甘蔗等高种植与新植配置比例对坡面沟蚀引起的氮磷养分流失的影响

杨翠红，李 勇，王 旭，陈婷婷，郭 豪，杨江怡，吴宗猛，周小淇，黄智刚
（广西大学 农学院/广西农业环境与农产品安全重点实验室，广西 南宁 530004）

摘　要：［目的］探讨甘蔗等高种植与新植适宜的配置比例，为甘蔗种植区减少坡面沟蚀和养分流失、提升耕地质量和合理种植甘蔗提供技术支撑。［方法］通过野外测量与试验分析相结合，确定苗期、分蘖期、伸长期和成熟期 4 个甘蔗生长时期内低、中、高 3 种等高种植和新植比例的甘蔗坡面沟蚀量和养分流失量，并明确其影响因素。［结果］①整个甘蔗生育期，那辣流域甘蔗种植坡面沟蚀及其导致的全氮、全磷流失量分别在 31.3～66.3 t/hm^2，39.0～82.5 kg/hm^2，18.0～38.4 kg/hm^2 之间；②苗期是那辣流域沟蚀和养分流失的主要时期，其贡献量占甘蔗全生育期比例为 47.7%～57.7%。③全生育期，高比例等高（Hc）的坡面沟蚀和养分流失比低比例新植坡面（Lc）低 33.03%～35.42%（$p<0.05$），但中比例等高（Mc）和 Hc，Lc 的流失量均不显著；低比例新植（L_{Rp}）坡面沟蚀和养分流失量比高比例新植（H_{Rp}）低 27.41%～32.98%，比中比例新植（M_{Rp}）低 21.02%～25.86%（$p<0.05$），凋落物覆盖度和根系密度是影响沟蚀与养分流失的重要因素。④全生育期，坡面全氮和全磷流失量分别占年氮肥和磷肥施用量的 24.1%～39.5%和 107.0%～156.7%。［结论］甘蔗种植时，60%以上的等高种植比例和 30%以下新植比例，可以有效减少坡面土肥流失。

关键词：等高比例；新植比例；沟蚀；生育期；氮磷流失

文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2023)05-0069-10　　**中图分类号：**S157.1

文献参数：杨翠红，李勇，王旭，等.甘蔗等高种植与新植配置比例对坡面沟蚀引起的氮磷养分流失的影响[J].水土保持通报，2023，43(5)：69-78. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20230327.002；Yang Cuihong，Li Yong，Wang Xu，et al. Configuration ratios for contour planting and replanted sugarcane affect gully erosion-induced nitrogen and phosphorus losses on slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2023，43(5)：69-78.

Configuration Ratios for Contour Planting and Replanted Sugarcane Affect Gully Erosion-Induced Nitrogen and Phosphorus Losses on Slopes

Yang Cuihong，Li Yong，Wang Xu，Chen Tingting，Guo Hao，
Yang Jiangyi，Wu Zongmeng，Zhou Xiaoqi，Huang Zhigang
(*College of Agriculture，Guangxi University/Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety，Nanning，Guangxi* 530004，*China*)

Abstract：[Objective] The objective of this study was to determine the suitable configuration ratios for contour planting and replanted sugarcane on slopes in order to provide technical support for rationally planting sugarcane such that gully erosion is mitigated and erosion-induced nutrient losses are minimized，thereby improving cultivated farmland quality. [Methods] Three configuration ratios (high，medium，and low) for contour planting and replanted sugarcane were evaluated. Slope-gully erosion and nutrient losses were determined by field measurements and laboratory experiments at the growth stages of establishment growth (EG)，vegetative growth (VG)，grand growth (GG)，and ripening growth (RG)，and the factors influencing erosion and nutrient loss were determined. [Results] ① During the total growth (TG) of sugarcane，the

收稿日期：2023-01-19　　**修回日期：**2023-02-12
资助项目：国家自然科学基金项目“湿热区土壤水蚀面源污染对垦殖强度的响应：中缅泰对比研究”(42220104004)
第一作者：杨翠红(1999—)，女(汉族)，广西壮族自治区贵港市人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀及农业面源污染。Email：369309839@qq.com。
通信作者：李勇(1958—)，男(汉族)，北京市人，博士，教授，博士生导师，主要从事农业面源污染溯源与防控研究。Email：liyong@caas.cn。

total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) losses caused by gully erosion on slopes planted to sugarcane in the Nala River Basin were 31.3—66.3 t/hm^2, 39.0—82.5 kg/hm^2, and 18.0—38.4 kg/hm^2, respectively. ② EG was the main stage of gully erosion and nutrient losses in the Nala River Basin, accounting for 47.7—57.7% of the total erosion and nutrient losses. ③ During TG, gully erosion and associated nutrient losses for higher contour ratios (Hc) were 33.03—35.42% lower than for lower contour ratios (Lc) ($p<0.05$), but the losses for medium contour ratios (Mc) were not significant compared with those of Hc and Lc. Gully erosion and nutrient losses of lower replanted ratios (L_{Rp}) were 27.41—32.98% lower than those of higher replanted ratios (HRp), and 21.02—25.86% lower than those of medium replanted ratios (M_{Rp}) ($p<0.05$). Litter cover and root density were the important factors affecting gully erosion and nutrient losses. ④ During TG, TN and TP losses on slopes accounted for 24.1%—39.5% and 107.0%—156.7% of the annual N and P application, respectively. [Conclusion] Planting sugarcane on slopes with a contour planting ratio of greater than 60% and a replanted ratio of less than 30% can effectively reduce soil and nutrient losses on slopes.

Keywords: contour ratio; replanted ratio; gully erosion; growth stage; nitrogen and phosphorus losses

广西是中国最大的甘蔗生产区,种植面积和产量比例均超过 60%[1]。然而,随着食糖需求的增长,该地区甘蔗种植区域正逐渐往地势起伏较大的丘陵坡地和林地上扩展,在降雨径流的作用下,极易造成水土流失[2]。据王正兴等[3]估算,不合理地耕作与种植方式导致广西已成为中国侵蚀面积增加比例最高的省份,土壤侵蚀面积达 3.80×10^4 km^2[4]。降雨径流在引起农田水土流失的同时,驱动大量氮磷迁移入河,不仅会导致农田耕地质量下降和土壤退化等问题;还会加剧水体富营养化,严重威胁饮水安全[5-6]。因此,研究广西甘蔗种植坡面土壤侵蚀及养分流失对提升耕地质量和降低面源污染具有重要意义。有研究表明,包括浅沟、细沟在内的临时性坡面沟蚀是农业耕地中最为严重的侵蚀类型[7-8],其贡献量占总侵蚀量的 50%~90%[9-10]。莫雅棋[11]通过连续 2 a 实地测量发现,甘蔗种植坡面的年沟蚀量在 24.2~65.4 t/hm^2,侵蚀强度在轻度—强烈程度之间;沟蚀导致的氮磷养分流失量分别在 33~80,12.1~27.3 kg/hm^2 之间。虽然临时性切沟只是沟渠发育过程中的一种过渡形态,且在农业耕作活动都容易被填埋,但已形成的浅沟、细沟很难通过填埋措施消除,恢复平整坡面[12]。所以如何减少坡面沟蚀,降低坡面沟蚀的环境负效应已成为广西甘蔗种植区亟待解决的问题。

沟蚀主要受降雨[13]、土壤特征[14]、地形(坡位、坡长、坡度和坡形等)[15-17]、土地管理[18-19]和作物特性等[20-21]因素共同影响。郭太龙等[13]在华南地区红壤坡面的研究结果表明暴雨产流是水蚀的动力机制,降雨与径流交互冲刷会增加坡面侵蚀产流。Thomaz 等[14]研究巴西甘蔗地土壤侵蚀发现土壤容重和透水能力影响沟蚀强度,沙壤土比壤土更容易被径流冲刷。邵帅等[15]在研究黑土区地形因子对土壤侵蚀的过程中发现坡顶的土壤侵蚀小于中坡,凹形坡的土壤侵蚀强度大于直型坡,微凸和微凹地形分别能加剧和抑制土壤侵蚀;Zhang 等[16]发现当坡度较低且坡面较长时,汇水面积较大,降雨时径流也会携带大量土壤顺坡冲刷,造成水土流失;此外,坡度增加会加速沟宽和沟深的发育速度,加快坡面浅沟侵蚀过程[17]。等高种植、免耕留茬等土地管理方式可以通过改变地表微地形、提升地面覆盖度等措施阻碍泥沙搬运,降低 33%~44%的沟蚀量[18-19]。Youlton 等[20]在巴西的研究发现草地变为新植甘蔗再变为宿根甘蔗的过程中,土壤侵蚀量先增大再减小,其大小排序为:新植甘蔗>宿根甘蔗>草地。然而,在气候条件不受控制,地形和土壤特性短时间难以改变的情况下,优化土地管理和调控作物种植已成为减少沟蚀的主要措施。杨任翔等[21]在南亚热带地区的径流小区试验结果表明等高种植全年可以降低 56%的土壤流失量,其水土保持效果比顺坡种植更好。黄艳荟等[22]研究发现,宿根甘蔗地的侵蚀泥沙量比新植甘蔗地低 85.4%,其水土保持效应主要集中在苗期和分蘖期。Li 等[23]通过实地测量细沟侵蚀及养分流失量发现,调控新植和宿根甘蔗在坡面上的空间分布,合理的新植宿根比例可以通过改变地面枯落物覆盖度以及甘蔗根系显著降低坡面沟蚀量和养分流失量。由于甘蔗生产实际过程中,新植与宿根模式交替种植不可避免,坡位、坡度对种植方向的选择以及农户以种植方向区分地块的习惯导致等高与顺坡,新植与宿根甘蔗在坡面交替分布,这意味着坡面必然产生不同的等高和新植比例。然而,目前尚缺乏不同甘蔗等高和新植比例对沟蚀和养分流失的影响,尤其是关于不同生长期坡面沟蚀和养分流失量的研究。

因此,本文以广西客兰水库那辣流域低、中、高 3

种等高比例的新植坡面和低、中、高 3 种新植比例的等高坡面为研究对象，通过野外原位测量、实地调研和试验分析法相结合，确定不同甘蔗生长期（苗期、分蘖期、伸长期和成熟期）下，甘蔗等高和新植种植比例的坡面沟蚀量和养分流失量，探究采取哪种等高比例可以有效降低新植坡面沟蚀和养分流失以及等高种植时的坡面的最佳新植比例范围，明确那辣流域坡面沟蚀及氮磷养分流失的主要时期，确定减少坡面沟蚀和养分流失的最佳比例范围。研究结果可为广西地区合理种植甘蔗，减少沟蚀和养分流失，降低农业生产活动环境负效应提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于广西壮族自治区客兰水库那辣流域（22°20′36″—22°20′50″N，107°39′29″—107°40′17″E）。流域面积 1.2 km²，丘陵地貌，坡度在 0°～35°之间；气候为南亚热带季风气候，多年平均降雨量约为 1100 mm，约 70%降雨集中在 3—9 月；土壤类型为赤红壤，土壤全氮和全磷含量分别在 0.9～1.6 g/kg 和 0.5～0.8 g/kg 之间。那辣流域甘蔗种植面积比例为 82.84%，桉树、道路和河道的土地利用比例分别为 10.99%，5.40%和 0.77%。流域内甘蔗种植年限一般为 3 a，第一年为新植甘蔗，后两年为宿根甘蔗，每年 3—12 月是甘蔗生长季，12 月至次年 3 月是甘蔗榨季[24]。

1.2　试验设计

本研究于 2021 年 3 月在那辣流域选择了 5 个相似全坡面，基于杨任翔等[21]关于甘蔗等高种植对侵蚀产沙的影响和那辣流域农户甘蔗种植情况，在全新植甘蔗坡面设置高比例等高（Hc，60%≤C≤100%）、中比例等高（M_C，30%＜C＜60%）和低比例等高（L_C，0%≤C≤30%）3 个处理；基于王旭[25]在那辣流域研究次降雨事件下，新植甘蔗比例对坡上部侵蚀及其引起的养分流失的研究结果，在 3 个等高坡面上设高比例新植（H_{Rp}，60%≤Rp≤100%）、中比例新植（M_{Rp}，30%＜Rp＜60%）和低比例新植（L_{Rp}，0%≤Rp≤30%）3 个处理，其中 Hc 和 H_{Rp} 处理设置在同一个坡面上。每个坡面划分为 3 个面积相当的 3 个小区作为重复试验，共 15 个试验区，在试验区的边界点插旗标记并记录 GPS 信息。试验坡面特征见表 1。

表 1　试验坡面地形特征

Table 1　Topographic characteristics of study slopes

因 素	坡 面	面积/m²	坡度/(°)	坡长/m	容重/(g·cm⁻³)
等高比例	L_C	3 649±184[b]	8.2±0.2[c]	115±2[c]	1.44±0.03[a]
	M_C	4 438±209[a]	12.0±0.4[a]	170±5[a]	1.42±0.04[a]
	H_C	3 445±268[b]	9.6±0.6[b]	135±3[b]	1.43±0.02[a]
新植比例	H_{Rp}	3 445±268[a]	9.6±0.6[c]	135±3[a]	1.43±0.02[c]
	M_{Rp}	3 152±40[a]	8.7±0.1[b]	115±3[c]	1.53±0.02[b]
	L_{Rp}	3 313±45[a]	12.5±0.4[a]	109±3[b]	1.69±0.01[a]

注：同一因素下的不同字母表示差异显著（p＜0.05）。下同。

1.3　沟蚀测量及样品采集与分析

参考前人研究[26]，将甘蔗整个生长周期称为全生育期（Total growth，TG），并将其划分苗期（Establishment growth，EG）、分蘖期（Vegetative growth，VG）、伸长期（Grand growth，GG）和成熟期（Ripening growth，RG）。甘蔗种植后（3 月）进行坡面初始侵蚀状况测量，而后在甘蔗生长的 4 个时期末期对坡面沟蚀进行测量与采样，一个时期的末期沟蚀量减去其初期沟蚀量作为该时期的沟蚀量。受台风影响，2022 年甘蔗成熟期时，那辣流域降雨量增高，成熟期降雨量约占全生育期 40%，其余生长期降雨量、降雨时间分布均与正常年份无明显差异，甘蔗生长时期划分与降雨见表 2。

表 2　研究期间那辣流域甘蔗生育期划分与降雨量

Table 2　Sugarcane growth division and rainfall in Nala watershed during the study period

时期	日期划分	降雨量/mm
苗 期	20210301—20210515	204.2
分蘖期	20210516—20210615	95.6
伸长期	20210616—20210830	299.9
成熟期	20210901—20211231	385.0

1.3.1　细沟测量　确定侵蚀沟起点后，利用卷尺沿着侵蚀沟走向测定沟长，每间隔 2～5 m 测量一次侵蚀沟的沟宽、深，同时用 GPS 记录侵蚀沟分布位置，确定每个试验小区的侵蚀沟数量。侵蚀沟体积计算如下[11]：

$$V=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}(tw_i+bw_i)\times d_i\times l_i \quad (1)$$

式中：V 为侵蚀沟的体积（m^3）；n 为侵蚀沟的数量；其中 tw_i 为第 i 条沟截面的上部宽度（m）；bw_i 为第 i 条沟截面的下部宽度（m）；d_i 是第 i 条沟截面的高度（m）；l_i 是第 i 条侵蚀沟的长度（m）。

1.3.2 土样采集与测定 在每条侵蚀沟的沟头、中部以及沟尾的沟壁处用环刀法分别采集两个土壤样品，用于测定土壤容重、土壤全氮和全磷含量。其中，土壤容重采用烘干称重法测定，土壤全氮和全磷含量分别采用凯式定氮法以及 $HClO_4$-H_2SO_4 热消解法测定[27]。

1.3.3 坡面沟蚀及养分流失 坡面沟蚀量计算公式如下[11]：

$$GE=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_i\times BD_i}{A_x} \quad (2)$$

式中：GE 为坡面沟蚀量（gully erosion，t/hm^2）；V_i 坡面第 i 条侵蚀沟的体积（m^3）；BD_i 为第 i 条侵蚀沟的土壤容重（g/cm^3）；A_x 是第 x 个试验区的面积（hm^2）。

沟蚀导致的总氮和总磷流失量计算如下：

$$TNl \text{ or } TPl=\frac{\sum_{i=1}^{n}V_i\times BD_i\times TN_i \text{ or } TP_i}{A_x} \quad (3)$$

式中：TN 和 TP 分别为坡面沟蚀导致的总氮流失量（total nitrogen loss，TNl，kg/hm^2）和总磷流失量（total phosphorus loss，TPl，kg/hm^2）；TN_i 和 TP_i 坡面第 i 条侵蚀沟的土壤全氮和全磷含量（g/kg）。

1.3.4 凋落物覆盖度 凋落物覆盖度（Litter cover，Lc）通过样带法测量[24]。具体测量的方法为：在试验区按上、中、下采集单位面积样带内的甘蔗枯叶，称鲜重记录后，再取 0.5 kg 鲜样于烘箱干燥，记录干重。凋落物覆盖度计算公式如下：

$$Lc=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n}\frac{dr_i}{0.5}\times fr_i \quad (4)$$

式中：Lc 为试验区的凋落物覆盖度（kg/m^2）；dr_i 为坡面第 i 个单位面积上的凋落物干重（kg）；fr_i 为坡面第 i 个单位面积上的凋落物鲜重（kg）。

1.3.5 根系密度 甘蔗根系是利用直径 10 cm、高 15 cm的荷兰根钻在距甘蔗茎杆 5 cm 处，分两次采集 0—30 cm 深度中的甘蔗根系样品。在试验坡面按上、中、下采集样品。通过湿筛法获取甘蔗根系，烘干后通过游标卡尺测量根系直径，并将根系分为 Rd≤1 mm，1 mm ＜Rd＜ 2 mm 和 Rd≥2 mm3 种规格称重[11,24]。

根系密度计算公式为：

$$Rd=\frac{1}{3}\sum_{i=1}^{n}\frac{Rw_i}{\pi\times r^2\times h} \quad (5)$$

式中：Rd 为试验区的甘蔗根系密度（root density，mg/dm^3）；Rw_i 为第 i 个坡面甘蔗根系的干重（mg）；r 为根钻的底面半径，取值为 5 cm；h 为取样深度，取值为 30 cm；π 取 3.14。

1.3.6 数据统计分析 本研究原始数据处理在 Excel 2019 中完成，利用 IBM SPSS Statistics 25 进行数据统计分析，通过 ArcMap 10.3 以及 Origin 2018 绘图。采用单因素方差分析（ANOVA）在 95%置信水平对不同等高比例和新植比例坡面沟蚀特征、沟蚀量及养分流失量进行显著性比较；通过皮尔逊双变量相关分析法，分别建立沟蚀量及养分流失量与地面凋落物覆盖度、甘蔗根系密度之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同等高和新植比例甘蔗种植坡面的侵蚀沟特征

各坡面的平均侵蚀沟数量在 8～15 条之间、沟体积范围是 3.7～7.1×10^5 cm^3，沟密度范围是 3.1～6.3 cm/m^2。除 M_{Rp}，L_{Rp}坡面外，其余 4 个坡面侵蚀沟各项数值在苗期最大；苗期后，各坡面侵蚀沟数量、沟体积、沟密度随时间逐渐增大。分蘖期坡面沟数量小于苗期，分蘖期到成熟期间各坡面侵蚀沟数量逐渐增加。不同等高比例坡面间，L_C 坡面沟蚀数量显著大于 H_C 坡面，是其 1.4～1.8 倍。M_C 坡面沟蚀数量基本与 L_C，H_C 无显著差异（$p>0.05$），只在分蘖期时显著高于 H_C 坡面（$p<0.05$）。苗期时，除 L_{Rp}坡面沟密度显著低于 M_{Rp}，H_{Rp} 坡面（$p<0.05$），是其 66%～72%外，其余坡面侵蚀沟体积、沟密度差异大多不显著。分蘖期时，各坡面的侵蚀沟体积、沟密度均无显著差异（$p>0.05$）。伸长期时，研究等高种植比例对沟蚀影响发现 M_C 坡面沟体积大于 H_C，L_C 的沟体积（$p<0.05$），但其沟密度与 L_C 坡面相近（$p>0.05$）；研究新植比例对沟蚀影响发现 H_{Rp}，M_{Rp}和 L_{Rp}坡面沟体积基本相同（$p>0.05$），但 M_{Rp}坡面沟密度显著大于 L_{Rp}和 H_{Rp}坡面。成熟期时，M_C 坡面的沟密度与 L_C 和 H_C 坡面无显著差异（$p>0.05$），但沟体积显著大于 H_C（$p<0.05$）；M_{Rp}坡面的沟体积与 H_{Rp}和 L_{Rp}坡面无差异（$p>0.05$），但沟密度显著大于这两个坡面（$p<0.05$）。

表 3　不同等高和新植比例甘蔗种植坡面的侵蚀沟特征

Table 3　Morphological characteristics of gullies with different ratios of contour planting and replanted sugarcane slopes

因素	坡面	沟数量(条)				沟体积($\times10^5$ cm^3)				沟密度/(cm·m^{-2})			
		苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期
等高比例	L_C	15±1^a	11±1^a	13±3^a	13±3^a	6.3±1.3^a	3.7±0.4^a	5.1±0.9^b	6.1±1.1^{ab}	6.3±0.4^a	4±0.9^a	4.8±1.2^a	5.6±2.6^a
	M_C	15±3^{ab}	9±2^a	10±2^{ab}	11±2^{ab}	7.1±2.2^a	4.7±1.3^a	6.6±0.3^a	7.4±0.5^a	5.6±1.2^a	3.1±0.7^a	3.6±0.8^{ab}	3.6±0.6^a
	H_C	11±3^b	6±1^b	8±1^b	8±1^b	6.2±0.5^a	4.3±1^a	4.8±0.1^b	5.6±0.2^b	4.7±0.6^a	2.6±0.4^a	2.9±0.4^b	3±0.4^a
新植比例	H_{Rp}	11±3^a	6±1^a	8±1^a	8±1^b	6.2±0.5^a	4.3±1^a	4.8±0.1^a	5.6±0.2^a	4.7±0.6^a	2.6±0.4^a	2.9±0.4^b	3±0.4^b
	M_{Rp}	9±1^a	8±1^{ab}	10±2^a	10±1^a	6.4±0.9^a	6±1.1^a	6.1±1.5^a	6.6±1.1^a	4.3±0.6^a	3.7±0.9^a	4.2±0.2^a	4.2±0.1^a
	L_{Rp}	8±2^a	9±2^b	10±1^a	11±1^a	6.1±1.8^a	6.4±1.5^a	6.6±1^a	6.7±0.8^a	3.1±0.3^b	3.2±0.3^a	2.9±0.3^b	2.8±0.3^b

注：L_C，M_C，H_C 为不同等高比例；H_{Rp}，M_{Rp}，L_{Rp} 为不同新植比例；具体详见 1.2 试验设计。下同。

2.2　不同等高比例甘蔗种植坡面沟蚀与养分流失量

不同等高比例坡面的坡面沟蚀量见图 1。结果显示，全生育期的坡面沟蚀量在 44.4～66.3 t/hm^2 之间，Lc 坡面沟蚀量显著大于 H_C 坡面($p<0.05$)，但 M_C 坡面沟蚀量与 H_C 和 L_C 坡面均无显著性差异($p>0.05$)。从苗期到成熟期，坡面沟蚀量逐渐减少，苗期是沟蚀产生的主要时期，约占全年侵蚀量的 53%～54%，其沟蚀量分别为分蘖期、伸长期和成熟期沟蚀量的 2.2～2.4 倍、3～3.2 倍和 8.6～10.3 倍。Lc，M_C 和 H_C 坡面在苗期沟蚀量分别为 35.1，30.1，24.7 t/hm^2。苗期、分蘖期和伸长期的沟蚀量显著性与全生育期一致。成熟期时，低、中、高比例等高耕作的坡面间沟蚀量平均值均为 3.1 t/hm^2，无显著性差异($p>0.05$)。

如表 4 所示，全生育期的坡面沟蚀导致的总氮、总磷流失量分别在 53.7～82.5，24.8～38.4 kg/hm^2，其中 H_C 坡面总氮、总磷流失量显著低于 L_C 坡面($p<0.05$)，而 M_C 坡面总氮、总磷流失量与其他坡面无显著性差异($p>0.05$)。随着生育期递进，坡面总氮、总磷流失量均逐渐降低。低、中、高比例等高坡面在苗期总氮流失量分别为 43.8，38.2，29.1 kg/hm^2，总磷流失量分别为 22.0，19.1，13.1 kg/hm^2，3 种比例坡面的总氮、总磷流失量均在苗期时最大，约占全年总氮、总磷流失总量的 53%～54% 和 52%～58%。苗期总氮流失量约是分蘖期、伸长期和成熟期的 2.2～2.5 倍、2.9～3.0 倍和 9.1～11.2 倍；总磷流失量约是分蘖期、伸长期和成熟期的 2.1～2.4 倍、3.1～4.2 倍和10.1～13.6 倍。

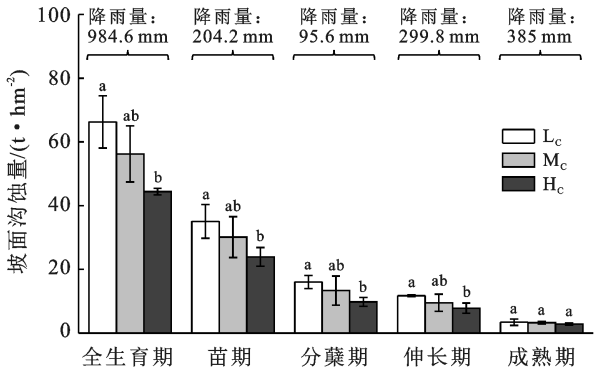

图 1　不同等高比例坡面的坡面沟蚀量的变化

Fig.1　Changes in gully erosion with different ratios of contour planting sugarcane slopes

苗期、成熟期时，不同等高比例坡面总氮流失量之间无显著性差异($p>0.05$)。分蘖期和伸长期时，不同等高比例坡面氮流失量的显著性与全生育期一致。此外，L_C 坡面总磷流失量只在苗期时显著高于 H_C 坡面($p<0.05$)，低、中、高比例等高坡面在分蘖期、伸长期和成熟期总磷流失量范围分别在 6.3～9.6 kg/hm^2，4.2～5.3 kg/hm^2，1.3～1.6 kg/hm^2 之间，无显著差异($p>0.05$)。

表 4　不同等高比例甘蔗种植坡面的沟蚀导致的总氮(TN)、总磷(TP)流失量

Table 4　Gully erosion-induced TN and TP losses under different ratios of contour planting sugarcane slopes　kg/hm^2

等高比例	总氮流失量					总磷流失量				
	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	全生育期	苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	全生育期
L_C	43.8±5.2^a	19.8±1.3^a	15.0±1.3^a	3.9±1.2^a	82.5±6.2^a	22.0±4.5^a	9.6±0.9^a	5.3±0.4^a	1.6±0.4^a	38.4±5.6^a
M_C	38.2±9.6^a	17.6±6.0^{ab}	12.7±2.0^{ab}	3.9±0.5^a	72.5±12.6^{ab}	19.1±4.1^{ab}	8.0±2.9^a	4.5±1.1^a	1.4±0.2^a	33.1±5^{ab}
H_C	29.1±6.5^a	11.8±1.6^b	9.6±2.2^b	3.2±0.3^a	53.7±7.0^b	13.1±1.6^b	6.3±0.9^a	4.2±0.8^a	1.3±0.2^a	24.8±0.6^b

2.3　不同新植比例甘蔗种植坡面的沟蚀与养分流失量及其影响因素

不同新植比例坡面沟蚀量见图 2。全生育期的坡面沟蚀量在 31.3～44.4 t/hm^2 之间，H_{Rp} 和 M_{Rp} 坡面沟蚀量显著大于 L_{Rp} 坡面($p<0.05$)，但 H_{Rp} 和 M_{Rp} 坡面沟蚀量无显著性差异($p>0.05$)。高、中、低比例新植坡面 EG 侵蚀量均随生育期递进而逐渐减少，苗期沟蚀量最大，约占总沟蚀量的 50%～54%，分别是分

蘖期、伸长期和成熟期沟蚀量的 2.3～2.4 倍、2.5～3.1 倍和 6.0～8.6 倍。苗期时，H_{Rp}，M_{Rp} 和 L_{Rp} 坡面沟蚀量为 24.7，21.5，15.6 t/hm²，其显著性与坡面全生育期沟蚀量显著性相同。分蘖期时，L_{Rp} 坡面沟蚀量只显著低于 H_{Rp} 坡面沟蚀量（$p>0.05$）。伸长期及成熟期时，不同新植比例坡面间平均沟蚀量分别为 7.2，2.9 t/hm²，无显著差异（$p>0.05$）。

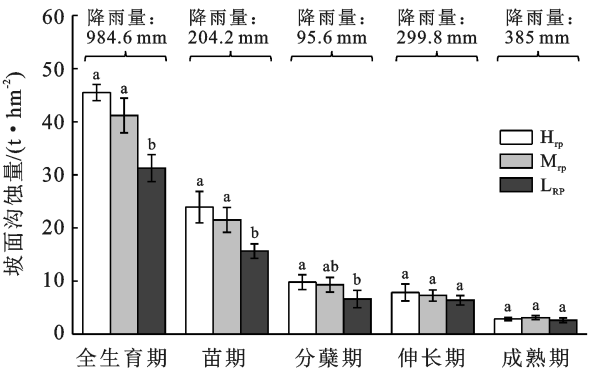

图 2 不同新植比例坡面沟蚀量的变化

Fig.2 Changes in gully erosion with different ratios of replanted sugarcane slopes

不同新植比例坡面的养分流失量见表 5。全生育期的坡面沟蚀导致的总氮、总磷流失量分别在 39.0～53.7，18.0～24.8 kg/hm² 之间，其显著性与坡面全生育期沟蚀量显著性相同。坡面总氮、总磷流失随着生育期递进逐渐减少。苗期总氮、总磷流失量最大，分别占总氮、总磷流失总量的 48%～54% 和 52%～56%。不同新植比例坡面苗期总氮流失量在 18.7～29.1 kg/hm² 之间，分别是分蘖期、伸长期和成熟期的 2.3～2.5 倍、2.3～3.0 倍和 5.1～9.1 倍；而总磷流失量在 10.0～13.6 kg/hm² 之间，分别是分蘖期、伸长期和成熟期的 2.1～2.6 倍 3.1～4.0 倍和 7.7～10.1 倍。

H_{Rp} 坡面氮流失量在苗期和全生育期都高于 L_{Rp} 坡面（$p<0.05$），但在分蘖期、伸长期及成熟期时均无显著性差异（$p>0.05$），后 3 个时期各坡面的总氮流失量分别在 8.3～11.8，8.3～9.2，3.2～4.1 kg/hm² 之间。L_{Rp} 坡面总磷流失量在苗期和分蘖期时显著低于 H_{Rp} 和 M_{Rp} 坡面（$p<0.05$），这与全生育期沟蚀总量的趋势相同；而伸长期和成熟期各新植比例的坡面间总磷流失量范围分别在 2.9～4.2，1.3～1.5 kg/hm² 之间，无显著差异（$p>0.05$）。

表 5 不同新植比例甘蔗种植坡面沟蚀导致的总氮(TN)、总磷(TP)流失量

Table 5 Gully erosion-induced TN and TP losses under different ratios of replanted sugarcane slopes kg/hm²

新植比例	总氮流失量					总磷流失量				
	苗 期	分蘖期	伸长期	成熟期	全生育期	苗 期	分蘖期	伸长期	成熟期	全生育期
H_{Rp}	29.1±6.5[a]	11.8±1.6[a]	9.6±2.2[a]	3.2±0.3[a]	53.7±7[a]	13.1±1.6[a]	6.3±0.9[a]	4.2±0.8[a]	1.3±0.2[a]	24.8±0.6[a]
M_{Rp}	27.1±3.4[ab]	11.8±3.3[a]	9.5±2.3[a]	4.1±0.4[a]	52.6±5.8[a]	13.6±1.6[a]	5.7±0.5[a]	3.4±0.4[a]	1.5±0.1[a]	24.1±1.4[a]
L_{Rp}	18.7±1.2[b]	8.3±1.6[a]	8.3±1.4[a]	3.7±0.7[a]	39.0±2.0[b]	10.0±0.2[b]	3.8±0.6[b]	2.9±0.6[a]	1.3±0.2[a]	18.0±0.4[b]

不同新植比例坡面的凋落物覆盖度和根系密度等植被特性存在明显差异，且随着甘蔗的新植比例增加，凋落物覆盖度和根系密度均在降低。坡面沟蚀及氮磷流失量与凋落物覆盖度、根系密度的回归分析结果显示，甘蔗凋落物覆盖度（图 3）、根系密度（图 4）与坡面沟蚀、氮磷流失均呈显著负相关关系（$p<0.01$）。其中，甘蔗根系凋落物覆盖度越大，坡面沟蚀和养分流失越少；坡面沟蚀和氮磷流失量随着植物根径小于 1 mm、根径在 1～2 mm 和根径大于 2 mm 的根系密度增大而减小。

2.4 坡面 TN，TP 流失占施肥量的比例关系

试验坡面氮肥和磷肥施用量分别在 161.1～234.4，15.3～24.5 kg/hm² 之间（表 6，表 7）。不同等高比例种植坡面沟蚀导致的总氮流失量占施氮量的 25.1%～39.5%，总磷流失量占施磷量的 107.0%～156.7%。不同新植比例坡面沟蚀导致的总氮流失量占施氮量的 24.2%～28.6%，总磷流失量占施磷量的 107.0%～126.9%。沟蚀导致的总磷流失量均大于施磷量，沟蚀导致的总磷流失量占施磷量比例是总氮流失量占施氮量比例的 4.0～5.0 倍。

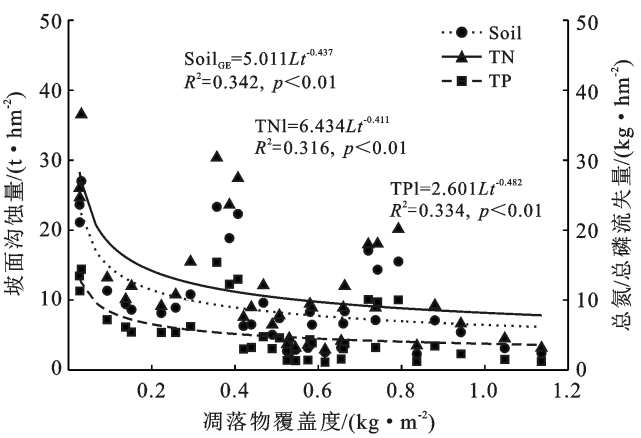

图 3 坡面沟蚀及其引起的养分流失量与凋落物覆盖度的关系

Fig.3 Relationships between gully erosion and it-induced TN and TP losses with litter cover

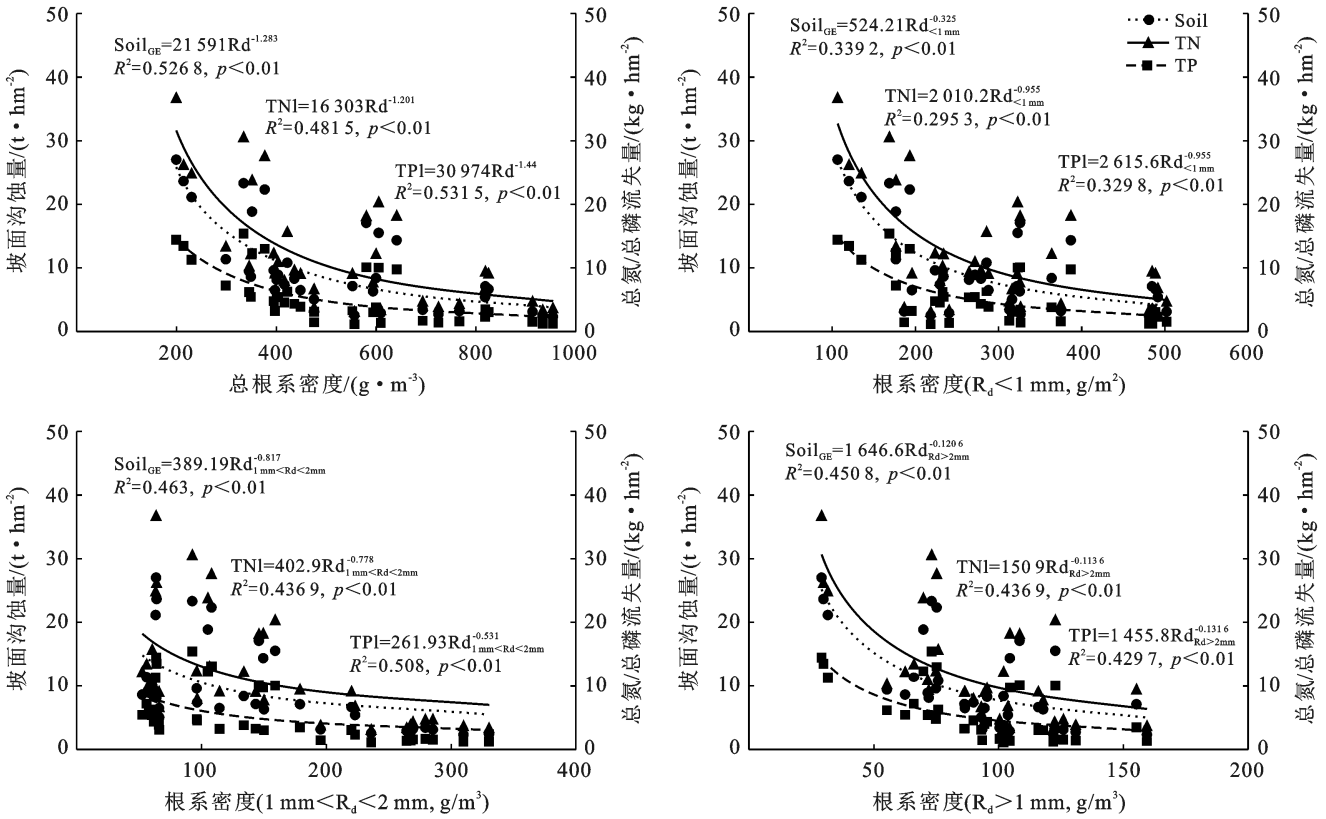

图 4　坡面沟蚀及其引起的养分流失量与根系密度的关系

Fig.4　Relationships between gully erosion and it-induced TN and TP losses with root density

如表 6 所示，不同等高比例坡面的年施氮量大小顺序为 $M_C > H_C \approx L_C$，L_C 坡面沟蚀导致的总氮流失量占年施氮量的比例显著高于 M_C 和 H_C 坡面（$p<0.05$），各生育期中，L_C 坡面的这一比例分别是 M_C 和 H_C 坡面的 1.1～1.3 倍和 1.2～1.7 倍。不同新植比例坡面的年施氮量大小排序为 $H_{Rp} > M_{Rp} > L_{Rp}$，但各坡面的总氮流失量占施氮量的比例之间无显著性差异（$p>0.05$）。除成熟期外，同一个时期内不同新植比例坡面的总氮流失量占年施氮量的比例也无显著差异（$p>0.05$）。如 7 所示，不同等高比例坡面的年施磷量范围在 21.6～24.5 kg/hm² 之间，L_C，M_C 坡面苗期总磷流失量和全年总磷流失量占施磷量的比例均显著高于 H_C 坡面（$p<0.05$），该比例在各坡面其余 3 个时期均无显著差异（$p>0.05$）。H_C 坡面磷流失量占施磷量的比例（107%）比 M_C 和 L_C 坡面少 46%～50%。不同新植比例坡面的年施磷量在 15.3～23.2 kg/hm² 之间，大小排序为 $H_{Rp} > M_{Rp} > L_{Rp}$，但各坡面全年磷流失量占施磷量的比例顺序为 $M_{Rp} > L_{Rp} > H_{Rp}$。H_{Rp} 坡面在苗期时磷流失量占施磷量的比例显著大于 M_{Rp} 坡面，在成熟期时却低于其他两个坡面。

表 6　不同等高、新植比例甘蔗种植坡面总氮流失量占年氮肥施用量比例

Table 6　Percentage of TN loss in sugarcane slope with different ratios of contour planting and replanted to annual nitrogen application

因 素	坡 面	年施氮量/(kg·hm⁻²)	总氮流失量占年氮肥施用量比例/%				
			苗 期	分蘖期	伸长期	成熟期	全生育期
等高比例	L_C	209.0	21.0±2.5[a]	9.5±0.6[a]	7.2±0.6[a]	1.9±0.6[a]	39.5±3.0[a]
	M_C	234.4	16.3±4.1[ab]	7.5±2.6[ab]	5.4±0.9[b]	1.7±0.2[a]	30.9±5.4[b]
	H_C	213.9	13.6±3.0[b]	5.5±0.7[b]	4.5±1.0[b]	1.5±0.2[a]	25.1±3.3[b]
新植比例	H_{Rp}	213.9	13.6±3.0[a]	5.5±0.7[a]	4.5±1.0[a]	1.5±0.2[b]	25.1±3.3[a]
	M_{Rp}	183.5	14.8±1.9[a]	6.4±1.8[a]	5.2±1.2[a]	2.2±0.2[a]	28.6±3.2[a]
	L_{Rp}	161.1	11.6±0.8[a]	5.1±1.0[a]	5.1±0.9[a]	2.3±0.4[a]	24.2±1.2[a]

表 7 不同等高、新植比例甘蔗种植坡面总磷流失量占年磷肥施用量比例

Table 7 Percentage of TP loss in sugarcane slope with different ratios of contour planting and replanted to annual phosphorus application

因素	坡面	年施磷量/(kg·hm^{-2})	总磷流失量占年磷肥施用量比例/%				
			苗期	分蘖期	伸长期	成熟期	全生育期
等高比例	L_C	24.5	89.7±18.2^a	39±3.8^a	21.5±1.5^a	6.3±1.6^a	156.7±22.7^a
	M_C	21.6	88.2±19.0^a	37.2±13.2^a	20.9±5.1^a	6.7±1.0^a	153.0±23.3^a
	H_C	23.2	56.3±6.9^b	27.0±3.8^a	18.0±3.6^a	5.6±0.7^a	107.0±2.7^b
新植比例	H_{Rp}	23.2	56.3±6.9^a	27.0±3.8^a	18.0±3.6^a	5.6±0.7^b	107.0±2.7^c
	M_{Rp}	19.0	71.4±8.6^b	29.8±2.6^a	17.7±2.0^a	8.1±0.8^a	126.9±7.1^a

3 讨论

3.1 不同等高和新植比例对甘蔗种植坡面的侵蚀沟特征的影响

侵蚀沟的数量、体积以及沟密度等侵蚀沟特征变化可以直观反应沟蚀剧烈程度[11]。本研究中，L_C，M_C，H_C，H_{Rp} 和 M_{Rp} 坡面侵蚀沟的沟数量、沟体积和沟密度呈先减小后增大趋势，且除 M_{Rp} 坡面成熟期的沟体积、沟密度达到了苗期的侵蚀程度外，其他坡面的侵蚀沟特征均低于苗期。这是由于苗期降雨后，种植户对这 5 个坡面内的新植蔗地的侵蚀沟进行填埋，并人工培垄以保障后期甘蔗正常生长，填埋后，分蘖期侵蚀沟变少，体积变小[23]（表 3）。L_{Rp} 沟数量、沟体积、随时间增加，沟密度随时间先增加后减小，这与郑粉莉[12]关于侵蚀沟发育过程的论述结论一致。降雨径流发生时，密集的水网连结在初期不断制造出坡面侵蚀沟，增加沟数量，在中期源源不断地增大、增长侵蚀沟，后期沟壁崩塌的土壤堆积在沟槽下部减小沟长导致沟密度变小[28]。H_{Rp} 坡面的沟数量、沟密度在填沟活动后小于 M_{Rp}，这可能是与 H_{Rp} 坡面新植比例更高，苗期沟蚀更为严重，分蘖期前被填埋的沟更多，种植户管理较为细致有关；也可能与后期新生侵蚀沟少、细、浅有关，使得分蘖期后沟数量、沟密度比 M_{Rp} 低。本研究发现随着坡面的等高比例升高，侵蚀沟特征在数值上呈减小趋势，但除 Lc 坡面侵蚀沟沟数量显著多于 Hc 外，其他沟特征的的差异性变化不大，这与 Rong 等[29]认为等高种植的方式有利于减少土壤沟蚀发生，降低侵蚀沟特征变化的结论一致。

3.2 不同等高比例对甘蔗种植坡面沟蚀与养分流失量的影响

本研究中，甘蔗种植坡面的沟蚀及其导致的养分流失量均随着等高比例的增加而降低（图 1，表 4），这说明等高种植可以有效降低坡面沟蚀和养分流失，这与杨任翔等[21]的研究结果一致。这可能与罗建[30]提出横坡垄作措施可以改变坡面的微地形，截断径流路径、削弱坡面地形对侵蚀效应的积极影响有关。一般认为，顺坡种植的排水效果好，但是降雨径流更容易造成侵蚀，而等高种植则弥补了这一缺点[18]。在本研究中，M_C 坡面沟蚀和养分流失量与 L_C 和 H_C 坡面无显著性差异（$p>0.05$），这可能说明等高比例在 30%～60%间存在一个降低沟蚀量的等高比例临界值，并不是甘蔗种植等高比例越高，阻断坡面径流的效果越好，因为径流在汇聚的过程也是一个能量累积的过程，当径流累积到一定等高行的最大拦截限度时，径流冲破田垄，反而会加剧沟蚀和养分流失[31]。此外，这可能是由于 M_C 坡面的坡长和坡度大于 L_C 和 H_C 坡面导致的。坡面侵蚀与坡长、坡度呈正相关关系，长坡长、陡坡度可以通过增加径流动能加剧侵蚀[32]，从而导致这样的结果。

研究结果表明，等高种植，尤其是高比例等高种植降低沟蚀和养分流失主要集中在苗期、分蘖期、伸长期，但在成熟期无显著作用（图 1，表 4）。这可能是由于前 3 个甘蔗生育期，农民会经常性的在雨后对甘蔗地进行培土，将冲垮的垄重新培高，继续发挥截流作用，降低沟蚀[24]。而在成熟期时，等高种植的甘蔗行在经历了大量降雨径流冲蚀后，田间垄行已被削平，此时甘蔗坡面趋于平缓，地表起伏和土壤表面的粗糙程度较低[24,33]，失去等高行的保护作用，此时 L_C，M_C 和 H_C 坡面田间形态接近，所以沟蚀量和养分流失量相当。整体而言，高比例等高种植养分流失量占年肥料施用量的百分比均比低中比例的低（表 6—7），因此，高比例等高种植也可作为一个通过减少农田土壤养分流失来降低肥料施用量的措施。

3.3 不同新植比例对甘蔗种植坡面沟蚀与养分流失量的影响

不同新植比例坡面沟蚀与养分流失结果表明，氮磷流失量与沟蚀量趋势一致，且沟蚀和养分流失量随新植比例和甘蔗生育期改变而变化。本研究中，新植比例越低，沟蚀和养分流失量越小（图 2，表 5），这与王旭[25]研究次降雨事件下不同新植甘蔗比例对土壤侵蚀和养分流失的影响结果相同。而莫雅棋[11]研究发现新植甘蔗最佳比例为 30%，超过 30%时，沟蚀速

率不断增加、土肥流失剧烈，这与本研究中 L_{Rp} 坡面在全生育期的沟蚀量与氮磷流失量显著小于 H_{Rp} 坡面的结果一致。这可能是由于新植比例可以影响甘蔗地的地表凋落物覆盖度和地下根细密度，进而影响沟蚀和养分流失[34]；也可能与明雪[35]在那辣流域研究发现宿根甘蔗地和新植甘蔗地的水文连通性不同有关，新植比例越高，水文连通性越高，径流侵蚀和泥沙搬运能力越强，土壤养分流失越大。在本研究中，坡面沟蚀及氮磷流失量与甘蔗地面凋落物覆盖度（图 3）、根系密度（图 4）均呈显著负相关关系（$p<0.01$），其中，根径小于 1 mm、根径在 1～2 mm 和根径大于 2 mm 的根系密度均可显著降低坡面流失。Li 等[23]研究发现，那辣流域的农民在甘蔗新植前会将甘蔗秸秆焚烧并进行深耕，相关甘蔗种植活动会降低地面覆盖度，导致地表裸露，破坏土壤结构、破碎植物根系[20]。而甘蔗枯叶可以地面上形成一个保护层，有效降低雨水径流对土壤的冲刷作用[36]；甘蔗根系相互缠绕，尤其是根径小于 1 mm 和根径在 1～2 mm 植物根系可以有效固结土壤，提高土壤的透水性，增强土壤抗冲性[22,37]。因此，新植甘蔗比例越高，地表凋落物覆盖度和地下根细密度越低，坡面沟蚀和养分流失越高。

不同新植比例甘蔗种植坡面侵蚀和氮磷流失的主要时期是苗期（48.0%～56.4%），其次为分蘖期（21.1%～25.4%）、伸长期（14.1%～21.3%），成熟期最小（5.2%～9.5%）。这与 Li 等[6]在那辣流域的研究结果初夏（23.1%～38.2%）、晚夏（30.9%～36.1%）、初秋（32.2%～40.1%）和晚秋（0.7%～1.0%）结果有所不同，这可能由于两个原因导致：一是研究尺度不同，本研究为坡面尺度，而该研究为流域尺度；二是时期划分以及降雨条件不同，而研究尺度，降雨等条件是影响土壤侵蚀的关键因素[38]。在本研究中，苗期沟蚀和养分流失最大，主要原因是苗期降雨占全生育期的 20%，且该时期有两次降雨量超过 50 mm[25]，而甘蔗新植活动导致此时新植比例较高的坡面（H_{Rp}）覆盖较低，甘蔗根系也未发育完全，土壤抗蚀性较差，沟蚀和养分流失量较大[21-23]。分蘖期和伸长期的沟蚀和养分流失量比较接近，这主要是分蘖期侵蚀性降雨较少，且此时甘蔗开始分蘖，根系密度开始增大，抵抗径流侵蚀的能力较强[24]；虽然伸长期降雨量是分蘖期的三倍，但此时甘蔗叶片发育完全，极大地提高了冠层覆盖度，且宿根蔗和新植蔗冠层无显著差异，甘蔗叶片截留、再分配降雨，削弱降雨动能，同时切断水文系统与侵蚀过程的链接，从而降低沟蚀和养分流失[39-40]。成熟期时，坡面沟蚀和养分流失量占全生育期的总流失量比例最低，且 3 种新植比例坡面的流失量之间无显著差异，这可能是进入 9 月后，农民会对所有甘蔗进行剥叶以提高甘蔗的光照时长累积糖分[41]，而剥落的叶片会在地表形成保护层，增加地面覆盖，避免雨滴与土壤直接接触，对径流的拦截阻碍作用更大，从而降低沟蚀和养分流失[20,25]；此外，经过前 3 个生育期，此时土壤紧实，容重较大[14]，所以即使成熟期降雨量占全生育期的 39%，但这两个因素的作用下，沟蚀和养分流失量依然最低。坡面沟蚀导致的养分流失量占年肥料施用量的比例结果表明，不同新植比例种植坡面与沟蚀量和养分流失量趋势一致，其中氮流失比例较小，但磷流失超过了磷肥施用量，这可能是由于土壤侵蚀会活化土壤，尤其是释放南方酸性土壤中的闭蓄态磷[11,22]，因此各新植比例坡面全磷流失量都超过施磷量。

4　结 论

（1）甘蔗新植活动加剧坡面沟蚀，等高种植可降低新植坡面沟蚀强度，甘蔗种植坡面配置 30%以下的新植比例和 60%以上的等高比例，是较好的种植方法。

（2）苗期是坡面沟蚀和养分流失发生的主要时期，分蘖期和伸长期次之，成熟期较少。

（3）在流域甘蔗生产中，采取高比例等高与低比例新植配置种植，同时增加苗期地表覆盖（（如保留地表枯落物、减少前茬收获后甘蔗叶焚烧））可减少沟蚀和养分流失，提高甘蔗地的水土保持效果。

[参 考 文 献]

[1] 国家统计局.中国统计年鉴[J].北京：中国统计出版社，2021.

[2] Li Yong, Are K S, Qin Zhaohua, et al. Farmland size increase significantly accelerates road surface rill erosion and nutrient losses in southern subtropics of China [J]. Soil and Tillage Research, 2020,204:104689.

[3] 王正兴，李芳.中国分省土壤侵蚀变化数据集（1985—2011）[J].全球变化数据学报（中英文），2018,2(1):51-58.

[4] 广西壮族自治区水利厅.广西壮族自治区水土保持公报[R].2021.

[5] 张维理，武淑霞，冀宏杰，等.中国农业面源污染形势估计及控制对策 I.21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学，2004,37(7):1008-1017.

[6] Li Yong, Are K S, Huang Zhigang, et al. Particulate N and P exports from sugarcane growing watershed are more influenced by surface runoff than fertilization [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020,302:107087.

[7] 刘晓冰，张兴义.沟道侵蚀的多样性和发生过程及研究展

望[J].土壤与作物,2018,7(2):90-102.

[8] 朱显谟.黄土区土壤侵蚀的分类[J].土壤学报,1956(2):99-115.

[9] 陈永宗.黄土高原沟道流域产沙过程的初步分析[J].地理研究,1983,2(1):35-47.

[10] 董旭,张宽地,杨明义,等.黄土坡面细沟流水动力学特性[J].中国水土保持科学,2016,14(3):45-51.

[11] 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].广西 南宁:广西大学,2021:1-40.

[12] 郑粉莉,徐锡蒙,覃超.沟蚀过程研究进展[J].农业机械学报,2016,47(8):48-59.

[13] 郭太龙,卓慕宁,李定强,等.华南红壤坡面侵蚀水动力学机制试验研究[J].生态环境学报,2013,22(9):1556-1563.

[14] Thomaz E L, Marcatto F S, Antoneli V. Soil erosion on the Brazilian sugarcane cropping system: An overview [J]. Geography and Sustainability, 2022,3(2):129-138.

[15] 邵帅,刘焕军,潘越,等.黑土区田块尺度微地形因子对土壤侵蚀与碱解氮的影响[J].土壤通报,2019,50(4):854-860.

[16] Zhang Xiyu, Fan Jianrong, Liu Qing, et al. The contribution of gully erosion to total sediment production in a small watershed in Southwest China [J]. Physical Geography, 2018,39(3):246-263.

[17] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏.雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J].农业工程学报,2017,33(11):124-132.

[18] 周怡雯,戴翠婷,刘窑军,等.耕作措施及雨强对南方红壤坡耕地侵蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):49-54.

[19] 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.

[20] Youlton C, Wendland E, Anache J, et al. Changes in Erosion and Runoff due to Replacement of Pasture Land with Sugarcane Crops [J]. Sustainability, 2016,8(7):685-697.

[21] 杨任翔,邱凡,王坚桦,等.雨型和甘蔗种植对赤红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):65-70.

[22] 黄艳荟,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.

[23] Li Yong, Mo Yaqi, Are K S, et al. Sugarcane planting patterns control ephemeral gully erosion and associated nutrient losses: Evidence from hillslope observation [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021,309:107289.

[24] 杨翠红,周小淇,郭豪,等.甘蔗种植配置模式对坡面沟蚀及土壤有机碳流失的影响研究[J/OL].江苏农业科学:1-10[2023-03-11.https://kns.cnki.net/kcms/detail//32.1214.S.20230104.1127.003.html.

[25] 王旭.甘蔗种植模式对那辣流域土壤侵蚀引起的养分流失及入河的影响研究[D].广西 南宁:广西大学,2022:1-10.

[26] 戴谅,王旭,李勇,等.径流与施肥对流域入河重金属污染负荷的控制[J].植物营养与肥料学报,2022,28(3):379-391.

[27] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[28] 赵龙山,侯瑞,吴发启.黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持,2017(9):47-51.

[29] Rong Li, Duan Xingwu, Zhang Guangli, et al. Impacts of tillage practices on ephemeral gully erosion in a dry-hot valley region in southwestern China [J]. Soil and Tillage Research, 2019,187:72-84.

[30] 罗键,郑子成,李廷轩,等.横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):66-72.

[31] 陆淑宁,张泽瑜,李荣融,等.等高耕作对不同坡度坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2023,37(2):37-44.

[32] 刘冉,余新晓,蔡强国,等.坡长对坡面侵蚀、搬运、沉积过程影响的研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(6):140-146.

[33] 秦凤,郑子成,李廷轩,等.玉米季坡耕地地表糙度的变化特征及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):18-22.

[34] Wang Xu, Li Yong, Dai Liang, et al. Control of sugarcane planting patterns on slope erosion-induced nitrogen and phosphorus loss and their export coefficients from the watershed [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022,336:108030.

[35] 明雪,康振威,黄智刚,等.甘蔗种植模式对流域水文连通性的影响[J].水土保持通报,2022,42(6):106-113.

[36] Martinelli L A, Filoso S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: Environmental and social challenges [J]. Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America, 2008,18(4):885-898.

[37] 李勇.黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M].北京:科学出版社,1995.

[38] 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.

[39] 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.

[40] Cerdà A, Rodrigo-Comino J, Giménez-Morera A, et al. Hydrological and erosional impact and farmer's perception on catch crops and weeds in citrus organic farming in Canyoles River watershed, Eastern Spain [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018,258:49-58.

[41] 谷学志.甘蔗高产栽培技术及病虫害防治措施[J].中国农业文摘—农业工程,2020,32(3):72-73.