

# 施用除草剂对喀斯特土壤溶解性有机碳运移的影响

张友<sup>1,2,6</sup>, 戴全厚<sup>2</sup>, 石正驰<sup>1,6</sup>, 严友进<sup>3</sup>, 胡泽银<sup>4</sup>, 周红<sup>5</sup>

(1.铜仁职业技术大学, 贵州 铜仁 554300; 2.贵州大学 林学院,

贵阳 550025; 3.南京林业大学, 南京 210037; 4.贵州师范大学 贵阳 550025;

5.铜仁学院, 贵州 铜仁 554300; 6.喀斯特农业面源污染控制与生态修复重点实验室, 贵州 铜仁 554300)

**摘要:** [目的] 揭示极端降雨条件下草甘膦施用对喀斯特土壤DOC迁移过程的影响规律, 为科学指导农药管理、防控面源污染、保障生态安全提供重要的理论依据。[方法] 利用可变坡钢槽模拟喀斯特地表微地形和地下孔裂隙的双层空间结构, 结合人工降雨模拟试验, 探讨了3种雨强水平(60, 100, 120 mm/h)和3种坡度(10°, 15°, 25°)条件下草甘膦除草剂对喀斯特土壤DOC迁移过程的影响规律。[结果] 在不同雨强条件下, 地表径流、壤中流和地下径流中的DOC含量分别为52.6~63.4 mg/L, 38.5~44.1 mg/L, 27.4~33.4 mg/L。喷洒草甘膦除草剂后, 地表径流、壤中流和地下径流中的DOC变化量分别为52.7%~84.1%, 16.6%~33.6%, -17.0%~1.0%。此外, 土壤DOC主要通过地表径流和地下径流两种途径迁移, 且在极端暴雨下以地表径流为主。雨强和坡度是影响DOC迁移的重要环境因素。[结论] 草甘膦的施用显著加剧了喀斯特土壤中DOC的流失, 进而威胁周围土壤和水质的安全, 并在一定程度上增强施用区域的“碳源”效应。

**关键词:** 除草剂; 草甘膦; 溶解性有机碳; 喀斯特; 土壤

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0224-08

## Effects of herbicide application on transport of dissolved organic carbon in karst soils

Zhang You<sup>1,2,6</sup>, Dai Quanhou<sup>2</sup>, Shi Zhengchi<sup>1,6</sup>, Yan Youjin<sup>3</sup>, Hu Zeyin<sup>4</sup>, Zhou Hong<sup>5</sup>

(1. Tongren Polytechnic University, Tongren, Guizhou 554300, China; 2. College of Forestry, Guizhou

University, Guiyang 550025, China; 3. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 4. Guizhou Normal

University, Guiyang 550025, China; 5. Tongren University, Tongren, Guizhou 554300, China; 6. Tongren Key Laboratory

of Karst Agricultural Non-Point Source Pollution Control and Ecological Restoration, Tongren, Guizhou 554300, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to elucidate the impact of glyphosate application on the transport process of dissolved organic carbon (DOC) in karst soils under extreme rainfall conditions. The findings provide critical insights for guiding pesticide management, controlling non-point source pollution, and safeguarding ecological security. [Methods] A dual-layer experimental setup was constructed using variable-slope steel flumes to simulate the microtopography of karst surfaces and subsurface fissure structures. Artificial rainfall simulations were conducted under three rainfall intensities (60, 100 and 120 mm/h) and three slope gradients (10°, 15° and 25°) to investigate the effects of glyphosate application on DOC migration in karst soils. [Results] Under varying rainfall intensities, DOC concentrations in surface runoff, interflow and underground flow ranged from 52.6~63.4 mg/L, 38.5~44.1 mg/L, 27.4~33.4 mg/L, respectively. Following glyphosate application, DOC levels in these flow paths changed by 52.7%~84.1%, 16.6%~33.6%, -17.0%~1.0%, respectively. DOC was mainly transported via surface and

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2025-05-28

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 国家自然科学基金“喀斯特碳酸盐岩与碎屑岩交互区坡面土壤侵蚀过程与机理”(42167044); 铜仁市新型功能材料产教联合体项目(2222165)

第一作者: 张友(1990—), 男, 土家族, 贵州思南人, 博士, 研究方向为农业面源污染。E-mail: zyou5339@163.com

通信作者: 戴全厚(1969—)男, 陕西长武人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与生态重建研究。E-mail: gzudjj@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

underground flows, with surface runoff being the dominant pathway under extreme rainfall. Rainfall intensity and slope were identified as key environmental factors influencing DOC transport. [**Conclusion**] Glyphosate application significantly increases DOC loss in karst soils, potentially threatening soil and water quality in surrounding areas and exacerbating the carbon source effect in treated regions.

**Keywords:** herbicide; glyphosate; dissolved organic carbon; karst; soil

土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)是衡量土壤质量和生态系统功能的重要指标之一,在维持土壤肥力、调节气候变化和全球碳循环中发挥着核心作用<sup>[1-2]</sup>。其中,溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC $<0.45\ \mu\text{m}$ )是SOC中最活跃、迁移性最强的组分,能够通过径流和淋溶过程迅速迁移至水体,对碳输出通量、土壤养分保持及水环境安全产生深远影响<sup>[3]</sup>。尤其在农业生态系统中,DOC的迁移不仅会加剧土壤碳流失和水体富营养化,还可能通过与重金属或农药形成络合物而改变其环境行为<sup>[4]</sup>。水蚀是全球范围内SOC迁移与再分布的主要路径,估算显示由降雨侵蚀引起的DOC流失量可达0.6~1.3 Gt/a<sup>[5]</sup>。这一过程受降雨强度、地形坡度、土壤理化性质、植被覆盖和人为干预等多重因素的影响<sup>[6-7]</sup>。然而,现有研究多集中于颗粒态有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)的流失过程,针对DOC这一活跃有机碳组分的研究仍显不足,特别是在复杂地形条件下其响应机制仍有待深入探讨<sup>[8]</sup>。

近年来,农业管理措施对土壤DOC流动性的影响日益受到关注<sup>[1,9]</sup>。草甘膦作为重要的农业生产资料,广泛应用于农业、林业、水产养殖和城市环境的杂草控制。然而,草甘膦在环境中的富集已对生态系统和人类健康构成了严峻威胁<sup>[10]</sup>。中国作为全球草甘膦的主要生产和使用国,近年来草甘膦的生产和使用量持续增长<sup>[11]</sup>,据统计,草甘膦与抗草甘膦作物结合使用,使得草甘膦使用增加15倍,成为人类历史应用最多的农用化学品<sup>[12]</sup>。虽然已有研究关注草甘膦对土壤微生物活性、土壤呼吸以及有机碳含量等方面的影响<sup>[13]</sup>,但其对土壤DOC释放、转化与迁移路径的具体作用机制仍缺乏系统研究,特别是在喀斯特等生态敏感区,其潜在生态风险亟待深入评估。

喀斯特地区作为全球重要的生态脆弱区之一,约占全球陆地面积的12%,且20%~25%的人口依赖该区域的生态系统<sup>[14-15]</sup>。其中,中国西南部尤为典型。该区土壤覆盖浅薄、裂隙发育、地表微地形复杂,地表-地下系统连通性强,使得DOC在强降雨条件下更易通过径流快速迁移至下垫水体,放大了农业活动对碳流失与水质污染的影响<sup>[15]</sup>。近年频发的极端暴雨及土地高强度利用进一步加剧了该区域的碳流失风险<sup>[16]</sup>。以往研究主要集中在“喀斯特地貌环境与理

化性质”“土地管理类型与植被恢复”“土壤微生物与环境效益方面的研究,而对DOC的动态响应与迁移路径研究仍十分有限<sup>[17]</sup>。在“双碳”战略目标背景下,明确草甘膦施用对喀斯特土壤DOC迁移特征的影响机制,既有助于揭示农业干预与土壤碳稳定性之间的关系,也为喀斯特地区的农业管理、面源污染防控与生态保护提供理论支撑。因此,本研究以喀斯特地区典型地貌单元为对象,利用可变坡钢槽模拟地表微地形与地下孔裂隙的双层空间结构,结合人工降雨试验,系统探讨草甘膦在不同坡度与降雨强度条件下对土壤DOC迁移过程的影响规律,旨在为绿色农业发展、碳迁移与区域生态安全提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设备与材料

本研究采用自主设计的可调坡度模拟钢槽(专利号:CNZL201010545602.7)与人工模拟降雨系统,构建模拟喀斯特地貌特征的试验平台。钢槽结构示意图如图1所示。该钢槽整体尺寸为长4.0 m、宽1.0 m、深0.35 m,由两块底板组成,底板上均匀分布有共计217个直径为5 cm的通孔。通过调节两底板孔洞之间的重叠面积,可实现0~10%范围内的孔隙度调控,从而模拟不同强度的地下孔(裂)隙结构。钢槽坡度可在0°~45°连续调节,便于模拟不同坡度条件下的地表与地下径流过程。槽体设有集流槽,以分别收集地表径流与地下渗流,精确表征DOC的迁移路径。

人工降雨采用由北京易科立德生态环境科技有限公司生产的EL-RS3/5型人工模拟降雨系统。该系统使用单一型号喷头,采用槽式间歇式降雨结构,主要由主控单元、供水系统、供电系统、控制系统、支架及喷头悬挂系统构成。喷头安装高度为4 m,有效降雨面积为4.5 m $\times$ 6.6 m,降雨均匀度系数为0.9。通过调节喷头摆动频率、供水压力、管道流量及喷头开关,可精准模拟不同雨强(包括极端暴雨)和不同降雨历时下的自然降雨过程,满足试验对降雨可控性和重复性的需求。

试验所用土壤采自贵州省贵阳市花溪区翁岗村(26°27'13.88"N,106°37'21.10"E),该区域为典型的喀斯特地貌,母质为碳酸盐岩发育的石灰性黏壤土。为确保试验过程中土壤的均一性,并最大程度降低

人为操作带来的试验误差,采集的土样经自然风干处理后,通过 5 mm 孔径筛,以去除大颗粒石砾及植

物残体。处理后的土壤充分混匀并贮存于干燥通风处备用。其基本理化性质详见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of soil

土壤类型	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	pH 值	全磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有价值/%	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )
石灰土	1.3	7.3	726.5	6.94	26.3	927.5

## 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 基于野外实地调查和文献资料分析结果,本研究在试验中设定基岩裸露率为 10%,该值代表贵州省典型坡耕地的平均基岩裸露水平。为模拟该特征,试验中选用直径大于 35 cm 的石灰岩块随机布设于钢槽坡面,通过坡面垂直摄影图像结合 ArcGIS 软件对布设效果进行裸露率精确校核,确保模拟条件符合自然实际。

结合贵州喀斯特地区常见的强降雨特征及其导致的水蚀风险,参考区域研究表明地表产流的侵蚀性降雨雨强阈值约为 50 mm/h<sup>[18]</sup>。考虑到近年来极端暴雨(雨强>120 mm/h)事件频发,本研究设置 3 个降雨强度水平:60, 100, 120 mm/h。其中,120 mm/h 雨强下不施加草甘膦的处理组作为对照组(Control Check, CK)。试验设置坡度为 10°, 15° 和 25° 共 3 个水平,每个处理重复两次,以增强结果的代表性与可靠性。地下裂隙度参照严友进等<sup>[19]</sup>提出的计算方法,设定为 1%。试验土层厚度为 30 cm,分为 3 层,每层厚度为 10 cm,按实地测定的紧实度逐层填装,自上而下分别为 410, 760, 1 070 kPa。土槽填装完成后,采用 10 mm/h 的预降雨对地表进行湿润处理,历时 30 min,目的是恢复土壤结构稳定性,模拟自然状态。预降雨结束后,向土槽地表均匀喷洒 10 L 草甘膦溶液(浓度为 7 g/L),模拟实际农业施药过程。施药后,静置 24 h,以确保草甘膦与土壤充分反应。随后开展正式降雨试验,降雨持续时间为 60 min,其间每 10 min 收集一次径流样品。降雨期间,在钢槽两侧布设多个雨量筒,精确测定每次降雨的实际雨强。每次降雨试验结束后,清除原有土壤,调整坡度并更换土壤,以进行下一组试验。

1.2.2 样品收集与测定方法 试验开始后,一旦地表或地下出现产流即开始计时。径流采样以 10 min 为时间间隔,分别采集地表径流和地下径流样品,收集于带刻度的聚乙烯桶中以记录其产流量。所有水样采集后立即于现场加入适量浓硫酸进行酸化预处理,以抑制微生物活动并稳定样品成分,随后将样品置于 4 °C 冷藏条件下保存,并确保在 24 h 内完成实验室分析。

草甘膦浓度采用高效液相质谱联用仪进行测定,分析前对样品进行离心处理,取上清液作为测试对象。样品中总磷(Total Phosphorus, TP)采用过硫

酸钾氧化-钼锑抗分光光度法进行测定。水样在过滤膜孔径为 0.45 μm 的滤膜过滤后,利用岛津 TOC-L 系列总有机碳分析仪测定样品中的总氮(Total Nitrogen, TN)和溶解性有机碳(DOC)含量。

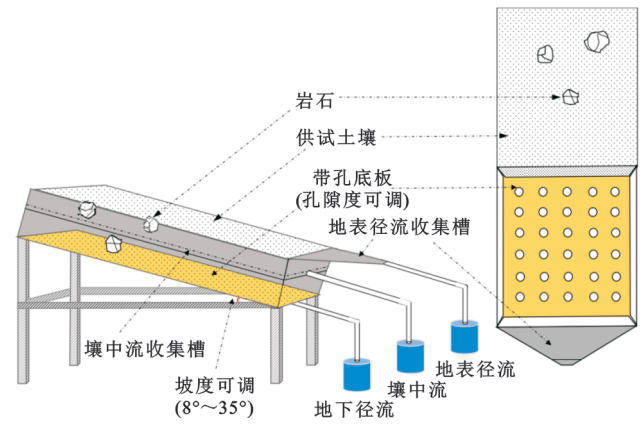


图 1 试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2.3 草甘膦贡献率(Contribution of Glyphosate, CG) 我们使用草甘膦贡献率(CG)来定量确定草甘膦对土壤养分运移的影响:

$$CG_i = \frac{C_{iGP} - C_{GP} - C_{iCK}}{C_{iCK}} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $C_{iGP}$  是喷洒 GP 的径流的 DOC 含量;  $C_{GP}$  是使用甘膦生产的碳;  $C_{iCK}$  是 CK 径流的 DOC 含量。

1.2.4 数据分析 所得试验数据首先使用 Excel 2007 进行整理与初步处理,随后采用 SPSS 19.0 和 Origin 2022 软件进行统计分析。差异性检验采用单因素方差分析(One-way ANOVA),组间差异通过最小显著差数法(Least Significant Difference, LSD)进行两两比较,显著性水平设定为  $p < 0.05$ 。此外,为探究环境因子对 DOC 迁移的解释效应,进一步采用 Canoco 5.0 软件与 R 语言对数据进行方差分解分析(Variance Partitioning Analysis, VPA),从而评估不同因子对 DOC 变化的相对贡献。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同坡度雨强下喀斯特土壤降雨产流特征

由表 2 可知,耕地产流以地表径流为主要,占总径流的 63.39%~86.69%;当雨强一定时,地表径流量随土壤坡度增大而增大,壤下径流却逐渐降低。

其中,坡度从15°增加到25°时,地表径流从79.0 L,增加到113.6 L。当土壤坡度一定时,地表径流量随降雨强度增大而增大,地下径流随降雨强度增大而减小。其中,当降雨强度从60 mm/h增加到120 mm/h,

地表径流量从79 L增加到187 L。通过单因素方差分析显示,随着坡度增加,径流量之间的差别越显著( $p < 0.05$ ),同样,随着降雨强度增加,径流量之间的差异越显著( $p < 0.05$ )。

表2 不同坡度和雨强下土壤产流特征

Table 2 Soil runoff characteristics under different slopes and rainfall intensities

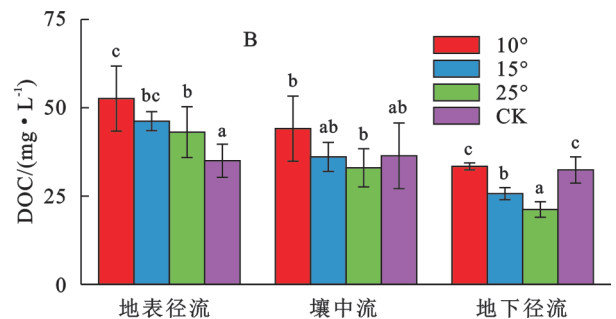
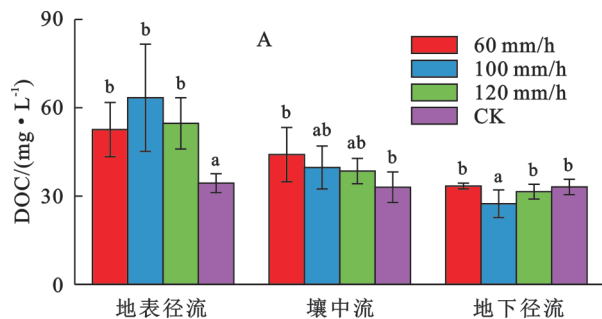
环境条件	水平	地表径流		壤中流		地下径流	
		径流量/L	占比/%	径流量/L	占比/%	径流量/L	占比/%
坡度	10°	79a	63.39	43.9b	35.23	1.72a	1.38
	15°	89.2ab	69.58	32.2a	25.12	6.8b	5.30
	25°	113.6b	80.08	26.56a	18.72	1.705a	1.20
雨强	60 mm/h	79a	63.39	43.9b	35.23	1.72a	1.38
	100 mm/h	165b	77.72	44.3b	20.87	3a	1.41
	120 mm/h	187b	86.69	25.2a	11.68	3.5a	1.62

注:a,b,c表示径流不同水平的显著性差异水平, $p < 0.05$ 。

## 2.2 施用草甘膦对土壤DOC运移量的影响

图2显示了喷洒草甘膦对土壤DOC运移动的影响。其中,图2A显示了喷洒草甘膦在不同降雨强度下对DOC的运移的影响。不同降雨强度条件下,地表径流中DOC含量为52.6~63.4 mg/L,壤中流DOC含量为38.5~44.1 mg/L,地下径流中DOC含量27.4~33.4 mg/L。图2B显示了喷洒草甘膦在不同土壤坡度下对DOC的运移的影响,在不同坡度条件下,地表径流中

DOC含量为43.1~52.6 mg/L,壤中流DOC含量为33.0~44.1 mg/L,地下径流中DOC含量21.2~33.4 mg/L。通过单因素方差分析表明,不同降雨强度对径流中DOC运移量差异不显著,不同土壤坡度对径流中DOC运移量差异显著( $p < 0.05$ )。具体表现为,在喷洒草甘膦的条件下,DOC运移量随土壤坡度增加逐渐降低。与对照组相比,喷洒草甘膦显著增加了地表径流和壤中流中DOC运移量,降低了地下径流中DOC运移量。



注:a,b,c表示相同径流不同水平的显著性差异水平, $p < 0.05$ ,下同。

图2 施用草甘膦对土壤DOC运移动的影响

Fig. 2 Effects of glyphosate application on soil DOC transport

## 2.3 除草剂草甘膦在喀斯特土壤中的迁移特征

本文通过人工降雨试验探讨了不同雨强和坡度条件下径流中草甘膦浓度的变化特征,结果如图3所示。在不同坡度和雨强下,草甘膦在不同水文路径中的含量存在差异,其中,在不同土壤坡度下,地表径流,壤中流和地下径流中,草甘膦的含量分别为1.9~11.7,2.0~4.9,3.4~6.9 mg/L,不同坡度间径流中草甘膦浓度差异显著( $p < 0.05$ )。在不同雨强下,地表径流,壤中流和地下径流中,草甘膦的含量分别为6.8~11.7,1.9~2.3,1.6~1.9 mg/L。地表径流中的草甘膦浓度也存在显著差异( $p < 0.05$ )。当降雨强度从60 mm/h增加到120 mm/h时,地表径流中GLY浓度随雨强增大而不断降低,壤中流和地下径流中

GLY浓度逐渐增加,但差异不显著。此外,在对照(CK)试验中未检测有GLY含量。

## 2.4 除草剂草甘膦对喀斯特土壤DOC迁移量的贡献

本研究以贡献率为指标,定量评估了除草剂草甘膦施用对喀斯特地区土壤可溶性有机碳(DOC)迁移过程的影响。结果表明,在不同水文路径下,草甘膦对DOC迁移的影响因降雨强度和坡面坡度的差异而存在显著变异性。在不同降雨强度条件下,草甘膦施用导致地表径流、壤中流和地下径流中DOC变化量分别为52.7%~84.1%,16.6%~33.6%及-17.0%~1.0%(图4A)。而在不同坡度条件下,3类水文路径中DOC含量的净变化幅度分别为23.4%~30.4%, -9.3%~21.0%和3.2%~34.6%(图4B)。从

贡献趋势来看,草甘膦对地表径流中 DOC 迁移的影响始终表现为正向。而对于壤中流和地下径流,其

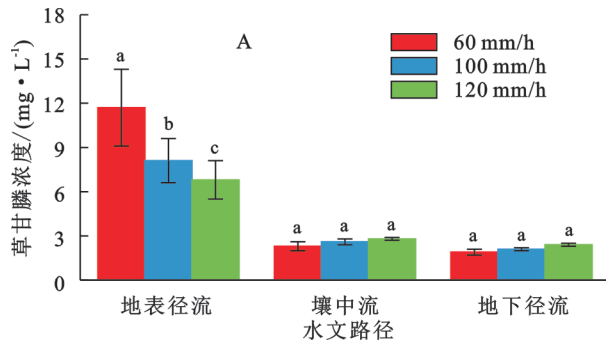


图 3 草甘膦在坡耕地中的运移量

Fig. 3 Transport of glyphosate in sloping farmland

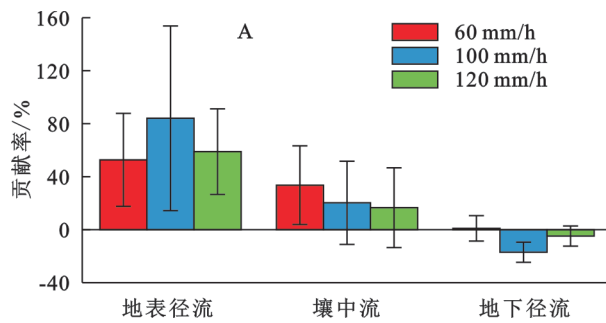
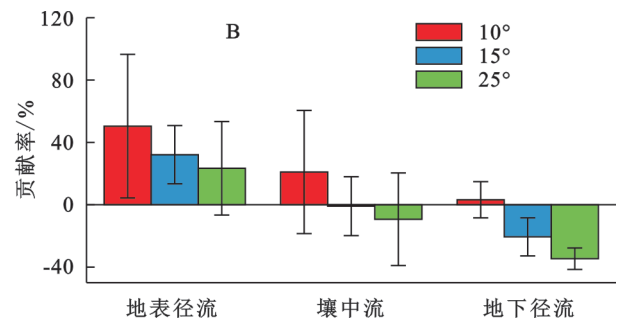
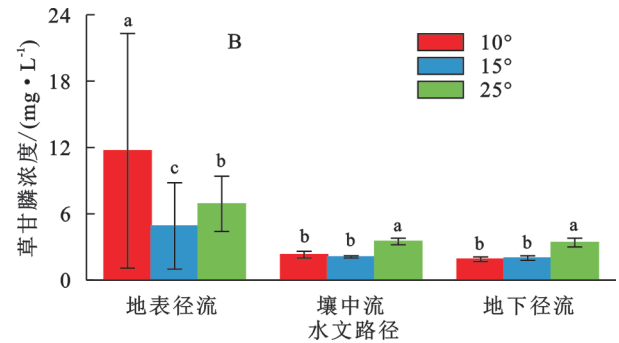


图 4 草甘膦对土壤 DOC 运移的贡献

Fig. 4 Contribution of glyphosate to soil DOC transport

贡献则随坡度变化而异:在 10° 坡度条件下呈正向效应,而在 15° 与 25° 坡度下则转为负向贡献。



### 3 讨论

#### 3.1 喀斯特土壤 DOC 运移路径分析

厘清喀斯特地区土壤 DOC 的运移路径,对于深入理解该区域土壤有机碳循环、水文过程及生态系统功能之间的耦合机制具有重要意义。如图 5 所示,喀斯特区的水文路径结构复杂,DOC 在不同路径中的迁移比例呈现出明显差异。从表 3 中可以看出,地表径流是 DOC 流失的主要通道,占总流失量的 40%~49%;其次为壤中流,占比为 31%~34%;地下径流相对较少,占比为 21%~26%。由此可见,地表过程在喀斯特地区 DOC 迁移中起主导作用。降雨和径流是 DOC 迁移的驱动力<sup>[20]</sup>。在喀斯特地区,地下裂隙系统发育,是水土流失及溶质迁移的关键通道。岩溶裂隙将地表径流与裂隙含水层、岩溶含水层相互连通,地表径流及土壤渗滤水中的 DOC 等溶质可经裂隙系统直接进入地下含水介质。在降雨过程中,径流沿浅层孔隙、裂隙、管道及岩溶漏斗等构造流动,伴随表层土壤颗粒的剥蚀与迁移,使得 DOC 得以随土壤共同进入地下裂隙、管道乃至地下河系统<sup>[16,21]</sup>。此外,西南喀斯特地区气候特征显著,表现为雨热同期、降雨时空分布不均,极端强降雨事件频发,且大暴雨及特大暴雨所占比例较高。这类强降雨事件显著增强了地表与地下水文通道的连通性,

为 DOC 的高效迁移提供了充足的水动力条件。

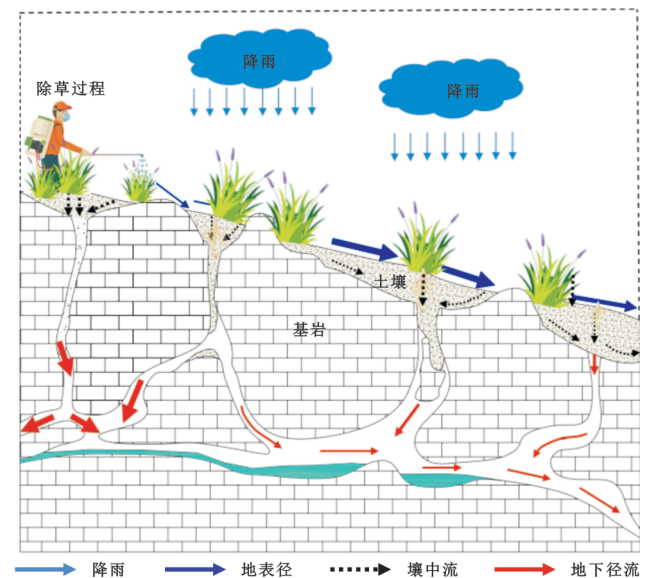


图 5 DOC 在喀斯特坡耕地中迁移路径

Fig. 5 Pathways of DOC transport in karst sloping farmland

#### 3.2 土壤 DOC 流失的环境因素

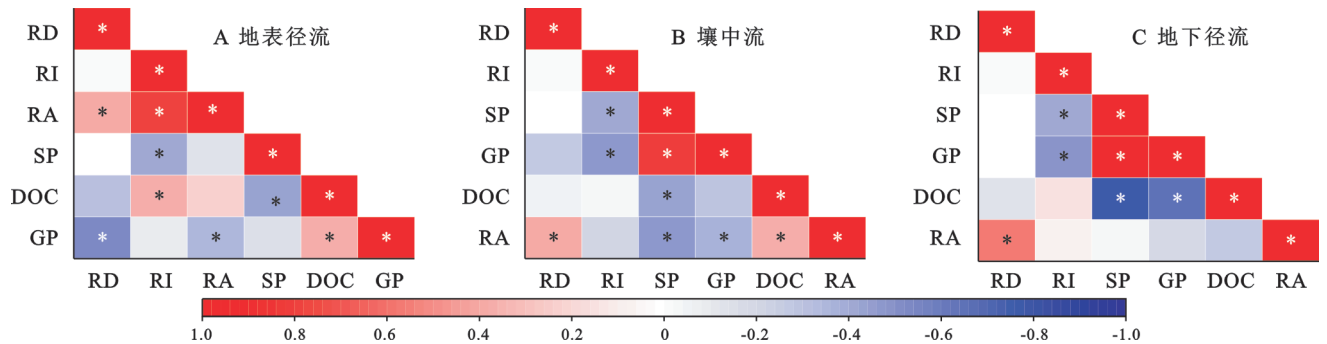
探明环境因素对土壤 DOC 流失的影响对改善水体质量、维护生态平衡,并确保土壤资源的可持续利用具有重要意义。本研究基于不同水文路径下的相关性与变方差分析,系统评估了草甘膦施用、坡度、径流量和降雨强度等因子对喀斯特坡耕地 DOC 迁移

过程的影响(图 6)。结果表明,不同水文路径中影响 DOC 迁移的主导环境因子存在显著差异。在地表径流中,坡度、降雨强度和草甘膦均与 DOC 迁移呈显著正相关( $p < 0.05$ );在壤中流中,坡度和径流量为显著影响因子( $p < 0.05$ );而在地下径流中,草甘膦和坡度对 DOC 的影响显著( $p < 0.05$ ),其中草甘膦与 DOC 迁移量呈负相关。总体上,降雨强度与 DOC 迁移量呈正相关关系,而坡度的相关性方向则因水文路径不同而异。进一步的方差分解分析结果揭示了各因子对 DOC 迁移的独立贡献率及其交互作用。在地表径流中,草甘膦对 DOC 迁移的独立解释率为 12.6%,降雨强度和坡度分别为 6.3% 和 6.1%。三者之间存在显著交互效应,其总贡献率依次为坡度(24.3%)>降雨强度(20.0%)>草甘膦(17.1%)。在壤中流中,坡

度的独立解释率达 13.0%,与径流量的交互解释率为 9.9%。在地下径流中,坡度对 DOC 迁移的独立解释率高达 66.1%,草甘膦为 4.1%,二者之间未表现出交互效应。综上所述,坡度在 3 种水文路径中均为关键控制因子,尤其在地下径流中作用最为显著,表明坡度是影响喀斯特区 DOC 迁移过程的核心驱动因素。

表 3 DOC 在不同路径中的迁移比例  
Table 3 Proportion of DOC transport through different pathways %

项目	坡度			雨强		
	10°	15°	25°	60 mm/h	100 mm/h	120 mm/h
地表径流占比	40.40	42.80	44.30	40.43	48.57	43.89
壤中流占比	33.90	33.40	34.00	33.90	30.41	30.86
地下径流占比	25.70	23.80	21.70	25.67	21.02	25.25



注:RD 表示降雨历时;RI 表示雨强;RA 表示径流量;GP 表示草甘膦;SP 表示坡度;DOC 表示溶解性有机碳,\*表示  $p < 0.05$  显著相关。

图 6 DOC 运移与环境因子相关分析

Fig. 6 Correlation analysis between DOC transport and environmental factors

本研究发现,坡度与土壤 DOC 迁移量之间呈负相关关系,这一结果与部分已有研究结论存在差异,可能受到水动力过程及土壤保持能力等因素的共同影响。从水动力学角度看,坡度增加通常会增强地表水流速度与能量,然而,对溶解态有机碳而言,较高流速可能促使其更易与土壤颗粒发生吸附或结合,从而降低其迁移能力与流失风险<sup>[22]</sup>。同时,较陡坡面减少了土壤对水分的保持能力,尽管这加剧了土壤侵蚀,但土壤有机质往往以团聚体或微颗粒的形式与矿物质紧密结合,其结构稳定性有助于限制 DOC 的释放与迁移。此外,坡度变化还可能间接影响微生物活性及生物胶体的形成,进而增强有机碳的稳定性与固持能力。在坡度较大的情形下,降雨产生的动能更高,可能促进土壤生物活性的增强,从而通过微生物代谢产物或多糖类物质的生成,提高 DOC 在土壤中的吸附与保留<sup>[23]</sup>。值得注意的是,尽管本研究在研究区内观察到坡度与 DOC 迁移呈负相关性,但该关系可能受区域环境条件、土壤类型、植被覆盖和土地利用方式等因素调控。因此,在不同地理背景和土地利用情境下,仍需进一步研究以验证坡度对 DOC 迁移的实

际效应,并探讨其潜在机制的普适性。

本研究表明,降雨强度与土壤 DOC 迁移量呈显著正相关,这与已有研究结果一致<sup>[24]</sup>。较强的降雨不仅增强地表径流的水动力条件,还显著提升了土壤中可溶性有机组分的动员能力,从而加剧 DOC 的流失风险。草甘膦与 DOC 的迁移量之间存在显著关系。在地表径流中,草甘膦与 DOC 迁移量呈正相关关系;而在地下径流中则表现为负相关。这种差异性可能与草甘膦在土壤中的空间分布及其与土壤组分的相互作用密切相关。已有研究表明,草甘膦进入土壤后主要滞留于表层土壤,且易被有机质及矿物表面吸附<sup>[25]</sup>。由于本研究聚焦于短时强降雨过程,草甘膦对深层土壤中 DOC 的影响可能存在一定的滞后性。

### 3.3 草甘膦对土壤 DOC 流失的影响

本研究中,草甘膦的施用显著增加了径流中 DOC 的含量,其原因可能主要体现在以下 3 个方面:一是草甘膦对土壤团聚体结构的破坏。有机碳在土壤中的固持主要依赖于团聚体包埋和与矿物质的络合作用<sup>[26]</sup>。土壤中的无机胶结物质在团聚体形成过程中起“桥梁”作用,增强结构稳定性。而草甘膦具

有较强的吸附亲和力,易与伊利石、蒙脱石、高岭石及铁铝氧化物等矿物,以及腐殖酸、苹果酸、柠檬酸等有机质发生离子交换、络合、氢键和配位等吸附作用<sup>[27]</sup>。在降雨作用下,草甘膦不仅破坏团聚体结构,还可能通过竞争吸附取代原本结合的有机碳,使其游离并随地表径流或通过浅层孔(裂)隙迁移至地下<sup>[28]</sup>。二是表面活性剂增强有机质颗粒迁移性。草甘膦商业制剂中常含聚氧乙烯胺和牛脂胺聚氧乙烯醚等表面活性剂<sup>[29]</sup>,这些成分能够吸附于有机质表面,促进草甘膦与有机质形成稳定复合物<sup>[30]</sup>。此类复合物增强了有机颗粒在水流中的悬浮性与迁移性。在降雨冲刷下,草甘膦与其结合的有机质颗粒共同进入地表径流体系,从而提升 DOC 的输出量。三是草甘膦降解产物的直接贡献。草甘膦在自然环境中不稳定,易在微生物参与下降解生成氨基甲酸和甘氨酸等可溶性有机小分子,这些产物直接提升了径流中的 DOC 浓度。此外,草甘膦本身作为含碳有机化合物,其降解亦可能向水环境中释放额外的有机碳组分。综上所述,草甘膦对土壤中 DOC 流失的促进作用是一个多机制协同的过程,涵盖了土壤结构破坏、化学吸附竞争、有机质迁移增强与降解产物贡献等方面。这一过程在喀斯特坡耕地等生态敏感区尤为显著,可能对土壤肥力、水质安全及区域碳循环造成深远影响。因此,未来应加强实验室模拟与野外实地观测相结合的系统研究,进一步解析草甘膦对土壤有机碳迁移的时空动态及其环境风险,并为农药科学施用和生态保护政策提供理论支持。

### 3.4 研究不足与展望

本研究通过模拟降雨试验,探讨了草甘膦施用对喀斯特坡耕地不同水文路径中土壤 DOC 流失的影响,揭示了草甘膦在增强地表径流 DOC 迁移方面的潜在作用,丰富了我们对于农业化学品影响土壤碳循环过程的理解。然而,仍存在一些不足之处。首先,本研究主要聚焦于短时暴雨条件下的草甘膦-DOC 响应机制,未涉及小雨强( $<50\text{ mm/h}$ )条件下草甘膦对 DOC 迁移的影响,而在此类情况下地表径流不发生、土壤渗透主导,草甘膦的迁移路径和作用机制可能显著不同,影响结果的适用性与普遍性。其次,试验中并未同步监测草甘膦的降解产物(如氨基甲酸、甘氨酸等),可能高估了草甘膦对 DOC 迁移的直接贡献,也未能揭示降解过程中对土壤有机碳行为的潜在影响。此外,尽管研究初步揭示了草甘膦通过破坏土壤团聚体、促进有机质迁移及生成含碳降解产物等途径增加 DOC 流失,但其核心作用机制尚不完全明确,尤其在草甘膦与土壤矿物、有机质、微生物群落之间复杂交互方面仍需深入探究。未来研究可进一步拓展

试验条件,涵盖多种除草剂类型、不同降雨强度与频次、复杂地形与土地利用情景,并引入对土壤理化特性、生物活性以及除草剂长期累积效应的综合监测,系统评估草甘膦对土壤碳动态及水质安全的影响。

## 4 结论

(1) 在喀斯特地区土壤中施用草甘膦显著增加了土壤 DOC 流失的风险,可能加剧施药区的“碳源”效应,进而对区域碳循环产生不利影响。

(2) 在暴雨条件下,地表径流是 DOC 流失的主要路径,而不同水文路径中 DOC 迁移所受的环境因子影响存在显著差异,其中降雨强度与坡度是主导 DOC 迁移过程的关键因素。

(3) 草甘膦残留物可随地表径流迁移至周边区域,或通过浅层孔隙、裂隙、管道系统进入地下径流,具有潜在的地下水污染风险。这不仅威胁到区域土壤碳储能力,也可能对水生生态系统造成不利影响。

### 参考文献(References):

- [1] Manninen N, Soenne H, Lemola R, et al. Effects of agricultural land use on dissolved organic carbon and nitrogen in surface runoff and subsurface drainage [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1519-1528.
- [2] Nachimuthu G, Watkins M D, Hulugalle N R, et al. Leaching of dissolved organic carbon and nitrogen under cotton farming systems in a vertisol [J]. *Soil Use and Management*, 2019, 35(3): 443-452.
- [3] Nakhavali M, Lauerwald R, Regnier P, et al. Leaching of dissolved organic carbon from mineral soils plays a significant role in the terrestrial carbon balance [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(5): 1083-1096.
- [4] Xu J, Jian Z, Wang Y, et al. Spatial-seasonal characteristics and influencing factors of dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter in Poyang Lake [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 82(1): 44.
- [5] Kuhn N J, Hoffmann T, Schwanghart W, et al. Agricultural soil erosion and global carbon cycle: controversy over [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34(7): 1033-1038.
- [6] Wu H, Guo B, Xue H, et al. What are the dominant influencing factors on the soil erosion evolution process in the Yellow River Basin [J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(4): 1899-1915.
- [7] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses [J]. *Catena*, 2010, 81(2): 97-103.
- [8] Hancock G R, Kunkel V, Wells T, et al. Soil organic carbon and soil erosion: understanding change at the large catchment scale [J]. *Geoderma*, 2019, 343: 60-71.
- [9] 李娜,张哲,白伟,等.耕作方式下坡面土壤侵蚀对有机碳流失的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(2): 82-90.

- Li N, Zhang Z, Bai W, et al. Effects of soil erosion on soil organic carbon loss in cinnamon soil slope land under different tillage methods[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(2):82-90.
- [10] Soares C, Pereira R, Spormann S, et al. Is soil contamination by a glyphosate commercial formulation truly harmless to non-target plants: evaluation of oxidative damage and antioxidant responses in tomato[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247:256-265.
- [11] 杨益军,张波. 2021年全球氨基酸类除草剂发展概况和趋势综述[J]. *世界农药*, 2021, 43(4):19-34.  
Yang Y J, Zhang B. Overview of the development and trend summary of the global amino acid herbicide market (2021)[J]. *World Pesticide*, 2021, 43(4):19-34.
- [12] Hébert M P, Fugère V, Gonzalez A. The overlooked impact of rising glyphosate use on phosphorus loading in agricultural watersheds[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(1):48-56.
- [13] Koçak B, Cenkseven S. Effects of three commonly used herbicides in maize on short-term soil organic carbon mineralization[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2021, 232(9):386.
- [14] 彭旭东,戴全厚,李昌兰. 中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5):1-8.  
Peng X D, Dai Q H, Li C L. Research progress on the process and mechanism of soil water loss or leakage on slope in southwest karst of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(5):1-8.
- [15] Ford D, Williams P. *Karst hydrogeology and geomorphology*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2007.
- [16] Yan Y J, Dai Q H, Yang Y Q, et al. Effects of vegetation restoration types on soil erosion reduction of a shallow karst fissure soil system in the degraded karst areas of Southwestern China[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(8):2241-2255.
- [17] 童凌晨,李强,岳鹏鹏. 基于CiteSpace的喀斯特土壤有机碳研究进展[J]. *广西师范大学学报:自然科学版*, 2022, 40(4):22-34.  
Tong L C, Li Q, Yue P P. Research progress and prospects of karst soil organic carbon based on CiteSpace[J]. *Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition*, 2022, 40(4):22-34.
- [18] 焦锡桦,彭韬,李社红,等. 喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值初探[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(5):57-63.  
Jiao X H, Peng T, Li S H, et al. Preliminary research on the threshold of erosive rainfall on karst slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):57-63.
- [19] Yan Y J, Dai Q H, Yuan Y F, et al. Effects of rainfall intensity on runoff and sediment yields on bare slopes in a karst area, SW China[J]. *Geoderma*, 2018, 330:30-40.
- [20] 马美景,王军光,郭忠录,等. 放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2):365-374.
- Ma M J, Wang J G, Guo Z L, et al. Research on sediment and solute transport on red soil slope under simultaneous influence of scouring flow[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(2):365-374.
- [21] Peng X D, Dai Q H, Li C L, et al. Role of underground fissure flow in near-surface rainfall-runoff process on a rock mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Engineering Geology*, 2018, 243:10-17.
- [22] Zhang X X, Song J X, Wang Y R, et al. Effects of land use on slope runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142418.
- [23] Zhang X F, Adamowski J F, Liu C F, et al. Which slope aspect and gradient provides the best afforestation-driven soil carbon sequestration on the China's Loess Plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 147:105782.
- [24] 徐爱兰,王鹏. 太湖流域典型圩区农田磷素随地表径流迁移特征[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3):1106-1111.  
Xu A L, Wang P. Phosphorus losses with surface runoff from farm lands in polder area around Taihu Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1106-1111.
- [25] Silva V, Montanarella L, Jones A, et al. Distribution of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in agricultural topsoils of the European Union[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621:1352-1359.
- [26] 刘亚龙,王萍,汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3):627-643.  
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3):627-643.
- [27] Geng Y, Jiang L J, Zhang D Y, et al. Glyphosate, aminomethylphosphonic acid, and glufosinate ammonium in agricultural groundwater and surface water in China from 2017 to 2018: occurrence, main drivers, and environmental risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 769:144396.
- [28] Zaller J G, Weber M, Maderthaner M, et al. Effects of glyphosate-based herbicides and their active ingredients on earthworms, water infiltration and glyphosate leaching are influenced by soil properties[J]. *Environmental Sciences Europe*, 2021, 33(1):51.
- [29] 杜勤惠,孙道远. 草甘膦除草剂表面活性剂的毒性[J]. *中国工业医学杂志*, 2018, 31(5):368-371.  
Du Q H, Sun D Y. Toxicities of surfactants in glyphosate-based herbicides[J]. *Chinese Journal of Industrial Medicine*, 2018, 31(5):368-371.
- [30] Ishiguro M, Koopal L K. Surfactant adsorption to soil components and soils[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2016, 231:59-102.