

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.027.

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 Jiangang, Wang Liuya, Zhang Chuntao, 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.

多场次模拟暴雨下 3 种草坪坡地微塑料迁移特征

马建刚, 王刘雅, 张春涛, 赵学海

(西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224)

摘 要: [目的] 探明降雨径流和水分入渗下的微塑料在坡地草坪内的迁移特征, 为草坪截存微塑料估算及城市草坪选择提供依据。[方法] 通过人工模拟多场暴雨, 在径流小区上研究了 3 种坡地草坪微塑料的径流迁移和土内垂直迁移特征。[结果] 绝大多数微塑料保留在草地内; 微塑料迁移量随着径流的增加和消减阶段而相应变化, 但径流稳定阶段微塑料迁移量呈波动式下降趋势; 随着降雨场次的增加, 微塑料迁移量及其波动显著降低; 微塑料粒径减小其径流迁移量增大, 但小于 0.5 mm 后微塑料迁移量无差异。微塑料向土内最大迁移深度集中在 15 cm 内; 随着降雨场次增加, 迁移深度无明显增加; 迁移粒径主要是 <0.25 mm 的微塑料, 但其 10 cm 以下迁移量不足 0—5 cm 的 1%, 0—5 cm 土壤内微塑料在上坡位淋失, 在下坡位富集。[结论] 微塑料迁移与径流过程和水分入渗规律并不完全一致, 且短期降雨引起的微塑料水平和垂直迁移比较少, 白三叶草地微塑料的迁移量最少, 黑麦草草地最多, 狗牙根的水平迁移和垂直迁移量居中。

关键词: 模拟降雨; 暴雨; 坡地草坪; 微塑料; 迁移

中图分类号: S157; X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0108-07

Migration Characteristics of Microplastics in Three Kinds of Lawn Slope Land Under Multiple Simulated Rainstorm

Ma Jiangang, Wang Liuya, Zhang Chuntao, Zhao Xuehai

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] Exploring the migration characteristics of microplastics under rainstorm runoff and water infiltration in sloping lawns, providing a basis for estimating the interception of microplastics in lawns and selecting urban lawns. [Methods] The characteristics of microplastic migration with runoff and vertical migration in soil of three kinds of sloping grassland were studied on runoff plots by artificial simulation of multiple rainstorms. [Results] The vast majority of microplastics remained in the grassland. The migration quantity of microplastics changed with the increase and decrease of runoff, but the migration of microplastics in the stable stage of runoff showed a fluctuating downward trend. With the increase of rainfall events, the migration and fluctuation of microplastics decreased significantly. The runoff migration increased with the decrease of microplastic particle size, but there was no difference in the migration of microplastics when the particle size was less than 0.5 mm. The vertical migration depth of microplastics concentrated within 15 cm. With the increase of rainfall, the depth did not increase significantly. The particle size of microplastics with vertical migration was mainly <0.25 mm, and the migration amount below 10 cm was less than 1% of 0—5 cm. The microplastics in 0—5 cm soil leached in the uphill position and enriched in the downhill position. [Conclusion] Short-term rainfall causes less horizontal and vertical migration of microplastics, and the migration of microplastics in white clover grassland is the least, is the most in ryegrass grassland, and the horizontal migration and vertical migration in Bermuda grass are in the middle.

Keywords: simulated rainstorm; slope lawn; microplastics; runoff migration; vertical migration

收稿日期: 2023-07-30

修回日期: 2023-08-13

资助项目: 国家自然科学基金(42261007); 西南林业大学博士科研启动基金(202220050049)

第一作者: 马建刚(1978—), 男, 山西古县人, 博士, 副教授, 主要从事城市与山地水土保持研究。E-mail: 12578734@qq.com

<http://stbcj.paperonce.org>

城市是微塑料的主要来源地,一部分微塑料直接被冲刷进入附近水体,另一部分则可能被保留在城市绿地系统^[1-4]。微塑料停留在土壤表面会在雨水径流和入渗水分作用下引起流失和深层再分布^[3,5-6],这一过程在农业裸露土壤方面得到了更多的研究。在植被对微塑料截留方面,植被相对于裸地具有更好的微塑料截留效果,其中麦冬草比红叶石楠的截留效果更好^[5],野外调查也表明植被区域土壤中微塑料截留量大、植被区域的地表径流微塑料更少^[7-9],然而植被对微塑料的截留方面的研究除了 Han 等^[5]的研究外,其他均是基于野外调查得到的结论,调查结论的前期径流和入渗的数量过程不清楚,导致降雨引起的微塑料迁移规律和分布机制尚不十分明晰。

暴雨是城市草坪出现径流的主要情况,因此,本

研究基于设定多场暴雨条件下,以更易发生径流的坡地草坪为对象,研究微塑料在径流和入渗下的迁移与再分布过程,有助于更好地了解微塑料在城市草坪地内的运移特征,并为防止陆地环境微塑料进入水体提供指导。

1 材料与方法

1.1 径流小区概况

人工模拟降雨室内试验小区选择坡度为 13°的人工草地 3 块,每个小区面积 25 m²(长×宽=10 m×2.5 m),植被分别为白三叶(*Trifolium repens* L.)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* L. Persoon),人工种植与管理时长为 8 个月,试验小区基本情况见表 1。

表 1 径流小区基本情况
Table 1 Basic situation of runoff plot

土壤类型	质地	植被类型	土壤容重/(g·cm ⁻³)	密度/(株·dm ⁻²)	株高/cm	覆盖度/%
红壤	黏壤土	白三叶	1.08(0—5 cm)	10.7	12.78	90.40
		黑麦草	1.28(5—10 cm)	12.5	13.13	90.10
		狗牙根	1.35(10—20 cm)	13.4	11.40	89.80

1.2 微塑料添加

试验选择的微塑料种类为聚丙烯(Polypropylene,简称为 PP),密度为 0.92~0.97 g/cm³,考虑到较小粒径微塑料回收率低的问题,选择 5 个粒径梯度,分别为 0.10~0.25 mm,0.25~0.5 mm,0.5~1.0 mm,1.0~1.5 mm,1.5~2.0 mm。草坪管理 7 个月后、试验开始前 1 个月均匀添加微塑料,添加量为土壤表层 1 cm 内微塑料含量为 0.5%(即 1 kg 土壤中含有 5 g 微塑料),添加总量为 54 g/m²,每个粒径均为 10.8 g/m²,每块径流小区添加总量为 1 350.0 g。采用分格少量多次均匀添加至草地土壤表面,分格水分管理 1 个月且期间不允许产生坡面径流。

1.3 降雨设备及降雨标准

试验用降雨设备为全自动下喷式人工降雨系统,有效降雨高度为 4.5 m,设置降雨标准为昆明市 20 a 一遇 1 h 暴雨量(60 mm/h)。降雨标准误差为±5.37 mm/h,降雨均匀度>85%。

1.4 降雨过程与径流采样

试验共进行 5 场降雨,每场降雨结束后待土壤含水量达 70%~80%田间持水量后再次进行(降雨场次依次记为 P1,P2,P3,P4,P5),每次降雨时长为初始产流开始后再持续降雨 30 min 结束。降雨产流开始后,以 2 min 为间隔,全量收集每 2 min 内的径流一次,直至产流结束。收集的径流样用于测定微塑料特征。

1.5 土壤采样

添加微塑料后,初次降雨前及每一次降雨结束后分别采集坡上(距坡顶 3.0~3.2 m 范围)、坡下(距坡顶 7.0~7.2 m 范围)0—5,5—10,10—15,15—20 cm 土壤并测定土层内的微塑料含量。采样 3 个位置重复,采样坑使用同类型土回填,两次采样点之间及采样点与径流小区边界距离不小于 20 cm。

1.6 微塑料提取与测定

(1) 径流中微塑料使用 Fe(Ⅱ)溶液消解后采用 NaCl 饱和液浮选提取^[10]、土壤中微塑料采用偏磷酸钾溶液分离后,使用 ZnCl₂ 溶液(1.6 g/L)浮选^[11]。(2) 微塑料提取液静止 24 h,上清液进行真空抽滤到玻璃纤维滤膜上,低温烘干后,通过显微镜观测出图,使用 imageJ 软件进行分类计数。(3) 微塑料密度普遍小于水密度,在浑水沉淀后,本研究沉淀后的泥沙中难以分选出微塑料,因此重点对径流和坡面土壤中的微塑料进行分选和测定。

1.7 数据处理

降雨试验及测定等于 2022 年 9 月—12 月内完成,使用 SPSS Statistics23 软件进行相关性分析,Microsoft Excel 2019,Origin 2018 进行数据统计分析和作图。

径流的微塑料迁移强度计算:

$$I=\frac{M}{A}$$

(1)

式中:I 为径流的微塑料迁移强度(g/m²),表示单位

面积内随径流迁移的微塑料含量; M 为径流中迁出径流小区的微塑料量(g); A 为小区面积(25 m^2)。

2 结果与分析

2.1 径流过程

产流后的径流过程见图1。径流量在产流后第

0~10 min内上升并趋于稳定,10~30 min内处于高值阶段并相对稳定,30~36 min属于径流消退阶段(图1)。

3种草地的径流系数依次为0.29,0.38,0.32,其中白三叶与黑麦草产流过程差异极显著($p<0.01$),其他差异均不显著。

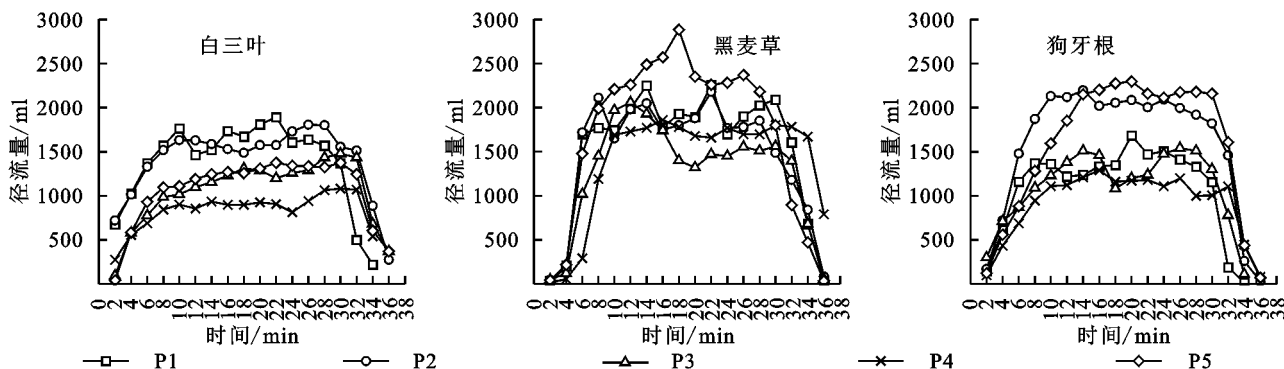


图1 3种草坪地径流过程

Fig. 1 Runoff process of three types of lawn slopes

2.2 微塑料的径流迁移

2.2.1 迁移过程与迁移量 微塑料首次添加后,随着降雨场次的增加,各时段内的微塑料迁移量逐渐减少(图2)。微塑料随地表径流的迁移在产流后第0~6 min内上升,30~34 min内微塑料迁移量呈下降趋势,微塑料迁移变化规律与径流量过程一致。6~30 min内径流量在高值阶段相对稳定,第1,2,3场降雨雨

下,此时段内微塑料迁移量并不是稳定在某个数值,而是起伏波动并呈现出降低的趋势,这与王慧^[6]在裸露土壤上的研究结果一致,应是随着降雨径流的持续,土壤表层残留的可被携带的微塑减少的缘故。随着表层微塑料的减少,或微塑料与土壤的结合愈发紧密的影响,第4,5场降雨下微塑料迁移量减少,波动幅度降低。

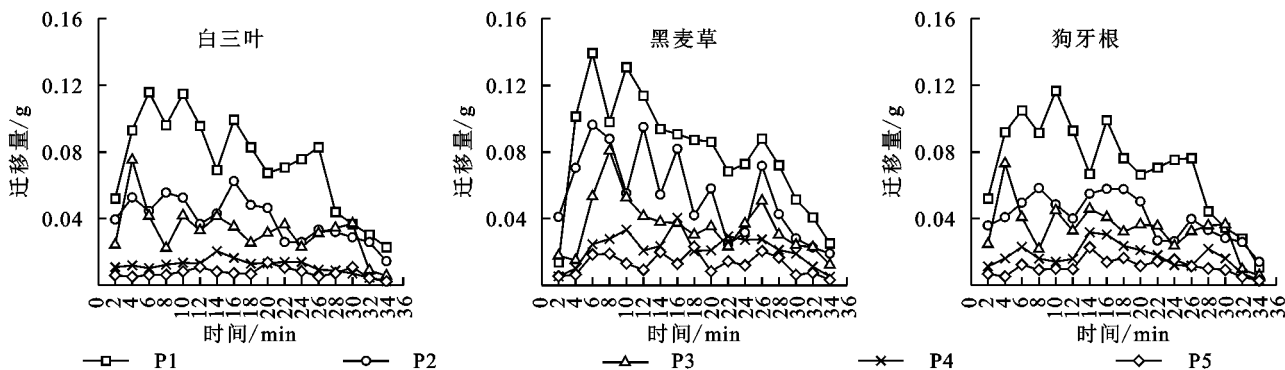


图2 3种草坪地微塑料随地表径流的迁移过程

Fig. 2 Migration process of microplastics along the runoff on three kinds of lawn slopes

试验发现微塑料迁移量峰值比径流量的峰值普遍出现得更早,迁移量高值阶段的稳定性小于径流量稳定性。一是由于微塑料密度小,其比土壤更易被悬浮带走,二是起始阶段的雨滴击溅更易使土壤表层的微塑料被剥离并带走,后期薄层流阶段在草被的阻延下其剥蚀土壤的能力比溅蚀阶段反而下降^[12]。可见,良好的植被盖度,降低雨滴对土壤的溅蚀是防止微塑料悬浮迁移的途径之一。

3种草坪不同降雨场次下微塑料迁移量见图3,3块径流小区迁移量平均为3.072 9 g,平均迁移强度

为0.122 9 g/m²。径流迁移量仅占添加量的0.23%,绝大部分微塑料停留在了草坪坡地上,这与Han等的模拟径流冲刷试验结论一致^[5],与以往的植被区域土壤微塑料含量大于同区域无植被区域的调查结果也比较一致^[7-9]。

3种草地的迁移量不同,第1,3场降雨下迁移量差异不显著,2,4,5迁移量差异显著,表现为黑麦草草地迁移量最大,平均值为3.496 g,其次为狗牙根2.937 g,最少为白三叶2.786 g。白三叶叶片近水平展开,其对雨水的拦截可以有效降低雨滴击溅作用,

其产流量也是最少的,狗牙根有匍匐茎,对径流的拦截作用显著,其产流量次少,在覆盖度相近的情况下,黑麦草直立茎叶,其缓冲雨滴与拦截径流的效果比白三叶、狗牙根差,其产流量和微塑料迁移量最大。

结合图 2 可以看出,微塑料的迁移峰值,黑麦草比白三叶、狗牙根都大。说明,草本覆盖度相近时,阔叶类、匍匐茎类草本比直立型、披针形草本截留微塑料效果更好。

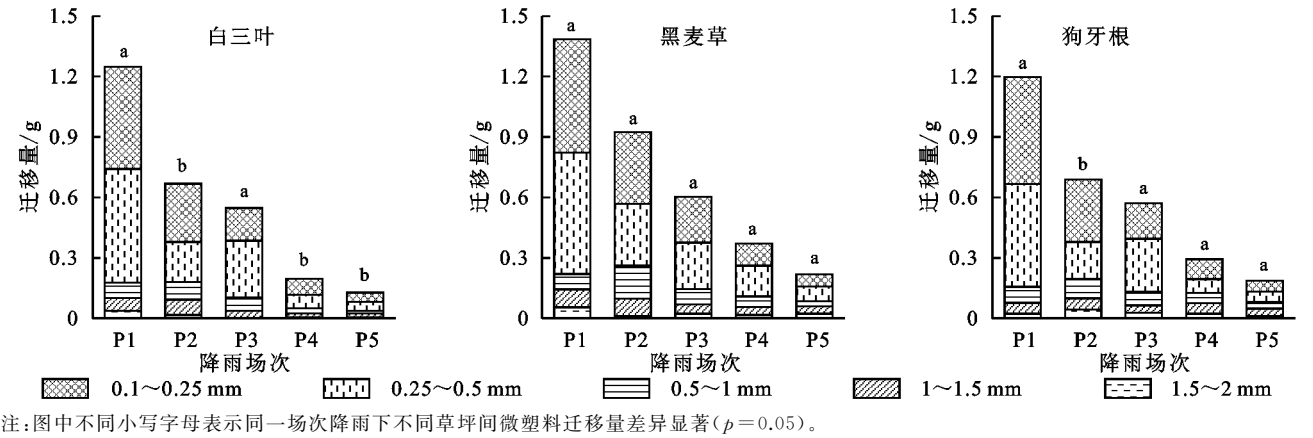


图 3 不同降雨场次各粒径微塑料累计迁移量

Fig. 3 Cumulative migration of microplastics with different particle sizes in different rainfall

2.2.2 不同粒径微塑料迁移比例 不同草地、每场降雨下的各粒径微塑料的迁移比例不同(表 2)。粒径从大到小,微塑料迁移比例平均值依次为 4.10%, 10.40%, 12.21%, 36.83%, 36.46%, 随着粒径的减小迁移比例增大, <0.5 mm 后微塑料迁移比例接近, 且两个粒径微塑料迁移比例 >70%, 说明 <0.5 mm 微塑料是坡地草坪上随径流迁移的主要物质。随着降雨场次的增加, 草坪内表层微塑料减少, 随着迁移量的降低, 小粒径的微塑料迁移比例下降, 大粒径的迁移比例增大, 如白三叶草地第 1, 5 场降雨中, 0.10~0.25 mm 微塑料迁移比例由 40.66% 降低为 36.65%, 1.5~2.0 mm 的由 3.03% 增大为 4.25%。

虽然以往研究使用微塑料种类和大小不同, 但是都表明细小微塑料随水迁移能力更强, 5 个粒径

(0.25, 1.0, 4.0, 15.0, 50.0 mm) 微塑料在多种降雨冲刷下, 植被区径流中只检出了 ≤1.0 mm 的微塑料, 且 0.25 mm 的显著多于 1.0 mm 的^[5], 李海燕等^[13]总结得到城市区域地表水体中微塑料尺寸也主要集中在 0.5 mm 以下。

持续降雨冲刷引起径流中微塑料粒径组成变化尚查遇不到相似文献, Wei 等研究表明^[14], 降雨前后北京清河中虽然小尺寸(0.05~0.3 mm)微塑料占主导, 但是降雨后小尺寸微塑料组成下降, 0.3~1.0 mm 与 >1.0 mm 的微塑料比例增加, 若考虑雨水的稀释作用, 则认为 0.3~1.0 mm 的微塑料增加量更大, 这其中还包括了由不透水地表直接被雨水携带进河流的微塑料。可以认为降雨冲刷下小粒径微塑料比例减低, 大粒径微塑料比例增大。

表 2 各粒径微塑料迁移比例

Table 2 Migration ratio of microplastics with different particle sizes											%				
粒径/mm	白三叶					黑麦草					狗牙根				
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5
1.5~2	3.03	2.43	0.00	2.77	4.25	3.91	1.17	3.59	4.39	9.95	1.80	6.29	4.73	7.37	5.81
1~1.5	5.04	11.45	6.78	9.79	14.14	6.41	9.37	7.64	10.65	17.58	4.59	8.17	6.49	18.01	19.93
0.5~1	6.07	13.00	11.81	12.57	9.79	5.62	17.71	12.91	14.23	11.46	6.62	14.15	11.50	17.12	18.61
0.25~0.5	45.21	29.81	51.95	35.22	35.54	43.39	33.28	38.17	41.24	33.40	42.64	26.57	46.22	23.69	26.06
0.1~0.25	40.66	43.32	29.47	39.65	36.28	40.67	38.46	37.69	29.48	27.60	44.33	44.83	31.06	33.80	29.58

2.3 微塑料土壤内的垂直迁移

2.3.1 迁移深度 3 种草地不同降雨场次下不同土层深度上各粒径微塑料含量见图 4—6。随着降雨期间水分入渗的持续发生微塑料向土内迁移, 黑麦草草地第一场降雨结束后, 微塑料已经迁移至 5—10 cm 土层(图 5), 白三叶和狗牙根均在第二场降雨才迁移

至 5—10 cm。白三叶第 4 场降雨后微塑料迁移至 15—20 cm 层(仅为上坡位 0.1~0.25 mm 微塑料, 含量为 0.000 3 g/kg)(图 4), 推测应为受到大孔隙影响的偶发现象, 其他两个草地最大迁移深度均为 10—15 cm 土层, 3 种草地迁移深度无差异。虽然长期的淋溶作用可以使微塑料迁移至 100 cm 的土层^[15], 但在短期模拟试

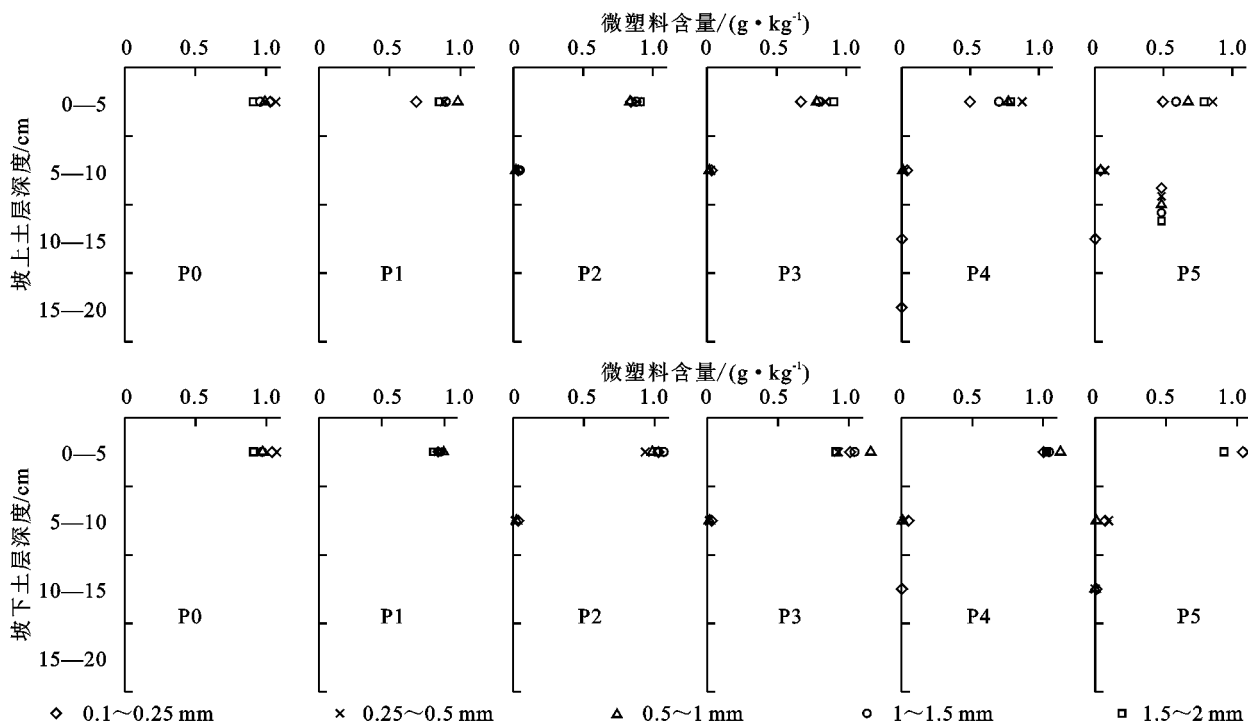
验下,微塑料迁移都集中在表层^[16-18],且主要集中在10 cm内,主要是表层松散土壤有利于水分携带微塑料发生垂直迁移,遇到下部紧实土壤水分入渗速率和入渗量降低,微塑料迁移变少、变慢,甚至在过渡层间发生积累现象^[17,19]。

不同粒径微塑料垂直迁移深度不同,1.5~2.0 mm的全部集中在0—5 cm土层,没有深层迁移;1.0~1.5 mm的微塑料仅在白三叶第2场降雨后出现在5—10 cm土层;0.25~1.0 mm的仅迁移到5—10 cm土层,且在第二场降雨后就有明显迁移,但是后续降雨没有再发生深层迁移;10 cm以下只有0.1~0.25 mm的微塑料,且在第3场降雨后才迁移到10—15 cm,第4、5场降雨期间没有再向深层迁移。

2.3.2 迁移量 粒径较小或进一步分解成更为细小的微塑料后才更容易向深层迁移^[16-18],本研究中迁移至5 cm以下的主要是<1.0 mm的颗粒,5场降雨后0—5 cm保存的微塑料均值为4.49 g/kg,迁移到5 cm以下的微塑料均值为0.17 g/kg,仅占初期0—5 cm土壤

微塑料的0.35%;迁移到10 cm以下的仅为0.006 g/kg,占初期0—5 cm微塑料的0.13%。Li等^[20]使用黑麦草在2个月天然降雨约210 mm的情况下,微塑料土壤内迁移量的90%均在10 cm深度内,受到极小颗粒微塑料无法回收测定的影响,10 cm以下回收率仅为1%,黑麦草比玉米和大豆土壤微塑料的迁移量和深度均小,草地的细根性比玉米、大豆的粗根性更不利于微塑料的垂直迁移。

3种草地上,在5 cm以下均有迁移的同时,上坡位和下坡位不同,上坡位0—5 cm土壤以淋失为主,降雨后土壤微塑料含量平均为3.491 g/kg,相对于降雨前淋失了28.90%;下坡位0—5 cm以富集为主,降雨后土壤微塑料含量平均为5.488 g/kg,相对于降雨前富集了11.64%;同时5—15 cm上坡位与下坡位土壤微塑料分别为0.159 6,0.158 5 g/kg,无明显差异。下坡位0—5 cm富集的微塑料中,全部是0.25~2.0 mm的微塑料,粒径由大到小增加比例依次为8.70,21.31,31.28%,而0.1~0.25 mm的淋失了0.043 g/kg,淋失占比为4.07%。



注:图中P0表示添加微塑料后模拟降雨前,第1—5场降雨标记为P1—P5,下同。

图4 不同降雨场次下白三叶草地土壤微塑料

Fig. 4 Soil microplastics of white clover under different rainfall fields

3种草地间,微塑料的垂直迁移无差异,但是迁移数量不同,坡上位黑麦草5 cm以下迁移量最少为0.05 g/kg,狗牙根最多为0.21 g/kg,白三叶为0.16 g/kg,坡下位依次位0.21,0.15,0.18 g/kg。由于黑麦草径流微塑料流失量最大,使得上坡位深层迁移最少,而在下坡位富集的情况下,黑麦草深层迁移量却最大。

3 结论

(1) 5场暴雨总降雨量156 mm下,微塑料在降雨径流作用下仅有添加量的0.23%发生了水平迁移。单位时间内微塑料迁移量在径流增长和消退阶段随着径流增加和减少相应的增加和减少,但是径流稳定阶段微塑料的迁移量变化呈波动式下降趋势,在水平迁移的

微塑料中,粒径 1.5~2.0,1.0~1.5,0.5~1.0,0.25~0.50, 36.83,36.46%。3 种草地上白三叶截留的微塑料最多,0.1~0.25 mm 微塑料迁移比例依次为 4.10,10.40,12.21, 其次为狗牙根,黑麦草草地截留的微塑料最少。

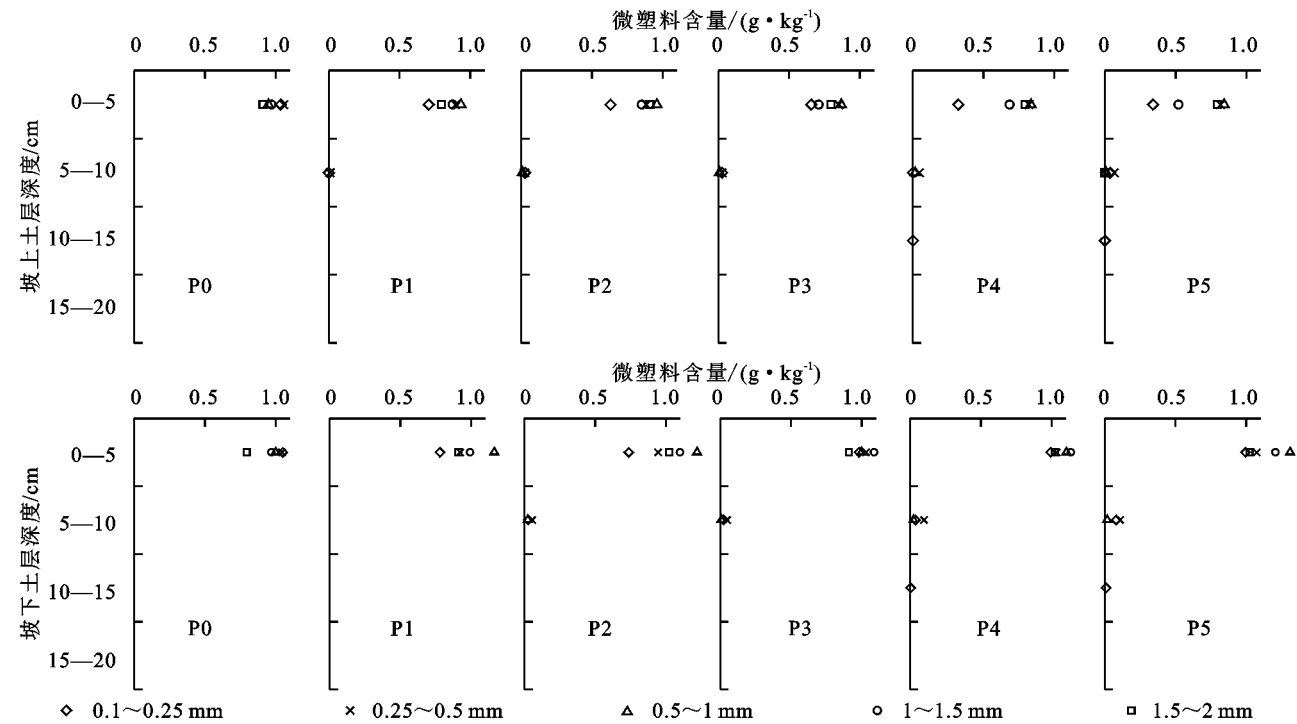


图 5 不同降雨场次下黑麦草草地土壤微塑料

Fig. 5 Soil microplastics of ryegrass under different rainfall fields

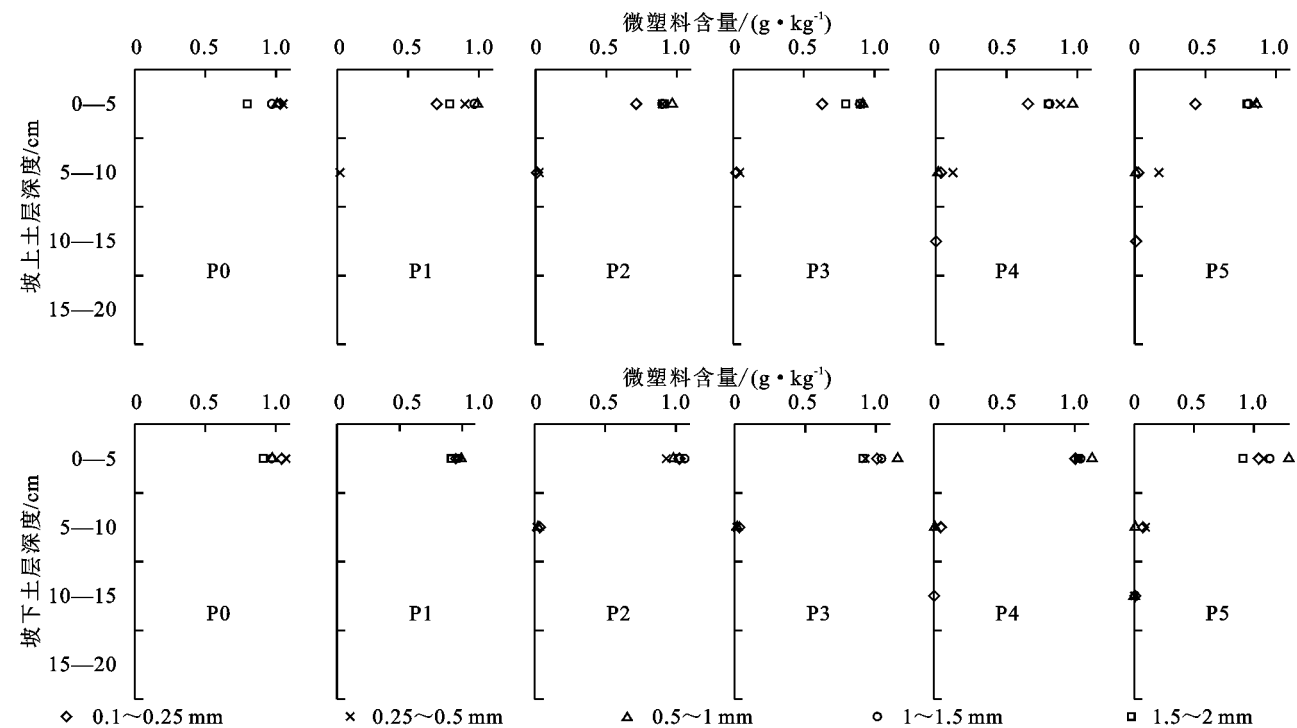


图 6 不同降雨场次下狗牙根草地土壤微塑料

Fig. 6 Soil microplastics of Bermuda grass under different rainfall fields

(2) 在水分入渗作用下微塑料发生了土内垂直迁移,迁移深度有限,迁移量少。

以 0—5 cm 为参照,1.5~2.0 mm 的微塑料没有发生深层迁移,1.0~1.5 mm 仅偶在白三叶草地 5—10 cm 土层观测到,0.25~1.0 mm 微塑料仅可迁移至 5—10 cm 土层,0.1~0.25 可迁移至 10—15 cm。向 5 cm 以下发生迁移的微塑料仅占土壤单位面积微塑料添加量的 0.35%。

参考文献(References):

- [1] Wei L F, Yue Q, Chen G L, et al. Microplastics in rainwater/stormwater environments: Influencing factors, sources, transport, fate, and removal techniques[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2023,165:117147.
- [2] Treilles R, Gasperi J, Gallard A, et al. Microplastics and microfibers in urban runoff from a suburban catchment of Greater Paris [J]. *Environmental Pollution*, 2021,287:117352.
- [3] 崔砚琦.北京城市不同功能区径流雨水微塑料赋存特征研究[D].北京:北京建筑大学,2022.
Cui Y Q. Research on the occurrence characteristics of microplastics in runoff rainwater in different functional areas of Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.
- [4] 张雅珊,陈宗耀,马伟芳.微塑料的迁移转化及其生态风险研究进展[J].*化工进展*,2022,41(11):6080-6098.
Zhang Y S, Chen Z Y, Ma W F. Research progress on the migration and transformation of microplastics and environmental risks [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022,41(11):6080-6098.
- [5] 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.
- [6] 薄录吉,李冰,张凯,等.农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J].*环境科学*,2023,44(4):2375-2383.
Bo L J, Li B, Zhang K, et al. Distribution, sources, and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2023,44(4):2375-2383.
- [7] Yin L S, Wen X F, Huang D L, et al. Microplastics retention by reeds in freshwater environment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021,790:148200.
- [8] Liu F, Vianello A, Vollertsen J. Retention of microplastics in sediments of urban and highway stormwater retention ponds[J]. *Environmental Pollution*, 2019,255(2):113335.
- [9] Smyth K, Drake J, Li Y R, et al. Bioretention cells remove microplastics from urban stormwater [J]. *Water Research*, 2021,191:116785.
- [10] 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.
- [11] Radford F, Zapata-Restrepo L M, Horton A A, et al. Developing a systematic method for extraction of microplastics in soils[J]. *Analytical Methods*, 2021,13(14):1695-1705.
- [12] 杨帆,程金花,张洪江,等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J].*农业机械学报*,2016,47(5):129-137.
Yang F, Cheng J H, Zhang H J, et al. Effect of herb plants on soil detachment and erosion dynamics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016,47(5):129-137.
- [13] 李海燕,杨小琴,简美鹏,等.城市水体中微塑料的来源、赋存及其生态风险研究进展[J].*生态环境学报*,2023,32(2):407-420.
Li H Y, Yang X Q, Jian M P, et al. A critical review on the sources, occurrences and ecological risk of microplastics in urban waters [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023,32(2):407-420.
- [14] Wei Y T, Dou P, Xu D Y, et al. Microplastic reorganization in urban river before and after rainfall[J]. *Environmental Pollution*, 2022,314:120326.
- [15] 王长远,马啸驰,郭德杰,等.长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响[J/OL].*环境科学*:1-15 [2023-07-27]. doi:10.13227/j. hjkx.202304174.
Wang C Y, Ma X C, Guo D J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on the occurrence and migration characteristics of soil microplastics [J/OL]. *Environmental Science*: 1-15 [2023-07-27]. doi:10.13227/j. hjkx.202304174.
- [16] 向黎,杨杰,涂晨,等.生物和非生物因素对蚯蚓驱动土壤中微塑料垂向迁移的影响研究[J].*生态与农村环境学报*,2023,39(5):599-607.
Xiang L, Yang J, Tu C, et al. Effects of biotic and abiotic factors on the vertical migration of microplastics in soil driven by earthworms [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023,39(5):599-607.
- [17] 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.
- [18] 张佳佳,陈延华,王学霞,等.土壤环境中微塑料的研究进展[J].*中国生态农业学报(中英文)*,2021,29(6):937-952.
Zhang J J, Chen Y H, Wang X X, et al. A review of microplastics in the soil environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021,29(6):937-952.
- [19] 王慧.淮河流域王蚌区间农业源微塑料迁移特征及影响因素研究[D].安徽淮南:安徽理工大学,2022.
Wang H. Study on migration characteristics and influencing factors of microplastics in agricultural sources in Wangbeng region of Huaihe river basin [D]. Huainan, Anhui: University of Science and Technology, 2022.
- [20] Li H X, Lu X Q, Wang S Y, et al. Vertical migration of microplastics along soil profile under different crop root systems [J]. *Environmental Pollution*, 2021,278:116833.