

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.02.041; CSTR:32311.14.rswc.2025.02.041.

庞芳, 王娜, 梁致齐. 不同雨强、坡度和植被覆盖对密云库区坡地产流及磷流失的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 122-130, 139.

Pang Fang, Wang Na, Liang Zhiqi. Effects of different rainfall intensities and slope gradients on runoff and phosphorus losses on sloping lands in Miyun Reservoir Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 122-130, 139.

不同雨强、坡度和植被覆盖对密云库区 坡地产流及磷流失的影响

庞芳^{1,3}, 王娜³, 梁致齐^{2,3}

(1.邯郸市生态环境局峰峰矿区分局, 河北 邯郸 056000;

2.保定泽农环境技术有限公司, 河北 保定 071000; 3.河北农业大学 资源与环境学院, 河北 保定 071000)

摘要: [目的]磷是造成密云库区水体富营养化的主要因素,探索密云库区坡地产流和磷流失特征,为密云库区水体富营养化污染防控提供数据支撑和理论依据。[方法]采用室内人工模拟降雨试验,研究了在不同降雨强度(40 mm/h, 60 mm/h 和 80 mm/h)、坡度(5°, 10° 和 15°)和不同覆盖条件下(裸地和苜蓿)地表径流和壤中流的产流特征以及磷随径流流失的规律。[结果]不同覆盖条件下地表径流和壤中流初始产流时间随降雨强度和坡度的增大而提前;不同覆盖条件下地表径流和壤中流产流速率均随降雨强度的增大而增大;同一降雨强度下,裸地壤中流和苜蓿地表径流产流速率随坡度表现为 5° > 15° > 10°。不同覆盖条件下地表径流和壤中流总磷(TP)流失浓度随降雨强度的增大而增大,同一降雨强度下,两种覆盖条件下地表径流 TP 流失浓度均在 10° 坡达到最大,而壤中流 TP 流失浓度随坡度的增大而增大。不同覆盖条件下地表径流中 TP 流失量随降雨强度的增大而增大;同一降雨强度下,裸地地表径流 TP 流失量随坡度增大而增大,苜蓿条件下随坡度表现出 10° > 15° > 5° 的规律;苜蓿对径流中 TP 流失具有良好的阻控效果,阻控效率可达 61.17%。不同覆盖条件下,TP 随地表径流流失占总流失量的 53.76% 以上,相关性分析表明降雨强度为密云库区坡地产流及磷流失的主要影响因子。[结论]密云库区坡地产流及磷流失受降雨强度、坡度和植被覆盖的影响,降雨强度为主要影响因子,地表径流是磷流失的主要途径。

关键词: 模拟降雨; 坡地; 地表径流; 壤中流; 磷

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)02-0122-09

Effects of different rainfall intensities and slope gradients on runoff and phosphorus losses on sloping lands in Miyun Reservoir Area

Pang Fang^{1,3}, Wang Na³, Liang Zhiqi^{2,3}

(1.Branch Bureau of Fengfeng Mining Site, Handan Municipal Bureau of Ecology and Environment, Handan, Hebei 056000, China; 2.Baoding Zenong Environmental Technology Co., Ltd., Baoding, Hebei 071000, China; 3.College of Resources and Environment, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: [Objective] Phosphorus is the main factor causing eutrophication in Miyun Reservoir Area. The aims of this study are to explore the characteristics of runoff and phosphorus losses in sloping lands in Miyun Reservoir Area, and to provide data support and theoretical basis for the prevention and control of water eutrophication pollution in Miyun Reservoir Area. [Methods] Indoor artificial rainfall experiments were used to study the characteristics of surface runoff and subsurface runoff and the pattern of phosphorus loss with runoff under different rainfall intensities (40 mm/h, 60 mm/h and 80 mm/h), slope gradients (5°, 10° and

收稿日期: 2024-07-17

修回日期: 2024-10-16

接受日期: 2024-10-30

资助项目: 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所团队促进项目(ZHS202304); 北京市农林科学院青年基金(QNJJ2022014); 国家重点研发计划项目(2023YFD1500500)

第一作者: 庞芳(1979—), 女, 河北邯郸人, 高级工程师, 主要从事生态环境保护。E-mail: 13730051975@163.com

通信作者: 梁致齐(1992—), 男, 河北邯郸人, 工程师, 主要从事面源污染防治与治理研究。E-mail: 18730282116@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

15°) and different cover conditions (bare land and alfalfa). [Results] The initial runoff generation time of surface runoff and subsurface runoff under different cover conditions advanced with the increase of rainfall intensity and slope gradient. The surface runoff and subsurface runoff rates under different cover conditions increased with the increase of rainfall intensity. Under the same rainfall intensity, the runoff rate of bare land and alfalfa surface runoff decreased in the order: $5^{\circ} > 15^{\circ} > 10^{\circ}$ slope gradient. The total phosphorus (TP) loss concentration of surface runoff and subsurface runoff increased with the increase of rainfall intensity under different cover conditions, and the TP loss concentration of surface runoff under the same rainfall intensity reached the maximum at 10° under the same cover condition, while the TP loss concentration of subsurface runoff increased with the increase of slope gradient. The loss of TP in surface runoff under different cover conditions increased with the increase of rain intensity. Under the same rainfall intensity, the TP loss of surface runoff increased with the increase of slope gradient, and the TP loss of surface runoff under the condition of alfalfa decreased in the order: $10^{\circ} > 15^{\circ} > 5^{\circ}$ slope gradient. Alfalfa had a good inhibitory effect on TP loss in runoff, and the control efficiency could reach to 61.17%. Surface TP loss with surface runoff accounted for more than 53.76% of the total loss under different cover conditions. Correlation analysis showed that rainfall intensity was the main influencing factor on runoff and phosphorus loss on sloping land in Miyun Reservoir Area. [Conclusion] Sloping land runoff and phosphorus loss in Miyun Reservoir Area are affected by rainfall intensity, slope gradient and vegetation cover, and rainfall intensity is the main influencing factor, surface runoff is the main way of phosphorus loss.

Keywords: simulated rainfall; sloping land; surface runoff; subsurface runoff; phosphorus

土壤侵蚀是当今世界面临的重大环境问题之一,对全球生态系统的可持续发展构成了巨大威胁^[1]。土壤侵蚀不仅使土壤肥力降低,而且导致了水体富营养化^[2]。降雨是坡面产流的主要驱动因子^[3],其形成的地表径流和壤中流会使土壤中的磷随之发生损失。密云水库是北京市重要的地表饮用水源地,但其地形起伏较大,土层薄而浅,固土保水能力差,这使得该地区极易发生土壤侵蚀和水体富营养化。然而,目前针对密云库区坡地径流中携带磷流失的研究较少,尤其是地表径流和壤中流的时空分布对土壤磷流失过程的影响。

国内外研究表明,土壤养分流失受到众多环境因素的影响^[4-5]。降雨强度是影响径流和养分损失的重要因素之一。Wang 等^[6]发现,降雨动能是径流中物质流失的重要因子,其中,雨滴溅落是颗粒物运输的首要环节,且随降雨强度增大,径流量和侵蚀作用增加,磷的流失量也随之增大。Peng 等^[7]利用模拟降雨试验表明在喀斯特这种特殊的地貌中,只有当降雨强度大于 30 mm/h 时,才能产生地表径流,并且随着降雨强度和坡度的增加,径流中磷的浓度增加。坡度对土壤侵蚀的影响也很重要,但其作用是复杂的^[8]。邱业等^[9]通过模拟降雨试验表明,坡度越大,磷流失浓度越大,但当坡度增大到一定值时,磷流失浓度开始下降,这一坡度即为临界坡度。Mahmoodabadi 等^[10]探讨了降雨强度和坡度对土壤侵蚀的相互作用,并指出

坡度越大,降雨强度对土壤侵蚀的贡献越小。植被覆盖是防治土壤侵蚀的重要措施^[11],植被可以拦截雨水,从而减少土壤表层的雨水飞溅,植物根系可以促进土壤颗粒的聚集,茎可以增加土壤颗粒表面粗糙度,从而降低径流流速,促进渗透并增加颗粒物的沉积^[12]。研究表明,植被过滤带(VFS)可以显著减少径流中的沉积物和养分损失^[13]。Hou 等^[14]通过模拟降雨研究发现高羊茅草能有效减少地表径流、产沙量,降低悬浮物(SS)、总氮(TN)和总磷(TP)的损失,并且植被覆盖度越高,降低效果越好。

综上所述,目前对地表径流流失和磷迁移方面研究较为深入,但对壤中流水分运移及磷迁移规律的研究仍处在探索阶段,且关于植物覆盖、降雨强度、坡度这 3 个因子的组合研究很少。因此,本研究采用人工模拟降雨试验,在裸地和苜蓿两种条件下评估降雨强度和坡度对地表径流和壤中流中磷损失的影响以及它们之间的关系,以期为密云库区水体富营养化污染防治提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

试验土壤取自北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所面源污染定位试验站,位于北京市密云区太师屯镇($117^{\circ}6'42.08''\text{E}$, $40^{\circ}32'22.02''\text{N}$)。太师

屯镇坐落于密云区东北部水源保护区内,土壤以褐土为主,土壤 pH 为 6.33,有机质含量为 9.97 g/kg,总氮含量为 0.488 g/kg,速效磷含量为 4.55 g/kg,速效钾含量为 45.9 g/kg。采取土样之前,原状土的容重采用环刀法进行逐层测定,然后挖取土壤剖面,每个剖面按照 5 cm 为一个土壤层次分层采集装袋,共采集 10 层。根据野外土壤采样层次顺序向径流槽中对应填充,控制填土过程土壤密度保持一致,边填边压实。装填完成后,将径流槽静态放置 1 个月,利用环刀法测定径流槽内土层的容重,比较槽内土壤是否与野外土壤的自然状况相似,才能够展开人工模拟降雨试验。每次降雨前保持前期土壤含水率基本一致。

1.2 试验装置及材料

降雨设备采用西安清远测控技术有限公司研制的 QYJY-502 型便携式自动人工模拟降雨系统,该设备的降雨高度为 5 m,降雨均匀系数在 85% 以上,雨强连续变化范围为 20~150 mm/h。本试验采用两组径流槽,每组径流槽 3 个,径流槽尺寸为 2 m×0.5 m×0.6 m,坡度在 0°~30°内可以灵活调节。径流槽一端设置有边缘高 5 cm 的集水槽用于收集地表径流,径流槽中部、底部设置有集水管用于收集壤中流,装置示意图见图 1。

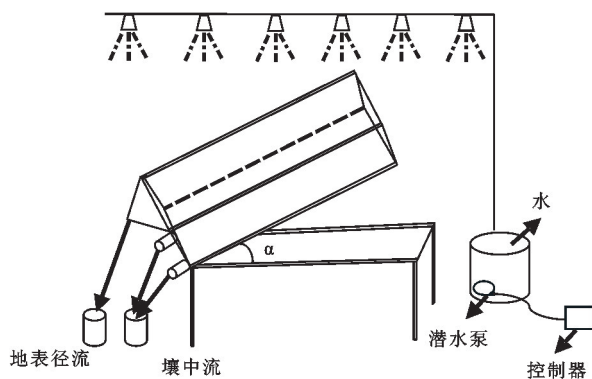


图 1 径流槽示意图

Fig. 1 Schematic diagram of runoff trough

1.3 试验设计

试验于 2022 年 6—10 月进行。选用多年生草本植物苜蓿 (*Medicago sativa*) 作为覆盖植物,它以“牧草之王”著称,不仅产量高,而且草质优良。苜蓿根系非常发达,常被作为水土保持先锋作物推广,且在密云区种植面积较大。坡度设置根据《中华人民共和国水利行业标准 (SL190-2007)》坡面面蚀强度分级指标,结合当地的实际地形条件,共设计 3 个坡度 (5°, 10° 和 15°)。通过分析密云区全年降雨数据,并根据当地降雨强度特征,设计 3 个降雨强度,分别为 40, 60, 80 mm/h。为了保证试验精度,每个处理均设置 3 次重复。地表径流和壤中流样品总收集时间为 90 min,每 5 min 采集 1

次样品,测定径流体积。样品在室温下放置 4~5 h,沉淀后取上清液用于养分含量测定,主要测定指标为总磷 (TP) (参照 GB11893-1989 的钼酸铵分光光度法),并保证所有试验在 48 h 内完成。

1.4 统计分析

使用 Excel 记录和处理数据,使用 Origin 2021 制图,利用 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 降雨强度与坡度对坡地初始产流时间的影响

在降雨前期,雨水以土壤表层渗透及土壤大孔隙填充为主,所以从降雨开始到径流产生有一个明显的滞后时间,即初始产流时间^[15]。受地形条件、土地利用方式等多种因素的影响,初始产流时间会发生变化,而明确该过程中的初始产流时间是土壤侵蚀估算的基础。由表 1 可以看出,对地表径流而言,在同一坡度条件下,裸地初始产流时间随降雨强度增大而提前,两者呈明显负相关,具体表现为 40>60>80 mm/h,这与张佳琪等^[16]的结论一致。以 5°坡为例,地表径流初始产流时间随降雨强度增大依次减小了 3.4 min 和 0.87 min,10°,15°坡也表现出相同的变化规律。但初始产流时间减小幅度随坡度增大而减弱,这是由于降雨强度增大,超出土壤入渗能力,导致产流时间提前^[17]。同一降雨强度条件下,裸地初始产流时间随坡度增大而提前,具体表现为 5°>10°>15°,这是因为坡度增加加速坡面汇流使得产流时间提前^[18]。苜蓿条件下的地表径流初始产流时间所表现出的规律与裸地一致,均随降雨强度和坡度的增加而减小。

裸地条件下壤中流与地表径流的初始产流时间呈现相同的规律,均随雨强和坡度的增大而提前,其主要原因是在同一坡度条件下,随着降雨强度的增大,在单位时间内,渗入土槽的降雨量越大,可使土壤迅速达到饱和状态,并有利于坡面产流和壤中流的产生^[19],而同一降雨条件下,坡度的增大加速了坡面的径流流速,增强了水势动能,导致裸地初始产流时间提前。苜蓿壤中流初始产流时间随降雨强度的增大而提前,但随坡度的增大随之推迟,表现为 15°>10°>5°,这是由于壤中流的产生受到土壤水分下渗的影响,苜蓿的存在会阻挡部分水分向下运移,当坡度增大受雨面积减小,土壤入渗速率减小,因此缓坡更有利于壤中流的产生,产流时间也随坡度的增大而推迟。两种覆盖条件下壤中流的初始产流时间均滞后于地表径流,这是由于当土壤水分含量达到饱和和才开始产生壤中流,且滞后时间呈现随雨强和坡度的增大而减小。

表 1 裸地和苜蓿在不同降雨强度、坡度条件下
地表径流与壤中流初始产流时间特征
Table 1 Temporal characteristics of surface runoff and
subsurface runoff of bare land and alfalfa under
different rainfall intensities and slope gradients

项目	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	坡度/ (°)	裸地初始 产流时间/min	苜蓿初始 产流时间/min
地表径流	40	5	6.23	7.64
		10	4.76	5.22
		15	3.00	5.12
	60	5	3.83	4.23
		10	1.75	3.14
		15	0.97	2.56
	80	5	1.96	3.13
		10	1.12	1.32
		15	0.24	1.05
壤中流	40	5	18.85	19.65
		10	14.42	24.87
		15	10.79	49.24
	60	5	13.33	14.54
		10	9.14	14.55
		15	7.55	18.54
	80	5	10.92	11.34
		10	8.65	11.72
		15	4.21	12.21

2.2 降雨强度与坡度对坡地产流的影响

由图 2 可以看出,降雨强度越大,裸地地表径流产流速率越大。与 40 mm/h 的降雨强度相比,在 15° 的坡度下,60 mm/h 和 80 mm/h 下的平均地表径流产流速率分别增加了 2.38 倍和 3.60 倍。同一降雨强度下,地表径流产流量随坡度增加而增加,以 60 mm/h 为例,5°,10°和 15°坡的平均地表径流产流量分别为 2.9, 3.2,3.6 L。王蕙等^[20]采用人工模拟降雨的方法研究发现,无论是无砾石红壤坡面还是嵌套砾石红壤坡面,其地表径流产流量均随坡度的增加而增大,这与本研究结果相同。这可能是由于坡度的减小显著增加了达到最大地表径流量的时间,同时减少了地表径流量。当坡度增加时,部分水的渗透性更强,并通过重力沿斜坡向下流动。如图 2 所示,裸地壤中流产流速率随着雨强增大而增大。同一降雨强度下,裸地壤中流产流速率表现为 5°>15°>10°,随着坡度的增加呈先上升后下降的趋势,这说明在 5°~10°之间存在临界坡度,与张兴奇等^[21]的研究结果一致。

苜蓿条件下地表径流和壤中流产流速率均随降雨强度的增加而增大,10°坡时,60 mm/h 和 80 mm/h 下

的地表径流产流速率最大分别达到 0.62 L/min 和 1.64 L/min,分别为 40 mm/h 的 3.31 倍和 6.63 倍。降雨强度相同时,苜蓿地表径流速率随坡度表现为 5°>15°>10°,与裸地表径流速率规律一致。而苜蓿壤中流速率在 60 mm/h 和 80 mm/h 下表现为随坡度的增大而减小,在 40 mm/h 雨强条件下表现为 10°>5°>15°。

2.3 降雨强度与坡度对坡地磷素流失浓度的影响

不同降雨强度、坡度下裸地和苜蓿地表径流和壤中流 TP 流失浓度随降雨时间的动态变化如图 3 所示。在不同降雨强度、坡度条件下裸地和苜蓿地表径流中 TP 流失浓度初期较大后期较小,且均随降雨时间呈现出先下降后趋于稳定的趋势,其原因是在径流初期,由于雨滴的拍打和冲刷,造成土壤破碎和迁移,导致颗粒磷含量迅速攀升,随着降雨历时的延长,径流中 TP 的浓度逐渐稳定,坡面被雨水冲刷的细颗粒逐渐减少,因此,径流中磷的流失浓度随降雨历时的延长而降低,之后达到稳定状态^[22]。此外,通过对比发现,苜蓿地表径流 TP 流失浓度小于裸地地表径流 TP 流失浓度。在裸地条件下,随着降雨强度和坡度的增加,径流槽坡面粗糙程度发生改变,形成了细沟侵蚀,水力冲蚀较为严重,致使通过坡面流失的水相悬浮态磷素养分较多。结果还表明,裸地和苜蓿地表径流 TP 流失浓度随雨强的增大而增大,其原因是随着降雨时间的延长,径流量逐渐增加,径流的稀释效应开始显现^[23]。同一降雨强度下,10°坡 TP 流失浓度最高,当坡度为 15°时,TP 流失浓度减小,5°和 10°坡的 TP 流失浓度随坡度的增加而增大,说明在这个坡度范围内,坡度的增加加剧了坡面 TP 流失,因为坡度越大,水分迁移能力增强,与土壤颗粒的接触增加,更易将吸附于土壤颗粒上的磷溶出,并随径流流失,进而导致 TP 浓度更高。15°坡的侵蚀强度小于 10°坡,说明坡度在 15°时,坡度的增加减缓了坡面 TP 流失。孔刚等^[24]在进行坡面养分流失的影响试验中发现,土壤中养分流失浓度随坡度的增大而增大,但随着坡度的增加,养分流失浓度开始减小,即养分流失存在临界坡度,因此本次试验中的临界坡度为 10°。

由图 3 可见,在 60 mm/h 和 80 mm/h 降雨强度下,裸地和苜蓿壤中流中 TP 流失浓度随降雨时间起伏变化较大,而在 40 mm/h 雨强下,壤中流中 TP 流失浓度较低变化相对稳定,但整体上表现为随降雨时间减小直至稳定。不同坡度下的壤中流 TP 流失浓度随降雨时间变化规律明显,壤中流 TP 流失浓度在不同坡度条件下的排序为 15°>10°>5°,随着坡度的增大,降雨对地表的冲蚀作用增强,壤中流对土壤养分的解吸侵蚀能力增大。冯勇^[25]对紫色土的研究结

果表明,壤中流中磷浓度与坡度呈正相关,这与本文研究结果相符。壤中流中 TP 流失浓度在不同雨强

下的排序为 $80\text{ mm/h} > 60\text{ mm/h} > 40\text{ mm/h}$,与地表径流 TP 流失浓度受降雨强度影响变化一致。

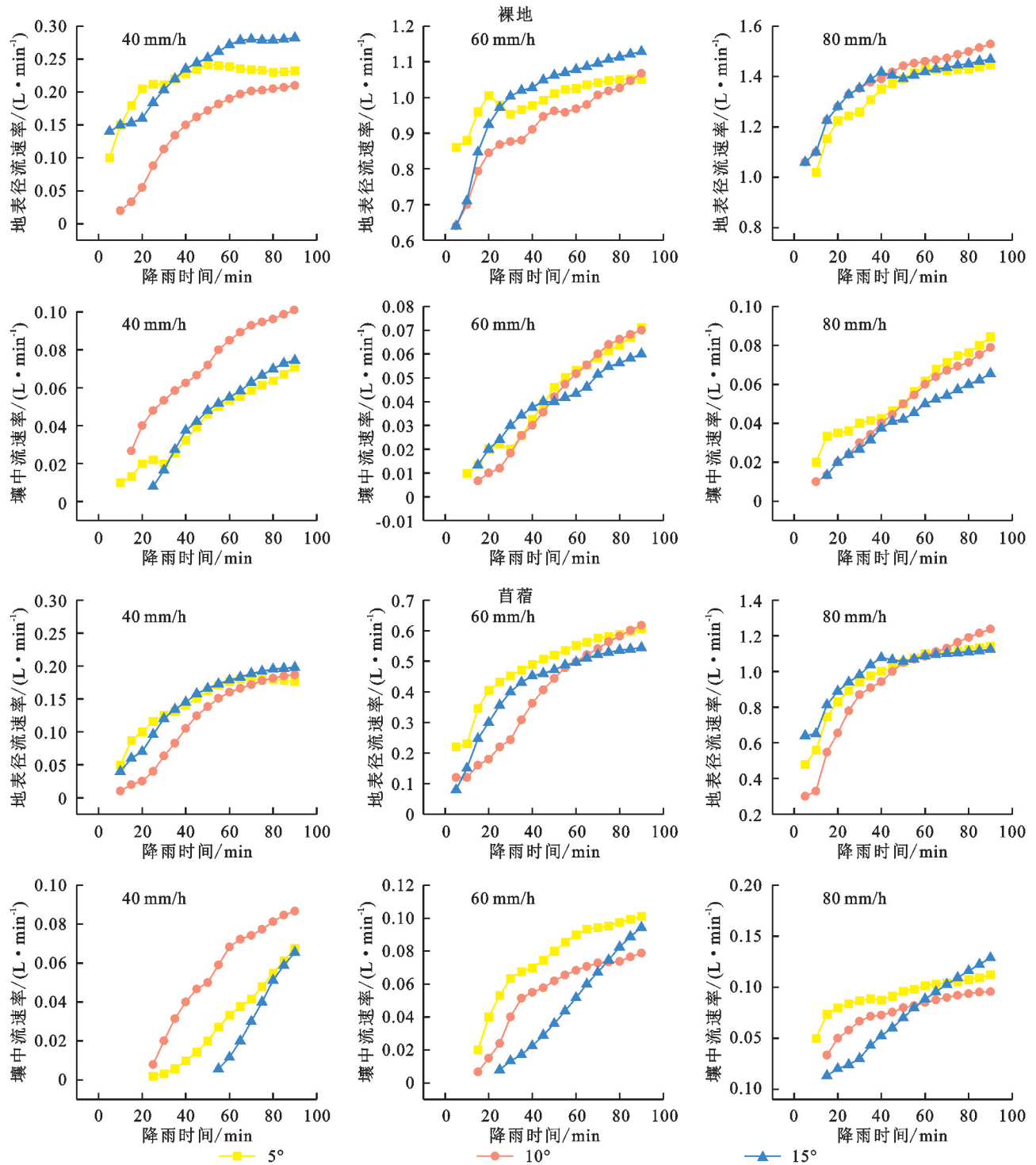


图 2 裸地和苜蓿在不同降雨强度、坡度下的径流速率

Fig. 2 Runoff rates of bare land and alfalfa under different rainfall intensities and slope gradients

2.4 地表径流与壤中流携带磷素流失量及主要流失途径

当磷进入土壤时,大部分磷被迅速吸收并稳定在土壤表面,而极少数磷分布在土壤溶液中,较难被径流带出土体,所以磷在地表径流及壤中流中含量都很低^[26]。由表 2 可以看出裸地在不同降雨强度、坡度

条件下地表径流中 TP 流失量为 $0.5 \sim 32.2\text{ mg}$,随降雨强度的增加而逐渐增大;在相同降雨强度条件下,TP 流失总量随坡度的变化呈现出 $15^\circ > 10^\circ > 5^\circ$,其中 80 mm/h 下, 15° 坡地表径流 TP 流失总量达到最大值为 32.2 mg 。降雨强度和坡度的增加会使径流速度大幅增加,并增大径流与土壤的相互作用强度,

影响坡面表层土壤颗粒侵蚀和携沙能力,进而增加磷的损失。而对于裸地壤中流的 TP 流失量而言,在不同降雨强度、坡度条件下,其流失总量为 0.32~1.32 mg,与地表径流相比,壤中流中的 TP 流失量要远小

于地表径流,在相同降雨强度和坡度条件下,地表径流中的 TP 流失量是壤中流的 1.16~33.24 倍。与地表径流不同,壤中流的 TP 流失总量与降雨强度及坡度之间并无明显规律。

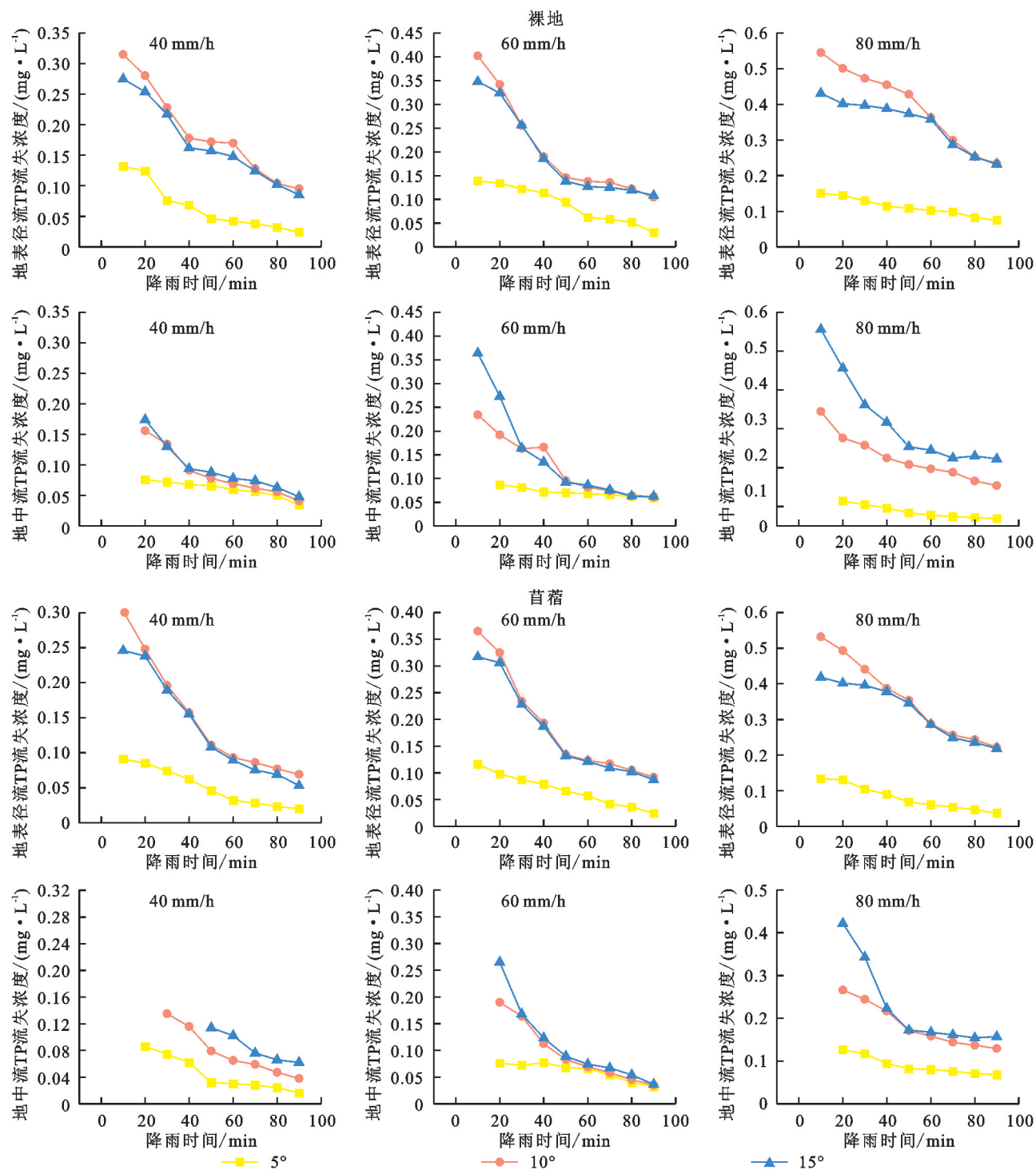


图3 裸地和苜蓿在不同雨强、坡度下地表径流和壤中流 TP 流失浓度

Fig. 3 TP loss concentrations in bare land and alfalfa under different rainfall intensities and slope gradients

由表3可以看出,在不同降雨强度、坡度条件下苜蓿地表径流中 TP 流失量为 0.23~24.73 mg,与裸地呈现出相同规律,随降雨强度的增加而逐渐增大,随坡度呈现出 $10^{\circ} > 15^{\circ} > 5^{\circ}$ 的规律,出现临界坡度为 10°

坡。苜蓿地表径流中的 TP 流失总量低于裸地,在不同降雨强度、坡度之间苜蓿的阻隔效率为 23.20%~61.17%;对于壤中流而言,其 TP 流失总量为 0.23~1.82 mg,在相同降雨强度、坡度条件下,苜蓿地表径流

中的 TP 流失总量是壤中流的 1.39~20.48 倍。裸地和苜蓿条件下,TP 随地表径流流失总量分别占总损失的 53.76%~97.08%和 71.76%~95.70%,因此,地表径流是磷素流失的主要途径。壤中流 TP 流失浓度以及流失量都远低于地表径流,不仅与雨强、坡度有关,与壤中流的发育、磷吸附特性、供试土壤类型和物理化学性质等紧密相关^[27]。苜蓿对壤中流中 TP 流失总量的阻控效率在 80 mm/h 降雨强度条件下为负,其中 15°坡时的阻控效率最低为-37.88%;在 40 mm/h 和 60 mm/h 条件下,苜蓿在不同坡度下对壤中流中 TP 流失总量的阻控效率为 6.06%~46.51%,起到了良好的阻控效果。

表 2 裸地在不同雨强、坡度下径流中 TP 流失总量及占比

Table 2 The total amount and proportion of TP loss in runoff under different rainfall intensities and slope gradients under bare land conditions				
	降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	坡度 /(°)	TP/ mg	TP 流失量占 TP 流失总量比例/%
地表径流	40	5	0.50	53.76
		10	1.80	82.95
		15	2.16	87.10
	60	5	2.84	88.20
		10	9.99	96.34
		15	10.97	97.08
	80	5	9.76	94.94
		10	30.65	96.73
		15	32.20	95.87
壤中流	40	5	0.43	46.24
		10	0.37	17.05
		15	0.32	12.90
	60	5	0.38	11.80
		10	0.38	3.66
		15	0.33	2.92
	80	5	0.52	5.06
		10	1.09	3.27
		15	1.32	4.13

2.5 坡面径流和磷素损失的影响因素

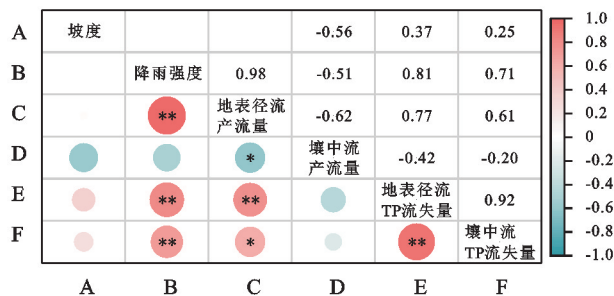
裸地条件下的地表径流产流量、壤中流产流量、地表径流和壤中流中 TP 的流失量与降雨强度、坡度之间的相关性如图 4 所示。地表径流产流量、TP 流失量和降雨强度之间存在极显著的正相关关系($p<0.05$),相关系数(r)分别为 0.98,0.81。坡度对裸地地表径流产流量和 TP 流失量均呈正相关性,但并不显著。然而,壤中流产流量、壤中流 TP 流失量与降雨强度之间存在负相关关系,且降雨强度显著影响了壤中流 TP 的流失。李馨欣等^[28]同样也指出降雨强度与壤中流产流量有负相关性。坡度对裸地壤中流

流失总量和 TP 损失呈负相关性,但不显著。对于裸地条件,降雨强度主要影响了地表径流产流量、壤中流产流量和径流中 TP 流失量。

表 3 苜蓿在不同雨强、坡度下径流中总磷流失总量、阻控效率及占比

Table 3 Total phosphorus loss, control efficiency and proportion of alfalfa runoff under different rainfall intensities and slope gradients					
	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	TP/ mg	TP 阻控 效率/%	TP 流失量占 TP 流失总量比例/%
地表径流	40	5	0.32	36.00	76.19
		10	1.16	35.56	79.45
		15	0.94	56.48	71.76
	60	5	1.31	53.87	81.88
		10	5.12	48.75	95.34
		15	4.26	61.17	93.22
	80	5	3.80	61.07	84.63
		10	24.73	23.20	95.70
		15	22.04	28.09	92.37
壤中流	40	5	0.23	46.51	23.81
		10	0.30	18.92	20.55
		15	0.37	13.51	28.24
	60	5	0.29	23.68	18.13
		10	0.25	34.21	4.66
		15	0.31	6.06	6.78
	80	5	0.69	-32.69	15.37
		10	1.37	-25.69	4.30
		15	1.82	-37.88	7.63

图 5 表示的是不同降雨强度、坡度与苜蓿地表径流、壤中流产流量和地表径流及壤中流中 TP 流失量的相关性。由图可知降雨强度与地表径流产流量和壤中流产流量呈现极显著正相关性($p<0.05$),相关系数分别为 0.99,0.82;与地表径流 TP 流失量和壤中流 TP 流失量呈现显著正相关性($p<0.1$),相关系数分别为 0.74,0.74。苜蓿条件下,地表径流量与地表径流中 TP 流失量以及壤中流量与壤中流中的 TP 流失量均呈显著正相关性($p<0.1$),相关系数分别为 0.78,0.77。由此可见,裸地和苜蓿两种条件下降雨强度为地表径流、壤中流产流量和 TP 流失量的主要影响因子。与众多学者研究结果相同,本研究也得出裸地和苜蓿条件下降雨强度与地表径流产流量、地表径流中磷素流失量均呈显著正相关,与壤中流中磷素流失量呈显著负相关。Ziadat 等^[29]的研究表明,作为控制因素,降雨强度比坡度更重要。Zhang 等^[30]通过研究降雨强度和坡度对径流中磷损失的影响发现,降雨强度对 TP 损失的影响大于坡度的影响,这与本研究中结论相一致。



注: A 表示坡度; B 表示降雨强度; C 表示地表径流产流量; D 表示壤中流产流量; E 表示径流 TP 流失量; F 表示壤中流 TP 流失量。

图 4 裸地条件下雨强和坡度与各影响因素相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of rainfall intensity and slope gradients with various influencing factors under bare land conditions

使用 SPSS 20.0 对每个槽的实测降雨数据进行逐步多元回归分析。裸地处理的植物覆盖率为 0, 苜蓿处理的植物覆盖率为 100%, 分析降雨强度(I)、坡度(S)和植被覆盖率(V)与地表径流中 TP(L)和壤中流中 TP(S)损失之间的线性关系。

$$L = 0.758I + 0.342G - 0.198V - 26.617$$

$$(R = 0.854, F = 12.618)$$

$$S = 0.717I + 0.316S + 0.008V - 0.938$$

$$(R = 0.783, F = 7.413)$$

在不同植被覆盖条件下, 地表径流 TP 损失回归方程的相关系数为 0.854, 壤中流中 TP 损失回归方程的相关系数为 0.783, 这表明多元回归方程较好地解释了地表径流中 TP 损失、植被覆盖、降雨强度和坡度之间的关系, 而对壤中流中 TP 损失的拟合效果较差。

3 结论

(1) 不同覆盖条件下地表径流初始产流时间随降雨强度和坡度的增大而提前; 裸地壤中流初始产流时间随降雨强度和坡度的增大而提前, 而苜蓿条件下壤中流初始产流时间随坡度表现出 $15^\circ > 10^\circ > 5^\circ$ 的规律。

(2) 不同覆盖条件下地表径流和壤中流产流速率随降雨强度的增大而增大; 裸地壤中流和苜蓿地表径流产流速率随坡度表现为 $5^\circ > 15^\circ > 10^\circ$, 随坡度呈先上升后下降的趋势, 这说明在 $5^\circ \sim 10^\circ$ 之间存在临界坡度; 而苜蓿壤中流速率在 60 mm/h 和 80 mm/h 降雨强度下表现为随坡度的增大而减小, 在 40 mm/h 降雨强度条件下表现为 $10^\circ > 5^\circ > 15^\circ$ 。

(3) 不同覆盖条件下地表径流 TP 流失浓度随降雨强度的增大而增大, 同一降雨强度下, 10° 坡的 TP 流失浓度最高; 不同覆盖条件下壤中流 TP 流失浓度均随降雨强度和坡度的增大而增大。

(4) 裸地地表径流中 TP 流失量随降雨强度和坡度的增大而增大, 壤中流中 TP 流失量与降雨强度

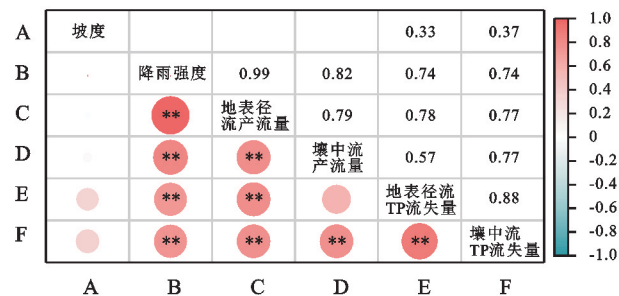


图 5 苜蓿条件下雨强和坡度与各影响因素相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of rainfall intensity and slope gradients with various influencing factors under alfalfa conditions

及坡度之间并无明显规律。苜蓿地表径流中 TP 流失量随降雨强度的增大而增大, 随坡度呈现 $10^\circ > 15^\circ > 5^\circ$ 的规律。苜蓿对径流中 TP 流失起到了一定的阻控效果。裸地和苜蓿条件下, TP 随地表径流流失分别占总流失量的 53.76%~97.08% 和 71.76%~95.70%, 因此, 地表径流是 TP 流失的主要途径。

(5) 相关性结果表明降雨强度为密云库区坡地产流及磷流失的主要影响因子。多元回归方程能较好地模拟地表径流中 TP 损失、植被覆盖、降雨强度和坡度之间的关系。

参考文献 (References):

- [1] Zhao Q H, Li D Q, Zhuo M N, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(2): 609-621.
- [2] Peacher R D, Lerch R N, Schultz R C, et al. Factors controlling streambank erosion and phosphorus loss in claypan watersheds [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 73(2): 189-199.
- [3] Yu X, Zhang X, Wu S, et al. The effect of vegetation and precipitation upon runoff and sediment production in sloping lands of loess area [J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24(1): 19-26.
- [4] Mayerhofer C, Meißl G, Klebinder K, et al. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator-Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine Catchments[J]. Catena, 2017, 156: 184-196.
- [5] Serrano-Muela M P, Nadal-Romero E, Lana-Renault N, et al. An exceptional rainfall event in the central western Pyrenees: Spatial patterns in discharge and impact [J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(3): 249-262.
- [6] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180-191.
- [7] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a

- rock-mantled slope in the Karst rocky desertification area[J]. *Journal of Hydrology*, 2019,578:124086.
- [8] Zhang F B, Yang M Y, Li B B, et al. Effects of slope gradient on hydro-erosional processes on an aeolian sand-covered loess slope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2017,553:447-456.
- [9] 邱业,曲芝旭,韩玉国,等.模拟降雨条件下肥料类型对坡面磷素流失的影响[J].*水土保持研究*,2023,30(5):106-112.
- Qiu Y, Qu Z X, Han Y G, et al. Effect of fertilizer types on phosphorus loss on slope under simulated rainfall[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5):106-112.
- [10] Mahmoodabadi M, Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion[J]. *Geomorphology*, 2016,253:159-167.
- [11] Wang Z J, Jiao J Y, Rayburg S, et al. Soil erosion resistance of "Grain for Green" vegetation types under extreme rainfall conditions on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2016,141:109-116.
- [12] Melville N, Morgan R P C. The influence of grass density on effectiveness of contour grass strips for control of soil erosion on low angle slopes[J]. *Soil Use and Management*, 2001,17(4):278-281.
- [13] Lee K H, Isenhardt T M, Schultz R C. Sediment and nutrient removal in an established multi-species riparian buffer[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003,58(1):1-8.
- [14] Hou G R, Zheng J K, Cui X L, et al. Suitable coverage and slope guided by soil and water conservation can prevent non-point source pollution diffusion: a case study of grassland[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022,241:113804.
- [15] de Vente J, Poesen J, Verstraeten G. The application of semi-quantitative methods and reservoir sedimentation rates for the prediction of basin sediment yield in Spain[J]. *Journal of Hydrology*, 2005,305(1/2/3/4):63-86.
- [16] 张佳琪,王红,张瑞芳,等.雨强对片麻岩坡面径流养分流失规律的影响[J].*水土保持学报*,2014,28(3):42-45,51.
- Zhang J Q, Wang H, Zhang R F, et al. Effect of rain intensity on nutrient loss of runoff in sloping gneiss area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(3):42-45,51.
- [17] 张梦,李冬杰,周玥.雨强和坡度对黄土坡面土壤侵蚀及氮磷流失的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(1):85-90.
- Zhang M, Li D J, Zhou Y. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion, nitrogen and potassium loss on loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(1):85-90.
- [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 G F, Zheng F L, Lu J, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hill-slope[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015,46(4):147-154,182.
- [19] 葛金金,杨加智,詹美礼,等.坡度与降雨强度对坡面侵蚀产沙过程影响的试验研究[J].*水电能源科学*,2015, 33(2):101-104.
- Ge J J, Yang J Z, Zhan M L, et al. Experimental study on influence of slope and rainfall intensity on surface erosion and sediment yield[J]. *Water Resources and Power*, 2015,33(2):101-104.
- [20] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(4):24-29.
- Wang H, Hu X J, Shan C J. Effect of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield on the red soil slope nested gravel-sand[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(4):24-29.
- [21] 张兴奇,顾礼彬,张科利,等.坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J].*水土保持学报*,2015,29(4):18-22,72.
- Zhang X Q, Gu L B, Zhang K L, et al. Impacts of slope gradient on runoff and sediment in northwest Guizhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015,29(4):18-22,72.
- [22] Wang L Q, Liang T, Zhang Q. Laboratory experiments of phosphorus loss with surface runoff during simulated rainfall[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,70(6):2839-2846.
- [23] 秦华,李晔,李波,等.人工模拟降雨条件下石灰土养分流失规律[J].*水土保持学报*,2016,30(1):1-4,53.
- Qin H, Li Y, Li B, et al. Nutrient loss of limestone soil under artificial simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(1):1-4,53.
- [24] 孔刚,王全九,樊军.坡度对黄土坡面养分流失的影响试验研究[J].*水土保持学报*,2007,21(3):14-18.
- Kong G, Wang Q J, Fan J. Research on nutrient loss from loessial soil under different slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007,21(3):14-18.
- [25] 冯勇.不同坡度和雨强条件下紫色土壤中流氮磷养分流失特征研究[J].*水土保持应用技术*,2014(4):4-6.
- Feng Y. Study on nutrient loss characteristics of nitrogen and phosphorus in purple soil under different slope gradient and rainfall intensity [J]. *Application Technology of Soil and Water Conservation*, 2014(4):4-6.
- [26] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等.红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J].*水土保持学报*,2014,28(6):41-45,70.
- Zheng H J, Hu J M, Huang P F, et al. Comparative study of nitrogen and phosphorus through surface-flow and interflow on red soil farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(6):41-45,70.

- [25] 韩瑞芸,陈哲,杨世琦.秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J].中国农学通报,2016,32(9):148-154.
Han R Y, Chen Z, Yang S Q. Effect of straw-returning on nitrogen and phosphorus and water of soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(9): 148-154.
- [26] 姜超强,郑青松,祖朝龙.秸秆还田对土壤钾素的影响及其替代钾肥效应研究进展[J].生态学杂志,2015,34(4):1158-1165.
Jiang C Q, Zheng Q S, Zu C L. Research progress on effects of straw returning on soil potassium and its substitute for potassium fertilizer[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(4):1158-1165.
- [27] 刘威.连续秸秆还田对土壤结构性、养分和有机碳组分的影响[D].武汉:华中农业大学,2015.
Liu W. Effect of continuous straw incorporation on soil structure, nutrient and organic carbon fraction[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [28] Morales V L, Parlange J Y, Steenhuis T S. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix: a review[J]. Journal of Hydrology, 2010,393(1/2):29-36.
- [29] Ge S Q, Pan Y Z, Zheng L W, et al. Effects of organic matter components and incubation on the cement-based stabilization/solidification characteristics of lead-contaminated soil[J]. Chemosphere, 2020,260:127646.

~~~~~  
(上接第 110 页)

- [29] 闫峰陵,李朝霞,史志华,等.红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J].农业工程学报,2009,25(3):37-41.  
Yan F L, Li Z X, Shi Z H, et al. Quantitative relationship between aggregate characteristics of red soil and slope erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009,25(3):37-41.
- [30] 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.  
Wen L L, Zheng F L, Yang Q S, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope farmland erosion in black soil region of Northeast China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012,43(9):1084-1091.

~~~~~  
(上接第 121 页)

- [27] 刘新梅,田剑,张昊,等.改良剂对复垦土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):326-333,355.
Liu X M, Tian J, Zhang H, et al. Effects of amendment on aggregates composition and organic carbon content in reclaimed soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(1):326-333,355.
- [28] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions[J]. Science, 2022,377(6606):603-608.
- [29] 矫丽娜,李志洪,殷程程,等.高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J].土壤学报,2015,52(3):665-672.
- Jiao L N, Li Z H, Yin C C, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(3):665-672.
- [30] Segoli M, De Gryze S, Dou F, et al. AggModel: a soil organic matter model with measurable pools for use in incubation studies [J]. Ecological Modelling, 2013, 263:1-9.
- [31] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66(6):1981-1987.

~~~~~  
(上接第 130 页)

- [27] Wang R, Min J, Kronzucker H J, et al. N and P runoff losses in China's vegetable production systems: Loss characteristics, impact, and management practices[J]. The Science of the Total Environment, 2019,663:971-979.
- [28] 李馨欣,王小燕,蔡崇法,等.紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J].水土保持学报,2017,31(5):25-31.  
Li X X, Wang X Y, Cai C F, et al. Response of soil water content and subsurface flow to rainfall intensity in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(5):25-31.
- [29] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J]. Land Degradation & Development, 2013,24(6):582-590.
- [30] Zhang R R, Li M, Yuan X, et al. Influence of rainfall intensity and slope on suspended solids and phosphorus losses in runoff[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019,26(33):33963-33975.