

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.020.

韦美敬, 黄艳荟, 杨浩宇, 等. 不同坡度下蔗地土壤侵蚀及氮素流失对雨型和甘蔗生育期的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 35-44.

Wei Meijing, Huang Yanhui, Yang Haoyu, et al. Response of Soil Erosion and Nitrogen Loss to Rainfall Pattern and Sugarcane Growth Period at Different Slopes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 35-44.

不同坡度下蔗地土壤侵蚀及氮素流失对 雨型和甘蔗生育期的响应

韦美敬, 黄艳荟, 杨浩宇, 赵子贵, 王业阳, 李桂芳

(广西大学 农学院, 广西农业环境与农产品安全重点实验室, 南宁 530004)

摘 要: [目的]探究自然降雨下坡度、雨型及甘蔗生育期对坡面土壤侵蚀与养分流失特征的影响,为甘蔗种植区土壤侵蚀的机理完善与防治提供理论依据。[方法]采用径流小区野外原位观测法,分析了不同雨型和甘蔗生育期下不同坡度(5°, 10°)蔗地坡面土壤侵蚀及氮素养分(硝态氮和铵态氮)流失特征。[结果](1) 各生育期下坡面径流量大小表现为伸长期>分蘖期>幼苗期>成熟期,氮素养分流失量则表现为分蘖期显著高于其他 3 个时期(2.6~905.2 倍);侵蚀量及其氮素养分流失量大小表现为分蘖期>伸长期>苗期>成熟期,其中,甘蔗分蘖期坡面侵蚀量显著高于其他时期(2.9~71.4 倍),在 10°坡面下差异更明显;(2) B 雨型(中雨量,短历时,大雨强)和 C 雨型(大雨量,短历时,超大雨强)是引起研究区蔗地土壤侵蚀及氮素养分流失的主要雨型,贡献 70% 以上的坡面产流产沙及氮素养分流失量。不同坡度处理中, C 雨型下的侵蚀泥沙量、A 雨型下的泥沙铵态氮流失量与 B 雨型下的径流铵态氮流失量存在显著性差异。(3) 雨型与甘蔗生育期极显著影响蔗地坡面产流产沙及氮素养分流失($p < 0.01$),且影响程度高于坡度、坡度与雨型的交互作用以及坡度与生育期的交互作用。相比径流及其氮素养分流失量,坡度及其与雨型、生育期的交互作用对侵蚀泥沙及其氮素养分流失量变化的影响更突出。[结论]坡度对蔗地坡面产流产沙及其氮素养分流失过程的影响更显著;蔗地坡面土壤侵蚀及氮素养分流失在分蘖期流失量最大,主要由 B 雨型和 C 雨型贡献。

关键词: 甘蔗; 雨型; 坡度; 生育期; 土壤侵蚀; 氮流失

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0035-10

Response of Soil Erosion and Nitrogen Loss to Rainfall Pattern and Sugarcane Growth Period at Different Slopes

Wei Meijing, Huang Yanhui, Yang Haoyu, Zhao Zigui, Wang Yeyang, Li Guifang

(Guangxi Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product

Safety, Agricultural College, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the influence of slope, rainfall pattern and sugarcane growth period on soil erosion and nutrient loss on slope surface, and to provide theoretical basis for the mechanism improvement and prevention of soil erosion in sugarcane planting area of lateritic soil. [Methods] In-situ observation method in runoff area was used to explore the characteristics of soil erosion and loss of nitrogen nutrients (nitrate nitrogen and ammonium nitrogen) at different slopes (5° and 10°) under different rain types and sugarcane growth period. [Results] (1) The runoff in each growth period decreased in the order: extension period>tillering period>seedling period>mature period, and the nitrogen loss in tillering period was significantly higher than that in the other three periods (2.6~905.2 times). The sediment yield and their nitrogen nutrient loss followed the order: tillering stage>extension period>seedling

收稿日期: 2023-09-25

修回日期: 2023-11-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(41967010); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA138024)

第一作者: 韦美敬(1999—), 女(壮族), 广西来宾人, 硕士研究生, 研究方向为坡面土壤侵蚀及养分流失。E-mail: 1361466400@qq.com

通信作者: 李桂芳(1987—) 女, 河南商丘人, 博士, 讲师, 研究方向为农田水土流失及其对生态环境的影响。E-mail: lifangdyx@163.com

<http://stbcy.paperonice.org>

period>maternity period, the sediment yield of sugarcane in the tillering stage was significantly higher than that in other periods (2.9~71.4 times), and the difference was more obvious under the 10° slope. (2) Type B (medium rainfall depth, short duration, strong rainfall intensity) and type C (great rainfall depth, short duration, extremely strong rainfall intensity) were the main rainfall pattern that caused soil erosion and the nitrogen nutrient loss in sugarcane in the research area, contributing more than 70% of the slope runoff, sediment yield and nitrogen loss. In different slope treatments, there were significant differences in the sediment amount under type C, sediment ammonium nitrogen loss under type A and runoff ammonium loss under type B. (3) Rain pattern and sugarcane growth period had significant effects on runoff, sediment and those nitrogen loss on sugarcane slope ($p<0.01$), and the effect was higher than that of slope, interaction between slope and rain pattern, interaction between slope and growth period. Compared with runoff and those nitrogen loss, slope and its interaction with rain pattern and growth period showed more prominent effects on erosion sediment and nitrogen loss. [Conclusion] The slope had a more significant influence on the sediment and nitrogen nutrient loss process of sugarcane slope. The soil erosion and nitrogen nutrient loss were greatest in the tillering period, mainly contributed by type B and type C.

Keywords: sugarcane; rain pattern; slope; growth period; soil erosion; nitrogen loss

土壤侵蚀会导致土壤肥力与生产力下降、耕地面积减少与河流污染等危害,严重制约着农林业的可持续发展,现已成为全球性生态问题^[1]。其中,降雨通过雨滴击溅和径流冲刷剥离和运移土壤颗粒,同时造成养分流失^[2],是导致土壤侵蚀最关键的天然因素^[3]。在坡面尺度上,降雨对土壤侵蚀的影响主要是通过降雨量、降雨强度、降雨历时等特征值反映^[4],但降雨在分布上存在特征差异,对土壤侵蚀影响程度不同。目前已有许多学者通过试验观测,根据降雨特征值的不同将降雨划分为不同的雨型,以此探究不同降雨特征综合影响下的土壤侵蚀规律。秦伟等^[5]研究指出,我国南方红壤地区土壤侵蚀主要由大雨强、短历时雨型造成。马星等^[6]指出产流产沙量与雨强密切相关,短历时、大雨强降雨型对紫色土坡面的产流产沙贡献最大且显著($p<0.05$)高于长历时、小雨强降雨型。黄凯等^[7]发现在西南喀斯特区,短历时、大雨强、小雨量雨型下的坡面产流量最大,而长历时、中雨强、大雨量下的产沙量最大。邬铃莉等^[8]研究指出,长历时、大雨量、中雨强降雨对草地坡面的侵蚀贡献率最高。曹美晨等^[9]研究结果显示,小雨量、短历时、大雨强降雨型是导致黄棉土芥末种植坡面土壤侵蚀的主要雨型。可见,不同地理区域由于降雨条件、土壤质地、植被等因素不同,其坡面土壤侵蚀对各雨型的响应也不尽相同,且目前较多关于不同雨型的研究集中在坡面产流产沙过程的变化特征上,结合养分流失的报道较为少见。

坡面种植作物可有效降低土壤侵蚀及养分流失^[10]。不同作物生育期因根系与植株生长状况以及植被覆盖度不同而影响坡面土壤侵蚀及养分流失。随着生育期的推进,根系发育伸长与土壤颗粒缠绕,

能够改善土壤结构,增强土壤抗侵蚀能力^[11],茎秆增高使经过作物冠层的穿透雨到达地面时动能发生改变,从而改变雨滴对土壤表面的击打能力^[12]。而作物冠层覆盖则形成了降雨的天然屏障,能够消减雨滴动能。研究指出,植被覆盖度与土壤侵蚀量呈显著负相关性,植被覆盖度越大,坡面减流减沙的效果越明显^[13]。因此,作物不同生育期下的坡面土壤侵蚀特征存在明显不同。甘蔗是我国最重要的糖料作物与经济作物,种植面积达 135.34 万 hm^2 ,主要种植在高温多雨的南方旱作坡耕地上,且甘蔗生长周期长,其快速生长期与雨季同步,极易引起土壤侵蚀与养分流失,危害生态环境^[14-15]。刘小梅等^[16]研究结果显示甘蔗不同生育期的坡面侵蚀速率表现为分蘖期>伸长期>苗期>成熟期,分蘖期土壤侵蚀总量占全生育期的 95.7%~97.4%,但不同坡度下,生育期对植蔗坡地土壤侵蚀及养分流失的影响特征尚不明晰。

基于此,本研究以不同坡度(5°,10°)下的植蔗坡地为研究对象,采用径流小区原位观测法,分析自然降雨条件下,不同雨型和不同甘蔗生育期下蔗地坡面土壤侵蚀及氮素(铵态氮和硝态氮)养分流失特征。研究结果可为甘蔗种植区土壤侵蚀的机理完善与防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于广西南宁市广西大学校内试验基地(108°17'38"E,22°50'59"N),属亚热带季风气候区,年平均降雨量 1 110.7 mm,年均气温 22.1 °C,年均相对湿度为 79%。供试土壤类型为赤红壤,土壤母质为

第四纪红黏土,土壤质地为黏性中壤土,pH 为 7.0,土壤容重为 $1.3\sim 1.4\text{ g/m}^3$,全氮含量为 1.7 g/kg ,硝态氮含量为 9.7 mg/kg ,铵态氮含量为 34.1 mg/kg ,全磷含量为 0.6 g/kg ,有机质含量为 7.1 g/kg 。

图 1 表示本研究区 2021 年 4—10 月的降雨量分布

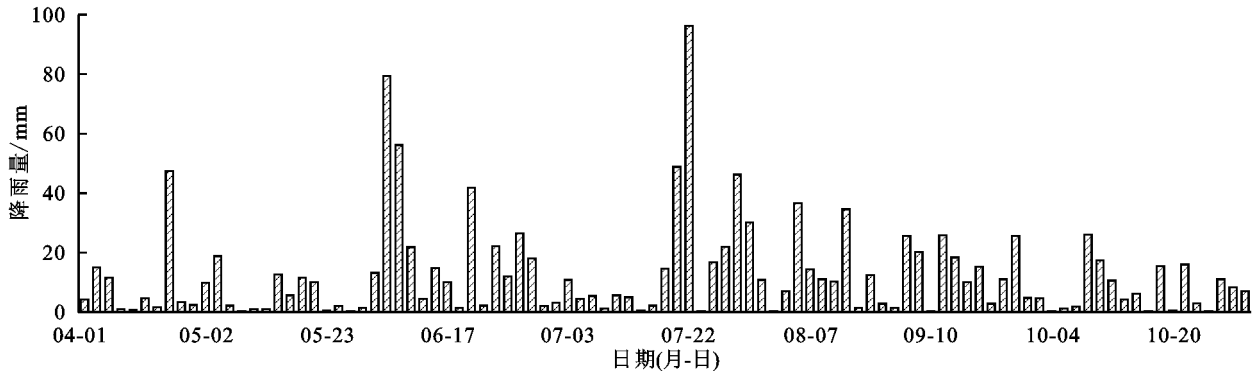


图 1 研究区 2021 年 4—10 月降雨量分布

Fig. 1 Distribution of rainfall from April to October 2021 in the study area

1.2 试验设计

本试验采用径流小区野外原位观测法,小区水平投影长 5 m,宽 2 m,坡度为 5° 与 10° ,均设 1 个重复。径流小区底部设出水口,出水口下方安置集流槽以承接侵蚀次降雨下坡面径流泥沙样品。试验观测时间为 2021 年 3 月至 2021 年 12 月,供试甘蔗品种为“桂糖 42 号”,采用双芽段单行双株种植,顺坡种植 2 列,间距为 1 m,于 2021 年 3 月 13 日下种。所有蔗地小区施肥量均为氮肥(N) 360 kg/hm^2 ,磷肥(P_2O_5) 90 kg/hm^2 ,钾肥(K_2O) 75 kg/hm^2 。基肥在下种时施用,追肥于甘蔗分蘖前期施用(2012 年 6 月 13 日),其中磷肥全部用作基肥,氮肥和钾肥按照 30% 基肥和 70% 追肥的方案在不同时期施入。甘蔗下种后,人为将小区整理为平整的坡面,除采取土样外及培土外,不再扰动坡面,其余田间管理按照当地农作习惯进行。此外,本文根据甘蔗的生长情况将生育期进行划分为 4 个时期:3 月中旬到 5 月中旬为甘蔗苗期,5 月下旬到 7 月上旬为分蘖期,7 月中旬到 9 月中旬为伸长期,9 月下旬至次年 1 月为成熟期。

1.3 样品采集与分析

观测期内自然降雨数据资料由试验小区附近气象站的翻斗式自记雨量器采集,获得降雨特征参数包括降雨日期、降雨量、降雨历时、平均降雨强度,最大 15 min 降雨强度(I_{15})、最大 30 min 降雨强度(I_{30})、最大 60 min 降雨强度(I_{60})等。

每场侵蚀性降雨结束后,用标尺测量集流槽内径流高度,获得小区径流量体积;将集流槽中的径流与泥沙充分混匀后,用 500 ml 塑料瓶取浑水样,每个小区取 3 瓶。静置,待样品完全沉淀后滤出上清

情况。降雨量介于 $0.4\sim 96.2\text{ mm}$,总雨量共计 $1\,246.2\text{ mm}$,其中,降雨主要集中在 6 月、7 月份,累计降雨量分别达 325.8 mm 与 324.4 mm ,日降雨量峰值出现在 7 月 22 日。观测期内共发生 46 场侵蚀性降雨,侵蚀性降雨量累计 $1\,057.4\text{ mm}$,占总雨量的 84.8%。

液存于 4°C 冰箱,塑料瓶中的泥沙转移后低温烘干($<45^\circ\text{C}$)并称量,由此计算次降雨下径流的含沙浓度,坡面侵蚀泥沙量由含沙浓度与集流槽内径流体积相乘获得。其他养分指标包括坡面径流中的硝态氮和铵态氮浓度:水样过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜后,利用连续流动分析仪测定(型号:AA3,产地:德国);侵蚀泥沙中的硝态氮和铵态氮浓度:取过 100 目的侵蚀泥沙样品 0.5 g ,经 2 mol/L 氯化钾溶液提取并过滤后,利用连续流动分析仪测定。

1.4 数据分析方法

利用 SPSS 26.0 进行数据相关性及双因素方差分析,利用 Origin 2018 和 Microsoft Office 2016 进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 蔗地径流、侵蚀泥沙及氮素养分流失特征

观测期间 46 场侵蚀性次降雨在甘蔗不同生育期内分布差异较大,表现为甘蔗幼苗期 5 场,分蘖期 16 场,伸长期 21 场及成熟期 4 场,各生育期累计侵蚀降雨量分别为 $96.0, 332.8, 528.0, 100.6\text{ mm}$,各占总侵蚀雨量的 9.1%,31.5%,49.9%和 9.5%,表明侵蚀性次降雨主要集中在甘蔗分蘖期与甘蔗伸长期。

不同生育期下的坡面径流、侵蚀泥沙及其硝态氮和铵态氮流失量差异较明显(表 1)。就地表径流与径流中的氮素养分流失而言,当坡度为 5° 时,幼苗期、分蘖期、伸长期与成熟期蔗地坡面径流量分别占流失总量的 9.3%,42.3%,43.0%和 5.4%;坡面径流硝态氮与铵态氮流失均主要集中在分蘖期(占比 72.0%和 85.8%),其次是伸长期(占比 23.4%和 10.9%)与

幼苗期(占比 4.1%和 3.2%),成熟期流失量最少(占比<1.0%)。当坡度为 10°时,不同生育期下坡面径流量依次占总流失量的 9.6%,42.6%,43.1%和 4.7%,坡面径流硝态氮与铵态氮流失量均集中在分蘖期,分别占总流失量的 67.6%和 82.5%,伸长期、幼苗期、成熟期的占比分别是 26.2%和 14.9%,5.8%和 2.5%,0.5%和 0.1%。不同坡度下,除坡面径流量在成熟期表现为 10°较 5°坡面降低 8.2%外,其他生育期下的蔗地坡面径流量及硝态氮流失量均表现为 10°>5°,但差异不明显;而 5°坡面下的铵态氮流失量则整体高于 10°,前者是后者的 1.3 倍,该差异主要体现在分蘖期间。以上表明,坡面径流受侵蚀性降雨分布的影响,在分蘖期与伸长期流失量较大,而径流中氮素流失则主要集中在分蘖期。此外,径流中氮素养分流失主要以硝态氮为主,5°与 10°坡面下硝态氮流失总量分别占氮素流失总量的 63.5%和 71.2%。

就坡面侵蚀泥沙及其氮素养分流失而言,当坡度为 5°时,苗期、分蘖期、伸长期与成熟期蔗地坡面侵蚀量分

别占侵蚀总量的 17.8%,60.5%,20.8%和 0.8%;各生育期下,分蘖期的硝态氮与铵态氮流失量最多,占总流失量的 56.2%与 40.4%,其次是伸长期(占比 32.8%和 39.7%)和幼苗期(占比 10.6%和 19.4%),成熟期最少,占比不足 1%。10°蔗地坡面侵蚀泥沙及其硝态氮、铵态氮在各生育期下的流失情况与 5°坡面相似,均主要发生在分蘖期(占比 71.9%,61.1%和 47.1%)与伸长期(占比 16.9%,31.3%和 35.1%)。这表明,坡面侵蚀泥沙及其氮素养分流失主要集中在分蘖期,但与径流不同的是,侵蚀泥沙中氮素养分流失主要以铵态氮为主,5°与 10°坡面下铵态氮流失总量分别占氮素流失总量的 82.9%和 81.2%。不同坡度下,10°坡面侵蚀泥沙及其硝态氮、铵态氮流失总量是 5°坡面的 1.7 倍、1.2 倍和 1.1 倍,但三者均在苗期表现出 10°<5°,分别较 5°坡面降低 5.2%,17.1%和 3.5%。侵蚀泥沙中铵态氮和硝态氮流失量在不同坡度下均不存在显著性差异,但侵蚀泥沙量差异显著,尤其在分蘖期和成熟期差异较为明显。

表 1 甘蔗各生育期下坡面径流、侵蚀泥沙及氮素流失量

Table 1 Slope runoff, sediment and nitrogen loss of sugarcane at each growth period

流失方式	指标	坡度/(°)	幼苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	总流失量
径流	径流量/(m ³ ·hm ⁻²)	5	412.0±2.4a	1877.8±134.6a	1908.4±255.4a	240.2±16.0a	4438.4±403.6a
		10	451.4±121.1a	1996.1±75.5a	2022.6±68.2a	220.5±10.2a	4690.6±118.2a
	硝态氮/(g·hm ⁻²)	5	791.6±9.8a	13879.8±1471.3a	4518.6±851.9a	100.2±17.6a	19290.2±2331.0a
		10	1183.5±568.4a	13890.5±487.6a	5375.7±119.4a	100.2±4.9a	20549.9±1170.4a
	铵态氮/(g·hm ⁻²)	5	358.6±86.1a	9504.5±755.3a	1209.1±106.6a	10.5±4.8a	11082.7±780.6a
		10	209.7±54.0a	6875.4±418.9a	1241.0±44.1a	7.6±0.2a	8333.7±428.7a
侵蚀泥沙	泥沙量/(kg·hm ⁻²)	5	6429.9±202.5a	21856.8±2883.4a	7514.7±2056.4a	306.3±83.3a	36107.7±4654.0a
		10	6093.4±404.6a	43043.9±1176.7b	10143.0±709.5a	623.2±12.9b	59903.5±884.6b
	硝态氮/(g·hm ⁻²)	5	15.2±0.5a	80.6±28.3a	47.1±6.3a	0.4±0.1a	143.3±35.0a
		10	12.6±2.2a	108.2±8.2a	55.5±13.5a	0.9±0.04a	177.2±7.6a
	铵态氮/(g·hm ⁻²)	5	134.6±39.2a	280.7±79.9a	275.5±17.4a	3.5±1.5a	694.3±21.8a
		10	129.9±14.4a	359.7±2.3a	267.8±31.1a	5.6±1.7a	763.0±20.7a

注:数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示处理在 5%水平上差异显著。

2.2 次降雨下坡度对蔗地坡面径流、侵蚀泥沙及氮素流失量的影响

图 2—3 表示不同坡度下,甘蔗各生育期坡面径流、侵蚀泥沙及其硝态氮、铵态氮流失量变化特征。坡面径流泥沙量变化受降雨影响较大,侵蚀泥沙量随降雨量波动变化明显,但随着生育期的推进,径流泥沙量及其氮素流失量对降雨的响应程度逐渐减弱。

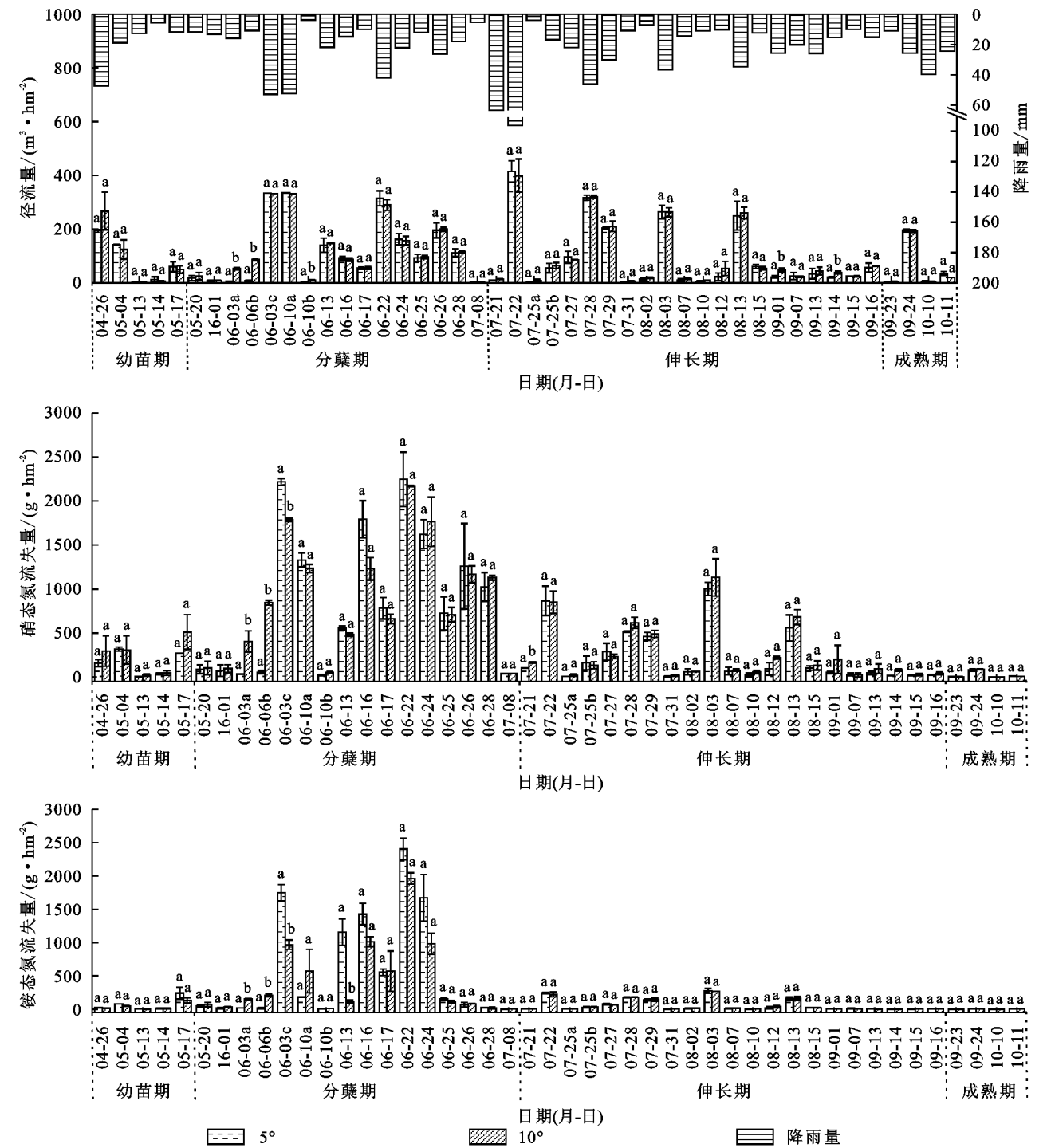
对坡面径流及其氮素流失而言(图 2),5°蔗地坡面径流量介于 2.0~414.4 m³/hm²,10°蔗地坡面径流量在 2.3~399.0 m³/hm²的范围内波动。除个别场次外,单场侵蚀次降雨下径流量整体<300.0 m³/hm²。5°和 10°蔗地径流硝态氮(1.5~2 246.8 g/hm²,1.4~2 171.6 g/hm²)及铵态氮流失量(0.6~2 404.2 g/hm²,0.1~1 962.8

g/hm²) 在分蘖期的波动幅度相对剧烈,硝态氮流失量>1 000.0 m³/hm²与铵态氮流失量>300.0 g/hm²的降雨场次均出现在分蘖期的 6 月份。整体上,不同坡度处理间的坡面径流及其氮素养分流失量差异不大,但 60%以上的降雨场次显示 10°坡面的径流量与硝态氮流失量较 5°坡面有所增加,增幅为 1.2%~1 102.0%与 4.3%~1 430.6%。5°蔗地坡面的径流铵态氮流失量整体高于 10°,尤其在 06-03,06-13,06-24 等几场次降雨中差异较明显。

对坡面侵蚀泥沙及其氮素流失而言(图 3),5°蔗地坡面侵蚀泥沙量介于 0.5~5407.6 kg/hm²,10°蔗地坡面侵蚀泥沙量在 0.2~10 689.1 kg/hm²内波动变化,且 10°蔗地坡面中 06-03 及 06-10 降雨下的侵蚀量

达 10 000.0 kg/hm² 以上,合计约占分蘖期总侵蚀泥沙量的 50%,其余整体上侵蚀泥沙量在 4 000.0 kg/hm² 以下。5°蔗地坡面泥沙硝态氮和铵态氮流失量分别介于 0.002~32.4 g/hm²,0.04~115.0 g/hm²,10°坡面则在 0.001~25.6 g/hm²,0.01~115.2 g/hm² 的范围内波动。与硝态氮相比,铵态氮流失量在分蘖期与伸长期的波动较为剧烈。除部分降雨场次外,不同坡度下坡面侵蚀泥沙及其氮素流失量差异不显著但整体表现为

10°>5°。甘蔗全生育期中,84.8%的降雨场次显示 10°坡面侵蚀量大于 5°坡面,增幅为 2.2%~1 319.0%;70%左右的降雨场次显示 10°坡面的侵蚀泥沙中硝态氮和铵态氮流失量较 5°坡面高,增幅介于 1.8%~928.6%和 0.1%~1 323.1%。但与径流中的氮素流失量特征不同的是,侵蚀泥沙中的铵态氮流失量大于硝态氮流失量,5°和 10°蔗地坡面下,同一场次降雨下铵态氮流失量分别是硝态氮流失量的 1.5~123.3 倍和 0.9~38.7 倍。



注:图中不同小写字母表示同一日期中不同场次降雨,下同。

图 2 不同坡度处理下径流及其氮素流失量变化特征
Fig. 2 Changes of runoff and nitrogen loss under different slope treatments

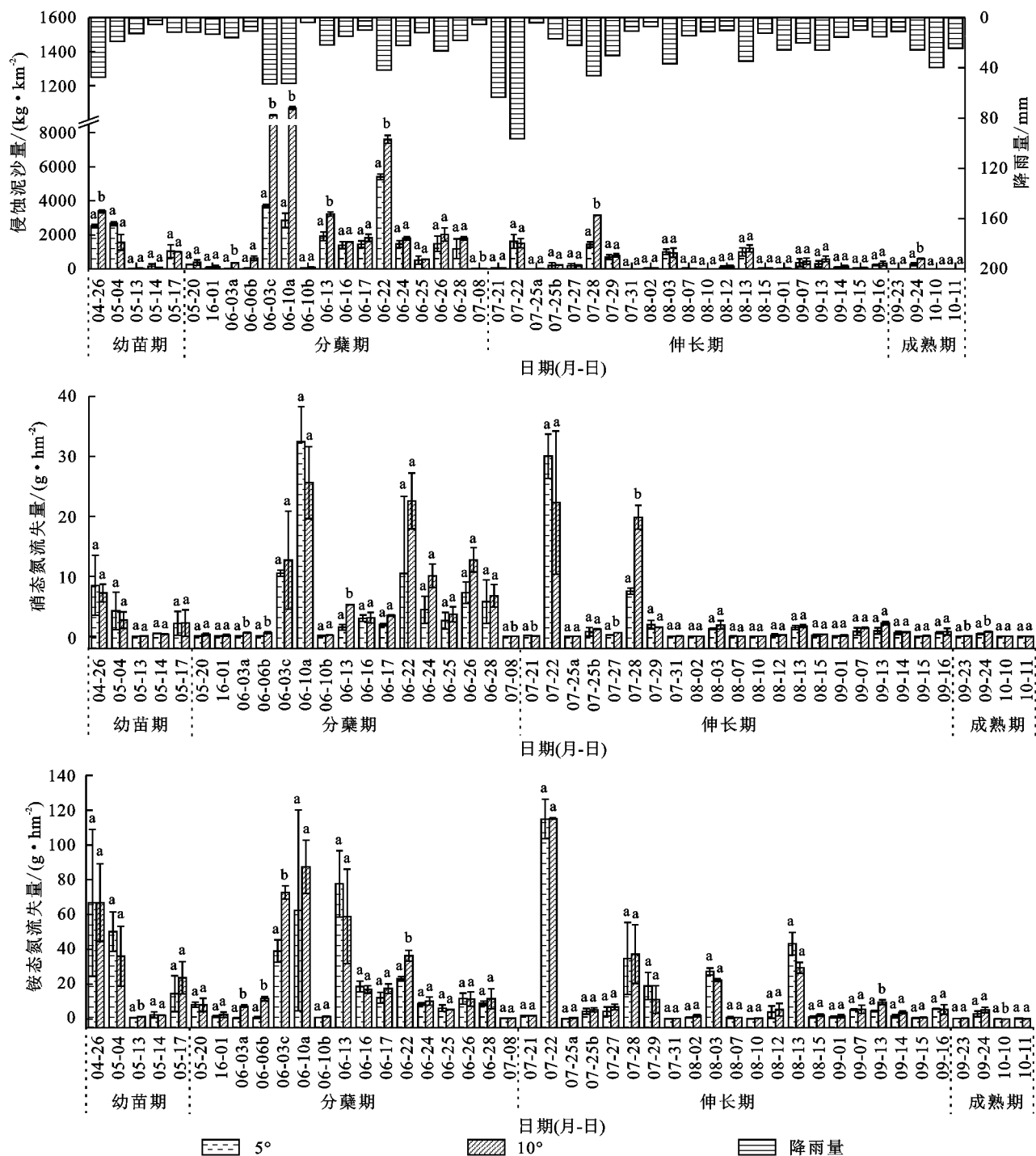


图3 不同坡面处理下侵蚀泥沙及其氮素流失变化特征

Fig. 3 Changes of sediment and nitrogen loss under different slope treatments

2.3 蔗地坡面径流、侵蚀泥沙及氮素流失量对雨型的响应

2.3.1 雨型特征 为进一步探究本研究区降雨对不同坡度下蔗地土壤径流、侵蚀泥沙及氮素养分流失的影响,现通过K-均值聚类分析法^[17],根据降雨量、降雨历时、 I_{30} ^[5]这3个特征指标,将观测期侵蚀性降雨划分为4种不同雨型(表2):A雨型(小雨量,中历时,小雨强)、B雨型(中雨量,短历时,大雨强)、C雨型(大雨量,短历时,超大雨强)、D雨型(超大雨量、长

历时、中雨强)。其中,A,B,C,D雨型场次分别占总降雨场次的50.0%,30.4%,15.2%,4.3%,累积降雨量分别达285.0,318.2,294.6,159.6 mm,各占侵蚀性降雨总量的27.0%,30.1%,27.9%,15.1%,表明本研究区A雨型发生的频次最高,但B雨型贡献的侵蚀降雨量最多。

2.3.2 雨型对蔗地坡面径流、侵蚀泥沙及其氮素流失特征的影响 图4为不同雨型下蔗地坡面径流及其铵态氮、硝态氮流失量特征,结果表明各雨型下,同

一坡度处理中坡面径流量与氮素流失量差异明显,均表现为 C 雨型贡献量最大,其次是 B 与 A 雨型,D 雨型最少。5°坡面处理中,C,B,A,D 雨型下的径流量占 5°坡地总径流量的 45.5%,33.3%,11.7%,9.6%;硝态氮和铵态氮流失量对总流失量的贡献率分别是 43.2%,38.0%,13.8%,5.0%和 45.9%,41.3%,10.6%,2.2%;10°坡面中的 C,B,A,D 雨型下径流量各占总

径流量的 42.8%,33.4%,14.9%,8.8%,硝态氮和铵态氮流失量则各占总流失量的 39.5%,34.8%,20.8%,5.0%和 51.2%,28.7%,17.3%,2.8%。同一雨型下,不同坡面处理中的径流量及其硝态氮流失量差异不大,铵态氮流失量在 B,C 雨型下差异相对明显,尤其是 B 雨型下 10°坡面铵态氮流失量仅为 5°坡面的 52.3%,差异达显著水平。

表 2 不同雨型降雨特征参数
Table 2 Rainfall characteristics of different rainfall patterns

雨型	降雨量/mm	降雨历时/h	平均雨强/(mm·h ⁻¹)	I ₃₀ /(mm·h ⁻¹)	降雨场次
A	3.8~39.6	0.3~35.3	0.4~46.4	3.2~23.2	23
B	18.0~47.7	0.5~10.5	2.1~35.2	22.8~40.0	14
C	30.2~52.8	0.8~17.2	3.1~32.1	57.2~88.4	7
D	63.4~96.2	15.0~22.3	4.2~4.3	15.0~22.3	2

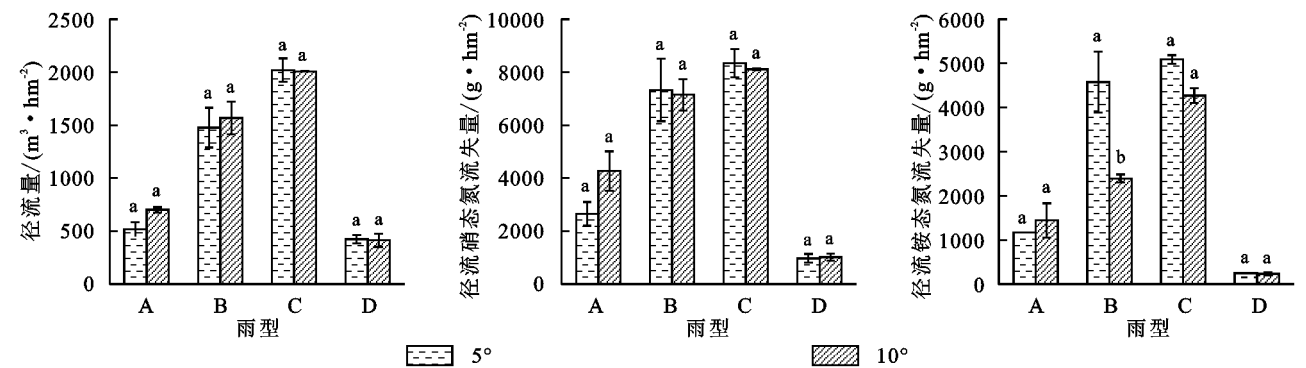


图 4 不同雨型下蔗地坡面径流及其氮素流失特征

Fig. 4 Slope runoff and nitrogen loss characteristics of sugarcane land under different rainfall patterns

不同坡度下蔗地坡面侵蚀泥沙量及其氮素流失量对各雨型的响应各不相同(图 5)。在 5°和 10°蔗地坡面中,各雨型下的侵蚀泥沙量均表现为 C 雨型>B 雨型>A 雨型>D 雨型。C 雨型(16 098.8 kg/hm², 34 676.4 kg/hm²)下的侵蚀泥沙量分别是 B 雨型(14 069.9 kg/hm², 34 676.4 kg/hm²)、A 雨型(4 255.4 kg/hm², 34 676.4 kg/hm²)、D 雨型(1 683.5 kg/hm², 34 676.4 kg/hm²)的 1.1,3.8,9.6 倍和 2.0,5.8,22.0 倍;泥沙硝态氮流失量均表现为 C 雨型>B 雨型>D 雨型>A 雨型,依次占 5°和 10°蔗地坡面中总侵蚀泥沙硝态氮流失量的 45.7%和 48.5%,26.5%和 30.5%,21.0%和 12.6%,6.8%和 8.8%;不同雨型下,B 雨型(267.3 g/hm², 296.6 g/hm²)对蔗地坡面侵蚀泥沙铵态氮流失量贡献最大,占比 38.5%与 38.9%,其次是 C 雨型(占比 35.8%和 32.4%)和 D 雨型(占比 16.8%和 15.3%),A 雨型(占比 8.8%和 13.4%)最少。对比不同坡度下的侵蚀泥沙及其氮素流失特征,A,B,C 雨型下,10°坡面侵蚀量是 5°坡面的 1.4,1.3,2.2 倍,尤其在 C 雨型下存在显著性差异,泥沙硝态氮流失量是 5°坡面的 1.3~1.5 倍,D 雨型下的侵蚀泥沙量及其硝态氮流失量则较 5°坡面降低 6.4%与 25.8%。泥沙铵态氮流失量在 A,

C 雨型下表现为 10°坡面高于 5°坡面,尤其在 A 雨型下差异达显著水平,前者是后者的 1.7 倍,在 B,D 雨型则表现为 10°<5°,但二者差异较小。

2.4 坡度、雨型及生育期对蔗地土壤侵蚀及其氮素养分流失的影响

通过双因素方差分析进一步探讨坡度、生育期、雨型、坡度与生育期的交互作用及坡度与雨型的交互作用对蔗地坡面径流、侵蚀泥沙及其氮素养分流失特征的影响。由分析结果可知(表 3),蔗地坡度以及坡度与生育期的交互作用仅对径流及侵蚀泥沙中的铵态氮流失量有显著影响,对侵蚀泥沙量有极显著影响;生育期则对坡面径流泥沙及其氮素流失量均有极显著影响。由此可得甘蔗生育期对蔗地坡面土壤侵蚀与氮素养分流失的影响大于坡度及其与生育期的交互作用。

由表 4 可知,坡度以及坡度与雨型的交互作用仅对蔗地坡面径流中铵态氮流失量和侵蚀泥沙量影响极显著,雨型则对坡面径流、侵蚀泥沙及其氮素流失量均有极显著影响。因此,雨型对蔗地坡面土壤侵蚀与氮素养分流失的影响大于坡度及其与雨型的交互作用。

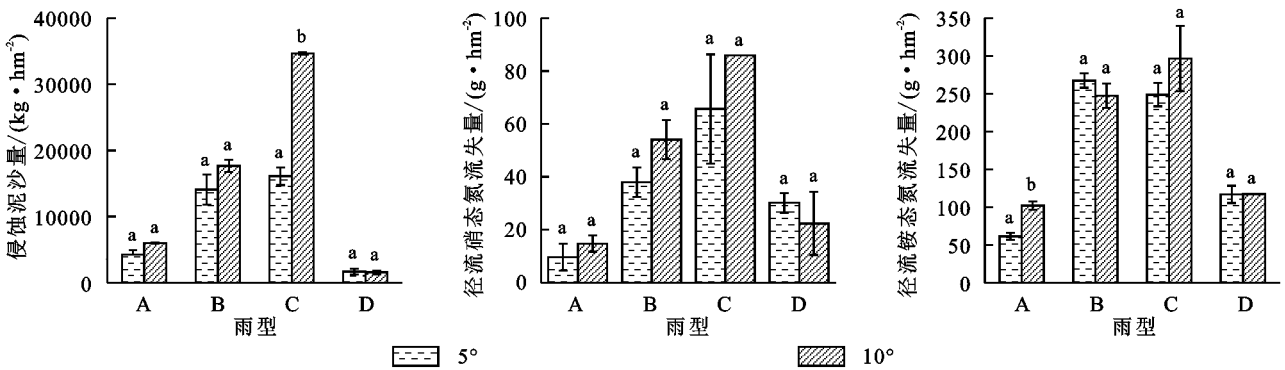


图 5 不同雨型下蔗地坡面侵蚀泥沙及其氮素流失特征

Fig. 5 Slope erosion and nitrogen loss characteristics of sugarcane land under different rainfall patterns

表 3 坡度与生育期对坡面径流、侵蚀泥沙及其氮素养分流失影响的双因素方差分析

Table 3 Effect of slope and growth period on runoff, sediment and nitrogen loss under under two-way ANOVA

因素	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流硝态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流铵态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	侵蚀泥沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	泥沙硝态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	泥沙铵态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)
坡度	0.340	0.230	0.045 *	0.000 **	0.163	0.013 *
生育期	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
坡度×生育期	0.837	0.508	0.031 *	0.000 **	0.394	0.015 *

注: * 显著性差异($p < 0.05$), ** 极显著性差异($p < 0.01$),下同。

表 4 坡度与雨型对蔗地坡面径流、侵蚀及其氮素养分流失影响的双因素方差分析

Table 4 Effect of slope and rainfall pattern on runoff, sediment and nitrogen loss under two-way ANOVA

因素	径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流硝态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	径流铵态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	侵蚀泥沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	泥沙硝态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)	泥沙铵态氮流失量/ ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)
坡度	0.248	0.321	0.001 **	0.000 **	0.109	0.095
雨型	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **	0.000 **
坡度×雨型	0.504	0.171	0.001 **	0.000 **	0.228	0.083

3 讨论

对于坡耕地而言,坡面侵蚀特征是作物生长状况、降雨特征等综合作用的结果^[18]。本研究中,坡度对蔗地坡面产沙过程的影响较产流过程显著。一方面,增加坡度虽能加快径流汇集却也使得坡面的实际承雨面积减小,使产流量未因坡度增加而明显上升^[19];另一方面,增加坡度使径流势能所转化的动能增大,且土壤表面颗粒稳定性变差,泥沙更容易被径流剥离搬运^[20]。

甘蔗生育期对蔗地坡面产流产沙及其氮素养分流失特征的影响大于坡度、坡度与生育期的交互作用。甘蔗生育期主要因其植被覆盖度与根系发育程度不同影响坡面产流产沙及养分流失进程。随着甘蔗生育期的推进,植被覆盖度的增加增强了甘蔗拦截降雨的能力,减弱了雨滴对土壤表面的击溅侵蚀。同时,随着植被冠层发育,地下部根量增多,根系分布面积增大,能够改善土壤结构,增强土壤的入渗能力,减少坡面产流产沙^[21]。胡秋宁等^[3]研究发现,植被覆盖度对土壤侵蚀的影响最为显著,影响作用大于坡度因子,与本研究结果一致。不同生育期甘蔗冠层发育

明显不同^[12],且本研究区降雨特征在不同生育期的分布差异明显,使不同生育期下的土壤侵蚀特征差异更为显著。不同生育期下,蔗地坡面径流量表现为伸长期>分蘖期>幼苗期>成熟期,但分蘖期的氮素养分流失量显著高于其他 3 个时期。这是由于径流量主要受降雨量影响^[18],伸长期较分蘖期降雨场次多且侵蚀降雨量较大,故伸长期坡面径流量较大;而分蘖期前期进行追肥会使表层土壤养分累积,导致分蘖期养分流失量大于其他生育期。不同生育期下的侵蚀量及其氮素流失量均表现为分蘖期>伸长期>幼苗期>成熟期。陈磊等^[22]研究指出,翻动土壤会提高土壤侵蚀速率,增加产沙量。分蘖期受培土影响,土层变薄且表层结构破坏,加之追肥,增大其径流携带泥沙及其养分流失的能力。甘蔗成熟期时降雨频次与降雨量与幼苗期相近,但成熟期坡面径流、侵蚀泥沙及其养分流失量较少。这是因为随着甘蔗生育期的延长,根系不断发育,叶面积指数上升,植被覆盖度提高,坡面产流产沙量减少^[23]。

本研究中雨型对蔗地坡面产流产沙及氮素养分流失特征的影响大于坡度、坡度与雨型的交互作用。雨型是影响坡面水土流失的重要因素,不同雨型下坡

面产流产沙及养分流失量存在明显差异^[24],其中,B雨型(中雨量,短历时,大雨强)和C雨型(大雨量,短历时,超大雨强)对本研究区土壤侵蚀的贡献率达70%以上,显著高于A雨型(小雨量,中历时,小雨强)和D雨型(超大雨量、长历时、中雨强)。前人研究指出,降雨量是控制产流变化的主导因子,而侵蚀量变化主要由 I_{30} 决定^[25]。D雨型雨量虽为最大,但由于降雨场次少,均出现在伸长期,且伸长期首场侵蚀性降雨与前一场间隔时间较长且蔗地植被覆盖度较高,该雨型下的累积径流侵蚀量及氮素养分流失量最小。B、C雨型下的雨强更大,对坡面土壤的打击力和冲刷能力更强,更容易导致蔗地坡面产流产沙及养分流失^[26]。另外,在本研究中,5°与10°坡面产流产沙与氮素养分流失量在分蘖期差异最明显。B雨型和C雨型集中在分蘖期和伸长期,但分蘖期的降雨场次更多,降雨量更大,坡度的影响作用较明显;而伸长期植被覆盖度明显增大,缩减了不同坡度下土壤侵蚀与养分流失差异。就单场次降雨而言,短历时、大雨强雨型侵蚀能力高,而雨量主要由雨强和历时决定,故本研究区应重点防范大雨强、短历时雨型^[8]。

4 结论

(1) 不同生育期下,径流量大小表现为伸长期>分蘖期>幼苗期>成熟期,坡面径流氮素养分流失量则表现为分蘖期显著高于其他3个时期。侵蚀泥沙量及其氮素养分流失量大小表现为分蘖期>伸长期>苗期>成熟期,其中,分蘖期侵蚀泥沙量显著高于其他时期。

(2) 不同雨型下坡面产流产沙及养分流失量存在明显差异,B雨型(中雨量,短历时,大雨强)和C雨型(大雨量,短历时,超大雨强)是引起研究区蔗地土壤侵蚀及氮素养分流失的主要雨型,贡献了70%以上的坡面产流产沙及氮素养分流失量。

(3) 雨型与甘蔗生育期极显著影响蔗地坡面产流产沙及氮素养分流失($p<0.01$),且影响程度高于坡度、坡度与雨型的交互作用以及坡度与生育期的交互作用。坡度及其与生育期、雨型的交互作用对侵蚀泥沙及其氮素养分流失量变化的影响更突出。

参考文献(References):

- [1] Wei B, Li Z W, Duan L X, et al. Vegetation types and rainfall regimes impact on surface runoff and soil erosion over 10 years in Karst hillslopes[J]. *Catena*, 2023,232: 107443.
- [2] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. *Catena*, 2019,173:494-504.
- [3] 胡秋宁,肖作林,刘睿.基于三峡库区重庆段不同降雨分区的土壤侵蚀多因子综合作用分析[J].*重庆师范大学学报:自然科学版*,2023,40(5):55-63.
Hu Q N, Xiao Z L, Liu R. Integrated effect of multi-factors on soil erosion under different rainfall zones in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2023,40(5):55-63.
- [4] 李瑞,李勇,刘云芳.贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究[J].*水土保持研究*,2012,19(3):7-11.
Li R, Li Y, Liu Y F. Study of rainfall and soil erosion on slope in Karst Region of Guizhou Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012,19(3):7-11.
- [5] 秦伟,左长清,晏清洪,等.红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J].*农业工程学报*,2015,31(2):124-132.
Qin W, Zuo C Q, Yan Q H, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015,31(2):124-132.
- [6] 马星,郑江坤,王文武,等.不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J].*水土保持学报*,2017,31(2):17-21.
Ma X, Zheng J K, Wang W W, et al. Characteristics of the runoff and sediment yield of sloping farmland in the purple soil area under different rainfall patterns [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(2): 17-21.
- [7] 黄凯,刘瑞禄,覃莉,等.不同降雨条件下坡长对喀斯特坡面土壤侵蚀的影响[J].*应用生态学报*,2021,32(1): 271-280.
Huang K, Liu R L, Qin L, et al. Effects of slope length on soil erosion of Karst slope under different rainfall conditions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021,32(1):271-280.
- [8] 郭铃莉,王云琦,王晨沅,等.降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(24): 157-164.
Wu L L, Wang Y Q, Wang C F, et al. Effect of rainfall patterns on hillslope soil erosion in rocky mountain area of North China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(24):157-164.
- [9] 曹美晨,辛艳,任正龔,等.半干旱黄土丘陵沟壑区不同土地利用坡面的降雨侵蚀特征[J].*泥沙研究*,2022,47(6):43-50.
Cao M C, Xin Y, Ren Z Y, et al. Characteristics of rainfall erosion on different land use slopes in semi-arid loess hilly and gully region [J]. *Journal of Sediment Research*, 2022,47(6):43-50.
- [10] 迟宇博,吴磊,李蕊,等.不同措施黄绵土坡地暴雨侵蚀及磷素流失特点[J].*农业环境科学学报*,2020,39(12): 2833-2843.
Chi Y B, Wu L, Li R, et al. Characteristics of soil erosion

- and phosphorus loss from loessial sloping land under different measures during heavy rainstorms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020,39(12):2833-2843.
- [11] 唐恺.人工模拟降雨条件下紫色土区花生地的土壤侵蚀及抗蚀特征研究[D].四川雅安:四川农业大学, 2022.
- Tang K. Soil erosion and anti-erosion characteristics of peanut land in purple soil area under artificial simulated rainfall conditions[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2022.
- [12] 余长洪,李就好,陈凯,等.甘蔗冠层对降雨再分配的影响[J].*水土保持通报*, 2015,35(3):85-87.
- Yu C H, Li J H, Chen K, et al. Effects of sugarcane canopy on rainfall redistribution[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015,35(3):85-87.
- [13] Chen H, Zhang X P, Abia M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018,170:141-149.
- [14] 国家统计局.中国统计年鉴-2022[EB/OL]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>. National Bureau of Statistics. China statistical yearbook-2022[EB/OL]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2022/indexch.htm>.
- [15] 黄艳芸,宁嘉丽,李桂芳,等.甘蔗种植方式对蔗地土壤侵蚀及氮素流失特征的影响[J].*水土保持通报*, 2022, 42(6):121-128,136.
- Huang Y H, Ning J L, Li G F, et al. Effects of planting methods on soil erosion and nitrogen loss in a sugarcane field[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(6):121-128,136.
- [16] 刘小梅,李勇,黄智刚,等.基于RUSLE的蔗区小流域土壤侵蚀特征研究[J].*水土保持通报*, 2022,42(3):82-88,397.
- Liu X M, Li Y, Huang Z G, et al. Soil erosion characteristics of sugarcane-growing watershed based on RUSLE[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(3):82-88,397.
- [17] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on Karst slopes in southwest China[J]. *Catena*, 2012,90:53-62.
- [18] Yang R X, Zheng J S, Li G F, et al. Effects of rainfall characteristics and sugarcane growth stage on soil and nitrogen losses[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023,30(37):87575-87587.
- [19] 李桂芳,郑粉莉,卢嘉,等.降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J].*农业机械学报*, 2015,46(4):147-154,182.
- Li G F, Zheng F L, Lu J, et al. Effects of rainfall and topography on soil erosion processes of black soil hill-slope[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015,46(4):147-154,182.
- [20] 洪斌,张祖莲,黄英,等.人工降雨条件下云南红土坡面土壤侵蚀特性[J].*水土保持通报*, 2016,36(4):118-123.
- Hong B, Zhang Z L, Huang Y, et al. Erosion characteristics of Yunnan laterite under artificial rainfall conditions[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016,36(4):118-123.
- [21] 肖继兵,孙占祥,刘志,等.降雨侵蚀因子和植被类型及覆盖度对坡耕地土壤侵蚀的影响[J].*农业工程学报*, 2017,33(22):159-166.
- Xiao J B, Sun Z X, Liu Z, et al. Effects of rainfall erosion factor, vegetation type and coverage on soil erosion of sloping farmland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(22):159-166.
- [22] 陈磊,李占斌,李鹏,等.黄土高原人为加速侵蚀下水土与养分流失耦合研究[J].*水土保持学报*, 2011,25(3):7-11.
- Chen L, Li Z B, Li P, et al. Study on the coupling effect of erosion and nutrient lost under manmade accelerated erosion on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011,25(3):7-11.
- [23] Zádorová T, Penížek V, Koubová M, et al. Formation of Colluvisols in different soil regions and slope positions(Czechia): Post-sedimentary pedogenesis in colluvial material[J]. *Catena*, 2023,229:107233.
- [24] 宋江平,李忠武,刘春,等.湘北红壤低山丘陵区典型水土流失治理模式径流泥沙效应[J].*水土保持学报*, 2018,32(1):32-38.
- Song J P, Li Z W, Liu C, et al. Effects of typical soil and water loss control patterns on runoff and sediment of red soil in low hilly areas from the northern Hunan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(1):32-38.
- [25] 张志旭,宋孝玉,李蓝君,等.黄土高原沟壑区典型草地小流域水土特征对不同雨型的响应[J].*干旱区资源与环境*, 2020,34(9):108-115.
- Zhang Z X, Song X Y, Li L J, et al. Response of water and sediment characteristics to different rainfall regime in a typical grassland watershed in the gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020,34(9):108-115.
- [26] 晁增祖,梁耿,刘世生,等.典型泥石流小流域降雨和土地利用对坡面侵蚀的影响[J].*水土保持研究*, 2023,30(3):19-26.
- Chao Z Z, Liang G, Liu S S, et al. Effects of rainfall and land use on slope erosion in typical debris flow small watershed[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(3):19-26.