

施用草甘膦除草剂对土壤质量影响的研究进展

张友^{1,2}, 戴全厚^{1,2}, 严友进^{1,2}, 胡泽银^{1,2}, 周红^{1,2}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 草甘膦除草剂是农业生产中不可或缺的物资, 过量使用会导致大量草甘膦及其衍生物在土壤中残留, 对生态环境安全构成威胁。通过系统阐述草甘膦在环境中的迁移转化过程, 以及草甘膦对土壤生物及环境质量的影响, 着重分析了草甘膦对土壤蚯蚓、微生物群落的毒理效应, 草甘膦与土壤其他污染物的协同效应和草甘膦驱动土壤碳氮磷生物地球循环变化。同时指出当前研究的不足, 并提出下一步研究的重点: (1) 加强草甘膦的降解机制和影响因素的研究, 并筛选更高效降解能力的微生物菌株, 提高草甘膦降解效率和修复草甘膦污染环境的能力; (2) 定期开展农业环境中草甘膦的检测和风险评估, 摸清草甘膦在喀斯特区的迁移路径, 探索草甘膦在岩溶地质中的吸附和去除能力, 以更好地评估岩溶地质的碳汇稳定性和水生生态系统的安全性; (3) 借助酶化学计量学等研究方法, 探明草甘膦在土壤中的转化速率、通量以及与微生物代谢和营养需求、环境效应之间的耦合关系。

关键词: 草甘膦; 土壤质量; 土壤生物; 生态毒理

中图分类号: S19

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0007-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.04.002

Research Progress on the Impact of Glyphosate Herbicide Application on Soil Quality

ZHANG You^{1,2}, DAI Quanhou^{1,2}, YAN Youjin^{1,2}, HU Zeyin^{1,2}, ZHOU Hong^{1,2}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025;

2. Soil Erosion and Ecological Restoration Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025)

Abstract: Glyphosate herbicides are essential materials in agricultural production, but excessive use can lead to a large amount of glyphosate and its derivatives remaining in soil, posing a threat to the ecological environment. By systematically elaborating the migration and transformation process of glyphosate in the environment, as well as its effects on soil organisms and environmental quality, the toxic effects of glyphosate on soil earthworms and microbial communities, the synergistic effects of glyphosate with other soil pollutants, and the changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus biogeochemical cycles driven by glyphosate were emphatically analyzed. At the same time, the deficiencies of the current research were pointed out, and the focus of the next research was put forward: (1) Strengthen the study on the degradation mechanisms and influencing factors of glyphosate, and screen for more efficient degrading microbial strains to improve the degradation efficiency of glyphosate and the ability to remediate glyphosate-contaminated environments. (2) To carry out regular monitoring and risk assessment of glyphosate in agricultural environments, map out the migration pathways of glyphosate in karst areas, explore the adsorption and removal ability of glyphosate in karst geology, so as to better evaluate the carbon sequestration stability of karst geology and the safety of aquatic ecosystems. (3) By using enzyme stoichiometry and other research methods, the conversion rate, flux, and coupling relationship between glyphosate and microbial metabolism, nutritional requirements, and environmental effects in the soil can be explored.

Keywords: glyphosate; soil quality; soil biology; ecotoxicology

收稿日期: 2023-02-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(42167044); 贵州省高层次创新型人才项目(黔科合平台人才[2018]5641); 贵大培育项目(贵大培育[2019]10号); 贵州省一流学科建设项目(CNYL[2017]007)

第一作者: 张友(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事农业面源污染防治和环境水化学研究。E-mail: gs.youzhang20@gzu.edu.cn

通信作者: 戴全厚(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

草甘膦除草剂作为提高农业生产和作物产量的重要生产资料,被广泛用于农业、林业、水产养殖及城市环境的杂草控制。草甘膦在环境不断富集,可能威胁到土壤的生产和生态功能,影响生态环境安全和人类健康^[1-3]。我国是世界草甘膦生产国和使用国之一。据统计^[4],2018 年和 2019 年,中国草甘膦农药生产量分别为 50 万 t 和 55 万 t,2019 年的中国草甘膦使用量占世界 8.9%,未来“免耕”种植农业和抗草甘膦作物的扩大,以及国家对百草枯等剧毒除草剂的禁止,草甘膦需求将继续增加^[5]。随着草甘膦的大量使用,在世界范围内多个国家的地表水、土壤及地下水等环境中均被广泛检出草甘膦(表 1),其中,在阿根廷土壤中的草甘膦高达(2 299±476) μg/kg,其检测草甘膦浓度已超过了美国(700 μg/L)和欧盟(0.1 μg/L)的最大污染限制^[6]。草甘膦残留可能改变土壤质量,影响生态系统的稳定性和多样性,威胁土壤和水生生态系统安全^[7-9]。有研究^[8,10]表明,施用草甘膦改变了土壤中碳磷循环过程、微生物活性以及群落结构。另外,草甘膦还可以通过风侵蚀的沉积物和灰尘作为环境运输途径,对环境 and 人类的影响远超出

其应用的农业地区^[3,11]。

喀斯特地区的生态环境具有独特的复杂性和脆弱性,地表水和地下水污染对人类健康、水生生态系统、社会经济发展和农业活动的影响在过去几十年里已成为一个日益重要的问题^[12-13]。据统计^[14],全球大约 1/4 的人口生活在仅占陆域面积 10%~15%的喀斯特地区,喀斯特地区大多是山区,以农业经济为主,土壤资源十分稀缺,人地矛盾尖锐。由于人口的增加和土地生产力的下降,农业甚至已经扩展到斜坡和山脊上的边缘土壤,高强度农业活动加剧土壤侵蚀、森林砍伐、化肥、杀虫剂和农业废物的污染^[15]。其中,农药的面源污染备受关注,一方面是因为土壤污染物直接通过食物链对人类健康造成不利影响;另一方面,喀斯特区浅薄岩溶土壤对污染物的缓冲能力弱,污染物很容易通过高渗透性的裂缝和水流管道网络快速地进入地表水和地下水,对周边水生态系统构成威胁^[16]。因此,本文系统梳理草甘膦在土壤环境中的迁移转化、草甘膦对土壤动物和微生物的生态毒理效应,以及草甘膦对土壤环境质量的影响等,为科学指导农业生产、土壤污染防治、改善环境质量等方面提供参考。

表 1 不同国家在土壤和径流中草甘膦残留情况

国家	样品	年份	浓度/(μg·L ⁻¹)	检测率/%	参考文献
加拿大	地表水	2002	6.07	22	[17]
美国中西部	地表水	2013	27.08	44	[18]
墨西哥	地表水	2015	1.42	100	[19]
阿根廷	地表水	2012	0.10~7.60	35	[20]
阿根廷	土壤	2012	2299±48	—	[21]
德国	河流	1998	0.59	—	[17]
瑞士	地表水	2016	2.10	—	[22]
法国	地表水	2004	165	91	[23]
斯里兰卡	土壤	2015	270~690	100	[24]
斯里兰卡	湖泊	2015	28~45	—	[24]
希腊	土壤	2014	26~4060	37	[25]
南非	河流	2015	0.42±0.04	—	[26]
澳大利亚	河流	2018	1.80±2.20	79	[27]
埃及	土壤	2018	0.42±0.04	—	[28]
中国	地表水	2018	32.49	100	[5]
中国	地下水	2018	2.29	100	[5]

1 草甘膦在环境中的降解、迁移及其归去

掌握草甘膦在土壤环境中迁移转化及其归趋是开展其环境效应研究的基础。草甘膦在土壤环境中的迁移转化过程见图 1。草甘膦可以通过生物途径或非生物途径降解,如吸附、化学催化氧化等。吸附是控制草甘膦在土壤中迁移、转化及其归趋的重要途径。其主要机制是通过草甘膦与不同土壤类型(砖红壤、红壤、黄棕壤、黑土、乌栅土)、土壤的矿物(伊利

石、蒙脱石、高岭石、铁铝氧化物)以及土壤有机质(腐殖酸、苹果酸和柠檬酸)之间通过离子交换、络合、氢键、螯合、配位交换等吸附作用力发生作用^[5]。化学催化氧化是通过过氧化氢、Fe²⁺、高锰酸钾、活性炭、臭氧等催化剂氧化催化有效降解或去除草甘膦。但是目前所用氧化剂和催化剂均为人为制备,并且需结合多种方法和技术才能最终达到处理效果,容易产生二次污染等,限制其在实际中的应用。

微生物降解是草甘膦在环境中的主要降解途径,主要包括细菌、真菌和放线菌,其中以细菌为主。微生物

降解草甘膦的机制是通过草甘膦氧化还原酶的作用将草甘膦分解为氨基甲磷酸 (AMPA) 和甘氨酸, 然后将 AMPA 进一步代谢为 CO_2 、 PO_4^{3-} 和 NH_4^+ , 最终使草甘膦降解为无害物质。具体包括 2 种途径 (图 2): 一是草甘膦先被 C-N 断裂酶催化为 AMPA, 然后 AMPA 在 C-P 裂解酶进一步分解为无机磷、二氧化碳和氨气, 或 AMPA 在转氨酶驱动下分解为无机磷和甲醛; 二是草甘膦在 C-P 键断裂酶作用下转化肌氨酸和无机磷, 肌氨酸在氧化酶作用下进一步分解为甲醛和甘氨酸。其降解强度取决于微生物活性、种类、生物量以及环境 pH、氧化还原条件等^[29-30]。目前, 可以将草甘膦作为磷源生长的微生物主要有假单胞菌属、苍白杆菌属、无色菌属、青霉菌属、酵母属、嗜热菌属、链霉菌属、曲霉菌属^[31-32]。虽然已经分离出了一些具有草甘膦降解能力的微生物, 但是由于土壤 pH、有机质和磷酸盐等多种因素的影响, 它们修复草甘膦污染环境的能力仍然存在挑战。一方面, 草甘膦的化学结构比较简单, 只有一种氨基酸基团和磷酸基团, 因此微生物降解草甘膦的过程相对困难, 需要多个酶的协同作用, 且代谢产物也可能对环境产生影

响; 另一方面, 草甘膦在土壤中的降解速率较慢, 需要在特定的生境和条件下才能发挥微生物的降解能力, 否则可能出现降解效率低、代谢产物积累等问题。因此, 为了提高草甘膦的降解效率, 今后的研究中需要进一步研究草甘膦的降解机制和影响因素, 并发掘和筛选更具有高效降解能力的微生物菌株, 提高草甘膦的降解效率和修复草甘膦污染环境的能力。

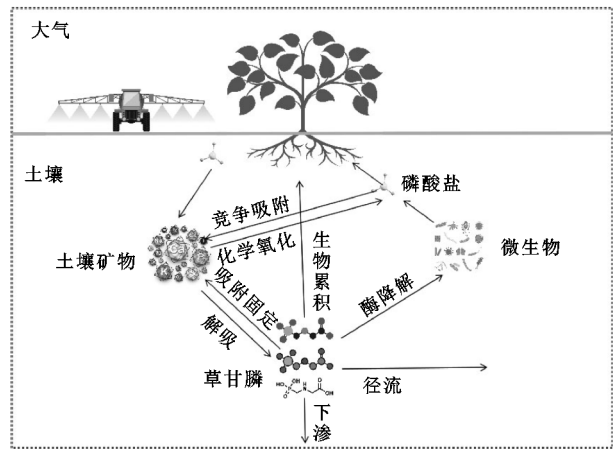


图 1 草甘膦在土壤中的迁移转化过程

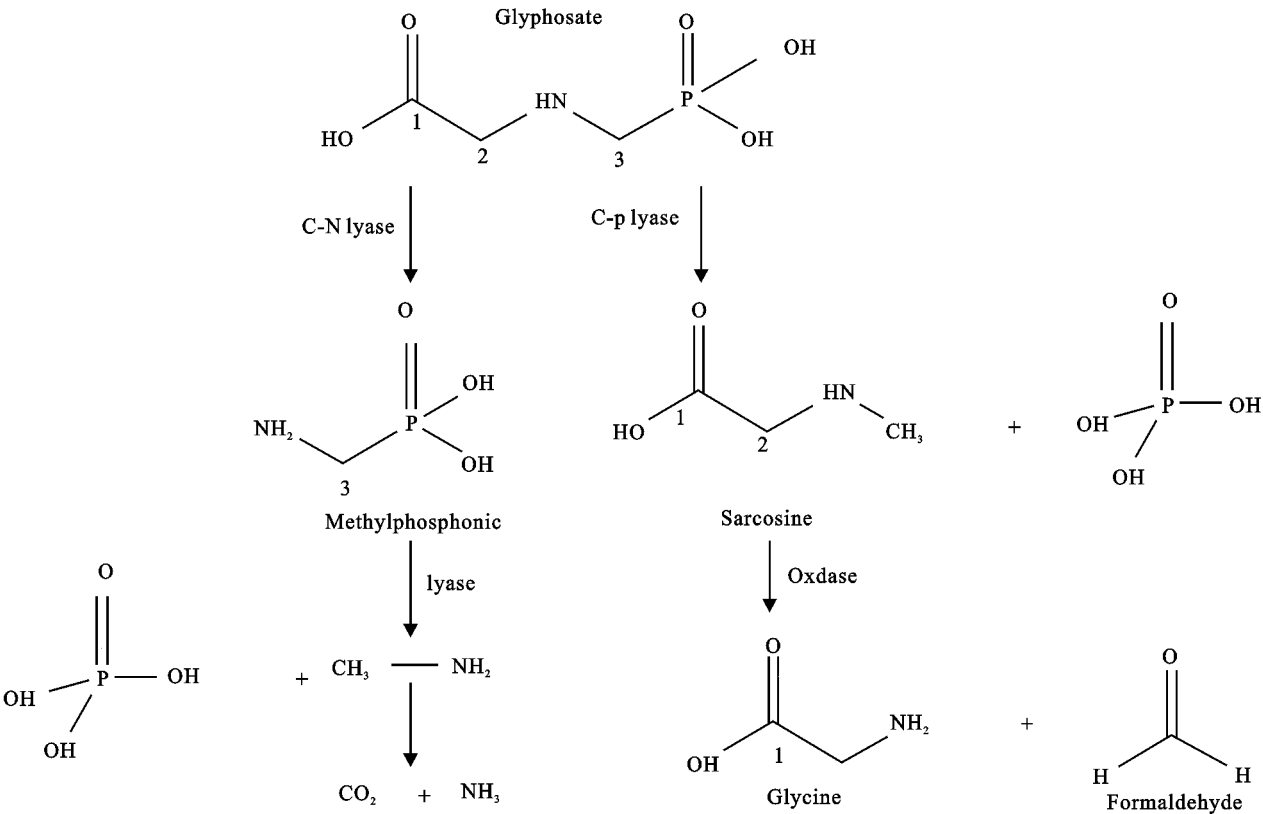


图 2 草甘膦的主要降解过程

2 草甘膦对土壤生物的影响

2.1 草甘膦对土壤蚯蚓的影响

蚯蚓被称为“生态系统工程师”, 同时也是土壤健康质量和肥力的重要生物指标^[33]。草甘膦是一种广谱除草剂, 在控制杂草的同时, 对蚯蚓等非靶标生物也产生一定的影响。草甘膦暴露可能导致蚯蚓死亡、

行为异常 (如降低移动速度和食欲减退等) 以及生长发育受到抑制等^[34]。此外, 草甘膦可能对蚯蚓的生殖和生殖能力产生负面影响, 从而影响种群的繁衍^[35]。草甘膦对蚯蚓的毒害作用主要是通过影响蚯蚓体内的代谢和生理过程来实现的。草甘膦可以抑制蚯蚓体内的氨基酸合成、糖原合成和 ATP 合成等

关键代谢过程,从而导致蚯蚓死亡或生长发育异常^[36]。另外,有研究^[37]表明,草甘膦对蚯蚓没有显著的毒理效应,并且蚯蚓的体重和茧产量也没有受到草甘膦的影响;Lescano 等^[38]研究发现,蚯蚓还加速草甘膦的降解速率。导致这些不同结果的原因可是受草甘膦的剂量、频率以及蚯蚓类型等多因素影响有关。因此,亟须解决草甘膦对蚯蚓毒害阈值浓度或筛选和培育耐受性强的蚯蚓品种。另外,优化农业管理措施,替代或者减少草甘膦等化学农药使用,保护土壤生态系统的健康和平衡。

2.2 草甘膦对土壤微生物的影响

微生物参与土壤有机质的分解、养分循环、土壤结构的形成等土壤的生态系统过程。因此,开展外来农药对土壤微生物的风险评估是科学指导农药使用和污染防治治理的重要依据。草甘膦作为一种广谱除草剂,通常会进入土壤中,对土壤中的微生物群落产生影响:(1)土壤中部分微生物(如原核微生物的细菌、放线菌,真核微生物的酵母、霉菌等)与植物的芳香族化合物代谢途径是一致的,均经过莽草酸途径进行生物代谢,因此,草甘膦对微生物的毒害机制与植物相似,即通过莽草酸毒害微生物,抑制微生物群落的生长和代谢,降低微生物的活性和数量^[37]。(2)草甘膦对土壤中的氮、磷和其他元素的循环和转化产生影响,这些元素对微生物生长和代谢至关重要,草甘膦的使用可能抑制微生物对这些元素的转化和利用^[39]。(3)草甘膦的使用可以导致土壤中有益微生物较少,增加土壤病原微生物的数量。例如,草甘膦导致土壤有益的荧光假单胞菌、锰还原菌和吡啶乙酸产生菌数量减少,而增加有害的镰刀菌数量^[40]。总之,农药对土壤微生物的影响是农业生产中不可忽视的问题,然而,目前缺乏长期的监测数据,无法准确评估草甘膦对土壤微生物群落的持久影响。由于研究对象和方法的不同,目前的研究结果存在一定的差异性。其次,目前的研究主要集中在实验室环境中进行,缺乏实际田间试验的研究。综上所述,草甘膦对土壤微生物的影响是一个复杂和多样的问题,需要进行系统的研究来完善对其影响的了解。同时,需要采取适当的农艺管理措施来减少草甘膦对土壤微生物的负面影响。

3 草甘膦对土壤环境质量的影响

3.1 草甘膦对土壤抗蚀性的影响

土壤团聚体稳定性是评价土壤抗冲抗蚀能力的重要指标^[41],而团聚体的形成和稳定与土壤矿物、有机质和生物间关系密切^[42]。草甘膦通过影响土壤矿物、有机质和生物来间接影响土壤团聚体的稳定性。草甘膦在环境中的有效使用率仅有 30%,其余被矿

物表面氢键的配位与阳离子吸附在土壤中,草甘膦在矿物上的吸附能力依次为 Fe^{3+} —蒙脱石 $>$ Ca^{2+} —蒙脱石 $>$ Na^{+} —蒙脱石和 Fe^{3+} —高岭石 $>$ Ca^{2+} —高岭石 $>$ Na^{+} —高岭石^[43]。残留在土壤中的草甘膦可能与土壤中的矿物质反应,改变矿物的结构和化学性质,从而影响土壤颗粒之间的黏着力和团聚体的形成和稳定性。有机质可以通过其黏合剂的作用促进土壤颗粒之间的黏结,而土壤有机质是影响草甘膦吸附量的主要因素,草甘膦分子的羧基、氨基和磷酸极性基团通过氢键与腐殖酸结合,影响土壤有机质的含量,进而影响土壤团聚体的形成与稳定^[44]。土壤微生物在土壤团聚体形成和稳定性方面起着重要作用。总之,草甘膦的使用可能加剧土壤中的团聚体失去稳定性,这可能加剧土壤侵蚀和贫瘠化等问题。

植被是控制土壤侵蚀的有效工具,尤其是根系的缠绕、固结和串联土体作用,提高土体的水稳结构和抗蚀强度,从而使土壤不易被径流带走^[45-47]。草甘膦的使用打破根孔微环境平衡;同时驱动土壤团聚体、植物覆盖、植物根系系统等近地表特征发生改变^[45]。草甘膦所致的根系系统死亡腐烂使土壤失去根系的固结作用,渗透能力急剧减弱,抗虫性能进一步恶化,为少数几次暴雨条件下地面超渗径流冲刷动力的形成创造了条件。

3.2 草甘膦对土壤碳氮磷生物地球循环的影响

碳、氮和磷在生物地球化学循环中发挥着关键作用。近年来,草甘膦在农业生产活动中大量投入,驱使土壤氮、碳、磷生物地球化学特征改变。草甘膦不会直接影响碳循环,但它可能影响植物的生长和死亡,从而影响碳在生物体内的积累和释放。此外,草甘膦会杀死微生物,从而影响土壤呼吸作用,导致碳从土壤中释放,这可能会增加大气中的二氧化碳浓度。

草甘膦作为磷源添加到土壤,草甘膦中的羧基、磷酸等基团与土壤中铝结合态磷、铁结合态磷和钙结合态磷发生等点位竞争,从而降低土壤对磷的吸附固定能力,导致土壤中磷释放,增加磷流失的风险^[48]。土壤中施用草甘膦提高了土壤磷酸酶的活性^[10],加速有机磷的矿化,从而提高有机磷的生物有效性。草甘膦土壤被微生物酶降解产生的无机磷不仅能被微生物使用,也被植物利用^[49]。根据草甘膦的分子结构“ $\text{C}_3\text{H}_8\text{NO}_5\text{P}$ ”,1 mole 草甘膦能够降解为 1 mole 无机磷,在磷限制条件下,部分浮游植物能够可以将草甘膦作为唯一的磷源支持生长^[50]。因此,在水生态安全防治过程中,草甘膦对藻类供磷作用不容忽视。

微生物是生物地球化学循环的重要驱动因素,草甘膦通过改变微生物群落、酶活性影响土壤氮碳磷循环。例如,施用高剂量的草甘膦时,增加有机碳降解

酶(葡萄糖苷酶)和有机氮降解酶(如N-酰-氨基葡萄糖酶和氨基肽酶)的活性,同时也抑制土壤功能性酶(过氧化氢酶、脲酶、转化酶和酸性磷酸酶)活性、土壤细菌和真菌生长,进而影响碳氮循环^[51-53]。此外,草甘膦对碳氮磷的影响受到土壤类型、土壤理化性质和农艺管理措施等影响^[51]。例如,草甘膦可以刺激中性pH土壤中的硝化过程,影响氮的转化^[54]。

3.3 草甘膦对土壤其他污染物的影响

土壤重金属污染被环境学界称为“化学定时炸弹”,具有不可逆性、隐蔽性和长期性的特点,草甘膦含有胺、膦酸、羧酸基团等有机配体,具有较强的络合金属能力,能够与土壤中的金属离子发生络合反应,从而影响草甘膦或重金属对生物的毒性。例如,目前的研究^[55]已经表明,草甘膦与砷、镉、铜、铅、镍和锌螯合,产生拮抗作用,降低其在土壤中的毒性和生物利用度;此外,草甘膦可能会络合和解吸与沉积物结合的重金属,最终将重金属从固相迁移到水介质中,促进重金属污染物向地下水和表层水中的迁移。

残留在土壤中的草甘膦可能与土壤中其他的有机污染物(如农药、工业化学品、石油和烷基苯等)共存,对土壤生态系统和生物多样性产生协同效应。例如,草甘膦和抗生素的联合作用刺激有毒蓝藻的形成,对水生生态系统的危害比单一污染更大^[56]。聚苯乙烯微塑料和草甘膦协同通过增加抗氧化酶活性来激活葫芦草抗氧化防御系统,以应对氧化应激^[57]。另外,草甘膦和农用地膜碎片之间的相互作用还降低土壤溶解态有机碳和有机磷含量,导致生物可利用碳和磷损失^[58]。

4 存在不足与展望

草甘膦是一种广泛使用的除草剂,在提高粮食生产方面具有重要作用,但施用草甘膦所产生的环境问题已日益凸显。近年来,众多学者针对在草甘膦环境中的迁移转化规律、生态毒理、环境化学等多领域取得诸多成就,但草甘膦污染涉及到水、土、气等界面,其作用机制十分复杂,包括物理、化学、生物等多过程,亟须开展系统的研究来全面评估其对环境的影响,并制定相应的管理和控制措施。

(1)草甘膦一直以来被认为是安全、低毒性农药,但在周边水体的检测频率仍然很高,其对土壤生物和土壤环境质量的影响可能被忽视。特别是在脆弱的喀斯特地区,土层浅薄,下垫面粗糙易渗漏,加之高温多雨的气候特征,草甘膦可能很少或没有自然过滤(很少或没有化学分解)就进入岩溶裂缝或管网;草甘膦随地表和地下径流搬运而发生污染风险转移,形成非连续的污染风险格局,威胁岩溶地质碳汇稳定和水生生态系统安全。因此,有必要定期开展农业环境中

草甘膦的检测和风险评估,摸清草甘膦在喀斯特区的迁移路径,进一步探索草甘膦在岩溶地质中的吸附和去除能力,以更好地评估岩溶地质的碳汇稳定性和水生生态系统的安全性。

(2)土壤中的生物活性可以通过土壤中碳、氮、磷和酶活性的增加来反映。此外,生态化学计量学可以将元素之间的多重平衡,并与碳、氮、磷阈值建立联系。同时,土壤酶活性被认为是评估土壤生态系统总生物活性的敏感指标,对于农药生物降解也有重要作用。酶活性还可以作为分解草甘膦的限速步骤之一,对土壤中的氮碳磷元素的营养有效性也有影响。因此,可以借助酶化学计量学方法来研究草甘膦在土壤中的转化速率、通量以及与微生物代谢和营养需求、环境效应之间的耦合关系。

(3)复合污染物质间的协同效应可以更准确地评估环境风险,对于环境保护和人类健康具有十分重要的意义。目前对于草甘膦与其他有机污染物之间的协同效应的研究相对较少。这可能是由于草甘膦已被广泛使用,并且在不同的环境条件下,与其他有机污染物的协同效应可能存在差异。此外,研究这种协同效应需要复杂的试验设计和数据分析。因此,有必要进一步研究和探讨草甘膦和其他有机污染物对土壤生态系统的影响,揭示草甘膦与其他污染物作用机制和影响程度,开发出更有针对性、更适用的污染物处理方法。

(4)开展田间试验获取长期的监测数据,准确评估草甘膦对土壤微生物群落的持久影响。进一步发掘和筛选具有高效降解能力的微生物菌株,提高草甘膦的降解效率和修复草甘膦污染的能力。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Connolly A, Jones K, Basinas I, et al. Exploring the half-life of glyphosate in human urine samples[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2019, 222(2): 205-210.
- [3] Bento C P M, Goossens D, Rezaei M, et al. Glyphosate and AMPA distribution in wind-eroded sediment derived from loess soil[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 1079-1089.
- [4] 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.
- [5] 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:e144396.
- [6] Saunders L, Pezeshki R. Glyphosate in runoff waters and in the Root-Zone: A review[J]. *Toxics*, 2015,3(4):462-480.
- [7] Romano-Armada N, Amoroso M J, Rajal V B. Effect of glyphosate application on soil quality and health under natural and zero tillage field condition[J]. *Soil and Environment*, 2017,36(2):141-154.
- [8] Panettieri M, Lazaro L, López-Garrido R, et al. Glyphosate effect on soil biochemical properties under conservation tillage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013,133:16-24.
- [9] Sihtmäe M, Blinova I, Künnis-Beres K, et al. Ecotoxicological effects of different glyphosate formulations[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013,72:215-224.
- [10] Chávez-Ortiz P, Tapia-Torres Y, Larsen J, et al. Glyphosate-based herbicides alter soil carbon and phosphorus dynamics and microbial activity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022,169:e104256.
- [11] 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.
- [12] Jarvie H P, Smith D R, Norton L R, et al. Phosphorus and nitrogen limitation and impairment of headwater streams relative to rivers in Great Britain: A national perspective on eutrophication[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,621:849-862.
- [13] Huang J C, Zhang Y J, Bing H J, et al. Characterizing the river water quality in China: Recent progress and on-going challenges[J]. *Water Research*, 2021,201:e117309.
- [14] Hartmann A, Goldscheider N, Wagener T, et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches[J]. *Reviews of Geophysics*, 2014,52(3):218-242.
- [15] Chen W, Zeng F M, Liu W, et al. Organochlorine pesticides in karst soil: Levels, distribution, and source diagnosis[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021,18(21):e11589.
- [16] Pan L Y, Dai J F, Wu Z Q, et al. Spatial and temporal variations of nitrogen and phosphorus in surface water and groundwater of Mudong River watershed in Huixian Karst Wetland, Southwest China[J]. *Sustainability*, 2021,13(19):e10740.
- [17] Van Bruggen A H C, He M M, Shin K, et al. Environmental and health effects of the herbicide glyphosate[J]. *Science of the Total Environment*, 2018,616/617:255-268.
- [18] Muturi E J, Donthu R K, Fields C J, et al. Effect of pesticides on microbial communities in container aquatic habitats[J]. *Scientific Reports*, 2017,7(1):1-9.
- [19] Rendon-von Osten J, Dzul-Caamal R. Glyphosate residues in groundwater, drinking water and urine of subsistence farmers from intensive agriculture localities: A survey in hopelchén, campeche, mexico[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017,14(6):e595.
- [20] Aparicio V C, De Gerónimo E, Marino D, et al. Environmental fate of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in surface waters and soil of agricultural basins[J]. *Chemosphere*, 2013,93(9):1866-1873.
- [21] Primost J E, Marino D J G, Aparicio V C, et al. Glyphosate and AMPA, “pseudo-persistent” pollutants under real-world agricultural management practices in the Mesopotamic Pampas agroecosystem, Argentina [J]. *Environmental Pollution*, 2017,229:771-779.
- [22] Poiger T, Buerge I J, Bächli A, et al. Occurrence of the herbicide glyphosate and its metabolite AMPA in surface waters in Switzerland determined with on-line solid phase extraction LC-MS/MS [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017,24(2):1588-1596.
- [23] Ls V A, Humbert J F. Herbicide contamination of freshwater ecosystems: Impact on microbial communities[J]. *Intech*, 2011,16:286-321.
- [24] Gunarathna S, Gunawardana B, Jayaweera M, et al. Glyphosate and AMPA of agricultural soil, surface water, groundwater and sediments in areas prevalent with chronic kidney disease of unknown etiology, Sri Lanka [J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 2018,53(11):729-737.
- [25] Karasali H, Pavlidis G, Marousopoulou A. Investigation of the presence of glyphosate and its major metabolite AMPA in Greek soils[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019,26(36):36308-36321.
- [26] Horn S, Pieters R, Bohn T. A first assessment of glyphosate, 2,4-D and Cry proteins in surface water of South Africa[J/OL]. *South African Journal of Science*, 2019,115(9/10): DOI:10.17159/sajs.2019/5988.
- [27] Okada E, Allinson M, Barral M P, et al. Glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) are commonly found in urban streams and wetlands of Melbourne, Australia[J]. *Water Research*, 2020,168:e115139.
- [28] El-Gendy K, Mosallam E, Ahmed N, et al. Determination of glyphosate residues in Egyptian soil samples [J]. *Analytical Biochemistry*, 2018,557:1-6.
- [29] Araújo A S F, Monteiro R T R, Abarkeli R B. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils[J]. *Chemosphere*, 2003,52(5):799-804.
- [30] Veiga F, Zapata J M, Marcos M, et al. Dynamics of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in a forest soil in Galicia, north-west Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2001,271(1/3):135-144.

- [31] Stosiek N, Terebieniec A, Ząbek A, et al. N-phosphonomethylglycine utilization by the psychrotolerant yeast *Solicoocozyma terricola* M 3.1.4. [J]. *Bioorganic Chemistry*, 2019, 93: e102866.
- [32] Zhan H, Feng Y M, Fan X H, et al. Recent advances in glyphosate biodegradation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(12): 5033-5043.
- [33] Liu T, Chen X Y, Gong X, et al. Earthworms coordinate soil biota to improve multiple ecosystem functions [J]. *Current Biology*, 2019, 29(20): 3420-3429.
- [34] Pochron S T, Mezic M, Byrne S, et al. Exposure to roundup increases movement speed and decreases body mass in earthworms [J/OL]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.991494>.
- [35] Gaupp-Berghausen M, Hofer M, Rewald B et al. Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): e12886.
- [36] 杨晓霞, 张雪梅, 张伟, 等. 蚯蚓细胞色素 P450 亚酶及代谢组学对土壤亚致死剂量草甘膦除草剂的响应 [J]. *环境科学学报*, 2021, 41(3): 1091-1100.
- [37] Pochron S, Choudhury M, Gomez R, et al. Temperature and body mass drive earthworm (*Eisenia fetida*) sensitivity to a popular glyphosate-based herbicide [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 139: 32-39.
- [38] Lescano M R, Masin C E, Rodríguez A R, et al. Earthworms to improve glyphosate degradation in biobeds [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(21): 27023-27031.
- [39] Widdig M, Heintz-Buschart A, Schleuss P, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on microbial community composition and element cycling in a grassland soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 151: e108041.
- [40] Zobiole L H S, Kremer R J, Oliveira R J, et al. Glyphosate affects micro-organisms in rhizospheres of glyphosate-resistant soybeans [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 110(1): 118-127.
- [41] Mustafa A, Minggang X, Ali Shah S A, et al. Soil aggregation and soil aggregate stability regulate organic carbon and nitrogen storage in a red soil of southern China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 270: e110894.
- [42] 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/OL]. *土壤学报*, 1-18 [2023-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220729.1322.004.html>.
- [43] 王玉军, 周东美, 孙瑞娟, 等. 除草剂草甘膦在几种土壤和矿物上的吸附研究 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(5): 780-785.
- [44] 孙立思, 王娜, 孔德洋, 等. 土壤理化性质对草甘膦残留检测的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(9): 860-864.
- [45] Wang B, Li P P, Huang C H, et al. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: e142304.
- [46] Wang B, Zhang G H. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81(6): 1567-1576.
- [47] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究 [J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37.
- [48] 周垂帆, 林静雯, 李莹, 等. 草甘膦对土壤磷形态及有效性的影响 [J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(6): 71-77.
- [49] Sun M J, Li H, Jaisi D P. Degradation of glyphosate and bioavailability of phosphorus derived from glyphosate in a soil-water system [J]. *Water Research*, 2019, 163: e114840.
- [50] 王聪. 浮游植物对除草剂草甘膦的响应及其机制的研究 [D]. 福建 厦门: 厦门大学, 2018.
- [51] Woźniak A G M. Yield and quality of spring wheat and soil properties as affected by tillage system [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2014, 60(4): 141-145.
- [52] Hatti V R B K. Soil properties and productivity of rain-fed finger millet under conservation tillage and nutrient management in Eastern dry zone of Karnataka [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2018, 39(5): 612-624.
- [53] Stratton G W. Effects of the herbicide glyphosate on nitrification in four soils from Atlantic Canada [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, 51(3): 373-383.
- [54] 王冰洁, 姜蕾, 潘波, 等. Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 与 2 种除草剂单一及复合污染对蚯蚓的急性毒性 [J]. *农药*, 2020, 59(6): 425-429.
- [55] 许杨贵, 李晶, 秦俊豪, 等. 水环境中草甘膦和三价砷对大型溞的联合毒性评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(11): 2076-2082.
- [56] Xu S J, Liu Y, Zhang J, et al. Proteomic mechanisms for the combined stimulatory effects of glyphosate and antibiotic contaminants on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Chemosphere*, 2021, 267: e129244.
- [57] Hernández-Gutiérrez E, Rendón-von Osten J, Escalona-Segura G, et al. Morphospecies abundance of above-ground invertebrates in agricultural systems under glyphosate and microplastics in south-eastern Mexico [J/OL]. *Environments*, 2021, 8(11): 130. <https://doi.org/10.3390/environments8110130>.
- [58] Liu H F, Yang X M, Liang C T, et al. Interactive effects of microplastics and glyphosate on the dynamics of soil dissolved organic matter in a Chinese loess soil [J]. *Catena*, 2019, 182: e104177.