

王旭,郭豪,阮红燕,等. 间作减少甘蔗种植坡面土壤及养分流失与输移:基于⁷Be 同位素示踪技术[J]. 江苏农业科学,2023,51(3):219–226.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2023.03.032

间作减少甘蔗种植坡面土壤及养分流失与输移: 基于⁷Be 同位素示踪技术

王旭¹,郭豪¹,阮红燕²,杨翠红¹,黄智刚¹

(1. 广西大学农学院,广西南宁 530004; 2. 南宁师范大学,广西南宁 530004)

摘要:为明确间作在甘蔗种植区的水土保持效应,选择广西甘蔗种植小流域典型坡面,设置甘蔗–西瓜间作(T)、甘蔗单作(CK)2个处理,基于⁷Be 示踪技术研究 2021 年 4 月 26 日(RE₁)、5 月 3 日至 5 日(RE₂)、7 月 22 日(RE₃)3 场降水事件下间作对坡耕地土壤、全氮和全磷流失的影响。结果表明,在 RE₁ 和 RE₂ 降水期间,间作不仅影响坡面土壤、全氮、全磷的沉积位置,还能使土壤、全氮和全磷净流失量分别减少 37.9%~44.1%、43.0%~44.4%、30.7%~43.4%,输移比分别降低 26.2%~35.2%、31.1%~37.7%、27.7%~28.9%。RE₃ 降水期间,间作坡面土壤、全氮、全磷的净流失量与对照坡面相比无显著差异,土壤的输移比也无显著差异,但全氮、全磷的输移比分别升高了 12.4%和 17.8%。总体来讲,3 次降水间作坡面总的土壤、全氮、全磷净流失量分别比对照坡面减少了 35.7%、38.0%、29.8%,平均输移比分别降低了 16.3%、17.3%、10.9%。表明间作可以有效减少坡面土壤养分流失、拦截和控制甘蔗种植区土壤养分的输移,是一种良好的水土保持措施。

关键词:次降水; 土壤养分; 净流失量; 输移比; 巨型坡面; 环境同位素示踪技术

中图分类号:S157.2;S157.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2023)03–0219–08

农田土壤及养分在降水径流驱动下进入河湖水体,加剧了水体泥沙含量并导致水体富营养化,严重威胁下游地区的水环境安全^[1]。全球范围内,每年因土壤侵蚀导致的氮、磷流失量分别达到了 3×10^7 、 1.75×10^7 t,超过 30% 的陆地面积受到农业面源污染的影响^[2]。侵蚀流失的土壤养分并不会全部进入河流,大部分沉积在坡面下部或沟道两侧低洼处,尽管如此,河流中依然有 55% 的氮和 95% 的磷来自泥沙沉积物^[3]。对此,许多地区通过建立梯田、人工湿地、推广坡地植物篱、间作等一系列措施减少土壤侵蚀的发生、削弱沉积物向水体输送,防止农田水土流失进一步恶化^[4–5]。其中,间作被认为是一种具备经济和生态双重收益的水土保持措施,不仅可以增加粮食产出,还可以降低环境负效应^[6–7]。间作是在同一块地上按照一定比例种植

生育周期不同的作物,不仅可以错开作物竞争养分的空间和时间,充分利用水肥气热等资源提升单位面积的经济效益;还可以通过增加覆盖达到保墒保水,促进作物根系生长,分离水土的效果,从而削弱降水径流对土壤的剥离冲刷作用,实现减少土壤的流失功能^[8–10]。陈小强等通过研究玉米–大豆种植模式的水土保持效应发现,相比单作,间作可减少约 30% 的水土流失^[11]。Guo 等通过径流小区研究发现,玉米–花生间作可以减少 94% 的径流,其侵蚀产沙量仅相当于裸地的 0.4%^[12]。然而,这些研究大多数集中在小区尺度上,通过土壤及养分流失的变化反映间作对坡面土壤及养分流失的影响,虽然可以有效排除其他因素对间作效果的影响,但却难以反映野外巨型坡面的实际应用效果。

坡面土壤侵蚀及相关养分流失的监测方法主要包括原位监测和核素示踪技术^[13]。其中,核素示踪技术是目前公认的能够快速、定量评价土壤侵蚀产沙速率的方法,其原理是通过比较采样点与参考点的核素含量来反映土壤的流失与沉积,当采样点核素含量小于参考点时,则采样点代表的区域发生了土壤流失现象;当采样点核素含量大于参考点时,则采样点代表的区域则表现出沉积特征^[14]。⁷Be

收稿日期:2022–03–01

基金项目:亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室开放课题(编号:SKLCUSA–b01905)。

作者简介:王旭(1995—),男,陕西延安人,硕士,主要从事土壤侵蚀及农业面源污染研究。E–mail:384059398@qq.com。

通信作者:黄智刚,博士,副教授,主要从事农业面源污染方面的研究。E–mail:hzg@gxu.edu.cn。

是一种自然沉降的放射性核素(半衰期 53.3 d),主要受降水的影响,沉降后会很快被表层土壤颗粒吸附,之后在外力作用下迁移搬运,经常被用来确定次降水事件或短期内的土壤侵蚀与沉积速率^[15]。目前,⁷Be 法估算土壤侵蚀速率的不确定性主要来源于植被冠层对⁷Be 的吸附截留作用,所以⁷Be 法的应用研究大部分是在裸地或植被覆盖较小的区域进行,但也有在草地、覆盖等条件下评价保护性耕作措施的应用,然而很少有研究利用⁷Be 评价间作对土壤及养分流失的影响^[16-18]。

广西壮族自治区地处我国南部,是我国最重要的甘蔗生产基地,2020 年全区甘蔗种植面积与产量均占全国 65% 左右^[19]。该区地形以山地丘陵为主,农作物主要种植在旱坡地上,刘警鉴等通过 RUSLE 模型估算出广西壮族自治区地区坡耕地的年平均土壤侵蚀量达 893 t/km^[20],莫雅棋通过细沟侵蚀监测得出坡耕地全氮和全磷的年流失量在 12.1 ~ 80.0 kg/hm 之间^[13]。在甘蔗生长前期,植被冠层覆盖和地面覆盖都比较低,大量农田土壤养分流失进入河流,增加水体污染的风险,严重威胁了下游饮水水质。虽然广西也采取了“源头减量-中段拦截-末端治理”的面源污染防控策略,但却忽视了广西已有较大面积推广的甘蔗间种其他作物模式的面源污染防控效应,相关研究主要集中在改良农艺措施、优化资源利用以及提升经济效益方面^[21-23],间作对甘蔗种植区土壤侵蚀及相关养分流失等环境影响鲜有报道。

对此,本研究以广西壮族自治区赤红壤坡耕地为研究对象,利用自然环境放射性同位素(⁷Be)示踪不同时间的土壤侵蚀或沉积速率,以此确定间作对甘蔗种植坡面土壤侵蚀、土壤全氮、全磷流失的影响。旨在为减少广西壮族自治区甘蔗种植区农田养分流失,防控农业面源污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于广西壮族自治区西江流域的那辣小流域(22°20'36"N,107°39'29"E)。属亚热带季风湿润气候,年平均气温介于 20 ~ 22 ℃ 之间,降雨天数在 130 ~ 200 d 之间,降水量 1 000 mm 左右,约 80% 的降水集中在 3—9 月。地貌类型为丘陵,土壤类型为赤红壤,土壤颗粒组成为 31.41% 黏粒,63.44% 粉粒,5.15% 砂砾,土壤质地粉质土-粉质

黏土壤土(美国制)^[24]。流域面积 1.29 km²,平均坡度约为 9°,平均坡长约为 190 m。2018 年以来,广西地区推广集约化农业,研究区内大规模种植甘蔗,至 2020 年,超过 80% 的土地利用为甘蔗地,其余土地利用类型包括道路、沟渠和桉树林。其中,甘蔗在流域内的种植年限一般为 3 年,包括新植甘蔗(一般于当年 1 月至 3 月新种植的甘蔗)和宿根甘蔗(前季的留茬甘蔗)2 种类型,甘蔗种植模式包括甘蔗单作以及甘蔗-西瓜间作 2 种模式。

1.2 试验处理

选择该流域地形特征及土壤理化性质相似(表 1),坡面宽度为 60 m 的 2 个巨型坡面。试验设 2 个处理:单作甘蔗的对照组(CK)、甘蔗间作西瓜的处理组(T)。具体试验布设见图 1,按照田块边界将坡面分为坡顶、上部、中上部、中下部、下部和坡底 6 个坡位,在坡顶位置于 2021 年 3 月新植甘蔗,基肥沟施,5 月中旬撒施追肥;其他坡位为宿根(1 年)甘蔗(2020 年种植,2021 年收获后的留茬甘蔗),于 3 月上旬、5 月中旬通过撒施进行追肥。甘蔗供试品种为桂糖 42,行距 1 m 横坡种植。处理组坡面间作的西瓜供试品种为黑美人,在甘蔗行间横坡种植,2021 年 2 月上旬点种于中下部、下部和坡底 3 个坡位,每隔 5 行甘蔗间作 1 行西瓜,同行株距 2 m,于同年 5 月上旬开始收获,6 月初间作结束。

甘蔗和西瓜的施肥时间、施肥方式以及施肥量见表 2。间作于 2021 年 2 月上旬种植西瓜开始,5 月下旬西瓜收获完后结束。

1.3 样品的采集与分析

本研究分别于 2021 年 4 月 26 日(RE₁,降水量 54.0 mm,平均雨强 6.8 mm/h)、5 月 2 日至 5 月 5 日(RE₂,降水量 79.8 mm,平均雨强 5.7 mm/h)、7 月 22 日(RE₃,降水量 52.8 mm,平均雨强 5.9 mm/h),降水结束后采集 3 次⁷Be 样品,包括试验坡面样品以及参考点样品。

坡面样品采集:首先将完整的坡面垂直于等高线划分为 3 个面积相当的小坡面作为重复小区。每次降水后,在每个小区里利用长 200 mm、宽 100 mm、深 20 mm 的刮板,按等高线采样原则间隔 5 m 采集各坡位的样品,每个坡位 3 个采样点,混合为 1 个样品。即在每个坡位上,采集 3 个重复样(图 1),每次降水采集 36 个坡面样品。

参考点样品采集:2021 年 3 月人工建立了 3 个无侵蚀无堆积,平坦的没有人为干扰的参考点,参

表 1 不同处理各坡位的地形特征及土壤理化性质

处理	坡位	地形特征		土壤理化性质			
		坡长(m)	坡度(°)	全氮含量(g/kg)	全磷含量(g/kg)	容重(g/cm ³)	土壤含水量(%)
CK	坡顶	37	14.94±1.53	1.20±0.04	0.47±0.03	1.49±0.06	15.43±0.57
	上坡	37	14.23±2.20	1.17±0.07	0.51±0.06	1.63±0.08	16.00±1.00
	中上	47	14.92±1.28	1.17±0.04	0.54±0.03	1.65±0.08	15.85±1.43
	中下	23	5.13±3.06	1.26±0.06	0.54±0.06	1.65±0.07	18.59±1.40
	下坡	23	5.26±1.95	1.26±0.03	0.50±0.04	1.70±0.08	19.50±0.67
	底部	23	3.31±0.77	1.23±0.01	0.54±0.08	1.71±0.04	21.02±0.23
	全坡	190	9.63±5.47	1.22±0.06	0.52±0.06	1.63±0.06	17.73±2.49
T	坡顶	43	11.54±1.23	1.20±0.06	0.51±0.02	1.49±0.05	15.13±2.05
	上坡	40	13.98±0.92	1.18±0.07	0.52±0.06	1.64±0.01	16.67±2.31
	中上	37	14.53±3.02	1.21±0.06	0.53±0.05	1.61±0.04	17.97±1.04
	中下	25	7.69±2.84	1.23±0.02	0.51±0.06	1.66±0.05	16.91±0.73
	下坡	25	4.05±1.27	1.20±0.03	0.52±0.02	1.70±0.01	20.83±5.54
	底部	25	4.65±1.81	1.24±0.04	0.51±0.05	1.71±0.04	23.61±5.55
	全坡	195	9.41±4.66	1.21±0.05	0.51±0.05	1.64±0.10	18.52±4.50

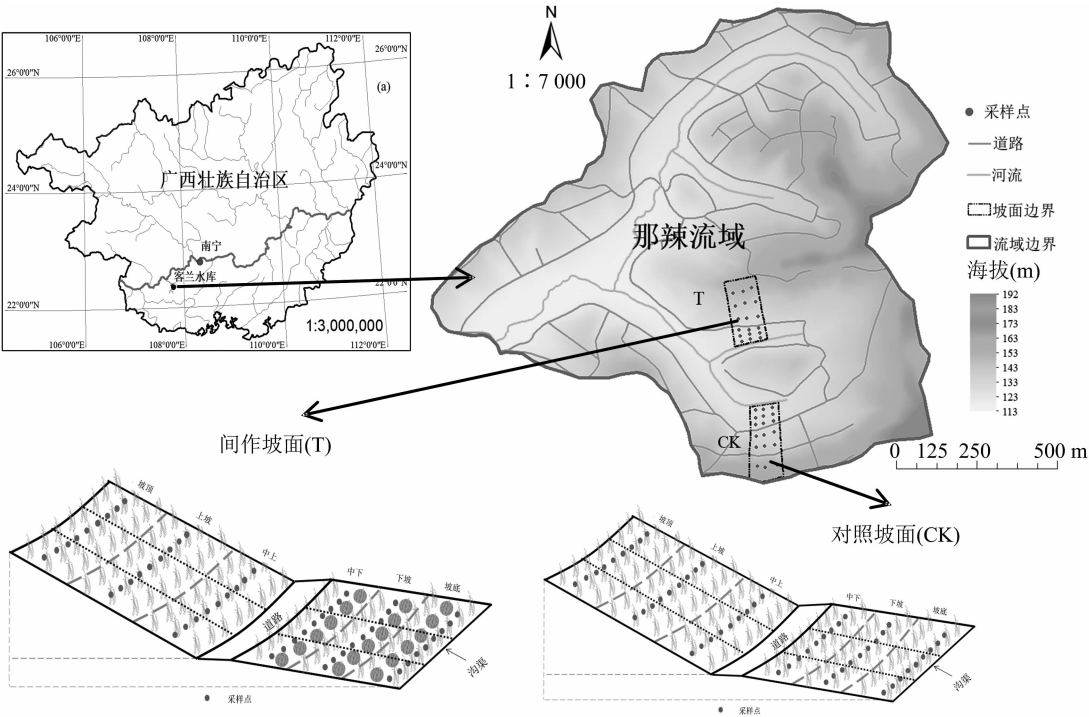


图1 研究区、坡位及采样点

表 2 不同作物的施肥时间、施肥方式以及施肥量

作物类型	施肥月份	施肥方式	施肥量(kg/hm ²)
甘蔗	3,5	沟施、撒施	216(N)、96(P ₂ O ₅)
西瓜	2,3,4,5	穴施、撒施、水溶冲施	110(N)、40(P ₂ O ₅)

考点的样品采集包括混合样品和剖面样品 2 个部分。(1)混合样品:采集方法与坡面样品一致。(2)剖面样品:在 0~10 mm 深度是每 2 mm 采集 1 次,在 10~20 mm 深度是每 5 mm 采集 1 次,共采集了 7 层。

样品的处理与分析:所有的样品密封带回实验

室风干后称质量,一部分过 2 mm 筛进行 ^7Be 质量活度 (Bq/kg) 测定,另一部分过 0.15 mm 筛进行土壤全氮含量和土壤全磷含量分析。 ^7Be 质量活度是在南京师范大学地理科学学院用美国 ORTEC 公司的高纯锗 γ 谱仪测定的,在 477.6 keV 能谱峰下测试 ^7Be 的比活度,测定时间为 12 ~ 24 h^[25]。土壤全氮含量和土壤全磷含量分析在广西大学农产品安全重点实验室进行,分别采用凯式定氮法和 $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HClO}_4$ 热消解法测定。

1.4 计算

土壤侵蚀速率 (E_s) 与沉积速率 (D_s) 是按照 Walling 等的方法^[15] 计算。在此基础上,计算侵蚀土壤全氮、全磷的流失速率 (E_N 、 E_P) 与沉积速率 (D_N 、 D_P) :

$$E_N = E_s \times C_N; \quad (1)$$

$$E_P = E_s \times C_P; \quad (2)$$

$$D_N = D_s \times C_N; \quad (3)$$

$$D_P = D_s \times C_P. \quad (4)$$

式中: C_N 、 C_P 分别为土壤全氮、全磷含量。

以此计算坡面土壤、全氮和全磷净流失速率 (Net) 以及输移比 (SDR), 公式如下:

$$Net = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \times Ae_i + \sum_{i=1}^n D_i \times Ae_i}{A}; \quad (5)$$

$$SDR = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i \times Ad_i}{\sum_{i=1}^n E_i \times Ae_i} \right) \times 100\%. \quad (6)$$

式中: E_i 和 D_i 分别是坡位 i 的土壤、全氮以及全磷的流失速率和沉积速率; Ae_i 和 Ad_i 分别是流失速率和沉积速率对应坡位的面积。

1.5 数据处理与分析

不同处理间的显著性分析是在 Excel 2019 中通

过单因素方差分析完成。坡面采样示意图利用 Word 2019 绘制,其余的图在 Origin 2018 中完成。

2 结果与分析

2.1 不同处理下坡面的 ^7Be 含量

如图 2 所示, RE_1 、 RE_2 和 RE_3 的 ^7Be 含量随着时间的变化呈现出先增加再减小的趋势。在参考点, RE_1 、 RE_2 、 RE_3 的 ^7Be 含量背景值分别为 367.1、533.8、280.0 Bq/m^2 ; CK 坡面上 3 场降水的 ^7Be 含量范围分别在 241.7 ~ 485.6 Bq/m^2 、366.0 ~ 782.8 Bq/m^2 、221.5 ~ 341.9 Bq/m^2 之间; T 坡面上 RE_1 的 ^7Be 含量范围是 240.7 ~ 471.0 Bq/m^2 , RE_2 的 ^7Be 含量范围是 343.6 ~ 718.9 Bq/m^2 , RE_3 的 ^7Be 含量范围是 229.7 ~ 322.5 Bq/m^2 。CK 和 T 坡面的 ^7Be 含量范围在不同降水事件下的大小顺序均为 $\text{RE}_2 > \text{RE}_1 > \text{RE}_3$ 。

空间上, ^7Be 含量在不同处理坡面上从坡顶到坡底整体表现出增加的趋势,但其含量随坡位变化而变化。通过比较各坡位的 ^7Be 含量与参考点的 ^7Be 含量背景值发现, CK 坡面的坡顶、上坡、中上及中下坡位在 3 场降水下的 ^7Be 含量均小于参考点的 ^7Be 含量背景值,除 RE_1 的上坡 ^7Be 含量 (322.9 Bq/m^2) 大于中上坡 (304.0 Bq/m^2) 外,其他 2 个降水事件下, CK 坡面的 ^7Be 含量在坡顶、上坡、中上及中下坡位递增。CK 坡面下坡及坡底 2 个坡位在 3 场降水下的 ^7Be 含量均大于 ^7Be 含量背景值,且 RE_1 和 RE_2 降水的下坡 ^7Be 含量大于坡底,但在 RE_3 中,下坡 (299.9 Bq/m^2) 的 ^7Be 含量小于坡底 (341.9 Bq/m^2)。在 T 坡面上, RE_1 和 RE_2 的坡顶、上坡和中上的 ^7Be 含量均小于参考点的 ^7Be 含量背景值,中下、下坡和坡底的 ^7Be 含量均大于参

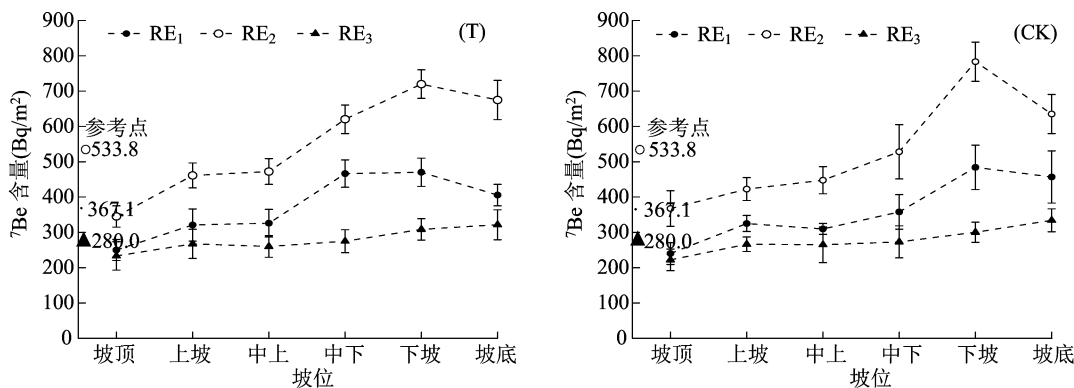


图2 不同处理坡面 ^7Be 含量的时空变化

考点的⁷Be 含量背景值,而 RE₃ 的⁷Be 含量空间分布与 CK 坡面相似。总体而言,在 3 场降水事件下,从坡顶到坡底 6 个坡位的⁷Be 含量呈先增再减的变化趋势。

2.2 不同处理坡面的土壤、全氮和全磷的流失及沉积特征

从表 3 可以看出,不同处理坡面的土壤、全氮和全磷的流失、沉积量的时空变化特征。相同的降水条件下,CK 坡面与 T 坡面的土壤流失与沉积在空间分布和数值大小上均有所差异。3 次降水事件下,CK 坡面的土壤流失均发生在坡顶、上坡、中上及中下 4 个坡位,在下坡和坡底则发生不同程度的沉积现象。在 RE₁ 和 RE₂ 中,CK 坡面的土壤流失量在每个坡位上均有显著差异,其大小顺序为坡顶>中上>上坡>中下,且坡顶的土壤流失量是其他坡位的 1.6~27.0 倍;但在 RE₃ 中,土壤流失量虽然也是坡顶(12.2 t/hm²)最大,但其他 3 个坡位之间(1.1~3.5 t/hm²)没有明显差异。RE₁ 中,CK 坡面的土壤沉积量在 2 个坡位无明显差异;RE₂ 中,下坡(23.7 t/hm²)的土壤沉积量显著高于坡底(9.2 t/hm²);而 RE₃ 中的土壤沉积量则是坡底比下坡高了 140%。前 2 次降水事件下,T 坡面的土壤流失发生在坡顶、上坡和中上 3 个坡位,其中坡顶的土壤流失量显著高于其他 2 个坡位,达到了这 2 个坡位的 3~4 倍。T 坡面间作的中下、下坡和坡底则是土壤沉积的区域,在 RE₁ 中,中下和下坡的土壤

沉积量无明显差异,但大于坡底;而 RE₂ 的土壤沉积量在 3 个坡位均有显著差异,其中下坡最大,其次是底部,最小的为中下坡位。在 RE₃ 中,T 坡面与 CK 坡面有相似的土壤流失与沉积特征,坡顶(11.1 t/hm²)土壤流失量显著高于其他 3 个坡位(1.2~3.3 t/hm²),但下坡与坡底的土壤沉积量无显著差异。

不同处理坡面的土壤全氮、全磷流失特征在空间分布规律上与该处理的土壤流失特征一致。3 次降水事件中,CK 坡面上全氮与全磷的流失也发生在上面的 4 个坡位,全氮、全磷流失量范围分别介于 1.0~24.9 kg/hm²、0.3~10.4 kg/hm² 之间,且坡顶的流失量最大,中下坡位的流失量最小。CK 坡面上全氮与全磷均沉积在下坡和坡底 2 个坡位,在 RE₁ 中,下坡的全氮沉积量比坡底高了 22.2%,下坡与坡底的全磷沉积量无差异;RE₂ 中,下坡的全氮、全磷沉积量分别比坡底高 153.5%、220.5%;但 RE₃ 中,下坡的全氮、全磷沉积量比坡底低了 56.8%、61.9%。RE₁ 和 RE₂ 中,T 坡面坡顶的全氮流失量比上坡、中上 2 个坡位高了 191.5%~305.1%,全磷流失量高了 157.5%~278.5%;全氮与全磷在下面 3 个坡位沉积,其中 RE₁ 的中下坡和下坡 2 个坡位的全氮、全磷沉积量约为坡底的 3 倍,RE₂ 的全氮沉积量在下坡比中下坡和坡底分别高了 134.0%、30.7%,全磷沉积量在下坡和坡底无差异,比中下坡高 97.4%~118.4%。RE₃ 中,全氮、全磷

表 3 不同处理坡面的土壤、全氮和全磷的流失、沉积量的时空变化

处理	坡度	RE ₁ 中流失量或沉积量			RE ₂ 中流失量或沉积量			RE ₃ 中流失量或沉积量		
		土壤 (t/hm ²)	全氮 (kg/hm ²)	全磷 (kg/hm ²)	土壤 (t/hm ²)	全氮 (kg/hm ²)	全磷 (kg/hm ²)	土壤 (t/hm ²)	全氮 (kg/hm ²)	全磷 (kg/hm ²)
CK	坡顶	-21.3±0.9a	-24.9±1.0a	-10.4±0.4a	-18.9±0.7a	-23.6±0.9a	-8.0±0.3a	-12.2±0.4a	-14.3±0.4a	-6.0±0.9a
	上坡	-5.9±0.6c	-6.6±0.6c	-3.2±0.3c	-11.8±0.4b	-15.0±0.5b	-5.2±0.2b	-2.3±1.3b	-2.6±1.4b	-1.3±0.7b
	中上	-10.0±0.9b	-11.4±1.1b	-5.5±0.5b	-8.1±0.5c	-10.0±0.6c	-4.0±0.2c	-3.5±1.4b	-4.0±1.6b	-2.0±0.8b
	中下	-1.1±0.6d	-1.3±0.8d	-0.7±0.4d	-0.7±0.1d	-1.0±0.2d	-0.3±0.1d	-1.1±0.6b	-1.3±0.7b	-0.6±0.3b
	下坡	16.0±0.7A	20.4±0.9A	7.1±0.3A	23.7±0.7A	28.9±0.9A	12.5±0.4A	4.5±0.8B	5.7±1.1B	2.4±0.4B
	坡底	13.6±0.8A	16.7±1.0B	8.3±0.5A	9.2±0.3B	11.4±0.4B	3.9±0.1B	10.8±1.2A	13.2±1.5A	6.3±0.7A
T	坡顶	-21.1±1.5a	-23.9±1.7a	-10.6±0.7a	-22.6±0.5a	-28.9±0.7a	-10.3±0.2a	-11.1±1.7a	-12.0±1.8a	-6.0±0.9a
	上坡	-5.3±1.0b	-5.9±1.1b	-2.8±0.5b	-7.9±1.1b	-9.9±1.4b	-4.0±0.6b	-1.7±0.4b	-1.9±0.4b	-0.8±0.2b
	中上	-6.7±0.6b	-7.6±0.7b	-2.9±0.3b	-5.8±0.9b	-7.5±1.1b	-3.3±0.5b	-3.3±0.2b	-3.8±0.3b	-1.9±0.1b
	中下	14.4±0.5A	17.7±0.6A	7.3±0.2A	7.9±0.5C	10.0±0.7C	3.8±0.3B	-1.2±0.6b	-1.3±0.7b	-0.7±0.4b
	下坡	14.0±0.3A	17.2±0.4A	7.1±0.2A	19.0±1.5A	23.4±1.8A	8.3±0.6A	5.4±0.7A	5.9±0.8A	3.2±0.4A
	坡底	4.7±0.4B	5.8±0.5B	2.3±0.2B	13.9±0.8B	17.9±1.0B	7.5±0.4A	7.9±0.6A	8.9±0.6A	4.3±0.3A

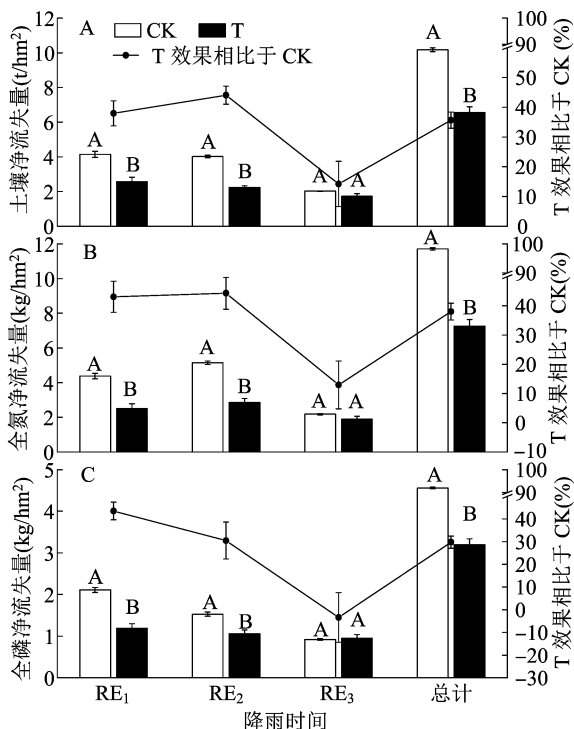
注:负数代表土壤、全氮和全磷流失,正数代表土壤、全氮和全磷沉积。不同小写字母与大写字母分别表示同一坡面的不同坡位流失量和沉积量的差异显著(P<0.05)。

的流失与沉积动态与 CK 坡面相似,坡顶全氮(12.0 kg/hm^2)、全磷(6.0 kg/hm^2)流失量比其他 3 个坡位高了 2.2 ~ 8.2 倍,下坡与坡底的全氮、全磷沉积量均无显著差异。

2.3 不同处理坡面的土壤、全氮和全磷的净流失量及输移比

从图 3 可以看出,间作可以显著减小坡面土壤、全氮和全磷的净流失量($P < 0.01$)。间作期间(RE_1 、 RE_2),T 坡面与 CK 坡面的土壤、全氮和全磷净流失量均有显著差异。 RE_1 中,T 坡面土壤、全氮、全磷的净流失量分别为 2.6 t/hm^2 、 2.5 kg/hm^2 、 1.2 kg/hm^2 ,比 CK 坡面分别减小了 37.9%、43.0%、43.4%; RE_2 中,三者 T 坡面的净流失量分别为 2.2 t/hm^2 、 2.9 kg/hm^2 、 1.1 kg/hm^2 ,分别减小了 44.1%、44.4%、30.7%。间作结束后的 RE_3 中,T 坡面与 CK 坡面的土壤、全氮及全磷净流失量差异不显著。3 场降水的总净流失量结果与前 2 次降水结果一致,T 坡面土壤、全氮、全磷的总净流失量分别为 6.60 t/hm^2 、 7.26 kg/hm^2 、 3.2 kg/hm^2 ,相比于 CK 坡面,分别减少了 35.7%、38.0%、29.8%。

间作对坡面土壤、全氮和全磷的输移比也有显著影响(图 4)。监测期间,T 坡面的 3 场降水下的土壤、全氮、全磷的平均输移比分别为 39.9%、39.2%、40.1%,与 CK 坡面相比,土壤输移比减少了 16.3%,全氮、全磷的输移比分别降低了 17.3%、10.9%。间作降低土壤及氮磷输移比集中在 RE_1 和 RE_2 这 2 场降水中,在 RE_3 降水中 T 坡面的土壤与 CK 坡面无显著差异,但全氮和全磷输移比却显



柱上大写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。图 4 同

图3 不同处理坡面的土壤、全氮和全磷净流失速率及间作的效果

著高于 CK 坡面。在 RE_1 中,T 坡面的土壤、全氮、全磷的输移比分别为 38.6%、33.1%、36.6%,CK 坡面三者分别为 52.3%、48.1%、51.4%;在 RE_2 中,CK 坡面的土壤、全氮和全磷的输移比在 42.2% ~ 50.0% 之间,比 T 坡面高了 38.4% ~ 60.5%。在 RE_3 中,T 坡面的全氮、全磷的输移比分别比 CK 坡面高 12.4%、17.8%。

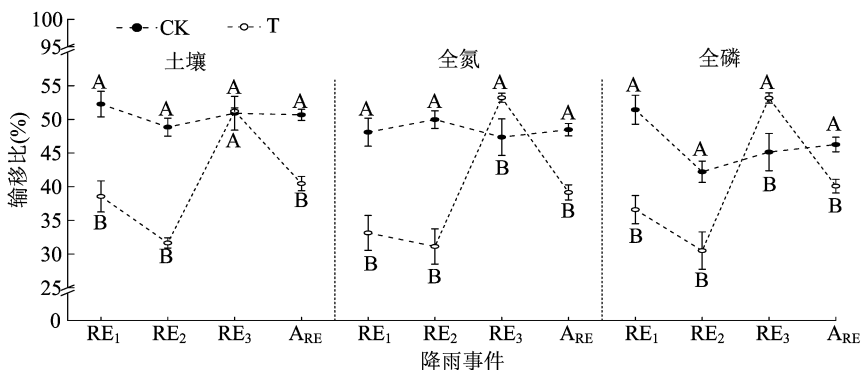


图4 不同处理坡面的土壤、全氮和全磷输移比

3 讨论

3.1 间作改变土壤养分的流失与沉积

间作是一种良好的水土保持措施,可以显著减

少甘蔗种植区坡面土壤及相关养分流失。本研究结果表明,单作甘蔗的野外巨型复合坡面上,土壤、全氮和全磷沉积主要发生在下坡和坡底 2 个坡位,而间作坡面在间作期间(RE_1 和 RE_2)的沉积位置是

中下、下坡和坡底 3 个有间作措施的坡位,间作期结束后(RE_3)则与单作坡面的沉积坡位相同。除了可以改变土壤、全氮和全磷的沉积位置外,间作还可以减少 29.8% ~ 38.0% 的土壤、全氮和全磷净流失量。苏正安等在龙门山地震带利用 ^{137}Cs 研究复合坡面土壤侵蚀与沉积状况,与本研究对照坡面结果相似,即巨型坡面的土壤及相关养分的流失部位是坡顶、上坡、中上及中下 4 个坡位,沉积在下坡和坡底^[14]。前人在径流小区尺度上的研究没有区分流失区和沉积区,通过直接比较间作与单作坡面土壤及相关养分的流失量来评价间作的水土保持效果,结果表明间作可以减少 16.0% ~ 99.6% 的土壤及相关养分流失^[10-12,26-27],认为间作可以通过增加覆盖度,延长覆盖时间来削弱雨滴溅蚀能量,减缓径流流速,从而减小降雨径流剥离土壤的能力,来减少土壤及相关养分的流失^[11];或通过增加根长、根表面积以及根体积来稳定土壤结构,提高土壤渗透性的能力,进而增强土壤抗冲性,减少水土流失^[10,28]。除此之外,张晓云等的研究表明,间作还可以通过增加地上部冠层覆盖度来减少水土流失^[29]。在甘蔗种植区,地面凋落物覆盖度和甘蔗根系密度与土壤及相关养分流失呈显著负相关关系^[13],所以在甘蔗生长初期可能会有较大的土壤及养分流失,但间作正好弥补了这一不足,通过增加甘蔗生长前期的地面覆盖度与植物根系来减少、拦截和控制坡耕地土壤及相关养分的流失。

3.2 间作影响土壤养分的输移比

土壤、全氮和全磷的输移比在间作(T)与单作(CK)的坡面上有显著差异,在间作期(RE_1 、 RE_2)和非间作期(RE_3)也有显著差异。在间作期间,T 坡面土壤、全氮和全磷的输移比与 CK 相比减少了 26.2% ~ 37.7%;在非间作期,T 坡面土壤的输移比与 CK 坡面无显著差异,但全氮和全磷的输移比却与间作期相反。关于输移比的研究主要集中在流域尺度或径流小区的泥沙输移比,土壤养分研究较少,流域侵蚀泥沙大部分会在坡面下部或者河道中沉积,只有 10% ~ 30% 会从流域出口输出^[30]。张风宝等利用 7Be 计算出坡耕地小区的泥沙输移比在 64.3% ~ 97.9% 之间,与本研究巨型坡面的输移比(30.78% ~ 54.48%)有所差别,可能是间作在 RE_1 、 RE_2 期间可以起到一种类似植物篱的作用,通过地面覆盖物拦截,控制坡耕地土壤及相关养分的流失,进而影响土壤养分的输移比^[31-32]。而在 RE_3

期间,间作坡面的全氮、全磷输移比均比前 2 次降水的输移比大,可能是由于以下 2 个原因导致的:在间作期间,坡上部流失的养分沉积在下部的 3 个坡位,泥沙养分的富集机制会增加这 3 个坡位的全氮和全磷含量;间作结束后坡面的中下坡位变为全氮全磷的流失区,这在一定程度上会导致养分流失变多,沉积变少,进而增大养分的输移比^[33];Shi 等报道,当植被盖度增加后,有超过一半的 7Be 被吸附截留,当间作结束后,甘蔗已处于伸长期,此时的植被覆盖度较高,会极大地高估土壤侵蚀速率,从而导致输移比降低,所以在甘蔗已完全生长后, 7Be 可能已不再适用于估算土壤和养分的输移比^[16]。总的来讲,间作可以降低 10.9% ~ 17.3% 的土壤、全氮和全磷输移比,说明在甘蔗种植区,间作的水土保持效果同样显著。

4 结论

间作可以改变土壤、全氮和全磷在复合坡面上的流失及沉积部位,间作期间,土壤、全氮和全磷的流失发生在坡顶、上坡和中上 3 个无间作的坡位,沉积在中下、下坡和坡底 3 个坡位。间作结束后,土壤、全氮和全磷流失与沉积的位置与无间作的对照坡面相同,流失在坡顶、上坡、中上和中下坡位,沉积在下坡和坡底。

间作能有效减少全氮和全磷在复合坡面上的净流失量,降低其输移比。间作期间,土壤、全氮和全磷净流失量可以减少 30.7% ~ 44.4%;其输移比降低了 27.7% ~ 37.7%。间作结束后,土壤、全氮和全磷净流失量无显著差异;而与对照坡面相比,土壤的输移比也无显著差异,但全氮、全磷的输移比分别升高了 12.4%、17.8%。总体来讲,3 次降水间作坡面总的土壤、全氮、全磷净流失量分别比对照坡面减少了 35.7%、38.0%、29.8%,平均输移比分别降低了 16.3%、17.3%、10.9%。因此,间作是一种良好的水土保持措施,可以显著减少、拦截和控制甘蔗种植区的农田土壤及养分流失。

参考文献:

- [1] 史志华,王 玲,刘前进,等. 土壤侵蚀:从综合治理到生态调控[J]. 中国科学院院刊,2018,33(2):198-205.
- [2] Quinton J N, Govers G, van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(5):311-314.
- [3] Meybeck M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world

- rivers[J]. American Journal of Science,1982,282(4):401–450.
- [4]郭鸿鹏,朱静雅,杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报,2008,24(4):290–295.
- [5]Chen H, Duan C Y. Research on the pattern of comprehensive improvement of small watershed pollution in Guangxi Province[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,535:394–398.
- [6]袁希平,雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报,2004,20(2):296–300.
- [7]Chai Q, Nemecek T, Liang C, et al. Integrated farming with intercropping increases food production while reducing environmental footprint[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2021,118(38):e2106382118.
- [8]酒鹃鹃,李永梅,王梦雪,等. 玉米大豆间作对坡耕地红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(22):219–228.
- [9]安瞳昕,周 锋,吴珍珍,等. 坡耕地间作作物群体水土保持耕作措施[J]. 水土保持研究,2019,26(2):17–22.
- [10]杜 静,范茂攀,王自林,等. 玉米–马铃薯间作根系特征及其与坡耕地红壤径流养分流失的关系[J]. 水土保持学报,2017,31(1):55–60.
- [11]陈小强,范茂攀,王自林,等. 不同种植模式对云南省中部坡耕地水土保持的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(4):48–52,65.
- [12]Guo M J, Zhang T G, Li Z B, et al. Investigation of runoff and sediment yields under different crop and tillage conditions by field artificial rainfall experiments[J]. Water,2019,11(5):1019.
- [13]莫雅棋. 广西集约化蔗区坡面沟蚀时空变化及主控因子分析[D]. 南宁:广西大学,2021.
- [14]苏正安,李 艳,熊东红,等. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(3):118–124.
- [15]Walling D E, He Q, Blake W. Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short – and medium – term rates of water – induced soil erosion on agricultural land[J]. Water Resources Research,1999,35(12):3865–3874.
- [16]Shi Z L, Wen A B, Ju L, et al. A modified model for estimating soil redistribution on grassland by using ^7Be measurements[J]. Plant and Soil,2013,362(1):279–286.
- [17]张 博,张风宝,杨明义. 荒草地小区土壤侵蚀的 ^7Be 示踪研究[J]. 核农学报,2013,27(1):93–98.
- [18]于寒青,李 勇,Nguyen M L,等. 基于FRN技术的我国不同地区典型土壤保持措施的有效性评价[J]. 核农学报,2012,26(2):340–347.
- [19]国家统计局. 中国统计年鉴2020[M]. 北京:中国统计出版社,2021:397–400.
- [20]刘警鉴,卢 远,刘斌涛,等. 广西壮族自治区土地利用与土壤侵蚀的关系[J]. 水土保持通报,2018,38(1):41–46.
- [21]周慧文,闫海锋,丘立杭,等. 甘蔗间套种西瓜栽培模式分析[J]. 农业研究与应用,2021,34(1):71–75.
- [22]李志贤,冯远娇,杨文亨,等. 甘蔗间作种植研究进展[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):884–888.
- [23]刘晓燕,梁 强,庞 天,等. 甘蔗套种马铃薯机械化栽培对土壤微生物多样性及甘蔗养分吸收的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(2):297–306.
- [24]唐 诚. 广西集约化蔗区沟渠侵蚀及其污染物输移与控制措施[D]. 南宁:广西大学,2021:11.
- [25]杨本俊,杨 浩,陈劲松,等. 宁镇地区 ^7Be 在黄棕壤坡地中的季节性分布研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):24–28.
- [26]马传功,陈建军,郭先华,等. 坡耕地不同种植模式对农田水土保持效应及土壤养分流失的影响[J]. 农业资源与环境学报,2016,33(1):72–79.
- [27]朱 青,陈正刚,李 剑,等. 贵州坡耕地三种种植模式的水土保持效果对比研究[J]. 水土保持研究,2012,19(4):21–25.
- [28]熊燕梅,夏汉平,李志安,等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(4):895–904.
- [29]张晓云,郎凤莲,李永贤,等. 坡地玉米马铃薯间作群体地上部垂直层化对水土流失的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2017,32(5):903–911.
- [30]Berhe A A, Barnes R T, Six J, et al. Role of soil erosion in biogeochemical cycling of essential elements: carbon, nitrogen, and phosphorus[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2018,46(1):521–548.
- [31]张风宝,杨明义,王光谦. 坡耕地小区坡面不同坡段侵蚀泥沙贡献率的 ^7Be 示踪研究[J]. 泥沙研究,2011(1):38–44.
- [32]卜崇峰,蔡强国,袁再健. 湿润区坡地香根草植物篱农作措施对土壤侵蚀和养分的影响[J]. 农业工程学报,2006,22(5):55–60.
- [33]姚 娜,程艳辉,蔡崇法. 紫色土氮养分富集实验研究[J]. 亚热带水土保持,2013,25(1):14–18.