降雨试验所得结论一致。

植物通过接纳和减缓降雨对坡面的冲击,将垂直

方向上的径流重新分配,同时,径流沿植物根系入渗至土壤深处,从而提高雨水入渗量。不同坡度石灰土坡耕地产流产沙特征存在明显差异,雨强相同时坡度越小,雨水降落到坡面的动能和势能相对较小,在坡面滞留时间越长,渗入地下的水量越大。因此,10°坡面相对 15°和 20°产生的径流量少;泥沙流失主要受雨滴对表层土壤的击打作用和径流的携带作用,坡度越小,雨滴在垂直方向上的分力越小,径流携带泥沙的能力弱,导致泥沙浓度降低。

表 1 不同坡度下径流量和泥沙浓度与产流时间的关系及特征

坡度/(°)	径流量 y 与产流时间 x		泥沙浓度 y 与产流时间 x		径流量/ ($L \cdot h^{-1}$)	泥沙流失量/ ($g \cdot h^{-1}$)
	拟合方程	相关系数 R^2	拟合方程	相关系数 R^2		
20°	$y=20.621e^{0.052x}$	0.988 3	$y=-1.365\ln x+6.023$	0.867 4	226.9	501.58
15°	$y=18.543e^{0.051x}$	0.955 6	$y=-1.514\ln x+6.174$	0.915 8	200.3	445.51
10°	$y=12.058e^{0.055x}$	0.945 9	$y=-0.730\ln x+3.414$	0.830 9	138.7	307.18

注:表中显著性检验 $p < 0.001$ 。

2.2 不同坡度坡耕地磷素流失特征

根据本次模拟降雨试验,磷素在不同坡度下的流失过程如图 2 所示。由图 2 可以看出,地表径流中总

磷(TP)浓度变化和径流量变化都呈现先下降后平缓的趋势,坡度不同,TP 浓度随产流时间的趋势变化无明显差异。随着产流时间的持续,吸附于表层土壤中的磷素在地表径流的冲刷和稀释作用下随径流向

坡底迁移,由于吸附解吸反应逐渐趋于平衡,径流量逐渐增大,导致径流中磷素浓度降低并趋于稳定。从土壤颗粒的角度分析,由于表层土壤长期受施肥的影响,含有大量可溶性磷,在降雨条件下,可溶性磷素易于从土壤中交换溶出,从而导致初始径流中磷素浓度较高,因此在初期出现浓度峰值,即存在初期冲刷效应^[17]。但是在径流产生 10 min 后,不同坡度坡耕地之间磷素流失浓度均趋于稳定,与王丽等^[18]的研究结果一致,但不同的是,王丽发现黑垆土的流失浓度峰值出现在径流产生后 3 min 左右,而本次研究得出磷素流失浓度峰值出现在初始产流处,导致此现象的原因可能是本次试验与王丽研究的土壤类型不同,相

比于黑垆土,磷素在石灰土中容易交换溶出,说明石灰土中磷素流失风险较高。

在 3 个坡度的径流中,颗粒态磷(PP)浓度均占到了 TP 浓度的 80% 以上,由此可见,磷养分在地表径流中的流失主要以颗粒态为主,这与大部分人的研究结果一致^[19]。通过对比不同坡度下磷素的流失量可以发现,在 20° 的条件下,TP 的累积流失浓度为 0.205 mg/L,而在 15° 和 10° 条件下分别为 0.180 和 0.161 mg/L,说明不同坡度对农田地表径流 TP 输出浓度有一定影响,坡度不同,雨水打击、分散、冲刷土壤颗粒的力度和产生的径流量不同,致使石灰土坡耕地中磷素流失浓度存在一定的差异。

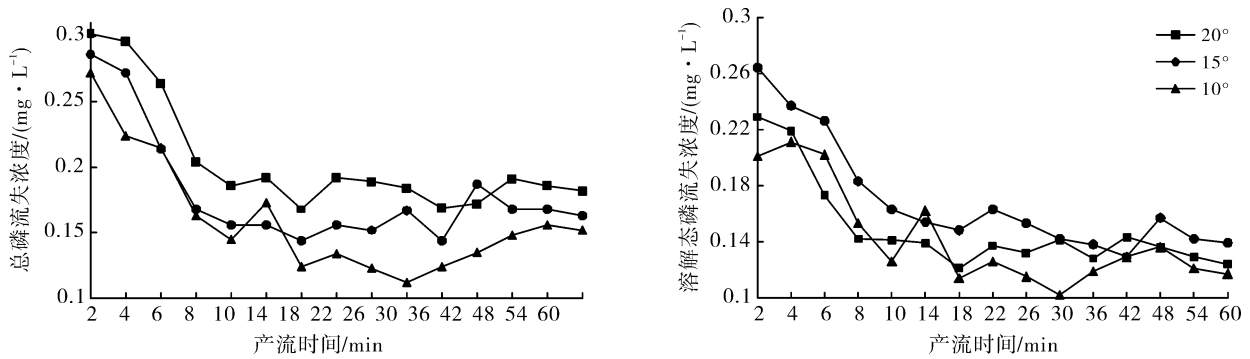


图 2 不同坡度下地表径流磷素流失过程

2.3 不同坡度石灰土坡耕地径流泥沙中磷素流失特征

根据本次模拟降雨试验,径流泥沙中磷素在不同坡度下的流失特征如图 3 所示。

由图 3 可以看出,随着降雨的持续,坡度对泥沙中总磷的流失浓度影响并不显著,只有在 20° 坡面下速效磷浓度的波动较大,表明石灰性土壤中的磷素易被固定,不易被解析。

原因可能是磷素在土壤中的分散比较均匀,泥沙的流失大都以细颗粒的形式被雨水冲刷,因此泥沙中的磷素浓度差异不大,但坡度与泥沙流失总量成正比

关系,从而影响土壤中磷素的流失总量,坡度越大,石灰性土壤中的磷素流失总量越大。因此在水土流失过程中,磷素是以泥沙为载体、径流冲刷为动力的形式流失。

比较磷素在径流和泥沙中的流失量发现,泥沙中磷素流失量占磷素流失总量的 85% 以上,即泥沙流失是引起土壤磷素流失的主要原因,这与傅涛等^[20]关于紫色土的研究结论一致,说明石灰土和紫色土中磷素在降雨过程中的流失形式相同。但本研究结果还表明,当雨强较大、坡度较小时,磷素在石灰土坡耕地径流中的流失量也不容忽视。

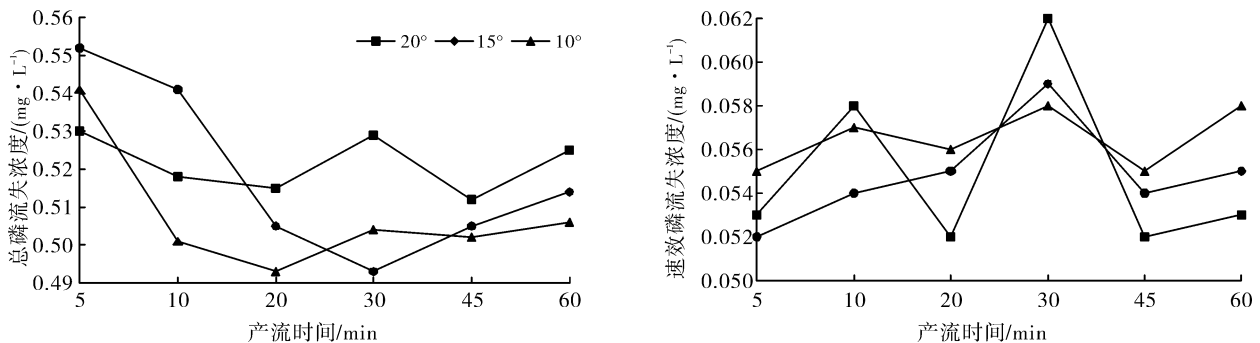


图 3 不同坡度下泥沙中磷素流失过程

2.4 各种形态无机磷在泥沙中的分布特征

一般大多以土壤中速效磷的含量判别土壤的供磷能力,通过对速效磷与不同形态无机磷进行相关性分析,可以得出不同形态无机磷对植物的有效性。杜伟等^[3]的研究结果表明,石灰性土壤中速效磷与无机磷库中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 呈高度线性正相关 ($p < 0.05$),相关系数分别达到 0.988 8 和 0.986 7,而与 Al-P , Fe-P , O-P , $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的相关性不显著,说明 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 对石灰性土壤中的速效磷贡献最大。通过本次降雨试验,径流泥沙中不同形态无机磷的分布特征如图 4 所示,分析表明,随着径流时间的持续,各种形态无机磷浓度均存在一定的波动,但幅度并不显著。泥沙中不同形态无机磷浓度存在较大差异,大致表现为: $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Al-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。径流泥沙中无机磷含量占总磷含量的 73.6%~80.6%,且 20° , 15° , 10° 坡面下占比分别为 77.9%, 76.9% 和 75.6%,说明在径流泥沙中流失的磷素主要以无机态为主。蒋柏藩等^[12]关于石灰性土壤中无机磷有效性的研究表明, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 是植物的有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$, Al-P , Fe-P 是缓效磷源, O-P , $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 被作物利用的有效性很低,为潜在磷源。分析径流泥沙中不同形态无机磷的流失特征发现,其中有效磷源和缓效磷源的流失比例占无机磷总量的 54.1%~57.8%,也解释了中国三峡库区周边坡耕地施肥量大且利用率低的原因,因为在暴雨导致的水土流失过程中,易被植物吸收利用的有效磷源随径流泥沙大量流失,农民为了保证土壤的供磷能力,大量的施用化肥,其中大部分无效态的磷素在泥沙的裹挟作用下,进入附近水体,加大面源污染。因此在以后的施肥管理中应加大有机磷肥的施用比例,这样既能提高植物对磷肥的利用率,又可以从源头控制周边水体的磷污染。

3 结论

(1) 石灰土坡耕地在大雨强条件下,随着坡度的增大,初始产流时间越短,径流量和泥沙量越大,在 $15^\circ \sim 20^\circ$ 坡面下,坡度与径流量之间的关系存在一个转折点。不同坡度下,径流量与产流时间均呈现指数关系,径流泥沙浓度与产流时间均呈现对数关系,且相关性均较高。

(2) 坡度通过影响产流量和产沙量进而影响磷素的流失总量,在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 范围内,石灰性坡耕地中坡度与磷素流失总量呈正比,但不同坡度径流和泥沙中的磷素流失浓度无显著差异。

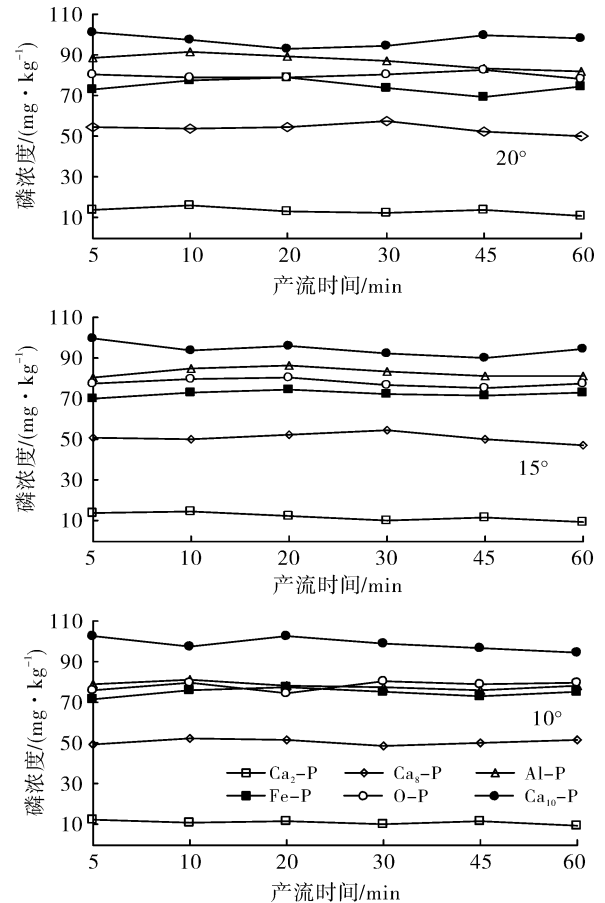


图 4 不同坡度下各种形态无机磷流失过程

(3) 石灰土坡耕地中磷素流失在径流中以颗粒态磷为主,在泥沙中以无机态磷为主,且不同坡度无显著性差异,磷素因泥沙携带的流失量占流失总量的 80% 以上。

(4) 径流泥沙中不同形态无机磷的流失浓度受坡度影响较弱,其中对石灰性土壤中速效磷贡献最大、农作物利用率最高的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 与 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 占 TP 流失总量的 11.8%~13.1%,无机磷库中缓效态磷和无效态磷在 TP 流失总量中的占比很大,是导致库区磷素贫瘠的主要原因。泥沙中不同形态无机磷浓度大小关系为: $\text{Ca}_{10}\text{-P} > \text{Al-P} > \text{O-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Ca}_2\text{-P}$ 。

[参 考 文 献]

- [1] 宋占午. 植物生理学中几个概念之我见[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(2): 142-144.
- [2] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, et al. A simplified, sequential, phosphorus fractionation method [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(11/14): 1981-1991.
- [3] 杜伟, 赵秉强, 林治安, 等. 有机复混磷肥对石灰性土壤无机磷形态组成及其变化的影响[J]. 植物营养与肥料

- 学报, 2011, 17(6): 1388-1394.
- [4] 陈倩, 穆环珍, 黄衍初, 等. 木质素对土壤磷素形态转化及对磷有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 745-748.
- [5] Douglas C L, King K A, Zuzel J F. Nitrogen and phosphorous in surface runoff and sediment from a wheat-pea rotation in northeastern Oregon[J]. Journal of Environment Quality, 1998, 27(5): 1170-1177.
- [6] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 49-55.
- [7] Fageria N K, Wright V C B R J. Aluminum toxicity in crop plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 1988, 11(3): 303-319.
- [8] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 30-32.
- [9] 焦平金, 许迪, 王少丽, 等. 自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 534-540.
- [10] 陈正维, 朱波, 刘兴安, 等. 不同坡度下紫色土坡耕地径流与氮素流失特征[J]. 中国农村水利水电, 2014(10): 68-72.
- [11] 陈玲, 刘德富, 宋林旭, 等. 香溪河流域坡耕地人工降雨条件下土壤氮素流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(6): 616-621.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [13] 蒋柏藩, 顾益初. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990(2): 101-102.
- [14] 陈俊杰, 孙莉英, 刘俊体, 等. 不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2): 1-5.
- [15] 马琨, 王兆骞, 陈欣, 等. 不同雨强条件下红壤坡地养分流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 16-19.
- [16] 张小娜, 冯杰, 高永波, 等. 不同雨强条件下坡度对坡地径流及溶质运移的影响[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 119-123.
- [17] 李振炜, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1152-1158.
- [18] 王丽, 王力, 王全九. 不同坡度坡耕地土壤氮磷的流失与迁移过程[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 69-75.
- [19] 杨丽霞, 杨桂山, 苑韶峰, 等. 不同雨强条件下太湖流域典型蔬菜地土壤磷素的径流特征[J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1763-1769.
- [20] 傅涛, 倪九派, 魏朝富, 等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74, 101.
- [21] 丁怀香, 宇万太. 土壤无机磷分级及生物有效性研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 681-685.

(上接第 114 页)

[参 考 文 献]

- [1] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 245-255.
- [2] 赖成光, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 珠江流域 1960—2010 年降雨侵蚀力时空变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159-167.
- [3] 胡琳, 苏静, 桑永枝, 等. 陕西省降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(6): 1101-1107.
- [4] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a Universal Soil Loss Equation[J]. Soil Science Society Proceedings, 1959, 23(3): 246-249.
- [5] 王万中, 焦菊英, 郝小品. 中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布 II [J]. 水土保持学报, 1996, 2(1): 29-39.
- [6] 吴德勇, 张新. 陇东地区降雨侵蚀力时空变化特征分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(6): 1-7.
- [7] 穆兴民, 戴海伦, 高鹏, 等. 陕北黄土高原降雨侵蚀力时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 37-43.
- [8] 刘梅, 魏加华, 王峰. 渭河流域降水时空变化与干旱特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 22-27.
- [9] 马明卫, 宋松柏. 渭河流域干旱指标空间分布研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 681-691.
- [10] 谢元, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [11] 朱明勇, 谭淑端, 张全发. 近 60a 汉江流域侵蚀性降雨的时空变化特征[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1544-1549.
- [12] 章文波, 谢元, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [13] 张家其, 龚箭, 吴宜进. 基于日降雨数据的湖北省降雨侵蚀力初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 274-280.
- [14] 陈东东, 程路, 栗晓玮, 等. 基于地统计学的四川省降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(1): 206-213.
- [15] 刘春利, 勤科, 谢红霞. 延河流域降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 850-857.
- [16] 汤国安, 杨昕. 地理信息系统空间分析试验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.