

# 甘蔗种植方式对蔗地土壤侵蚀及氮素流失特征的影响

黄艳荟, 宁嘉丽, 李桂芳, 杨任翔, 王坚桦, 陈钊柱

(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] 探讨自然降雨条件下甘蔗种植方式(宿根和新植)对坡地的土壤侵蚀及氮素流失特征的影响,为区域水土流失防治和甘蔗合理种植提供理论依据。[方法] 基于径流小区原位观测试验,以 10° 赤红壤植蔗坡地为研究对象,设置甘蔗宿根和新植两种种植方式,测定自然降雨条件下坡面径流、侵蚀量及硝态氮和铵态氮流失量,获得自然降雨条件下宿根蔗和新植蔗坡地土壤侵蚀特征和氮素流失的特征。[结果] ①2021 年 5—10 月宿根蔗和新植蔗地分别发生侵蚀性降雨 40 场和 43 场,累计侵蚀性降雨 981.8 mm 和 1 013.0 mm。蔗地径流、侵蚀量及氮素流失量均集中在 6 月,径流和侵蚀泥沙中硝态氮和铵态氮主要随地表径流流失,占径流侵蚀氮素流失总量的 96.0% 以上;径流中的氮流失以硝态氮为主(>70.0%),而侵蚀泥沙中则以铵态氮流失为主(>80.0%)。宿根蔗坡面径流、侵蚀量较新植蔗减少了 31.8% 和 83.5%,径流中硝态氮和铵态氮流失量减少了 56.7% 和 51.9%,侵蚀泥沙中则减少了 85.4% 和 60.2%。②次降雨条件下,蔗地坡面径流、侵蚀和氮素流失随降雨量波动变化,宿根蔗和新植蔗地的径流、侵蚀量及氮素流失量主要发生在 2021 年 6 月 3—24 日降雨中,且整体上均表现为宿根蔗小于新植蔗。随着甘蔗的生长,蔗地坡面径流、侵蚀及其携带氮素流失量均逐渐减小。③最大 30 min 降雨强度( $I_{30}$ )和降雨量是影响蔗地径流中和侵蚀泥沙中氮素流失的主要因子;最大 60 min 降雨强度( $I_{60}$ )和  $I_{30}$  分别是影响宿根蔗和新植蔗坡面径流侵蚀的最主要降雨因子。[结论] 蔗地坡面土壤径流、侵蚀泥沙中的硝态氮和铵态氮流失以地表径流中的硝态氮流失为主;与新植蔗相比,宿根蔗在甘蔗苗期和分蘖期可以有效降低坡面径流侵蚀及氮素流失,伸长后期二者差异逐渐变小。

**关键词:** 宿根蔗; 新植蔗; 降雨; 土壤侵蚀; 氮流失

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0121-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220919.002; Huang Yanhui, Ning Jiali, Li Guifang, 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.

## Effects of Planting Methods on Soil Erosion and Nitrogen Loss in a Sugarcane Field

Huang Yanhui, Ning Jiali, Li Guifang, Yang Renxiang, Wang Jianhua, Chen Zhaozhu

(Guangxi Key Laboratory of Agro-environment and Agro-product Safety,  
Agricultural College of Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of sugarcane planting methods [ratoon sugarcane (RS) and newly planting sugarcane (NS)] on soil erosion and nitrogen loss characteristics of slope land under natural rainfall were determined in order to provide a theoretical basis for regional water and soil loss prevention, and for determining reasonable planting practices for sugarcane. [Methods] In-situ observations were made of natural rainfall processes, runoff, sediment yield, and nitrate nitrogen and ammonium nitrogen losses under individual rainfall events for different sugarcane planting patterns [ratoon sugarcane (RS) and newly planting sugarcane

收稿日期: 2022-04-22

修回日期: 2022-06-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“植蔗坡耕地土壤侵蚀及养分流失特征和机制”(41967010); 广西自然科学基金项目(2018GXNSFBA138024)

第一作者: 黄艳荟(1997—), 女(壮族), 广西壮族自治区柳州市人, 硕士, 研究方向为蔗田坡面土壤侵蚀及养分流失特征。Email: hyh3214804596@163.com。

通讯作者: 李桂芳(1987—), 女(汉族), 河南省商丘市人, 博士, 讲师, 主要从事农田水土流失及其对生态环境的影响方面的研究。Email: lifangdyx@163.com。

(NS)] on lateritic soil from May to October in 2021. [Results] ① The numbers of individual erosive rainfall events in the NS and RS treatments were 40 and 43, respectively, and the erosive rainfall amounts were 981.8 mm and 1 013.0 mm, respectively, from May to October in 2021. Runoff, sediment, and nitrogen losses of sugarcane land mainly occurred in June. Nitrogen losses were mainly lost through surface runoff, accounting for more than 96.0% of the total nitrogen loss in runoff and sediment. Nitrate nitrogen loss accounted for more than 70% of total dissolved nitrogen in runoff, while ammonium nitrogen was the main nitrogen loss type in sediment (>80%). Compared with the NS treatment, the total runoff and soil erosion of the RS treatment decreased by 31.8% and 83.5%, respectively, the loss of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in runoff decreased by 56.7% and 51.9%, and the sediment loss decreased by 85.4% and 60.2%. ② Runoff, sediment yield, and nitrogen losses of sugarcane land under the different treatments fluctuated with individual rainfall events among sugarcane growing treatments, and losses mainly arose from the rainfall occurring from June 3 to 24, 2021. The losses of nitrate and ammonium nitrogen in runoff and erosion sediment for the RS treatment were generally lower than for the NS treatment. Additionally, runoff, sediment, and the nitrogen losses in runoff erosion gradually decreased with the growth of sugarcane. ③ The maximum 30-minute rainfall intensity ( $I_{30}$ ) and rainfall were the main factors affecting nitrogen loss in sugarcane field runoff and sediment. The maximum 60-minute rainfall intensity ( $I_{60}$ ) and  $I_{30}$  were the main rainfall factors affecting the slope runoff erosion of the RS and NS treatments, respectively. [Conclusion] Losses of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen in runoff and sediment in sugarcane land were mainly in the form of nitrate nitrogen occurring with surface runoff. Compared with the NS treatment, the RS treatment could effectively reduce runoff, erosion, and nitrogen losses during the sugarcane seedling stage and tillering stage. Differences between the two treatments gradually decreased in the later stage of elongation.

**Keywords:** ratoon sugarcane; newly planted sugarcane; rainfall; soil erosion; nitrogen loss

中国南方红壤区年均降雨量大、降雨集中且单点暴雨发生的频率较高,是水土流失高发地区<sup>[1-2]</sup>。由于红壤坡耕地的不合理开发利用,使得水土流失和氮磷养分流失问题日益严重,导致耕地土壤生产力下降,水体富营养化等环境问题,影响农业的可持续发展<sup>[3-5]</sup>。因此研究红壤区坡耕地水土流失对农业面源污染和耕作质量保育具有重要意义。坡耕地土壤侵蚀是土壤与降雨、径流相互作用的结果<sup>[6]</sup>。土壤侵蚀过程受多种因素共同影响,如降雨特征,降雨量<sup>[7]</sup>、降雨强度<sup>[8]</sup>、降雨历时等<sup>[9]</sup>。崔璨等<sup>[7]</sup>基于三峡库区小流域的研究结果表明,降雨量对三峡流域产沙的影响程度高于降雨强度;而李桂芳等<sup>[10]</sup>通过对自然降雨观测试验发现, $I_{30}$ 是导致南方红壤地区坡耕地径流流失的主要降雨因子;李叶鑫等<sup>[11]</sup>研究了降雨对辽西坡耕地的影响,结果表明降雨历时对坡面溅蚀量具有重要影响。此外,作物类型<sup>[12]</sup>、作物生育期<sup>[13]</sup>、作物种植方式等<sup>[14]</sup>均会影响坡耕地侵蚀过程。作物类型不同,其地上部分冠层覆盖和茎秆对降雨再分配不同,地下部分根系对土壤抗侵蚀能力的影响也不同,促使坡面径流形成及侵蚀过程也存在明显差异<sup>[15-17]</sup>。肖继兵等<sup>[18]</sup>研究不同作物种类对土壤侵蚀的影响时,指出甘薯地的坡面侵蚀量大于谷子地。对于同一

种作物,生育期不同,植被覆盖度差异显著,进而对坡面侵蚀的影响存在不同<sup>[15]</sup>,Lin等<sup>[19]</sup>认为植被覆盖度差异是影响小麦各生育期产流产沙量差异的主要因素。在模拟降雨条件下,玉米植被覆盖度最低时产流产沙量及氮素流失量最高<sup>[20]</sup>,徐宁等<sup>[13]</sup>在大豆调节坡耕地土壤侵蚀影响研究中也得出相似结论,并指出随着大豆生育期的推进坡耕地的产流产沙量逐渐减小。作物种植方式通过影响坡耕地表层土壤性质及地表粗糙度,增加坡耕地的拦蓄能力,提高抗侵蚀能力<sup>[21]</sup>。如轮作、间作、套作等种植方式可以提高地表覆盖度,增加地面粗糙度,有效减小降雨侵蚀<sup>[12]</sup>;横坡耕作比顺坡耕作具有更好的水土保持效果,杨任翔等<sup>[22]</sup>认为,横坡蔗地比顺坡蔗地,坡耕地径流侵蚀量分别减少了 51.8%和 43.6%。

甘蔗是重要的糖料作物,主要种植在广西、云南、广东等亚热带地区<sup>[23]</sup>。据资料显示,广西壮族自治区的甘蔗种植约有 70%分布在旱坡地上<sup>[24]</sup>,且由于降雨频繁,甘蔗种植对坡面侵蚀及养分流失存在显著影响<sup>[24-26]</sup>。杨任翔等<sup>[5]</sup>基于径流小区原位观测试验结果表明,蔗地的氮素流失以硝态氮为主,占径流氮素流失总量的 79%以上,同时还指出蔗地坡面侵蚀量及养分流失量在年内分布存在明显差异,其流失量主要集中在甘蔗苗期。与木薯和玉米等作物相比,

甘蔗可在一定程度上降低坡面侵蚀量<sup>[27]</sup>, Anache 等<sup>[28]</sup>基于巴西长期定位观测数据,指出甘蔗种植坡耕地的地表径流量和侵蚀量显著大于灌木和牧草地。Li 等<sup>[29]</sup>基于流域尺度的研究,表明新植蔗地的年平均侵蚀量比宿根蔗地高 10%,宿根蔗可以有效降低沟蚀的发生。甘蔗快速生长期(6—9 月)与种植区的雨季相重<sup>[25]</sup>,在降雨高峰期蔗地土壤养分极易随地表径流流失<sup>[30]</sup>。根据栽培年限把甘蔗种植方式划分宿根蔗和新植蔗,前者是由留在土壤中蔗蔸的芽萌发,而后者由蔗种直接萌发<sup>[14]</sup>。宿根年限多为 2~3 a,中国宿根蔗栽培面积约占植蔗面积的 40%~60%<sup>[31]</sup>。但现有自然降雨条件下甘蔗种植对土壤侵蚀特征研究主要集中在新植蔗或者年际尺度蔗地土壤侵蚀变化,而次降雨下,新植蔗和宿根蔗种植对坡面侵蚀及养分流失的特征目前尚不清晰。鉴于此,本文以宿根蔗和新植蔗坡地为研究对象,基于径流小区

原位观测试验,通过测定次降雨条件下植蔗坡面径流、侵蚀以及氮素(硝态氮和铵态氮)流失量,分析甘蔗种植方式对蔗地土壤侵蚀的影响;结合降雨特征参数分析,探讨影响宿根蔗地和新植蔗地土壤侵蚀及养分流失的主要降雨因子,研究结果可为甘蔗的合理种植提供理论依据。

## 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)。研究区属亚热带季风气候区,年平均降雨量 1 110.7 mm<sup>[32]</sup>,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,土壤容重为 1.3~1.4 g/cm<sup>3</sup>。基本理化性质详见表 1。

表 1 试验土壤基本理化性质

全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	pH 值
1.7	9.7	34.1	0.6	7.1	7.0

### 1.2 试验设计

试验采用径流小区野外原位观测法,观测时间为 2021 年 5—10 月。径流小区水平投影长 5 m,宽 2 m,坡向正南,基于广西野外植蔗坡地的调查,植蔗坡地坡度一般在 15°以下,参考其他研究区的试验设计<sup>[33-34]</sup>,本研究中植蔗坡地径流小区坡度设为 10°。小区四周均砌水泥围墙,小区下端设有出水口,出水口与集流槽相通,集流槽槽壁设有标尺用于观测集流槽内的水深。

试验设新植蔗和宿根蔗 2 种植方式,各设置 1 个重复。甘蔗采用双芽段单行双株种植,顺坡种植 2 列,间距为 1 m。供试甘蔗品种为“桂糖 42 号”,宿根蔗于 2021 年 1 月 16 日砍收,新植蔗于 2021 年 3 月 13 日下种。施肥量为氮肥(N)360 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)90 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)75 kg/hm<sup>2</sup>,其中氮肥与钾肥按基肥 30%+追肥 70%施用,磷肥全部作基肥施用。主要的施肥方案详见表 2,其他田间管理措施均按常规进行。

表 2 试验田间管理与施肥方案

种植方式	施肥量(N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O)/(kg·hm <sup>-2</sup> )	施肥时间		培土时间		种植规格
		基肥	追肥	小培土	大培土	
宿根蔗	252:0:52.5	—	20210614	20210614	20210903	采用双芽段单行双株种植,顺坡种植 2 列,列宽为 1 m。
新植蔗	360:90:75	20210313	20210614	20210614	20210903	

### 1.3 样品采集与分析

本试验中自然降雨数据资料由翻斗式自计雨量器采集。降雨资料通过径流小区附近气象站的翻斗式自记雨量器(雨后 12 h 内采集)获得,包括降雨日期、降雨量(P)、降雨历时(T)、平均降雨强度(I),最大 15 min 降雨强度(I<sub>15</sub>)、最大 30 min 降雨强度(I<sub>30</sub>)、最大 60 min 降雨强度(I<sub>60</sub>)等。本试验将导致土壤侵蚀发生的降雨称为侵蚀性降雨<sup>[7]</sup>,降雨间歇时间小于 6 h 的降雨视为 1 场降雨<sup>[35]</sup>。径流小区下方设有集流槽,用于承接降雨产生的径流泥沙。每次降

雨结束后,利用标尺测量小区集流槽内的水位,通过体积法测定小区径流量<sup>[36]</sup>;将集流槽中的径流与泥沙搅拌均匀,用 500 ml 塑料瓶在槽中的不同位置取浑浊水样,每个小区取 3 瓶,静置,上清液存于 4 °C 冰箱,塑料瓶中的沉淀泥沙转移后低温烘干(<45 °C)并称量,并计算次降雨下径流的泥沙浓度,泥沙浓度与集流槽内径流泥沙体积的乘积即为坡面侵蚀量<sup>[36]</sup>。水样过 0.45 μm 微孔滤膜后,用连续流动化学分析仪(型号:AA3,产地:德国)测定地表径流中的硝态氮和铵态氮浓度;侵蚀泥沙经 2 mol/L 氯化钾溶

液提取后,利用连续流动分析仪测定侵蚀泥沙中的硝态氮和铵态氮含量。

#### 1.4 数据分析方法

利用 SPSS 19.0 进行降雨特征参数与径流、侵蚀及氮素流失量的回归分析,并利用 Origin 2018 和 Microsoft Office 2013 进行图表绘制。

## 2 结果

### 2.1 降雨特征分析

试验区 2021 年 5—10 月降雨量分布如图 1 所示。共计降雨 95 场,降雨量介于 0.2~96.2 mm,总降雨量为 1 158.0 mm,其中降雨主要发生在 6—7 月,降雨场次为 35 场,累计降雨量为 650.6 mm,占总降雨量的 56.2%。2021 年 5—10 月宿根蔗和新植蔗地分别发生侵蚀性降雨 40 场和 43 场,累计侵蚀性降雨量分别为 981.8 和 1 013.0 mm,分别占总降雨量的 84.7%和 87.5%。2021 年 5—10 月蔗地侵蚀性降雨量在 3.8~96.2 mm,降雨历时在 0.3~35.3 h,平均降雨强度在 0.4~46.4 mm/h, $I_{15}$  在 5.6~126.4 mm/h, $I_{30}$  在 3.2~88.4 mm/h, $I_{60}$  在 1.6~49.8 mm/h。

### 2.2 不同种植方式下坡面径流、侵蚀及氮流失量分布特征

由表 3 可知,2021 年 5—10 月宿根蔗和新植蔗地

侵蚀中的氮素均主要随地表径流流失(比例为 97.0%和 96.2%),以硝态氮流失为主,占氮素流失总量的 67.1%和 69.2%。不同种植方式下坡面地表径流中硝态氮流失量占径流硝态氮和铵态氮流失总量的 70.0%,是径流中铵态氮流失量的 2.2~2.5 倍;而侵蚀泥沙中氮素流失则以铵态氮为主,比例在 80.0%以上。观测期内新植蔗坡面径流、侵蚀总量分别是宿根蔗处理下的 2.5,6.1 倍;新植蔗坡面径流中硝态氮和铵态氮流失量则是宿根蔗的 2.3 和 2.1 倍,侵蚀泥沙中则分别为 6.9 和 2.5 倍。结果表明,与新植蔗相比,宿根蔗处理可以显著降低坡面径流侵蚀及氮素流失量,尤其是坡面径流量和氮素养分流失量。

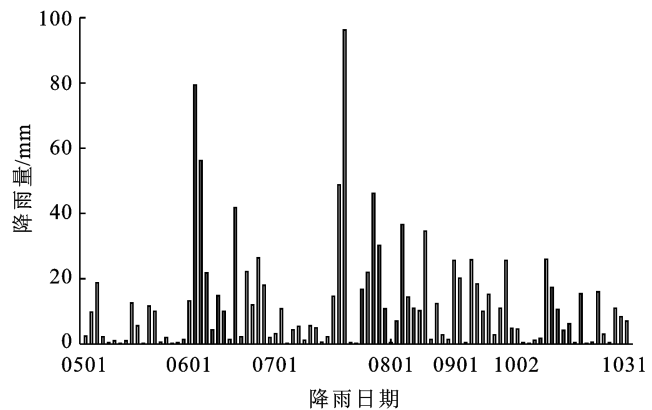


图 1 试验区 2021 年 5—10 月降雨分布特征

表 3 不同种植方式下植蔗坡面径流量、侵蚀量及氮素流失量

种植方式	径流			侵蚀		
	径流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	硝态氮/ ( $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	铵态氮/ ( $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	侵蚀量/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	硝态氮/ ( $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	铵态氮/ ( $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
宿根蔗	3 018.4±5.3 <sup>b</sup>	8 924.1±39.6 <sup>b</sup>	4 004.1±86.5 <sup>a</sup>	9 893.7±113.8 <sup>b</sup>	27.3±0.9 <sup>b</sup>	375.5±2.3 <sup>b</sup>
新植蔗	4 423.3±7.5 <sup>a</sup>	20 605.3±233.7 <sup>a</sup>	8 320.3±55.1 <sup>a</sup>	59 874.7±283.2 <sup>a</sup>	187.7±3.8 <sup>a</sup>	943.2±17.3 <sup>a</sup>

注:同一列不同小写字母表示在 5%水平上差异显著。

### 2.3 次降雨条件下蔗地坡面径流、侵蚀及氮素流失特征

2.3.1 次降雨下蔗地径流及氮素流失特征 2021 年 5—10 月测定的宿根蔗地坡面径流量介于 1.7~346.8  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ (图 2),呈明显的波动变化,除个别场次外,整体上坡面径流量 $<200.0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,径流量最大值出现在 6 月 3 日。次降雨下宿根蔗坡面径流中硝态氮流失量和硝态氮流失浓度在 3.5~1 973.7  $\text{g}/\text{hm}^2$ ,0.1~9.3  $\text{mg}/\text{L}$ 之间;坡面硝态氮流失量在 5—6 月较大,且波动明显,7 月之后整体小于 100.0  $\text{g}/\text{hm}^2$ 。坡面径流中铵态氮流失量和铵态氮浓度分别介于 0.3~709.7  $\text{g}/\text{hm}^2$  和 0.04~9.3  $\text{mg}/\text{L}$ ,铵态氮流失主要集中在 6 月的几场侵蚀性降雨,最大流失量出现在 6 月 22 日,7 月之后坡面径流中铵态氮流失量均较小

(0.3~88.3  $\text{g}/\text{hm}^2$ ),坡面径流中铵态氮浓度与铵态氮流失量变化趋势类似。

在观测期内新植蔗坡面的径流量介于 2.3~471.1  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ (图 2),最大值出现在 7 月 22 日次降雨中,其余整体上坡面径流量都小于 150.0  $\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。次降雨条件下新植蔗坡面径流中硝态氮流失量和硝态氮流失浓度分别在 1.4~3 015.1  $\text{g}/\text{hm}^2$  和 0.4~18.5  $\text{mg}/\text{L}$ 之间,前期(5—6 月)硝态氮流失量较大,波动明显(21.7~3 015.1  $\text{g}/\text{hm}^2$ ),7 月后除个别场次外,70%以上的次降雨下坡面径流中硝态氮流失量均小于 200.0  $\text{g}/\text{hm}^2$ 。硝态氮浓度的变化与流失量变化相似,在 5—7 月呈剧烈的波动变化,且在 6 月 16 日次降雨下出现极大值,8 月以后整体上波动较小。坡面径流中的铵态氮流失量和铵态氮浓度在 0.1~

1 962.8 g/hm<sup>2</sup> 和 0.03~11.7 mg/L 之间,铵态氮流失主要集中在 6 月,最大流失量出现在 6 月 22 日降雨中,在 7 月以后,次降雨下铵态氮流失量及浓度均较小且差异不大,在 0.1~270.8 g/hm<sup>2</sup>,0.03~1.2 mg/L 范围内波动变化。此外,次降雨下蔗地坡面径流中硝态氮流失量明显高于铵态氮。不同种植方式下坡面径流量、硝态氮流失量和铵态氮流失量均表现为:宿根蔗<新植蔗,宿根蔗坡面径流中的硝态氮流失浓度和铵态氮流失浓度均小于新植蔗。由图 2 还可知,蔗地坡面追肥后,2021 年 6 月 16—24 日降雨下坡面径流中硝态氮和铵态氮浓度及流失量均有不同程度的增加,其中新植蔗的增幅更为明显。

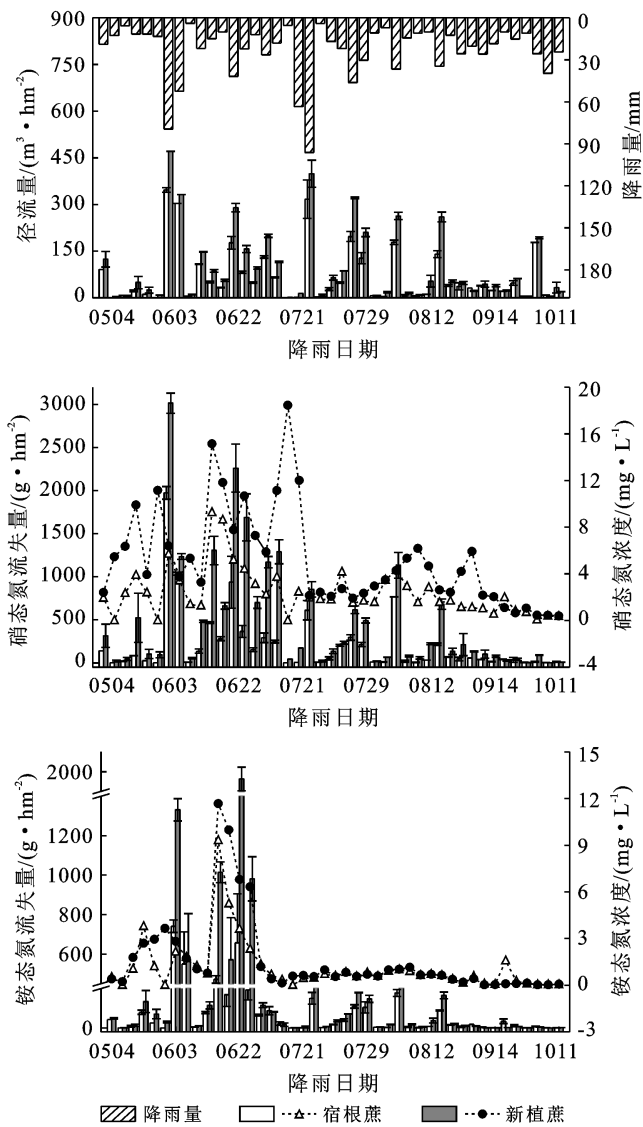


图 2 次降雨下宿根蔗和新植蔗坡面径流及氮素流失特征

2.3.2 次降雨下蔗地侵蚀泥沙及氮素流失特征 由图 3 可知,次降雨下宿根蔗地坡面侵蚀量介于 3.0~1 903.1 kg/hm<sup>2</sup>之间,主要集中在 6 月,坡面最大侵

蚀量出现在 6 月 3 日,6 月以后除 0722,0728,0813 外,侵蚀量均小于 200.0 kg/hm<sup>2</sup>。次降雨条件下宿根蔗坡面侵蚀泥沙中硝态氮流失量和硝态氮含量分别在 0.003~8.4 g/hm<sup>2</sup>,0.1~9.0 mg/kg 之间,极大值均出现在 7 月 22 日;硝态氮流失量除在 6 月较大外,其余整体上小于 1.0 g/hm<sup>2</sup>。侵蚀泥沙中铵态氮流失量和铵态氮含量在 0.1~101.6 g/hm<sup>2</sup> 和 10.4~115.0 mg/kg 之间,其中极大值均出现在 7 月 22 日,变化趋势与硝态氮相似。新植蔗地坡面侵蚀量介于 5.7~11 346.7 kg/hm<sup>2</sup> 之间,最大侵蚀量出现在 6 月 10 日,坡面侵蚀主要集中在 6 月 10 日至 7 月 28 日降雨中,8 月以后,侵蚀量整体小于 1 000 kg/hm<sup>2</sup>。新植蔗地坡面侵蚀泥沙中硝态氮流失量和硝态氮含量在 0.007~36.6 g/hm<sup>2</sup> 和 0.5~14.3 mg/kg 之间;侵蚀泥沙中硝态氮流失主要集中在 6 月 3—28 日,7 月 22 日和 28 日降雨中(>10.0 g/hm<sup>2</sup>)。

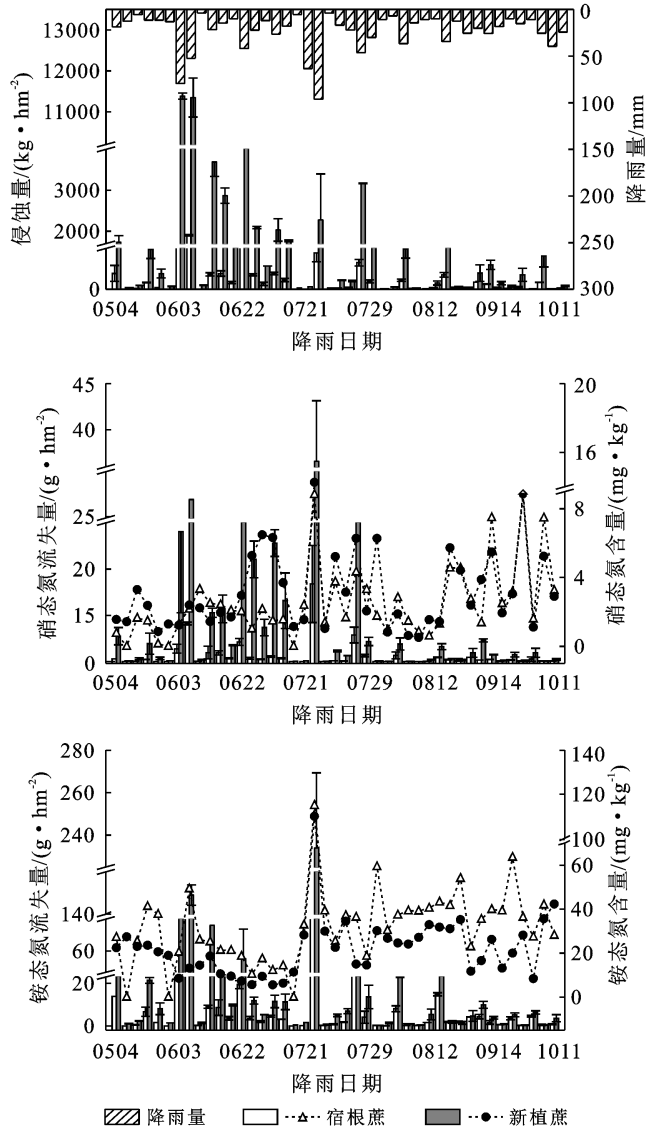


图 3 次降雨下宿根蔗和新植蔗坡面侵蚀及氮素流失特征

由图 3 可知,新植蔗地坡面侵蚀泥沙中铵态氮流失量和铵态氮含量在  $0.2 \sim 233.9 \text{ g/hm}^2$  和  $5.6 \sim 110.0 \text{ mg/kg}$  之间,侵蚀泥沙中的铵态氮流失主要集中在 6—7 月的几场侵蚀性降雨中,其余时段铵态氮流失量主要在  $10.0 \text{ g/hm}^2$  左右变化;侵蚀泥沙中铵态氮含量整体上呈明显的波动,前期(5—6 月)在  $5.5 \sim 27.4 \text{ mg/kg}$ ,后期(7—10 月)在  $8.4 \sim 110.0 \text{ mg/kg}$ 。由图 3 可知,不同种植方式下,宿根蔗地和新植蔗地的侵蚀泥沙中硝态氮流失量和铵态氮流失量表现为:宿根蔗地 < 新植蔗地。

### 3 讨论

#### 3.1 甘蔗种植模式对蔗地坡面土壤侵蚀的影响

不同作物种植方式导致坡面覆盖、田间管理措施及土壤性质存在明显差异<sup>[13]</sup>,从而影响到坡面侵蚀情况。宿根蔗地坡面径流、侵蚀和养分流失量显著低于新植蔗,由不同种植方式下坡面水沙关系可知(图 4),随着径流量的增加,新植蔗地坡面侵蚀量的增幅更为明显。主要是由于宿根蔗生长快,使得整体上,尤其 5—7 月宿根蔗地植被覆盖度明显大于新植蔗地,而较大的植被覆盖度可以有效降低降雨动能,从而避免降雨对表土的直接作用,而密集的植被覆盖度密集的植被可以降低径流速度,减轻径流输沙能力,从而减少坡面径流量和侵蚀量<sup>[18]</sup>;宿根蔗地表土扰动程度较低,土壤较为紧实,抗侵蚀能力较强;此外,宿根蔗在上一年收获后做留根处理,其根系密度高,细根数量多,根系固土效率高,对径流的阻碍作用更强,对降雨入渗的促进作用更强,导致了宿根蔗地土壤抗地表径流侵蚀的能力较强<sup>[30,37]</sup>。与宿根蔗相比,新植蔗种植较晚,两者生长时间不同且生长性状差异较大<sup>[31]</sup>,5—7 月新植蔗植株较为幼小,植被覆盖度低;且新植蔗种植过程中,地表翻耕程度大,表土结构破坏严重,使得新植蔗地坡面抗侵蚀能力低<sup>[13,37]</sup>。Li 等<sup>[29]</sup>在那辣流域的研究结果表明,相比新植蔗地,宿根蔗地有上一年的甘蔗落叶,覆盖更高,促使坡面沟渠侵蚀量明显减少。这与本人的试验研究结果相似。

宿根蔗地和新植蔗地氮素流失随着地表径流侵蚀量、施肥和甘蔗生长变化而波动<sup>[30]</sup>。地表径流和侵蚀是坡地氮素迁移的主要载体,而氮素流失量是氮素浓度与径流侵蚀量共同作用的结果<sup>[3]</sup>。由图 2 可知,径流量与氮素流失量的变化趋势较为一致。不同种植模式下氮素流失量均表现为宿根蔗低于新植蔗,与宿根蔗相比,新植蔗在种植过程时需经过翻耕等人为活动,而梁珂等<sup>[38]</sup>研究表明,翻耕会增加坡面侵蚀及

坡面养分流失概率。坡面径流中的硝态氮和铵态氮流失量随着时间的推进逐渐降低,这可能是由于作物的生长,植株高度和植被覆盖度都发生了变化,作物结构改变了降雨过程中雨滴对表土的作用,削弱了植被覆盖度下氮素流失对径流量侵蚀量的响应<sup>[20]</sup>。

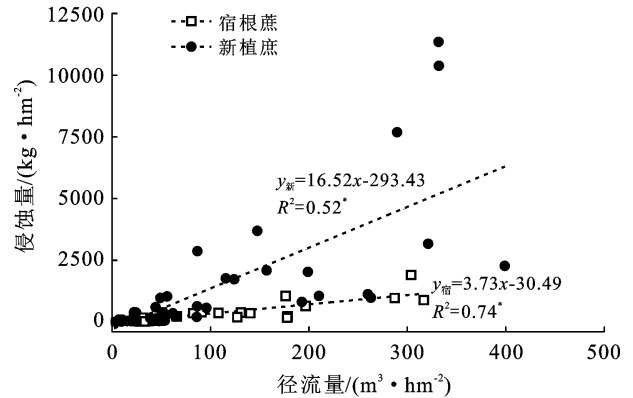


图 4 不同种植方式下坡面水沙关系

#### 3.2 降雨对蔗地坡面土壤侵蚀的影响

降雨是坡面径流产生的主要驱动因子,是造成坡面土壤侵蚀及养分流失的主要影响因素<sup>[39]</sup>。本文研究表明,蔗地坡面径流量、侵蚀量及养分流失量均主要集中在甘蔗 5—7 月,所占比例在  $73.3\% \sim 94.4\%$ ,尤其是 6—7 月,这与杨任翔等<sup>[5]</sup>和 Gomes 等<sup>[40]</sup>的研究结果相似。主要原因之一是研究区 6—7 月的降雨量之和占观测期内总侵蚀性降雨量的  $60.3\%$ ,毛妍婷等<sup>[41]</sup>对江西红壤和陈仕奇等<sup>[42]</sup>对三峡库区小流域的研究均指出坡面径流侵蚀及养分流失集中在降雨高峰期。由图 2—3 可知,蔗地坡面径流侵蚀流失主要集中在 6—7 月的几场侵蚀性降雨,以新植蔗坡面为例,在 0603,0610,0622,0722 次降雨下坡面径流和侵蚀量占坡面径流侵蚀总量的  $18.2\%$  和  $52.9\%$ 。由表 4 可知,不同种植方式下坡面径流侵蚀及其氮流失量均与降雨量、降雨强度( $I_{15}$ ,  $I_{30}$  和  $I_{60}$ )表现为显著相关或极显著正相关关系,而与降雨历时和平均降雨强度整体上无显著相关关系,说明降雨量和降雨强度是影响坡面土壤侵蚀和养分流失的主要因素(表 4)。这与姚一文等<sup>[8]</sup>的研究结果相似。

为进一步筛选影响径流侵蚀的主要降雨因子,将各降雨因子与径流侵蚀和养分流失量进行逐步回归分析。由表 5 可知,在回归拟合过程中,经过自检剔除了降雨历时、平均降雨强度,表明坡面径流、侵蚀量及养分流失量与降雨历时、平均降雨强度无直接的线性关系。通过标准化系数分析<sup>[43]</sup>,可知不同甘蔗种植方式下坡面径流侵蚀及养分对降雨特征的响应存在

不同,  $I_{60}$  是影响宿根蔗地径流量和侵蚀量的主要因子, 而新植蔗地分别受  $I_{30}$  和  $I_{15}$ ;  $I_{30}$  是宿根和新植蔗地径流中的氮流失主要的影响因子, 而降雨量是影响侵蚀泥沙中氮流失的主要因子。

表 4 坡面径流、侵蚀及养分流失量与降雨量( $P$ )、降雨历时( $T$ )及降雨强度( $I$ )相关分析

种植方式	指标	$P/\text{mm}$	$T/\text{h}$	$I/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$I_{15}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$	$I_{60}/(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$
宿根蔗	径流量	0.761**	0.105	0.330*	0.712**	0.744**	0.767**
	径流硝态氮	0.562**	0.067	0.247	0.691**	0.724**	0.716**
	径流铵态氮	0.421**	-0.019	0.275	0.675**	0.680**	0.661*
	侵蚀量	0.628**	0.014	0.369*	0.746**	0.746**	0.752**
	泥沙硝态氮	0.786**	0.247	0.150	0.343*	0.372*	0.426**
	泥沙铵态氮	0.727**	0.172	0.243	0.411**	0.426**	0.470**
新植蔗	径流量	0.743**	-0.017	0.426**	0.760**	0.794**	0.809**
	径流硝态氮	0.429**	-0.141	0.330*	0.658**	0.660**	0.639**
	径流铵态氮	0.298*	-0.098	0.220	0.527**	0.537**	0.519**
	侵蚀量	0.507**	0.011	0.290	0.757**	0.748**	0.737**
	泥沙硝态氮	0.750**	0.124	0.210	0.518**	0.540**	0.577**
	泥沙铵态氮	0.767**	0.221	0.210	0.437**	0.437**	0.472**

注: \* 表示在 0.05 水平上差异显著; \*\* 表示在 0.01 水平上差异显著。

表 5 坡面径流、侵蚀量与养分流失量与降雨量( $P$ )、降雨历时( $T$ )及降雨强度( $I$ )的回归分析

种植方式	指标	因变量	逐步回归方程模型	$R^2$	自变量影响程度
宿根蔗	径流	径流量	$Y = -38.776 + 3.512I_{60} + 2.248P$	0.743	$I_{60} > P$
		硝态氮	$Y = -162.007 + 9.012I_{30} + 4.827P$	0.578	$I_{30} > P$
		铵态氮	$Y = -58.109 + 5.279I_{30}$	0.463	$I_{30}$
	侵蚀	侵蚀量	$Y = -207.683 + 18.230I_{60} + 6.033P$	0.668	$I_{60} > P$
		硝态氮	$Y = -0.827 + 0.063P$	0.618	$P$
		铵态氮	$Y = -10.482 + 0.833P$	0.528	$P$
新植蔗	径流	径流量	$Y = -44.654 - 6.238I_{60} + 3.207P + 6.098I_{30}$	0.787	$I_{30} > I_{60} > P$
		硝态氮	$Y = -25.693 + 17.292I_{30}$	0.436	$I_{30}$
		铵态氮	$Y = -80.206 + 9.479I_{30}$	0.537	$I_{30}$
	侵蚀	侵蚀量	$Y = -1434.384 + 67.757I_{15}$	0.573	$I_{15}$
		硝态氮	$Y = -3.344 + 0.335P$	0.562	$P$
		铵态氮	$Y = -19.877 + 1.820P$	0.589	$P$

注:  $Y$  表示径流量( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )、侵蚀量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )及硝态氮和铵态氮流失量( $\text{g}/\text{hm}^2$ )。样本数量  $N_{\text{宿}} = 40$ ,  $N_{\text{新}} = 43$ 。

## 4 结论

(1) 2021 年 5—10 月宿根蔗和新植蔗地分别发生侵蚀性降雨 40 场和 43 场, 累计侵蚀性降雨 981.8, 1 013.0 mm。次降雨下, 蔗地坡面径流呈波动变化, 整体上新植蔗地坡面径流、侵蚀量高于宿根蔗, 径流量是宿根蔗的 1.0~8.5 倍, 侵蚀量是宿根蔗的 1.1~17.9 倍。不同种植方式下蔗地坡面径流和侵蚀泥沙中的氮素(硝态氮和铵态氮)主要随地表径流流失, 主要流失形态为硝态氮。

(2)  $I_{30}$  和降雨量是影响蔗地坡面径流中的氮素和侵蚀泥沙中的氮素流失的主要降雨因子; 降雨量、降雨强度( $I_{15}$ ,  $I_{30}$  和  $I_{60}$ ), 其中  $I_{60}$  是影响宿根蔗径流

量和侵蚀量的主要降雨因子, 而影响新植蔗坡面径流量和侵蚀量的主要降雨因子是  $I_{30}$  和  $I_{15}$ 。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Zhao Longshan, Fang Qian, Hou Rui, et al. Effect of rainfall intensity and duration on soil erosion on slopes with different microrelief patterns [J]. Geoderma, 2021, 396:115085.
- [2] Guo Shufang, Zhai Limei, Liu Jian, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191:48-56.
- [3] 严磊, 邓旭哲, 薛利红, 等. 不同雨强和植被盖度对稻田径流及氮素流失的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2021, 40 (12):2761-2769.

- [4] 魏文学,谢小立,秦红灵,等.促进南方红壤丘陵区农业可持续发展的复合农业生态系统长期观测研究[J].中国科学院院刊,2019,34(2):231-243.
- [5] 杨任翔,邱凡,郑佳舜,等.赤红壤植蔗坡地坡面径流及溶解态氮磷流失特征[J].生态学报,2022,42(3):904-913.
- [6] 彭宏佳,吴起鑫,任斐鹏,等.喀斯特地区坡面不同土地利用方式水土流失及磷素输出对次降雨特征的响应[J].农业环境科学学报,2018,37(4):756-765.
- [7] 崔璨,王小燕,孙宁婷,等.三峡库区典型农业小流域次降雨产沙过程及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):17-23.
- [8] 姚一文,戴全厚,甘艺贤,等.雨强和地下孔(裂)隙度对喀斯特坡耕地养分流失的影响[J].中国农业科学,2021,54(1):140-151.
- [9] 杨凯,赵军,赵允格,等.生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J].农业工程学报,2019,35(23):135-141.
- [10] 李桂芳,杨任翔,谢福倩,等.不同土地利用方式下赤红壤坡面土壤侵蚀特征[J].水土保持学报,2020,34(2):101-107,230.
- [11] 李叶鑫,吕刚,傅昕阳,等.降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):37-43.
- [12] Muoni T, Koomson E, Öborn I, et al. Reducing soil erosion in smallholder farming systems in East Africa through the introduction of different crop types [J]. *Experimental Agriculture*, 2020,56(2):183-195.
- [13] 徐宁,吴发启,杨一凡,等.大豆调节坡耕地径流和泥沙作用研究[J].水土保持学报,2020,34(3):42-48.
- [14] Pang Z Q, Tayyab M, Kong C B, et al. Continuous Sugarcane planting negatively impacts soil microbial community structure, soil fertility, and sugarcane agronomic parameters [J]. *Microorganisms*, 2021, 9(10):2008-2014.
- [15] 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.
- [16] 赵娅君,吴发启,徐宁,等.不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究[J].水土保持通报,2020,40(6):23-28,35.
- [17] 丁培.模拟降雨下根系密度对土壤侵蚀和侵蚀性的影响[J].水利科学与寒区工程,2022,5(2):40-44.
- [18] 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.
- [19] Lin Qingtao, Xu Qian, Wu Faqi, et al. Effects of wheat in regulating runoff and sediment on different slope gradients and under different rainfall intensities [J]. *Catena*, 2019,183(C):104196.
- [20] 冯小杰,郑子成,李廷轩,等.暴雨条件下紫色土区玉米季坡耕地氮素流失特征[J].中国农业科学,2018,51(4):738-749.
- [21] Zhao J L, Wang Z G, Dong Y F, et al. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,802:149665.
- [22] 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):65-70,78.
- [23] 周一帆,杨林生,孟博,等.中国甘蔗主产区产量差及影响因素分析[J].中国农业科学,2021,54(11):2377-2388.
- [24] 黎静宜,李勇,黄智刚,等.甘蔗集约化种植区施肥显著增加入河硝态氮污染:基于氮氧同位素的流域示踪[J].植物营养与肥料学报,2022,28(1):104-113.
- [25] 谢如林,谭宏伟,周柳强,等.甘蔗种植体系水土及氮磷养分流失研究[J].西南农业学报,2013,26(4):1572-1577.
- [26] 区惠平,周柳强,黄金生,等.长期不同施肥对甘蔗产量稳定性、肥料贡献率及养分流失的影响[J].中国农业科学,2018,51(10):1931-1939.
- [27] 罗兴录,樊吴静,杨鑫.不同作物种植垦作对水土流失影响研究[J].中国农学通报,2014,30(36):232-236.
- [28] Anache J A A, Flanagan D C, Srivastava A, et al. Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,622/623:140-151.
- [29] 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 and Environment*, 2021, 309:107289.
- [30] Li Yong, Abegunrin T P, Guo Hao, et al. Variation of dissolved nutrient exports by surface runoff from sugarcane watershed is controlled by fertilizer application and ground cover [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2020,303:107121.
- [31] 张跃彬,邓军,杨绍林,等.国际上甘蔗栽培的研究进展[J].甘蔗糖业,2021,50(2):1-5,140.
- [32] 广西壮族自治区统计局.广西统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2021.
- [33] 张铁钢,李占斌,李鹏,等.模拟降雨条件下不同种植方式的坡地氮素流失特征[J].水土保持学报,2016,30(1):5-8.
- [34] 张洋,樊芳龄,周川,等.三峡库区农桑配置对地表氮磷流失的影响[J].土壤学报,2016,53(1):189-201.
- [35] 林庆明,丁文峰,张长伟,等.模拟降雨条件下红壤坡面侵蚀产沙水动力学特征[J].水土保持通报,2019,39(2):16-21.



- [12] 刘甲午,葛兆轩,田晓敏,等.华北落叶松各龄级土壤肥力的研究[J].安徽农业科学,2015(43):2156-158,161.
- [13] 董雪,虞毅,高永,等.天然沙冬青平茬复壮技术研究[J].科技导报,2014,32(23):55-61.
- [14] 吉小敏,宁虎森,梁继业,等.典型荒漠与绿洲过渡带人工梭梭林平茬复壮试验研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(12):37-43.
- [15] Xie Hongtao, Wang G G, Yu M. Ecosystem multifunctionality is highly related to the shelterbelt structure and plant species diversity in mixed shelterbelts of Eastern China [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 16: e00470.
- [16] Wu Yan, Wang Wenjie, Wang Qiong, et al. Impact of poplar shelterbelt plantations on surface soil properties in Northeastern China [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, 48(5): 559-567.
- [17] Wang Feng, Pan Xubin, Gerlein-Safdi C, et al. Vegetation restoration in Northern China: A contrasted picture [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(6): 669-676.
- [18] 杨文斌,王晶莹,王晓江,等.科尔沁沙地杨树固沙林密度、配置与林分生长过程初步研究[J].北京林业大学学报,2005(4):33-38.
- [19] 赵文智,刘志民,常学礼.奈曼沙区植被土壤水分状况的研究[J].干旱区研究,1992,9(3):40-44.
- [20] Thiery J M, d'Herbès J M, Valentin C. A model simulating the genesis of banded vegetation patterns in Niger [J]. *Journal of Ecology*, 1995, 83: 497-507.
- [21] Galle S, Peugeot C. Soil Water Spatial Distribution of Tiger Bush in Niger [C] // AGU fall meeting, San Francisco. *Eos Trans*(74).1993, 43:C253.
- [22] 杨文斌,王涛,冯伟,等.低覆盖度治沙的理论及沙漠科
- 技进步[J].中国沙漠,2017,37(1):1-6.
- [23] 杨文斌,郭建英,胡小龙,等.低覆盖度行带式固沙林带间植被修复过程及其促进沙地逆转效果分析[J].中国沙漠,2012,32(5):1291-1295.
- [24] 姜丽娜.低覆盖度行带式固沙林促进带间土壤、植被修复效应的研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
- [25] 罗维成,赵文智,孙程鹏,等.科尔沁沙地樟子松(*Pinus sylvestris*)人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J].中国沙漠,2018,38(1):126-132.
- [26] 乌达巴拉.科尔沁沙地土地利用变化分析及驱动力研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2009.
- [27] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法(II): $\beta$ 多样性的测度方法[J].生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [28] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法(I): $\alpha$ 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994,2(4):231-239.
- [29] 白永飞,许志信,李德新.内蒙古高原针茅草原群落 $\alpha$ 多样性研究[J].生物多样性,2000,8(4):353-360.
- [30] 白永飞,邢雪荣,许志信,等.内蒙古高原针茅草原群落 $\beta$ 多样性研究[J].应用生态学报,2000,11(3):408-412.
- [31] 姜丽娜,杨文斌,卢琦,等.低覆盖度行带式固沙林对土壤及植被的修复效应[J].生态学报,2013,33(10):3192-3204.
- [32] 陈乾,刘凯,王希贤,等.福建柏混交林主要土壤理化性质与土壤含水量的关联研究[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(6):771-780.
- [33] 石星,李卫,杨文斌,等.低覆盖度行带式固沙林对带间小气候的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(10):117-121.
- [34] 杨文斌,王涛,熊伟,等.低覆盖度治沙理论的核心水文原理概述[J].中国沙漠,2021,41(3):75-80.

(上接第128页)

- [36] 水利部水土保持监测中心.径流小区和小流域水土保持监测手册[M].北京:中国水利水电出版社,2015.
- [37] 李浩,韦本辉,黄金玲,等.粉垄对甘蔗根系结构发育及呼吸代谢相关酶活性的影响[J].中国农业科学,2021,54(3):522-532.
- [38] 梁珂,贺小容,何丙辉,等.翻耕除草对不同坡长下紫色土氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(4):7-13.
- [39] Wu Lei, Yen Haw, Ma Xiaoyi. Effects of particulate fractions on critical slope and critical rainfall intensity for runoff phosphorus from bare loessial soil [J]. *Catena*, 2021, 196: 104935.
- [40] Gomes T F, Van de Broek M, Govers G, et al. Runoff, soil loss, and sources of particulate organic carbon delivered to streams by sugarcane and riparian areas: An isotopic approach [J]. *Catena*, 2019, 181: 104083.
- [41] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):26-33.
- [42] 陈仕奇,龙翼,严冬春,等.三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J].环境科学,2020,41(3):1276-1285.
- [43] 李宗勋,李启艳,侯晓龙,等.不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J].水土保持学报,2020,34(1):27-33,40.