

降雨对不同水土保持措施坡面产流产沙及土壤养分流失的影响

唐朝¹, 罗欢², 马晓清³, 赵辛雪¹, 国铭⁴

(1. 北京市密云区水土保持工作站, 北京 101500; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083;
3. 北京市密云水库管理处, 北京 101500; 4. 北京市延庆区水土保持管理站, 北京 102100)

摘要:以石匣小流域作为研究区域,分析 2013—2022 年坡耕地、鱼鳞坑、人工植草 3 种水土保持措施径流小区与对照裸地无水土保持措施径流小区的观测数据,探究降雨对不同水土保持措施径流小区产流产沙量和土壤养分流失量的影响,结果表明:①次降雨径流深与降雨量成正相关关系,不同水土保持措施径流小区的减流效果从高到低依次为人工植草、鱼鳞坑、坡耕地、裸地。②次降雨产沙量与降雨量成正相关关系,不同水土保持措施径流小区的减沙效果由高到低依次为鱼鳞坑、人工植草、坡耕地、裸地;对照裸地来看,坡耕地的产沙量明显减小,人工植草和鱼鳞坑径流小区则几乎不产沙。③在大雨强条件下,除降雨Ⅱ时 TP 流失量人工植草大于坡耕地外,不同水土保持措施径流小区对总氮(TN)、总磷(TP)流失量的削减作用由强到弱依次为鱼鳞坑、人工植草、坡耕地、裸地;在小雨强条件下,鱼鳞坑和人工植草径流小区的 TN、TP 流失量比裸地径流小区显著减小,坡耕地径流小区的 TN、TP 流失量比裸地径流小区还大。

关键词:降雨;土壤养分;产流产沙;水土保持措施;径流小区;石匣小流域

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-0941.2025.07.013

引用格式: 唐朝,罗欢,马晓清,等.降雨对不同水土保持措施坡面产流产沙及土壤养分流失的影响[J].中国水土保持,2025(7):40-44,59.

水土流失和面源污染是人类面临的重大环境问题之一,严重的水土流失和面源污染威胁着社会经济的可持续发展和人民群众的生产生活安全。北方土石山区是我国水土流失和面源污染高发区域之一^[1]。根据 2020 年的相关数据,北方土石山区水土流失总面积为 16.3 万 km²,约占全区土地总面积的 20% 以上^[2]。密云水库作为北京市不可或缺的地表饮用水水源地,其水质状况直接关系到首都居民的生活品质与健康福祉^[3]。

针对水土流失与面源污染的严峻问题,急需采取有效的水土保持措施^[4]。学者们深入研究了不同类型水土保持措施在控制水土流失和调节产流产沙方面的效果。欧会迪等^[5]通过对太行山南麓坡面产流特征的研究发现,与自然荒坡相比,鱼鳞坑坡面草本群落、灌木群落、乔木群落的平均径流深分别减少了 56.61%、72.80%、39.58%。路炳军等^[6]通过对坡面监测小区观测发现,在密云水库的几次大规模降雨条件下,相比裸地小区,有水土保持措施小区的总磷(TP)、总氮(TN)流失量平均值分别减少了 39.6%、27.5%。杜映妮等^[7]对丹江口库区典型生态修复小流域进行了研究,结果发现随着降雨量增大,植物措施的减流减沙效益逐渐降低,说明降雨是影响水土流失的重要因素之一,会直接影响水土保持措施的效益

发挥。

因此,本研究以密云水库上游的石匣小流域为研究区,选取裸地、坡耕地、人工植草、鱼鳞坑 4 种径流小区,通过分析 2013—2022 年观测数据,探究降雨对不同水土保持措施径流小区产流产沙量和土壤养分流失量的影响,分析不同水土保持措施的防治效果,以为北方土石山区水土流失治理工作提供理论依据和决策支持。

1 研究区概况

石匣小流域地处北京市密云水库东北部(北纬 40°32'42"~40°37'30",东经 117°00'34"~117°06'49"),地势整体北高南低,海拔为 130~390 m;属于暖温带大陆性季风气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雨,小流域内不同地点年均降水量为 300~700 mm;土壤类型为由冲积、洪积母质发育而成的褐土,基岩种类基本为花岗岩,总体质地为轻壤土,土层结构整体比较稳固紧实,土壤颗粒间的缝隙较小,土层相对较薄。

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230714)

第一作者: 唐朝(1985—),男,北京人,工程师,学士,主要从事水土保持工作。

通信作者: 罗欢(2000—),女,四川内江人,硕士研究生,主要研究方向为水土保持。

E-mail: luohuan_22@163.com

2 研究方法

2.1 径流小区布设

为探究不同水土保持措施抑制产流产沙和防治土壤氮磷养分流失的实际效果,在石匣小流域内布设4个径流小区。4个径流小区统一设置为水平坡长10 m、宽度5 m、水平面积50 m²。在每个小区下方布设9个高度为0.8 m的分流孔,其下放置横断面面积1.13 m²的分流桶;集流槽设置在小区坡面下缘,垂直于径流流向;此外,小区内还设有径流桶。对2013—2022年4个小区的降雨量、径流量、产沙量,以及径流中总氮(TN)、总磷(TP)等土壤养分流失量进行连续观测和记录。4个小区基本信息见表1,其中1号小区作为对照组,是未采取任何水土保持措施的裸地;2号小区是种植玉米的坡耕地;3号小区种植苜蓿;4号小区内部设有多个长1.0 m、宽1.5 m的鱼鳞坑,种植树种为刺槐、侧柏。

表1 4个径流小区基本信息

径流小区	坡度/(°)	植被覆盖度/%	植被类型	详细信息
1号	14.4	0	无	裸地
2号	16.5	80	玉米	坡耕地
3号	19.0	80	苜蓿	人工植草
4号	17.1	80	刺槐、侧柏	鱼鳞坑

2.2 数据收集及处理

收集径流桶和分流桶的水量测得总径流量,径流量与径流小区面积的比值即为径流深。集流槽、径流桶和分流桶内泥沙的总质量即为径流小区产沙量。将径流样经沉淀、过滤后,分别采用流动注射-钼酸铵分光光度法、碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定清水样的TP、TN含量。降雨数据来自北京市密云区水土保持工作站,包含2013—2022年汛期(5—10月)的全部降雨数据(累计降雨451场),其中径流小区发生产流的降雨有100场,探究这100场降雨条件下不同水土保持措施径流小区的坡面产流产沙特征和土壤养分流失情况,进而研究坡面产流产沙量、土壤养分流失量与降雨量的相关性。减流率、减沙率的计算公式分别为

$$f_r = \frac{Q_a - Q_i}{Q_a} \times 100\% \quad (1)$$

$$f_s = \frac{S_a - S_i}{S_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中: f_r 为减流率; Q_a 为裸地对照径流小区的产流量,单位mm; Q_i 为不同水土保持措施径流小区的产流量,单位mm; $i=1,2,3$,分别对应坡耕地、人工植草、鱼鳞坑径流小区; f_s 为减沙率; S_a 为裸地对照径流小区的

产沙量,单位kg; S_i 为不同水土保持措施径流小区的产沙量,单位kg。

3 结果与分析

3.1 不同水土保持措施径流小区汛期径流深

表2为2013—2022年汛期不同水土保持措施径流小区次降雨径流深。由表2可知,2013—2022年汛期4个径流小区次降雨产流的径流深平均值由大到小依次为裸地、坡耕地、鱼鳞坑、人工植草径流小区,可见不同水土保持措施均能够明显减少产流。其中,坡耕地径流小区径流深数据波动较明显,原因是汛期为农作物生长季,特别是在一年两季的耕作模式下,人为清理杂草、整地、翻耕播种等农事活动频繁,对地表扰动增多,对土壤表层扰动强度大,因此会出现个别差异数值。裸地径流小区地表无植被覆盖,降雨直接侵蚀地表并形成径流,而人工植草和鱼鳞坑径流小区较裸地径流小区具有明显的减小径流深的作用,主要原因是植被覆盖度较大,减少了雨水对地表的直接溅蚀,对径流的拦蓄作用也较为显著。

表2 2013—2022年汛期不同水土保持措施

径流小区	径流深/mm			减流率/%
	平均值	最大值	最小值	
1号	10.87	81.04	0.19	
2号	8.82	45.08	1.35	18.91
3号	3.12	5.21	0.49	61.27
4号	4.48	17.05	0.49	58.78

2013—2022年汛期不同水土保持措施径流小区平均次降雨径流深与降雨量见图1。由图1可知,与裸地径流小区相比,布设有水土保持措施的径流小区径流深明显较小,尤其是人工植草和鱼鳞坑在抑制产流方面效果显著,而坡耕地径流小区抑制产流的效果较差。

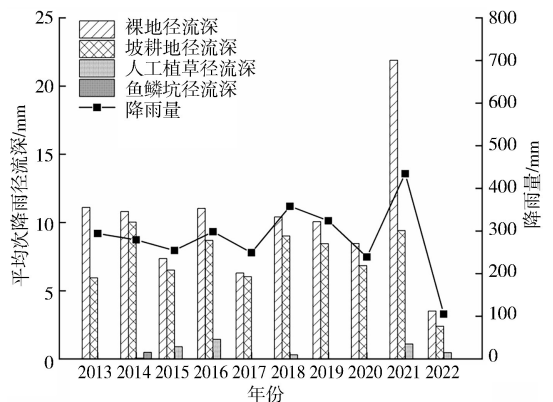


图1 2013—2022年汛期不同水土保持措施径流小区平均次降雨径流深和降雨量
选取30场典型侵蚀性降雨,对不同水土保持措施

径流小区次降雨径流深和降雨量的关系进行线性拟合,结果见图 2。线性回归方程的斜率越小,表明该径流小区产流量对降雨量的响应程度越低,减少水土流

失的效果越佳。由图 2 可知,抑制产流效果由强到弱依次为人工植草、鱼鳞坑、坡耕地、裸地径流小区。

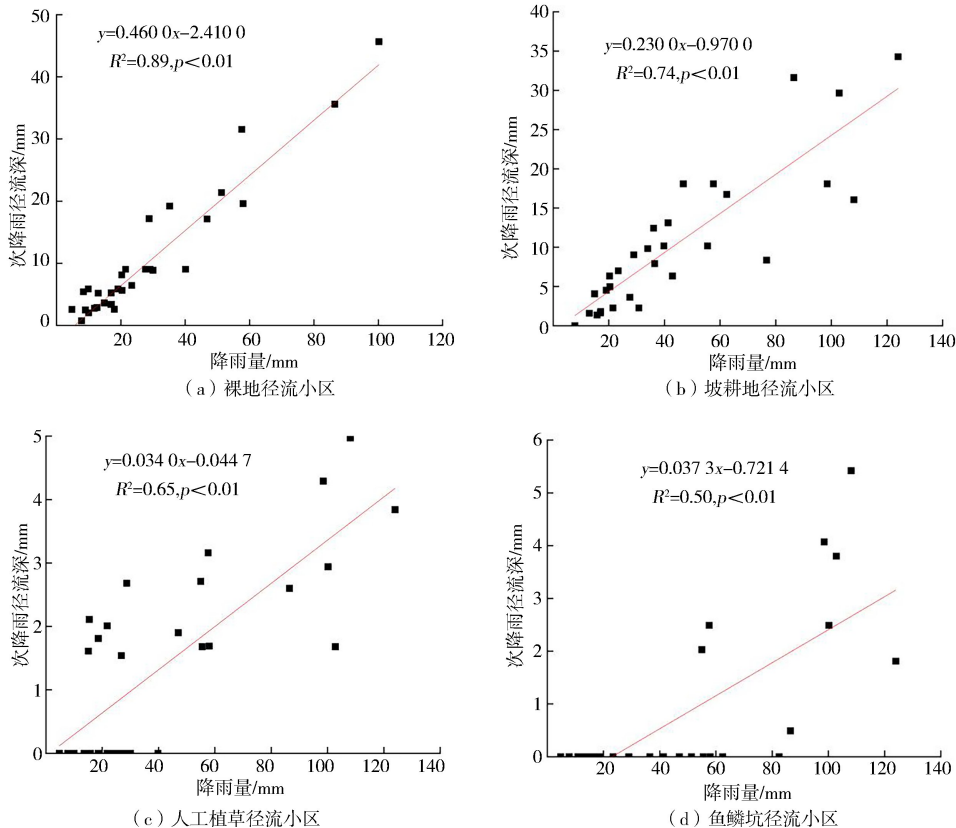


图 2 30 场典型侵蚀性降雨不同水土保持措施径流小区次降雨径流深和降雨量拟合结果

3.2 不同水土保持措施径流小区汛期产沙量

2013—2022 年 4 个径流小区次降雨产沙量变化见表 3。由表 3 可知,平均产沙量最大的为裸地径流小区,最小的为鱼鳞坑径流小区,平均产沙量分别为裸地径流小区 519.62 kg、坡耕地径流小区 311.98 kg、人工植草径流小区 4.71 kg、鱼鳞坑径流小区 3.37 kg;相比裸地径流小区,布设有水土保持措施的径流小区减沙率均较大,减沙率分别为坡耕地径流小区 39.96%、人工植草径流小区 99.09%、鱼鳞坑径流小区 99.35%。坡耕地径流小区的产沙量数值波动较大,且减沙效果没有人工植草和鱼鳞坑径流小区明显,减沙效果较人工植草和鱼鳞坑径流小区分别小 59.13、59.39 个百分点,但总体来说布设有水土保持措施的径

流小区产沙量均明显小于裸地径流小区,说明布设水土保持措施能够有效抑制泥沙的流失。

2013—2022 年汛期不同水土保持措施径流小区平均次降雨产沙量与降雨量见图 3。由图 3 可知,对照裸地径流小区,坡耕地径流小区的产沙量显著减小,人工植草和鱼鳞坑径流小区则产沙很少甚至不产沙。选取 30 场典型侵蚀性降雨,分别将裸地、坡耕地、人工

表 3 2013—2022 年汛期不同水土保持措施径流小区次降雨产沙量

径流小区	产沙量/kg			减沙率/%
	平均值	最大值/kg	最小值/kg	
1 号	519.62	2 665.20	1.27	
2 号	311.98	2 278.23	0.47	39.96
3 号	4.71	18.68	0.54	99.09
4 号	3.37	18.79	0.41	99.35

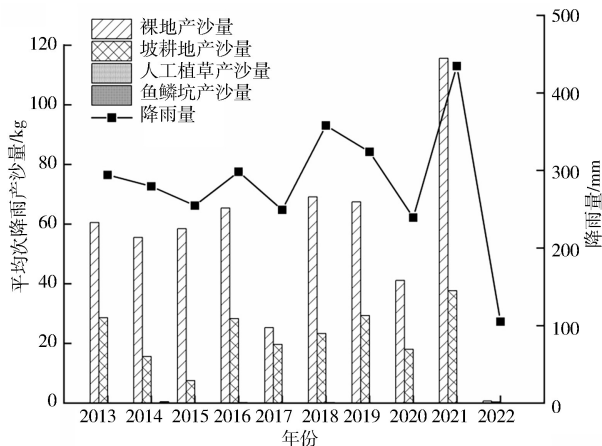


图 3 2013—2022 年汛期不同水土保持措施径流小区平均次降雨产沙量和降雨量

植草和鱼鳞坑径流小区次降雨产沙量与降雨量进行线性拟合,结果见图4。线性回归方程的斜率越小,说明产沙量随降雨量增大而增长的幅度越小,抑制产沙效

果越好,因此减沙效果从高到低依次为鱼鳞坑、人工植草、坡耕地、裸地径流小区。

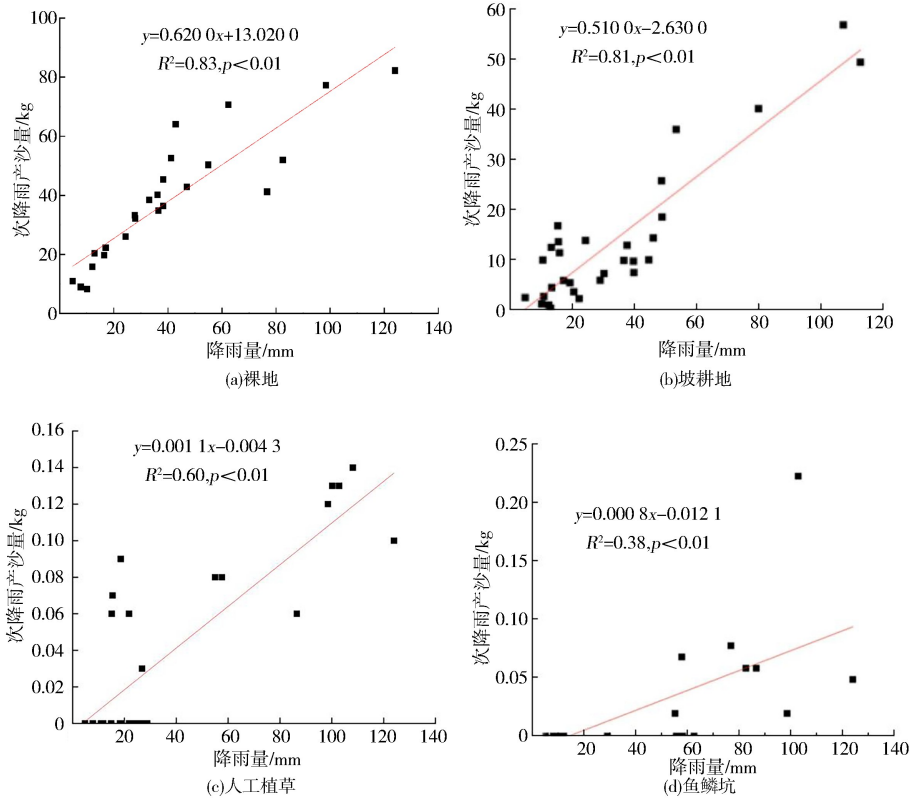


图4 30场典型侵蚀性降雨不同水土保持措施径流小区次降雨产沙量和降雨量拟合结果

3.3 不同水土保持措施对土壤养分流失量的影响

选择TN、TP指标,反映不同水土保持措施配置模式对土壤养分随径流流失的控制作用。按照降雨量和雨强大小的分类标准,在2013—2022年汛期的100场降雨中选取4场不同类型的典型降雨,依次为:降雨I,大雨量、大雨强类型降雨;降雨II,小雨量、大雨强类型降雨;降雨III,大雨量、小雨强类型降雨;降雨IV,小雨量、小雨强类型降雨。4场典型降雨的基本信息见表4。

表4 4场典型降雨的基本信息

降雨类型	降雨日期	降雨历时/min	降雨量/mm	雨强/(mm/h)
I	2021-07-26	732	100.2	8.21
II	2018-08-12	440	55.0	7.50
III	2021-07-12	1 917	124.0	3.88
VI	2018-08-11	700	29.1	2.49

4场降雨条件下不同水土保持措施径流小区地表径流中TN、TP流失量变化情况见图5。由图5可知,不同类型降雨条件下,不同水土保持措施径流小区地表径流中TN、TP流失量有明显差异。由图5(a)、图5(b)可以看出,在大雨强条件下,除降雨II时TP流失

量人工植草大于坡耕地外,不同水土保持措施径流小区地表径流中TN、TP流失量削减效果均表现为鱼鳞坑>人工植草>坡耕地>裸地径流小区。由图5(c)、图5(d)可以看出,在小雨强条件下,鱼鳞坑和人工植草径流小区地表径流中TN、TP流失量较裸地径流小区明显减小,但坡耕地径流小区的TN、TP流失量比裸地径流小区还要多,其原因可能是小雨强条件下发生的主要为蓄满产流,降雨到达土层深处,而农作物生长季的施肥、翻地导致地表土壤松散,使得TN、TP更易流失。

4 讨论

选取坡耕地、人工植草和鱼鳞坑3种水土保持措施,以及裸地作为无水土保持措施的对照组,基于2013—2022年监测数据,深入分析不同水土保持措施对产流产沙及养分流失量的影响,结果表明:鱼鳞坑具有截断径流、汇集径流、改变径流轨迹等作用,坡面径流被鱼鳞坑汇集,减轻了对坡面的冲刷,从而达到蓄水减流、保土保肥的作用;人工植草可以截留降雨、降低雨滴动能、减缓径流产生、增大入渗,同时植物根系能

增强土壤抗冲性,从而有效减少产流产沙;坡耕地虽然受人为活动影响剧烈,减流减沙效益相比其他水保措

施差,但是相比裸地仍具有一定的减流减沙效益。具体来说,在减流方面,相比裸地,3 种水土保持措施小

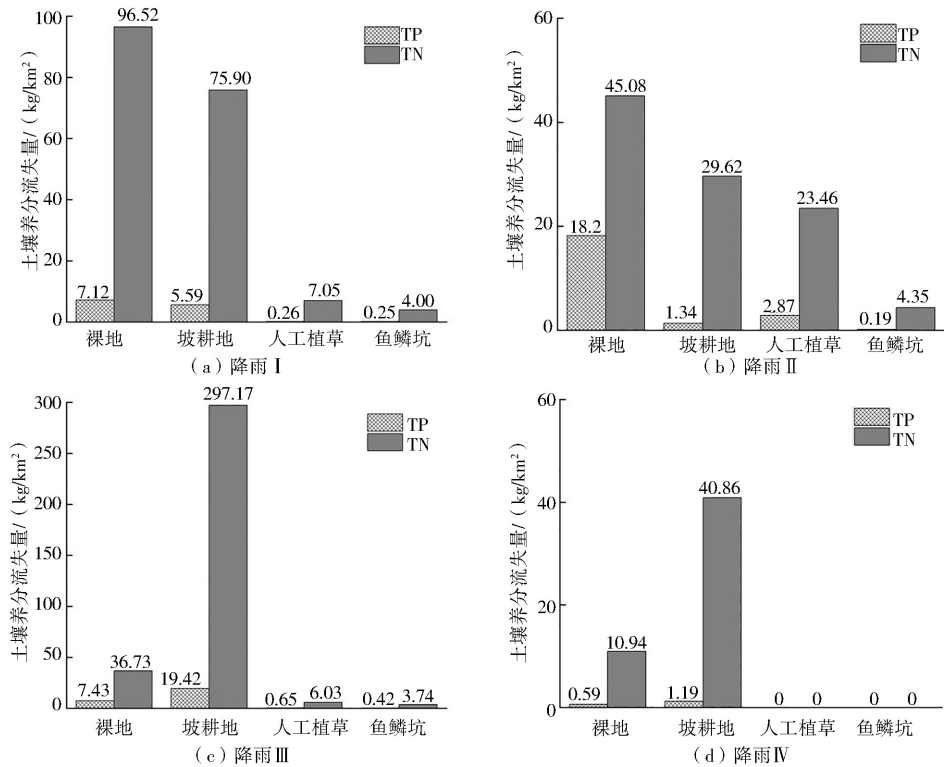


图 5 4 种降雨条件下不同水土保持措施径流小区地表径流 TN、TP 流失量

区的径流深都有不同程度的降低,结合减流率可以发现,3 种水土保持措施的减流效果为人工植草>鱼鳞坑>坡耕地。在减沙方面,相比裸地,3 种水土保持措施的产沙量均明显降低,减沙率较大,能够有效抑制泥沙输出,其中人工植草与鱼鳞坑减沙效果较好,人工植草产沙量略高于鱼鳞坑,而坡耕地减沙效益较低,这与前人研究结果类似^[8-11]。降雨是引起水土流失的直接原因,相比雨强、降雨历时,降雨量对径流、泥沙量的影响更大^[12]。在减少土壤养分流失方面,不同雨强条件下,人工植草和鱼鳞坑均能明显减少 TP、TN 流失量,但坡耕地的削减作用较小,说明水土保持措施能够有效减少土壤养分流失,使水源得到有效保护,只是坡耕地的削减效果并不显著。

在自然条件下,除了降雨和水土保持措施,影响坡面产流产沙的因素还有很多,因此在实际治理工作中需要综合考虑多种因素。考虑到本研究分析的水土保持措施较为单一,没有对不同措施组合的水土保持效果进行研究,今后应在这些方面改进试验设计,以期能为研究区的水土保持工作提供更加科学、完善的理论支撑。

5 结论

1) 不同水土保持措施的减流效果从高到低依次

为人工植草、鱼鳞坑、坡耕地和裸地,人工植草和鱼鳞坑抑制径流过程的作用强于坡耕地。次降雨径流深与降雨量成正相关关系。

2) 不同水土保持措施减沙效果从高到低依次为鱼鳞坑、人工植草、坡耕地、裸地,相比裸地,坡耕地的产沙量显著减小,人工植草和鱼鳞坑则产沙很少甚至不产沙。次降雨产沙量与降雨量成正相关关系。

3) 在大雨强条件下,除降雨 II 时 TP 流失量人工植草大于坡耕地外,不同水土保持措施径流小区对 TN、TP 流失量削减作用由强到弱依次为鱼鳞坑、人工植草、坡耕地、裸地。在小雨强条件下,鱼鳞坑和人工植草的 TN、TP 流失量较裸地显著减小,而坡耕地的 TN、TP 流失量比裸地还大。

参考文献:

- [1] 计保权. 兴城朱家小流域水土流失成因及防治策略[J]. 水土保持应用技术, 2022(1): 41-42.
- [2] 孙天妙, 曹建生, 阳辉, 等. 北方土石山区水土流失治理现状与展望[J]. 防护林科技, 2022(5): 56-61.
- [3] 王晓燕, 胡秋菊, 朱风云, 等. 密云水库流域降雨径流土壤中氮磷流失规律: 以石匣试验区为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2001, 22(2): 79-85.

(下转第 59 页)