黄蕃攀,侯 磊,马建刚,等.极端降雨条件下坡耕地土壤微塑料迁移 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3843-3854.
Huang F P, Hou L, Ma J G, et al. Migration of microplastics in sloping croplands soil under extreme rainfall conditions [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3843-3854.

极端降雨条件下坡耕地土壤微塑料迁移

黄蕃攀[1],侯 磊[2],马建刚[1],王艳霞[1],刘骐玮[2],王 伟[3],梁启斌[2*] (1.西南林业大学水土保持学院,云南 昆明 650224；2.西南林业大学生态与环境学院,云南 昆明 650224；3.云南蓝态环境工程有限公司,云南 昆明 650224)

摘要：设置不同降雨强度(60,90,120 和 180mm/h)和坡度(0°,5°,10°和 20°)条件,开展为期 14d 的室内模拟短历时降雨(单次降雨时长 10min)实验,观测坡耕地的产流量、产沙量和微塑料流失量,研究降雨结束后微塑料在土壤水平和垂直方向的迁移特征,探讨降雨强度和坡度对坡耕地土壤微塑料迁移的影响.结果表明:60 和 90mm/h 处理的短历时降雨下,未发生产流、产沙和微塑料流失,增大降雨强度可显著提高其他处理的产流量(213.11~261.70mm)、产沙量(1191.68~1391.40g/m^2)和微塑料流失量(23113~39953n/m^2).坡度为 0°时,产流量、产沙量和微塑料流失量均为 0,20°时的微塑料流失量(34570.92n/m^2)显著高于 10°(23113.37n/m^2).微塑料流失量随降雨天数的增加呈先增加后减小趋势,微塑料流失量与产流量和产沙量均呈显著正相关关系(P<0.05).微塑料在表层土壤水平方向的迁移总量为 4.73~31.00n/g,迁移量随距离的增加而减小,微塑料水平迁移总量与降雨强度呈正相关关系(P>0.05).土壤中微塑料垂直迁移总量在 1.41~11.59n/g 范围内,随土壤深度的增加微塑料迁移量减小,微塑料垂直迁移总量与降雨强度和坡度间呈正相关关系(P>0.05).短历时极端降雨会导致坡耕地土壤微塑料流失,降雨强度和坡度是影响微塑料流失和改变土壤中微塑料分布的重要因素.

关键词：土壤；微塑料；迁移；坡耕地；降雨强度；坡度
中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3843-12

Migration of microplastics in sloping croplands soil under extreme rainfall conditions. HUANG Fan-pan[1], HOU Lei[2], MA Jian-gang[1], WANG Yan-xia[1], LIU Qi-wei[2], WANG Wei[3], LIANG Qi-bin[2*] (1.College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China；2.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China；3.Yunnan Lantai Environmental Engineering Co., Kunming 650224, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3843~3854

Abstract：A 14-d indoor simulated short-duration rainfall (10min for a single rainfall) experiment was conducted with different rainfall intensities (60, 90, 120 and 180mm/h) and slope gradients (0°, 5°, 10° and 20°) to observe the runoff and sediment yield and MPs loss from the soil of sloping croplands. We investigated the migration characteristics of MPs in the horizontal and vertical directions of soil after rainfall, and explored the effects of rainfall intensity and slope gradient on soil MPs migration in sloping croplands. The results showed that: Under short-duration rainfall of 60and 90mm/h treatment, no runoff and sediment yield and MPs loss were observed. The runoff (213.11~261.70mm) and sediment yield (1191.68~1391.40g/m^2) and MPs loss (23113~39953n/m^2) increased with the increase of rainfall intensity in the rest of the treatments. The runoff and sediment yield and MPs loss were all zero at 0° slope gradient, and MPs loss was significantly higher at 20° (34570.92n/m^2) than at 10° (23113.37n/m^2). The MPs loss showed a firstly increasing and then decreasing trend along with the simulated rainfall experiment, and the MPs loss showed a significant positive correlation with both runoff and sediment yield (P<0.05). The total amount of MPs migration in the horizontal direction in surface soil ranged from 4.73 to 31.00n/g, which decreased with the increase of distance. There was a positive correlation between the amount of horizontal MPs migration and rainfall intensities (P>0.05). The total amount of vertical migration of MPs in soil column ranged from 1.41to 11.59n/g, which decreased with the increase of soil depth. The amount of vertical MPs migration showed a positive correlation with rainfall intensities and slopes (P>0.05). The results indicate that extreme rainfalls of short-duration lead to soil MPs loss from sloping croplands, and rainfall intensity and slope gradient are important factors affecting the MPs loss and changing the MPs distribution in soil.

Key words：soil；microplastics；migration；sloping cropland；rainfall intensity；slope gradient

---

收稿日期：2024-12-15
基金项目：云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-090);云南省基础研究计划项目(202301AT070220);西南林业大学科研启动基金资助项目(110223015)

* 责任作者，教授, qbliang@swfu.edu.cn

塑料垃圾经老化分解,形成粒径小于 5mm 的微塑料[1-2].微塑料会释放增塑剂、吸附重金属、有机污染物和病源微生物等,导致潜在的生态环境及健康风险,受到广泛关注[3-4].微塑料在海洋、内陆淡水、土壤、冰川和大气等环境中被广泛检出[5-6],而土壤被认为是微塑料重要的储存库.受大气降水和地形条件等因素的影响,土壤中的微塑料会随地表径流迁移至河流、湖泊和水库等地表水体,在土壤原生动物和渗流作用下,微塑料还会在土壤中发生垂向迁移,进入浅层地下水,进而污染地下水[7-9].

雨水溅蚀及地表径流冲刷作用导致土壤中微塑料发生悬浮并随地表径流流失,导致下游水体中微塑料丰度升高[10].香港、三峡库区和澳大利亚库克斯河口等地的水体中微塑料丰度在降雨后增加了 1.87~21.5 倍[11-15].降雨强度还显著影响微塑料流失量,重庆璧山区农田地表径流中观测结果显示,暴雨时微塑料流失量显著高于中雨[16].由此,降雨及地表径流显著影响土壤中微塑料的迁移与流失,已成为影响下游水体微塑料污染的重要因素之一.

为深入揭示微塑料在土壤中的迁移机制,有学者通过室内模拟降雨实验探索不同情境下的微塑料流失及迁移.标准径流场实验中,模拟 60mm/h 降雨仅导致 0.13g/m^2 的微塑料流失,占添加量的 0.23%,流失较为缓慢[17];而在裸地条件下,降雨强度提升至 118.8mm/h 时,微塑料流失量可达 149.69g/m^2[10],表明降雨强度和植被覆盖状况均影响微塑料流失量.进一步的实验表明,微塑料的水平迁移最远可达 24cm,垂直迁移最深可达 7cm,并随降雨强度和坡度增加而加剧[18-19].此外,干湿循环也被证实能促进微塑料逐步向深层移动,且迁移深度与循环次数呈正相关[20].综上,降雨强度、坡度、植被覆盖状况和干湿循环等都影响土壤中微塑料流失和迁移,上述研究揭示了当地正常降雨条件下土壤微塑料迁移的规律,但在极端气候日益频发背景下,短历时高强度降雨对坡耕地微塑料流失和迁移的影响需进一步探索.

云南省山地面积占全省总面积的 94%,是我国水土流失严重的省份之一[21-22],红壤坡耕地的侵蚀总量高达 376.57×10^{6}t/a,占全省土壤侵蚀总量的 63.02%[23].因此,本研究以云南红壤坡耕地为研究对象,开展室内模拟降雨实验,探究短历时极端降雨条件下,微塑料在红壤坡耕地径流中流失规律和土壤微塑料迁移特征,探讨降雨强度和坡度对微塑料流失的影响,以期为云南高原山地土壤微塑料污染管控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

实验用塑料购自宏发制刷厂(中国安徽),为红色聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)塑料纤维,纤维截面直径为 0.15mm,微塑料长度<1mm、1~2mm 和 2~3mm 的数量占比分别为 82%、12%和 6%.供试土壤购自云南省昆明市西山区肥土源有机肥经营部,pH 值为 6.41、含水率 28.10%,实验前土壤过 5mm 筛,置于阴凉通风处自然风干,经消解浮选提取发现,供试土壤中检出黑色薄膜状、黄色薄膜状、蓝色纤维状、白色纤维状、黑色纤维状,但无红色纤维状的微塑料,不会干扰实验结果.

1.2 实验设计

参照云南省日极端降水概率特征及时空变化[24],依据我国暴雨等级标准,本实验分别设置降雨强度为 60,90,120 和 180mm/h,在坡度为 10°的土壤实验槽开展为期 14d 的室内模拟降雨实验,每天降雨 1 次,每次降雨历时 10min.在 120mm/h 降雨强度下,设置 0°,5°,10°和 20°不同坡度开展实验,降雨频次和降雨历时设置同前.实验共 8 个处理,每个处理 3 组重复.

1.3 实验装置与方法

实验装置为自制不锈钢土壤模拟槽,如图 1 所示,长×宽×高为 100cm×10cm×35cm,土壤模拟槽底板上方 5cm 处设置孔径为 2cm 的多孔板,用于收集下渗的降雨,并在模拟槽排水端设置下渗雨水收集口,多孔板上方填充 20cm 厚的土壤,在模拟槽底板上方 25cm 处设置地表径流收集口.模拟槽置于西南林业大学模拟降雨大厅,通过调节模拟槽底座角度改变坡耕地的坡度,使用全自动下喷式人工降雨系统进行降雨,降雨高度为 3m,通过计算机系统控制降雨强度和降雨时长,降雨均匀度在 85%以上.

实验前,根据云南红壤坡耕地翻耕 20cm 土壤的平均容重(1.25g/cm^3)和模拟槽容积[25],称取 30kg 土壤填充于模拟槽内,将 0.5g 红色纤维状的微塑料和 100g 土壤混合均匀,铺设至模拟槽坡顶端 10cm×

10cm 处,并均匀喷洒适量水(每 3d 重复 1 次),待土壤稳定 14d,使填充土壤厚度刚好为 20cm.随后开展为期14d模拟降雨实验,每天降雨10min,单次降雨结束后收集地表径流、径流中的泥沙和下渗雨水,测量并记录地表径流体积、流失泥沙质量和下渗雨水体积,参照文献[26]消解、浮选地表径流和下渗雨水中的微塑料.降雨 14d 后,分别采集土壤表层水平方向和垂直方向的样品,水平方向上,在距离微塑料添加处0,3,6,9,15,25,40,60 和 90cm 位置依次采集 100g 表层(0~2cm)潮湿土壤样品;垂直方向上,在微塑料添加区域下方 2,3,4,5,6,8,10,12,14,16,18 和 20cm 处采集 100g 潮湿土壤样品,土壤样品自然风干后进行微塑料提取.参照文献[27]进行分散、浮选、消解和浮选土壤微塑料样品.用体式显微镜(Olympus SZX16,日本)观测地表径流、下渗雨水和土壤样品中添加的红色纤维状微塑料并统计数量.

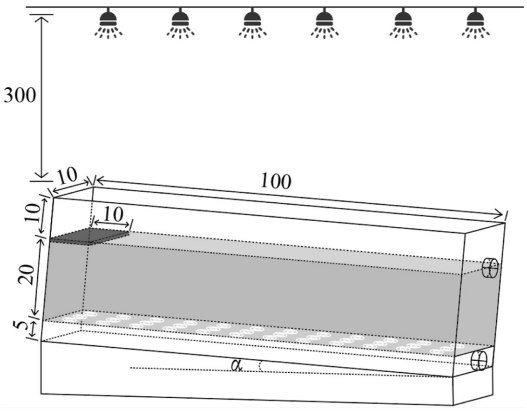


图 1　实验装置示意

Fig.1　Schematic diagram of the simulated device

装置尺寸单位为 cm,灰色为土壤,黑色为微塑料填充区域

1.4　数据处理

坡耕地的产流量、下渗量、产沙量和微塑料流失量按式(1)、(2)、(3)和(4)进行计算[28].

$$L_W = V_w / S \quad (1)$$

$$L_X = V_X / S \quad (2)$$

$$L_M = n / S \quad (3)$$

$$L_S = m / S \quad (4)$$

式中:L_W 为产流量,mm;L_X 为下渗量,mm;L_M 为单位面积坡耕地微塑料流失数量,n/m^2,参照文献[29]将微塑料流失数量换算为流失质量,g/m^2;L_S 为产沙量,g/m^2;V_w 和 V_x 为地表径流体积和下渗降雨体积,L; S 模拟槽的投影面积,m^2;n 为微塑料个数,m 为流失土壤质量,g.

用 Excel 2019 软件整理实验数据,用 SPSS 26 进行数据相关性分析和差异性分析,用 Origin 2022 绘制柱状图、点线图和线性拟合等.

2　结果与分析

2.1　极端降雨条件下红壤坡耕地产流产沙和下渗量特征

如图 2 所示,降雨强度小于 120mm/h 和坡度小于 5°的处理未发生产流和产沙,而所有处理均有下渗量产生,其余处理的产流、产沙和下渗总量分别在114.25~261.70mm 、 25.20~1584.73g/m^2 和 31.49~259.40mm 之间.实验前期(前 4d)的产流量和产沙量快速增加,随后趋于平缓,而下渗量在前 3d 快速增加,随后呈缓慢下降的趋势.

图 2(g)表明,产流总量和产沙总量随降雨强度加大而增加,60 和 90mm/h 降雨强度处理时的产流量和产沙量均为 0,而 180mm/h 时的产流总量(261.70mm)显著高于 120mm/h(213.11mm)(P<0.05),产流量增加了 22.80%.180mm/h 处理的产沙总量(1391.40g/m^2)较 120mm/h(1191.68g/m^2)的显著增加了 16.76%(P<0.05),60,90,120 和 180mm/h 降雨强度处理下的下渗总量分别为 31.49,122.54,70.88 和103.90mm,90 和 180mm/h 降雨强度时的下渗总量显著高于其他的处理(P<0.05).

由图 2(h)可知,随坡度增加产流和产沙总量增加,而下渗总量反之.0°时的产流产沙量为 0°,10°和20°时产流总量分别为 213.11 和 214.09mm,均显著高于 5°(114.25mm)(P<0.05),产沙总量也呈现相同规律,20°(1584.73g/m^2)和 10°(1191.68g/m^2)处理的产沙量显著高于 5°(25.20g/m^2)(P<0.05).0°(259.40mm)时下渗总量最大,均显著高于 5°(152.33mm)、10°(70.88mm)和 20°(49.98mm)(P<0.05).

2.2　极端降雨条件下红壤坡耕地微塑料流失特征

如图 3(a)、(c)和(e)所示,60 和 90mm/h 处理时微塑料流失量为 0,其余处理下的微塑料流失总数量和流失总质量在 23113~39953n/m^2 和 0.84~1.45g/m^2 之间,实验前 4d 微塑料快速流失,随后流失量缓慢下降.降雨强度为 180mm/h 时微塑料流失总量(39953n/m^2)和流失总质量(1.45g/m^2)较 120mm/h 显著增加了72.86%(P<0.05).

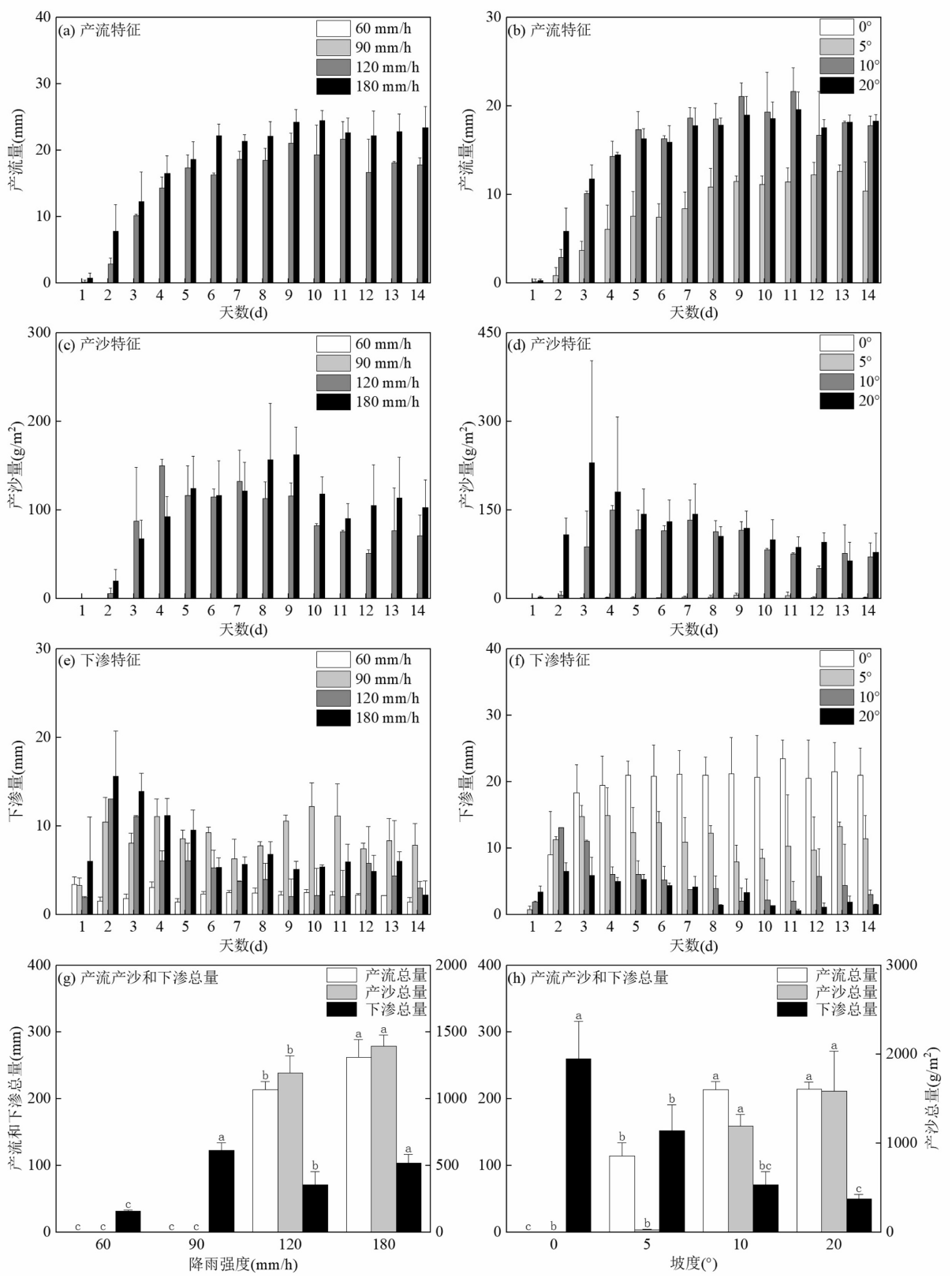


图 2 不同降雨强度和坡度情景下的产流、产沙和下渗过程

Fig.2 Processes of runoff and sediment yield and infiltration under different scenarios of rainfall intensity and slope gradient

不同小写字母表示不同降雨强度和坡度下产流、产沙和下渗总量差异显著(P<0.05)

如图 3(b)、(d)和(f)所示,0°处理时微塑料流失量为 0n/m^2,5°,10°和 20°微塑料流失总数量分别为

28989,23113 和 34571n/m^2,流失总质量分别为 1.05, 0.84 和 1.26g/m^2,20°时的微塑料流失总量和流失总质量显著高于 10°(P<0.05),而与 5°相比差异性未达到显著水平(P>0.05).

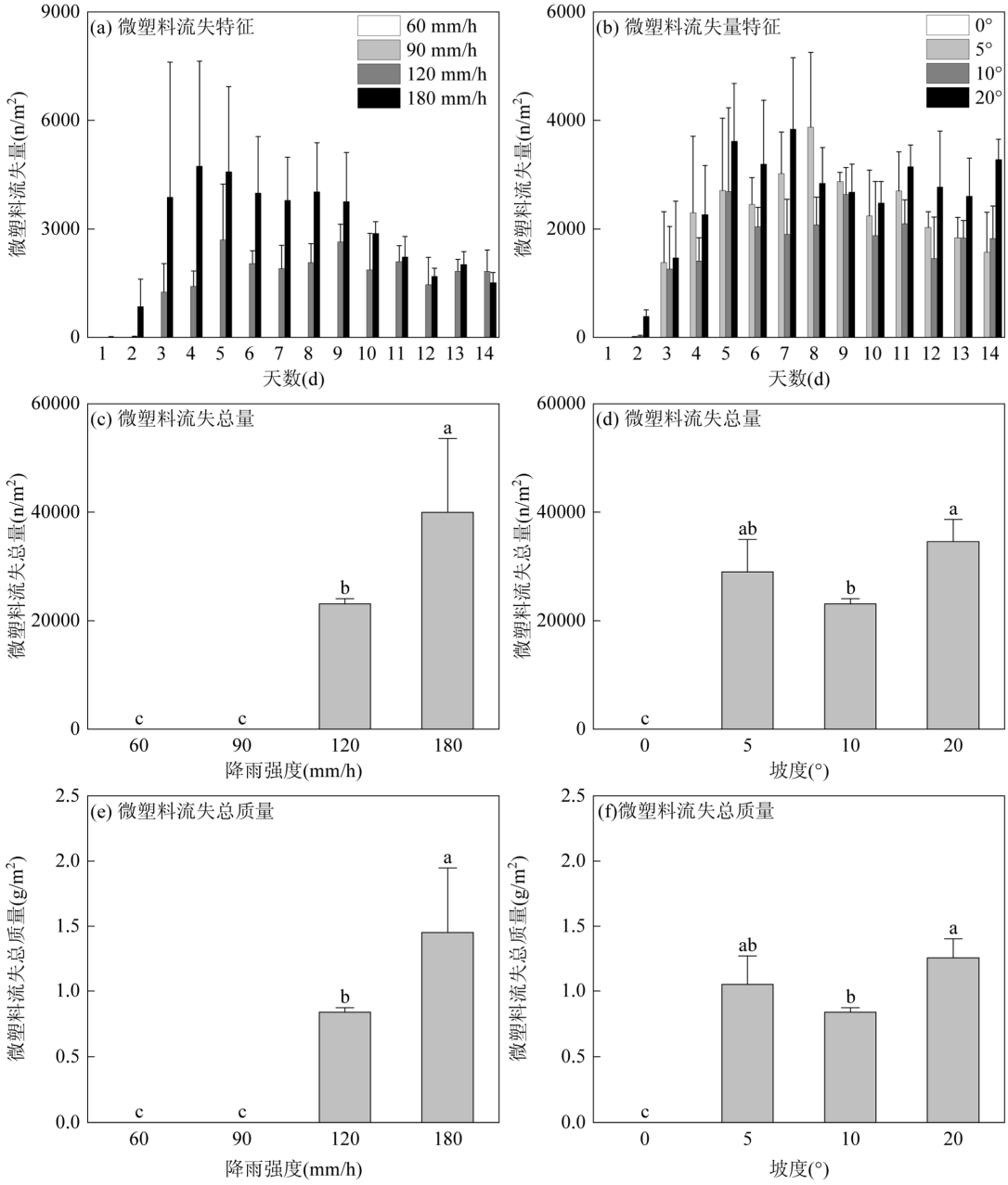


图 3　不同降雨强度和坡度情景对土壤微塑料流失量的影响

Fig.3　Effects of different scenarios of rainfall intensity and slope gradient on soil microplastics loss

不同小写字母表示不同降雨强度和坡度下微塑料流失总量及总质量差异显著(P<0.05)

如图 4(b)和(d)所示,120 和 180mm/h 时微塑料流失量与产流量的拟合方程 R^2 分别为 0.8516 和 0.2071,其中 120mm/h 时产流量与微塑料流失量相关性达到极显著水平(P<0.01),与产沙量的拟合方程 R^2 分别为 0.5795 和 0.4591,均达到显著相关水平(P<0.05).

如图 4(a),(b)和(c)所示,5°,10°和 20°时的微塑料流失量和产流量拟合方程 R^2 分别为 0.5167,0.8516 和 0.8032,均达到显著相关水平(P<0.05),其中 10°和 20°达到极显著相关水平(P<0.01),与产沙量拟合方程 R^2 分别为 0.4253,0.5795 和 0.0522,5°和 10°均达到显著相关水平(P<0.05),而 20°未达到显著相关水平(P>0.05).

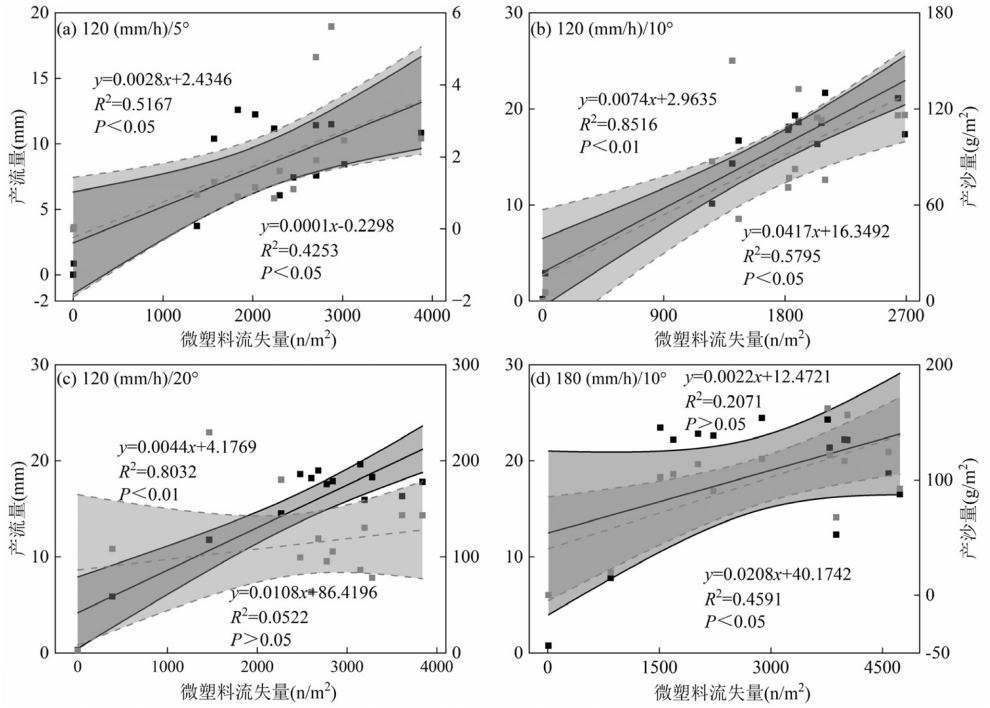


图 4 产流产沙量和微塑料流失量间的关系

Fig.4 Correlations between runoff and sediment yield and microplastics loss

深灰色为产流量和微塑料流失量线性拟合,浅灰色为产沙量和微塑料流失量线性拟合

2.3 极端降雨条件下微塑料在坡耕地土壤水平方向的迁移特征

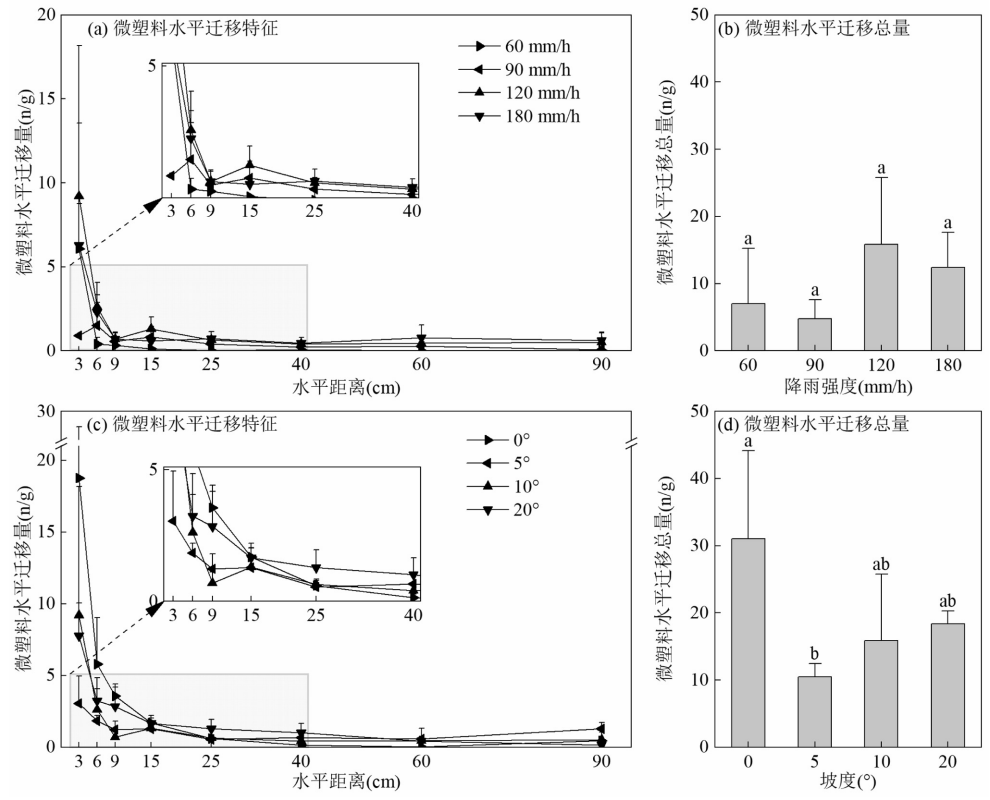


图 5 不同降雨强度和坡度情景对表层土壤微塑料水平迁移的影响

Fig.5 Effects of different scenarios of rainfall intensity and slope gradient on the horizontal transport of microplastics in soil

不同小写字母表示不同降雨强度和坡度下微塑料水平迁移总量差异显著(P<0.05)

如图 5(a)和(b)所示,微塑料的土壤水平迁移总量在 4.73~12.41n/g 之间,微塑料迁移量在土壤水平方向前段(0~9cm)快速下降,9cm 后趋于平稳.120mm/h 处理时微塑料水平迁移总量最大(15.84n/g), 其次为 180(12.41n/g),60(7.00n/g) 和 90mm/h(4.73n/g),降雨强度处理间未达到显著性差异水平(P>0.05),微塑料在土壤表层的迁移主要发生在前 9cm 的距离范围,60,90,120 和 180mm/h 处理时,前段(0~9cm)的微塑料迁移量分别占其水平迁移总量的 97.14%、62.82%、78.96%和 74.76%.

如图 5(c)和(d)所示,微塑料迁移总量在 10.49~31.00n/g 之间, 0°,5°,10°和 20°处理时微塑料水平迁移分别为 31.00,10.49,15.84 和 18.35n/g,其中 0°处理的水平迁移量显著高于 5°(P<0.05),其余处理未达到差异性显著水平(P>0.05).0°,5°,10°和 20°处理时,前段(0~9cm)的微塑料迁移量分别占其水平迁移总量的 90.65%,58.45%,78.96%和 75.44%.

如图 6 所示,微塑料在土壤水平方向的迁移总量与降雨强度呈现正相关关系,而与坡度呈负相关关系,拟合的 R^2 分别为 0.1571、0.0918,二者均未达到显著水平(P>0.05).结果表明,增大降雨强度能促进微塑料在土壤中的水平迁移.对坡度而言,0°处理时未发生产流,土壤中微塑料未随地表径流发生流失,进而加剧了微塑料在土壤中的迁移,导致水平迁移总量大于其余坡度处理,使得微塑料迁移总量与坡度呈负相关关系.

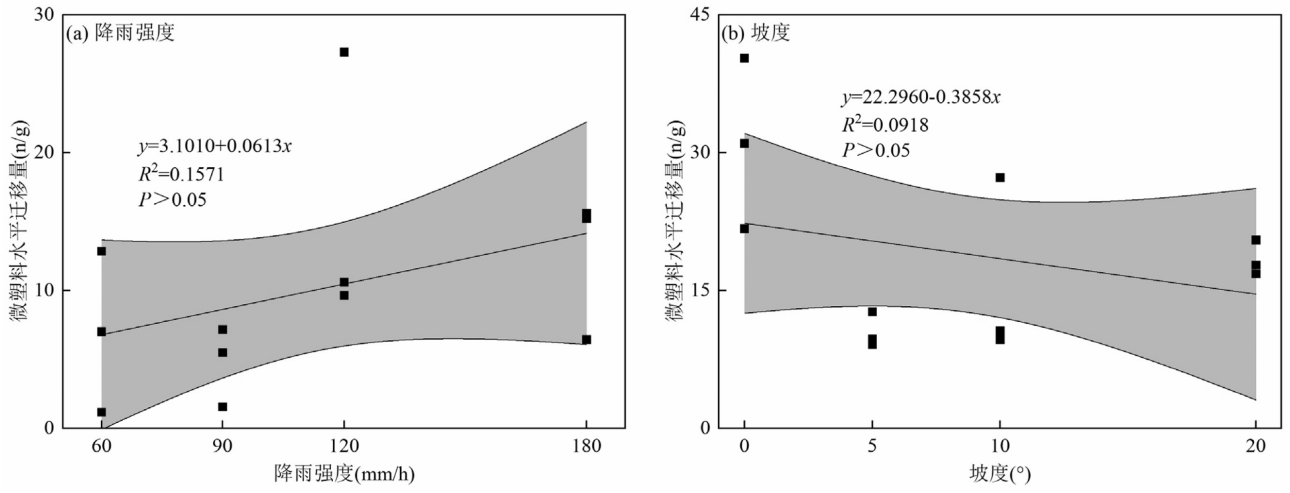


图 6　微塑料水平迁移总量与降雨强度、坡度间的关系

Fig.6　Relationship between total amount of horizontal transport microplastics and rainfall intensities, slopes

2.4　极端降雨条件下微塑料在坡耕地土壤垂直方向的迁移特征

如图 7(a)和(b)所示,土壤中微塑料垂直迁移总量在 1.41~5.79n/g 之间,在土壤垂直深度前 6cm 微塑料迁移量快速下降,而深度超过 6cm 后,微塑料迁移量呈缓慢下降趋势.60,90,120 和 180mm/h 降雨强度时,微塑料垂直迁移总量依次为 1.41,4.88,5.79 和 3.91n/g,不同处理间未达到差异性显著水平(P>0.05),微塑料在土壤垂直方向上的迁移主要发生在前 6cm,60,90,120 和 180mm/h 处理时,前段 6cm 深度的微塑料迁移总量分别占其垂直迁移总量的 94.34%,86.89%,96.54%和 78.84%.

如图 7(c)和(d)所示,土壤中微塑料垂直迁移总量在 5.78~11.59n/g 之间,微塑料在不同深度迁移规律与不同降雨强度处理一致,0°,5°,10°和 20°微塑料迁移总量分别为 11.08,9.79,5.79 和 11.59n/g,不同坡度处理间未达到差异性显著水平(P>0.05),微塑料迁移量主要在土壤 0~6cm 前快速下降,6cm 后趋于稳定,0°,5°,10°和 20°处理时 0~6cm 微塑料迁移量分别占其垂直迁移总量的 84.36%,96.19%,95.62%和 98.16%.

如图 8 所示,拟合的 R^2 分别为 0.0244,0.0004,均未达到显著正相关水平(P>0.05),表明实验设置的降雨强度和坡度对微塑料垂直迁移量影响差异不大.

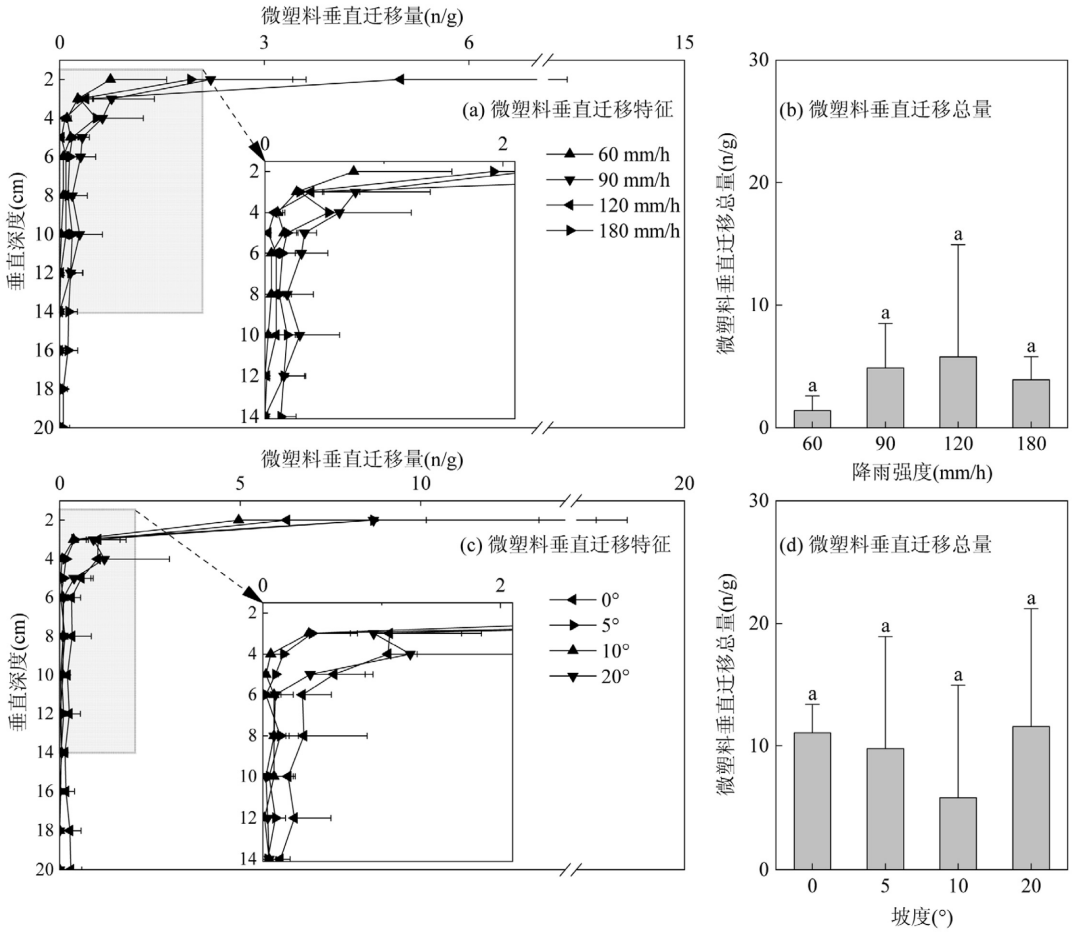


图 7 不同降雨强度和坡度情景对微塑料垂直迁移的影响

Fig.7 Effects of different scenarios of rainfall intensity and slope gradient on the vertical transport of microplastics in soil column

不同小写字母表示不同降雨强度和坡度下微塑料垂直迁移总量差异显著(P<0.05)

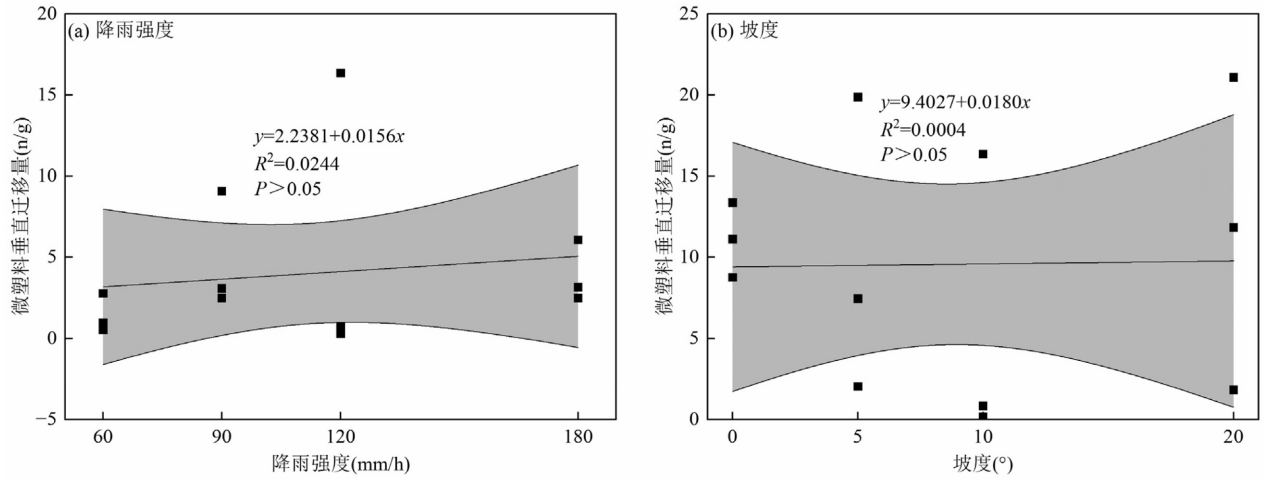


图 8 微塑料垂直迁移总量与降雨强度、坡度间的关系

Fig.8 Relationship between total amount of vertical transport microplastics and different rainfall intensities and slopes

3 讨论

3.1 坡耕地土壤微塑料的流失及迁移特征

本研究径流中微塑料流失总量和总质量范围分别为 23113~39953n/m^2 和 0.84~1.45g/m^2,微塑料流失量低于王琬等[30]和 Zhang 等[10]研究结果,高于马建刚等[17]的研究结果(表 1).王琬等[30]模拟 108mm/h 降雨和坡度为 5°实验发现,微塑料流失总量为

106.32g/m^2,占微塑料添加量的 10.59%,流失量大于本实验相近的降雨强度 120mm/h 和坡度 5°下微塑料流失总量 1.05g/m^2,但本研究的微塑料流失量与添加量的占比(17.59%)却较大,可能是王琬等的实验将 100g 微塑料与实验土壤均匀混合,而本研究将 0.5g 微塑料添加至土壤表面,导致微塑料更容易流失,流失占比更大.王琬等发现微塑料流失随降雨天数增加呈先增加后减小的趋势,变化规律与本实验结果一致.马建刚等[17]在 10m×2.5m 的径流小区中种植白三叶、黑麦草和狗牙根三种覆盖植被条件下,通过模拟降雨实验研究了微塑料在植被覆盖条件下的迁移规律,降雨后微塑料流失总量为 0.13g/m^2,仅占其微塑料添加量(1350g)的 0.23%,发现微塑料迁移量的峰值比径流量的峰值普遍出现更早,其峰值的稳定性小于径流量的稳定性,其规律与本实验研究一致,而微塑料流失总量低于本实验,可能因本试验无植被覆盖、模拟槽较小和降雨强度较大,导致微塑料流失量更易流失.

本研究表明,微塑料在土壤水平和垂直方向上迁移范围分别为 1202~5603n/m^2 和 359~3082n/m^2,微塑料迁移量均随水平距离和深度的增加呈减小趋势,微塑料在土壤中迁移规律与 Zhang 等[18]和 Park 等[19]一致,但本研究的微塑料迁移总量较低. Zhang 等[18]发现土壤中微塑料水平和垂直迁移距离较小,但迁移量较大,可能因设置的降雨强度(5,15 和 25mm/d)、坡度(0°,8°和 15°)和实验装置较小(水平和垂直有效迁移为 30 和 20cm),降雨产生径流量和下渗量小,导致微塑料在土壤水平迁移仅可迁移至实验装置末端,垂直方向在 7cm 前堆积.同时 Park 等[19]发现 13mm/h 降雨强度下微塑料可垂直迁移至 10.6cm,但主要集中在 3.4cm,29mm/h 降雨强度下可垂直迁移至模拟装置末端 17.8cm,可能以沙子作为土壤模拟介质,与本研究通过实际土壤填充相比,沙子填充孔隙较大,导致微塑料更易迁移.

土壤中微塑料添加量(丰度)越高,微塑料流失越大,且植被覆盖能明显缓解土壤微塑料的流失[17].微塑料在土壤中水平垂直迁移量和距离主要受降雨强度、地形和植被覆盖等因素影响[18].微塑料在土壤中迁移方式复杂多样,还可能受到土壤动物和微塑料性质等因数的影响.老化作用会改变土壤中微塑料的颜色、粒径、粗糙度等性质,进而影响微塑料的迁移[31].有学者选用老化微塑料、以石英砂为填充材料条件下进行模拟实验研究,发现老化后的微塑料(PE)垂直迁移能力显著减低[32],而老化微塑料在土壤中的迁移特征及影响机制研究有待进一步开展.

表 1　不同降雨强度和坡度下土壤微塑料迁移特征比较

Table 1　Comparison of soil microplastic migration characteristics under different rainfall intensities and slope gradients

降雨强度(mm/h)和坡度(°)	填充介质	投加微塑料的形状	微塑料投加量(g)	微塑料流失总量(g/m^2)	水平迁移总量(n/m^2)	垂直迁移总量(n/m^2)	文献
108/5	黑土	颗粒	100	106.32	—	—	[30]
118/5	黑土	颗粒	100	149.69	—	—	[10]
60/13	红壤	颗粒	1350	0.12	—	—	[17]
5/8	黄棕壤	颗粒	0.5	—	0	24338	[18]
15/8	黄棕壤	颗粒	0.5	—	27359	21231	
25/8	黄棕壤	颗粒	0.5	—	21548	21548	
15/0	黄棕壤	颗粒	0.5	—	21404	7048	
15/8	黄棕壤	颗粒	0.5	—	27129	21289	
15/15	黄棕壤	颗粒	0.5	—	57739	5869	
13/0	沙子	碎片	2.7	—	—	66083	[19]
29/0	沙子	碎片	2.7	—	—	38416	
60/10	红壤	纤维	0.5	0	1777	359	本研究
90/10	红壤	纤维	0.5	0	1202	1239	
120/10	红壤	纤维	0.5	0.84	4021	1469	
180/10	红壤	纤维	0.5	1.45	3151	992	
120/0	红壤	纤维	0.5	0	5603	2770	
120/5	红壤	纤维	0.5	1.05	2633	2456	
120/10	红壤	纤维	0.5	0.84	4021	1469	
120/20	红壤	纤维	0.5	1.26	4881	3082	

注:“—”表示文献未提供.

3.2 降雨强度和坡度对坡耕地土壤微塑料流失的影响.

本研究 60 和 90mm/h 降雨强度的实验中,10min 降雨过程的产流产沙量为 0,主要原因是每天的降雨历时短,进入土壤的降水量低于饱和持水量,未能产生地表径流,也无微塑料流失.张紫薇等[33]模拟 30,60 和 90mm/h 降雨实验发现,60 和 90mm/h 降雨强度条件下,前 10min 降雨时未产生地表径流,而持续降雨 12~15min 后,开始出现产流产沙.

本实验结果显示,120 和 180mm/h 降雨强度时,产生地表径流和泥沙流失,微塑料流失量随降雨天数的增加呈现先增加后减小趋势,可能因降雨天数的增加,土壤表层可流失土壤和微塑料减少,或微塑料与土壤结合更加紧密,使产沙量和微塑料流失量呈下降趋势,这与 Treilles 等[34]和马建刚等[17]的研究结果一致.本研究发现降雨强度显著提高微塑料流失(P<0.05),微塑料的流失主要发生在径流量较大的降雨事件中,单位时间降雨量越大,对土壤的溅蚀强度越大,产流量和产沙量越大,对表层土壤的冲刷更强,土壤悬浮颗粒和微塑料同时流失,导致微塑料迁移至河流、湖泊和水库等地表水体[15,35-37].因此,降雨强度是影响坡耕地土壤微塑料流失的主要因子之一.

坡度是反映地形的主要指标,也是影响产流和土壤表面颗粒物流失的主要因素[38].本实验表明,土壤坡度对微塑料流失量、产流量、产沙量和下渗量有显著的影响(P<0.05),随坡度逐渐增加产流量和产沙量不断增加,且径流速度也随之增加,从而入渗时间和入渗量减小[39].本实验结果表明,坡度为 5°、10°和 20°时微塑料流失总量呈现先减小后显著增加趋势,微塑料流失总量 5°>10°处理组,可能因 5°产沙量较小,而 10°时产沙量显著增加,径流中悬浮的土壤颗粒增加,流失过程中的部分微塑料与土壤颗粒相结合,导致重量增加使部分微塑料保留在土壤中,坡度增加至 20°时重力增加使径流流速增加,使径流中悬浮的微塑料与土壤结合时间减小,导致微塑料流失量增加[40].因此,本实验验证了坡度是影响微塑料流失的重要因素.

3.3 降雨强度和坡度对坡耕地微塑料在土壤水平和垂直方向迁移的影响

因水的动力携带,对表层土壤进行扰动改变原有的土壤结构,部分微塑料在迁移过程中与土壤结合逐渐在土壤表层沉积,有研究表明微塑料在迁移过程中会与土壤团聚或吸附污染物,导致重量增加而发生沉积,并进入更深层的土壤中[41].本实验结果表明,不同降雨强度下降雨在无地表径流产生时,60mm/h 降雨强度增加至 90mm/h 后,在一定程度上减小了微塑料在土壤水平方向的迁移总量,反而促进微塑料在土壤深层迁移总量,可能因降雨强度增加使降雨量增加,导致微塑料水平迁移距离增加,同时下渗增加,促使水平方向上的微塑料进入更深层土壤,从而影响微塑料在水平和垂直方向上的迁移[42];而降雨产生地表径流时,本实验发现,120 和 180mm/h 降雨条件下,随降雨强度增加微塑料的水平和垂直迁移总量均呈现减小趋势,可能因降雨强度增加微塑料随地表径流流失加剧,导致土壤水平和垂直方向可迁移微塑料减小;同时因降雨强度增加产流量、产沙量和下渗量增加,导致雨水冲击力和径流流速增加,对土壤表层扰动增强,进而导致微塑料远距离迁移量和迁移深度不断增加[18,20,43].

当坡度为 5°、10°和 20°时,随坡度增加重力增大,产流量和产沙量增大,流失速度加快,径流和泥沙共同改变微塑料迁移.实验发现不同坡度处理对土壤水平方向微塑料迁移有着显著的影响(P<0.05),产生径流时,随坡度增加,土壤中微塑料水平迁移总量增加,有研究也发现,坡面上的微塑料迁移丰度和距离随坡度增加而增加[44].实验结果表明 0~10°时的微塑料垂直迁移量和迁移深度不断减小,因坡度增大下渗量减小,导致微塑料迁移量出现不断减小趋势[45];而 20°出现缓慢增加趋势,可能是坡度增大后重力增加使径流速度增加,对表层泥沙扰动增加,使表层较小土壤粒径流失量增加,粗颗粒的则被保持下来,形成新的土壤孔隙,导致微塑料在土壤垂直方向迁移量增加.

红壤坡耕地微塑料迁移受到降雨强度和坡度的影响,降雨强度是影响微塑料迁移的主要因子之一.降雨强度可导致微塑料在水平方向迁移距离更远,坡度也可改变其土壤中的迁移过程;微塑料在水平和垂直方向上分别集中在 9 和 6cm 内.因本实验周期较短,强降雨产生径流后可能加剧表层土壤扰动加剧,可能导致微塑料迁移至深层紧实土壤出现堆积现象,进而影响迁移规律[18,38].

4　结论

4.1　不同降雨强度(120 和 180mm/h)和坡度(5°、10°和 20°)条件下,红壤坡耕地土壤产流量和产沙总量分别为 114.25~261.70mm、25.20~1584.73g/m,随降雨强度和坡度增加呈显著增加的趋势;各处理下渗总量在 31.49~259.40mm 之间,下渗总量随坡度增加显著下降(P<0.05).

4.2　不同降雨强度(120 和 180mm/h)和坡度(5°、10°和 20°)条件下,土壤微塑料在径流中流失总量范围为 23113~39953n/m^2,降雨强度 180mm/h 时的微塑料流失量显著高于其余处理(P<0.05),产流量、产沙量与微塑料流失量呈现正相关关系.

4.3　微塑料在土壤水平的迁移总量在 4.73~31.00n/g 之间,坡度为 0°时水平迁移总量显著高于 5°(P<0.05),微塑料水平迁移总量和降雨强度呈正相关关系(P>0.05).

4.4　土壤微塑料垂直迁移总量在 1.41~11.59n/g 之间,坡度为 20°时垂直迁移总量最大,但 0°时微塑料迁移深度最深,微塑料垂直迁移总量与降雨强度和坡度间呈正相关关系(P>0.05).

参考文献：

[1] Chen L Y, Liu W X, Yang T, et al. Probabilistic material flow analysis of eight commodity plastics in China: Comparison between 2017 and 2020 [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2023,191:106880.

[2] Islam T, Cheng H F. Existence and fate of microplastics in terrestrial environment: A global fretfulness and abatement strategies [J]. Science of The Total Environment, 2024,953:176163.

[3] Li K H, Wang F Y. Global hotspots and trends in interactions of microplastics and heavy metals: a bibliometric analysis and literature review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023,30(41):93309−93322.

[4] 丁贺宁,惠　彩,龙於洋,等.不同环境介质中塑料际病原菌的赋存与传播研究进展 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3978−3993.
Ding H N, Hui C, Long Y Y, et al. Research progress on the occurrence and dissemination of plastisphere pathogens in different environmental media [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3978−3993.

[5] Hale C R, Seeley E M, LA Guardia L J M, et al. A Global Perspective on Microplastics [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020,125(1):e2018JC014719.

[6] Horton A A, Walton A, Spurgeon J D, et al. Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities [J]. Science of The Total Environment, 2017,586:127−141.

[7] Xu J, Zuo R, Shang J H, et al. Nano− and micro−plastic transport in soil and groundwater environments: Sources, behaviors, theories, and models [J]. Science of The Total Environment, 2023,904:166641.

[8] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms [J]. Scientific Reports, 2017,7:1362.

[9] Han N P, Ao H Y, Mai Z, et al. Characteristics of (micro)plastic transport in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Science of The Total Environment, 2023,855:158887.

[10] Zhang S L, Liu X, Hao X H, et al. Distribution of low−density microplastics in the mollisol farmlands of northeast China [J]. Science of The Total Environment, 2020,708:135091.

[11] Cheung P K, Hung P L, Fok L. River Microplastic Contamination and Dynamics upon a Rainfall Event in Hong Kong, China [J]. Environmental Processes, 2018,6:253−264.

[12] Cheung C K H, Christelle N. Impacts of extreme weather events on microplastic distribution in coastal environments [J]. Science of The Total Environment, 2023,904:166723.

[13] Cheung P K, Fok L, Hung P L, et al. Spatio−temporal comparison of neustonic microplastic density in Hong Kong waters under the influence of the Pearl River Estuary [J]. Science of The Total Environment, 2018,628−629:731−739.

[14] Xu D L, Gao B, Wan X H, et al. Influence of catastrophic flood on microplastics organization in surface water of the Three Gorges Reservoir, China [J]. Water Research, 2022,211:118018.

[15] Hitchcock J N. Storm events as key moments of microplastic contamination in aquatic ecosystems [J]. Science of The Total Environment, 2020,734:139436.

[16] Liu D P, Yang Z M, Yang G, et al. Occurrence and emission characteristics of microplastics in agricultural surface runoff under different natural rainfall and short−term fertilizer application [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,477:135254.

[17] 马建刚,王刘雅,张春涛,等.多场次模拟暴雨下 3 种草坪坡地微塑料迁移特征 [J]. 水土保持研究, 2024,31(3):108−114.
Ma J G, Wang L Y, Zhang C T, et al. Migration Characteristics of Microplastics in Three Kinds of Lawn Slope Land Under Multiple Simulated Rainstorm [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(3):108−114.

[18] Zhang X T, Chen Y X, Li X Y, et al. Size/shape−dependent migration of microplastics in agricultural soil under simulative and natural rainfall [J]. Science of The Total Environment, 2022,815:152507.

[19] Park S, Kim I, Jeon W−y, et al. Exploring the vertical transport of microplastics in subsurface environments: Lab−scale experiments and field evidence [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2023,257:104215.

[20] O'Connor D, Pan S Z, Shen Z T, et al. Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet−dry cycles [J]. Environmental Pollution, 2019,249:527−534.

[21] 王帅兵,王克勤,李叔东,等.云南省 2012~2016 年水土保持动态监测结果分析 [J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022,20(6):50−58.
Wang S B, Wang K Q, Li S D, et al. Analysis of the dynamic monitoring results for soil and water conservation during 2012~2016 in Yunnan province [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(6):50−58.

[22] 马志敏,杨素雨,王治国,等.云南局地暴雨分型研究 [J]. 云南大学学

报(自然科学版), 2020,42(1):108-118.
Ma Z M, Yang S Y, Wang Z G, et al. Study on the local rainstorm classification in Yunnan Province [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2020,42(1):108-118.

[23] 陈正发,李 靖,段青松,等.基于 USLE 模型的云南省坡耕地土壤侵蚀和养分流失评价 [J]. 农业工程学报, 2022,38(16):124-134.
Chen Z F, Li J, Duan Q S, et al. Evaluation of soil erosion and nutrient loss of slope farmland in Yunnan Province using USLE model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(16):124-134.

[24] 张素凡,王 龙,余 航,等.云南省日极端降水概率特征及时空变化研究 [J]. 灌溉排水学报, 2017,36(5):11-16.
Zhang S F, Wang L, Yu H, et al. Statistical Analysis and Spatio-temporal Variation of Extreme Rainfalls in Yunnan Province [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017,36(5):11-16.

[25] 宋 鸽,史东梅,朱红业,等.不同耕作措施对红壤坡耕地耕层质量的影响 [J]. 土壤学报, 2020,57(3):610-622.
Song G, Shi D M, Zhu H Y, et al. Effects of Tillage Measures on Quality of Cultivated-layer in Red Soil Slope Farmland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(3):610-622.

[26] 袁海英,侯 磊,梁启斌,等.滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 [J]. 环境科学, 2021,42(7):3166-3175.
Yuan H Y, Hou L, Liang Q B, et al. Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake [J]. Environmental Science, 2021,42(7):3166-3175.

[27] 戴柳云,侯 磊,王 化,等.土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响 [J]. 环境科学, 2024,45(5):3069-3077.
Dai L Y, Hou L, Wang H, et al. Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin [J]. Environmental Science, 2024,45(5):3069-3077.

[28] 白力鑫,何丙辉,李天阳,等.长期施肥与耕作对紫色土坡耕地产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报, 2024,38(1):31-39.
Bai L X, He B H, Li T Y, *et al*. Effects of Long-term Fertilization and Tillage on the Production of Runoff and Sediment on Purple Soil Slope Cropland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(1):31-39.

[29] 王 化,梁启斌,戴柳云,等.洱海上游表流人工湿地对水体微塑料赋存特征的影响 [J]. 环境科学, 2024,45(11):6616-6624.
Wang H, Liang Q B, Dai L Y, et al. Effect of Free Water Surface Constructed Wetland on the Occurrence Characteristics of Microplastics in Water in the Upper Reaches of the Erhai Lake [J]. Environmental Science, 2024,45(11):6616-6624.

[30] 王 琬,张少良,刘 旭,等.水蚀对黑土微塑料运移和分布影响的初步研究 [J]. 水土保持研究, 2024,31(2):1-10.
Wang W, Zhang S L, Liu X, et al. Preliminary Study on the Effect of Water Erosion on the Transport and Distribution of Microplastics in the Mollisols [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):1-10.

[31] Ren Z F, Gui X Y, Xu X Y, et al. Microplastics in the soil-groundwater environment: Aging, migration, and co-transport of contaminants – A critical review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021,49:126455.

[32] 蒋园园,徐 蕾,吴 涛,等.老化前后聚乙烯微塑料在多孔介质中的迁移特性研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2024,40(11):1495-1503.
Jiang Y Y, Xu L, Wu T, et al. Transport Characteristics of Polyethylene Microplastics in Porous Media Before and After Aging [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024,40(11):1495-1503.

[33] 张紫薇,赵文俊,李 奇,等.表层土壤结构对红壤坡耕地产流及产沙过程的影响 [J]. 土壤学报, 2024,61(2):434-444.
Zhang Z W, Zhao W J, Li Q, et al. Effects of Top Soil Structure on Runoff and Sediment Yield of Red Soil Slope Cropland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(2):434-444.

[34] Treilles R, Johnny G, Gasperi A, et al. Microplastics and microfibers in urban runoff from a suburban catchment of Greater Paris [J]. Environmental Pollution, 2021,287:117352.

[35] Naden P S, Murphy J F, Old G H, et al. Understanding the controls on deposited fine sediment in the streams of agricultural catchments [J]. Science of The Total Environment, 2016,547:366-381.

[36] Piñon-Colin J D T, Rodriguez-Jimenez R, Rogel-Hernandez E, *et al*. Microplastics in stormwater runoff in a semiarid region, Tijuana, Mexico [J]. Science of The Total Environment, 2020,704:135411.

[37] Han N P, Zhao Q C, Ao H Y, et al. Horizontal transport of macro- and microplastics on soil surface by rainfall induced surface runoff as affected by vegetations [J]. Science of The Total Environment, 2022, 831:154989.

[38] 袁 溪,潘忠成,李 敏,等.雨强和坡度对裸地径流颗粒物及磷素流失的影响 [J]. 中国环境科学, 2016,36(10):3099-3106.
Yuan X, Pan Z C, Li M, et al. Influence of rainfall intensity and slope gradient on suspended substance and phosphorus losses in runoff [J]. China Environmental Science, 2016,36(10):3099-3106.

[39] Deng L Z, Sun T Y, Fei K, et al. Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China [J]. Geomorphology, 2020,352:106997.

[40] Rehm R, Zeyer T, Schmidt A, et al. Soil erosion as transport pathway of microplastic from agriculture soils to aquatic ecosystems [J]. Science of The Total Environment, 2021,795:148774.

[41] Alimi S O, Budarz F J, Hernandez M L, et al. Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(4):1704-1724.

[42] Xing X G, Yu M, Xia T J, et al. Interactions between water flow and microplastics in silt loam and loamy sand [J]. Soil Science Society of America Journal, 2021,85(6):1956-1962.

[43] 李煜瑄,窦 明,李桂秋,等.水体中微塑料迁移行为的水力学实验与数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1765-1776.
Li Y X, Dou M, Li G Q, et al. Hydraulic experiments and numerical simulation of microplastics migration in aquatic environments [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1765-1776.

[44] Laermanns H, Lehmann M, Klee M, et al. Tracing the horizontal transport of microplastics on rough surfaces [J]. Microplastics and Nanoplastics, 2021,1(1):11.

[45] Xiao D, Li S W, Chen Z, et al. Microplastic and silica colloid transport in a saturated porous medium under various flow directions: the effect of gravity [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2023,235(1):3.

作者简介：黄蕃攀(2000-),男,海南海口人,西南林业大学硕士研究生,主要研究方向为微塑料环境行为.发表论文 1 篇.fphuang12@163.com.