

网络出版时间:2020-03-13 09:22 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.09.011
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200312.0911.004.html

模拟降雨条件下烤烟植株对降雨再分配及产流的影响

吕 凯,段颖丹,吴伯志

(云南农业大学 农学与生物技术学院,云南 昆明 650201)

【摘要】【目的】明确烤烟植株对降雨再分配及产流的影响,为坡耕地土壤侵蚀的防治及可持续利用提供理论依据。【方法】采用室内人工模拟降雨法,测定了 40,80 和 120 mm/h 降雨强度下烤烟旺长期的茎秆流、穿透雨、径流和渗漏,并进一步探讨了茎秆流和穿透雨与产流的关系。【结果】茎秆流量、穿透雨量和穿透雨率与降雨强度呈极显著正相关关系,而茎秆流率则与降雨强度呈极显著负相关关系;不同降雨强度下茎秆流率和穿透雨率分别为 24.66%~28.79%和 71.21%~75.34%。当降雨强度为 40 mm/h 时,茎秆流几乎不参与径流形成,当降雨强度为 80 和 120 mm/h 时,茎秆流再分配后形成径流和渗漏的比例分别为 16.90%~20.54%和 79.46%~83.10%;穿透雨再分配后形成径流和渗漏的比例分别为 40.14%~66.19%和 33.81%~59.86%。径流中来源于茎秆流和穿透雨部分的比例分别为 0.82%~10.07%和 89.93%~99.18%,而在渗漏中来源于茎秆流和穿透雨部分的比例分别为 42.19%~44.21%和 55.79%~57.81%。【结论】降雨经烤烟植株再分配后,茎秆流主要形成了渗漏,对地表径流的贡献相对较小;而穿透雨主要形成了径流和渗漏,是两者的主要来源。

【关键词】 烤烟植株;降雨再分配;茎秆流;穿透雨;径流产流;模拟降雨

【中图分类号】 S157.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2020)09-0081-08

Effects of flue-cured tobacco plants on rainfall redistribution and runoff generation with simulated rainfall

LÜ Kai, DUAN Yingdan, WU Bozhi

(Faculty of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agriculture University, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: 【Objective】 The effects of flue-cured tobacco plants on rainfall redistribution and runoff generation were investigated to provide basis for controlling soil erosion and sustainable use of slope land. 【Method】 Stemflow, throughfall, runoff and infiltration were measured indoor by rainfall simulator under different rainfall intensities of 40, 80 and 120 mm/h. The relationships between stemflow, throughfall and runoff were also investigated. 【Result】 Stemflow, throughfall and throughfall ratio had significantly positive correlation with rainfall intensity, and there was remarkable and negative correlation between stemflow ratio and rainfall intensity. The throughfall and stemflow accounted for 24.66%—28.79% and 71.21%—75.34% of total precipitation under different rainfall intensities. The stemflow was partitioned into runoff and infiltration under rainfall intensities of 80 and 120 mm/h, which accounted for 16.90%—20.54% and 79.46%—83.10% of stemflow, respectively. The stemflow was barely changed into runoff under rainfall

〔收稿日期〕 2019-09-23

〔基金项目〕 公益性行业(农业)科研专项(201503119);云南中烟工业有限责任公司重点科技项目(2016YL05)

〔作者简介〕 吕 凯(1984—),男,湖北应城人,高级工程师,在读博士,主要从事作物耕作学与栽培学研究。

E-mail: 378632822@qq.com

〔通信作者〕 吴伯志(1960—),男,云南玉溪人,教授,博士生导师,主要从事作物耕作学与水土保持研究。

E-mail: bozhiwu@outlook.com

intensity of 40 mm/h. The ratios that throughfall was partitioned into runoff and infiltration were up to 40.14%—66.19% and 33.81%—59.86%, respectively. The ratios from stemflow and throughfall were 0.82%—10.07% and 89.93%—99.18% of runoff, and the ratios of stemflow and throughfall to infiltration were up to 42.19%—44.21% and 55.79%—57.81%, respectively. 【Conclusion】 Stemflow is mainly partitioned into infiltration after rainfall redistribution, and it contributes less to surface runoff. Runoff and infiltration mainly come from throughfall.

Key words: flue-cured tobacco; rainfall redistribution; stemflow; throughfall; runoff generation; simulated rainfall

土壤侵蚀是制约坡耕地可持续利用的重要因素之一,它不仅会使土壤理化性状恶化,作物产量和质量降低,而且还会使土地生产力持续下降^[1],而降雨产流则是导致坡耕地土壤侵蚀和养分流失的主要因素^[2]。作物冠层对降雨的再分配作用,可以降低雨水的侵蚀力,增加雨水入渗,减少产流,从而有效抑制土壤侵蚀^[3-5]。坡耕地是云南省重要的农业土地资源,也是土壤侵蚀的主要源头,由于受地理和气候条件的限制,云南省坡耕地农业生产用水主要以自然降雨为主。因此,开展坡耕地作物对降雨再分配及地表产流的影响研究,对降低水土流失、提升雨水利用效率、促进坡耕地可持续利用具有重要的现实意义。

降雨经过植物冠层再分配后主要转化为穿透雨、茎秆流和冠层截留三部分^[6],其中穿透雨和茎秆流到达地表后一部分入渗进入土壤,另一部分则以径流形式存在。对于林木而言,降雨经冠层再分配后,穿透雨量占降雨量比例最高,其次为冠层截留,而茎秆流占比最低^[7-8]。而对于农作物而言,穿透雨和茎秆流是降雨再分配后的主要部分,也是地表径流的主要来源,其占降雨量的比例分别可达 49.4%~85.5%和 13.6%~47.3%,而冠层截留量占比则仅为 0.3%~3.4%^[9-10];随着冠层覆盖度的增加,穿透雨量呈下降趋势,而茎秆流量则呈上升趋势^[11-12]。近年来国内外学者关于冠层对降雨再分配的作用开展了大量研究,但多集中于不同条件下茎秆流、穿透雨和冠层截留量的比例变化^[13-15]以及茎秆流和穿透雨中的养分分布情况^[16-18],而对降雨再分配后茎秆流和穿透雨对地表产流影响的研究则颇为少见。基于此,本研究采用人工模拟降雨的方式,分析不同降雨强度下烤烟旺长期植株对降雨再分配的影响,并进一步探讨降雨再分配后茎秆流和穿透雨与地表产流的关系,以期对烤烟种植区坡耕地土壤侵蚀防治及可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4 月至 6 月在云南省昆明市云南农业大学(102.76°E, 25.13°N)进行。该区域年平均气温为 15 °C,年均日照时数 2 200 h,无霜期 240 d 以上,年降雨量 1 035 mm,全年 85%的降雨量集中于 5—10 月,其中大雨和暴雨较多。土壤类型主要为红壤和紫色土。烤烟为当地的主要经济作物之一。该区域为云南清香型烟叶的核心产区,烤烟常年种植面积约占耕地总面积的 7.60%。

1.2 试验材料与装置

供试烤烟为当地主栽品种 K326。模拟降雨装置由南京南林电子科技有限公司制造,降雨机类型为下喷式,型号为 HQJY,降雨高度 9 m,降雨强度变化范围 15~150 mm/h,雨滴大小为 0.5~1.5 mm,调节精度为 3%,降雨均匀度大于 85%。径流小区采用自制可调节坡度(0°~30°)的土槽,长度、宽度和深度分别为 160,80 和 30 cm,土槽下端上方和底部分别设置有导流管,用于地表径流和地下渗漏的收集(图 1)。供试土壤来自于云南农业大学大田试验场 0~20 cm 耕层,其理化状况为^[19]:pH 值 6.66,有机质含量 23.60 g/kg,全氮含量 0.15 g/kg,全磷含量 0.08 g/kg,全钾含量 0.15 g/kg,碱解氮含量 37.29 mg/kg,速效磷含量 20.36 mg/kg,速效钾含量 83.30 mg/kg。

1.3 试验设计

烤烟于 2018 年 4 月 24 日移栽。在土槽内横坡起垄 2 行,垄体宽 40 cm,垄高 25 cm,土槽上端和下端垄沟宽均为 20 cm,中间垄沟为 40 cm。每垄种植烤烟 2 株,共计种植 4 株,株距和行距分别为 40 cm 和 80 cm,种植完成后将土槽置于室外。由于试验区域烤烟多种植于缓坡地,故将土槽坡度调至 7°。烤烟于 6 月 8 日完成揭膜培土,其余农事操作按照当地烤烟生产习惯进行。

根据试验区域多年的降雨侵蚀力特征^[20]以及气象部门对降雨强度的划分,设计 40, 80 和 120 mm/h 3 个降雨强度,分别模拟大雨、暴雨和特大暴雨。在烤烟移栽后 65 d(旺长期,平均株高 82 cm,叶面积指数为 3.38),将其推入室内进行模拟降雨试验,观测径流量、渗漏量、穿透雨量和茎秆流等指标,每个降雨强度条件下设置 3 种组合处理方式:观测径流量和渗漏量(T1);截取茎秆流后,观测径流量和渗漏量(T2);截取垄沟穿透雨后,观测径流量和渗漏量(T3)。每次降雨观测前,对降雨强度进行率定。降雨开始后,每隔 5 min 采集 1 次径流量和渗漏量,当连续 3 次观测结果基本一致时,正式开始记录,每隔 10 min 取样 1 次,重复 3 次。

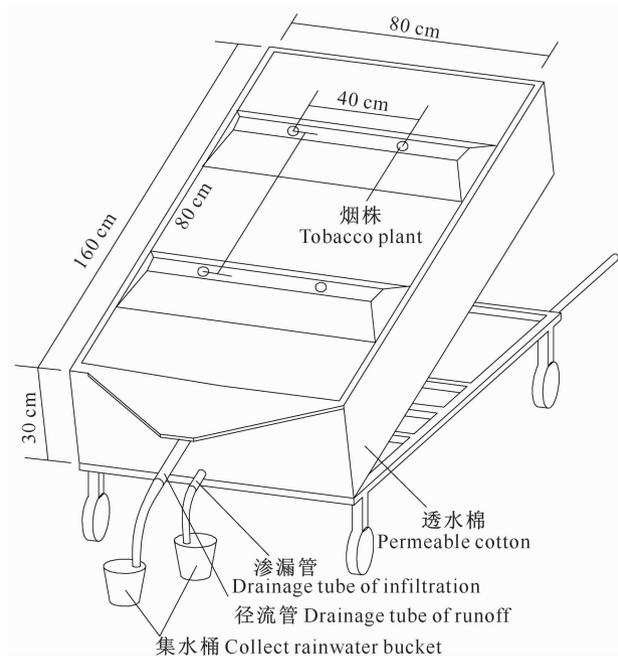


图 1 径流和渗漏测定装置示意图

Fig. 1 Runoff and infiltration measurement

1.4 指标测算

1.4.1 茎秆流量 参照王迪等^[21]测定玉米茎秆流的方法进行。在烤烟茎秆根部距垄面 5 cm 处用聚乙烯薄板呈漏斗状将茎秆包裹住,漏斗下端开口连接直径 1 cm 软管用于引流,软管下端连接集水桶(带盖)。漏斗下端与茎秆和软管接缝处均采用密封胶进行防漏处理。每次取样后,用量筒测量收集到的茎秆流体积(图 2),即为茎秆流量,据之计算茎秆流率(茎秆流量与降雨量之比)。

1.4.2 穿透雨量 (1)总穿透雨量。由于试验正式观测前,植株冠层截留量已达到饱和和状态,再者试验在室内进行,且降雨时湿度较大,因此冠层截留量和

雨水蒸发量可忽略不计。根据水量平衡原理,冠层上方单位时间内降雨量为茎秆流量与穿透雨量之和。因此,总穿透雨量为降雨量与茎秆流量之差,穿透雨率为穿透雨量与降雨量之比。

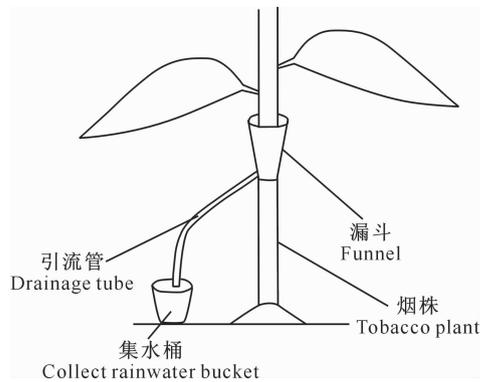


图 2 烤烟茎秆流收集装置示意图

Fig. 2 Stemflow collection device of tobacco stalk

(2)垄沟穿透雨量。在垄沟间放置自制的开口塑料盒用于收集垄沟穿透雨。土槽上端和下端塑料盒长度、宽度和深度分别为 80, 20 和 20 cm,中间垄沟塑料盒长度、宽度和深度分别为 80, 40 和 20 cm,塑料盒宽度不同是为适应不同位置垄沟的宽度。每次取样后,用量筒测量塑料盒中的水量,即为垄沟穿透雨量。

(3)垄体穿透雨量。根据水量平衡原理,总穿透雨量应为垄沟穿透雨和垄体穿透雨之和。因此,垄体穿透雨量为总穿透雨量与垄沟穿透雨量之差。

1.4.3 径流量和渗漏量 在土槽下端的上方和底部导流管套接引流软管至集水桶,用于收集径流和渗漏。每次取样后,用量筒测量体积。

1.4.4 茎秆流和穿透雨再分配 以 T1 处理条件下的径流和渗漏为参照,截取茎秆流后(T2)的径流和渗漏则来源于穿透雨,而 T1 与 T2 处理的径流和渗漏之差即为茎秆流中形成径流和渗漏的部分,故茎秆流和穿透雨中形成径流和渗漏的比例分别可按以下公式计算。

(1)茎秆流再分配。有以下表达式:

$$S_r = (R_{T1} - R_{T2}) / S。$$

式中: S_r 为茎秆流形成径流部分的比例, R_{T1} 为 T1 处理径流量(L), R_{T2} 为 T2 处理径流量(L), S 为茎秆流量(L)。

根据水量平衡原理,有:

$$S_i = 1 - S_r。$$

式中: S_i 为茎秆流形成渗漏部分的比例。

(2)穿透雨再分配。有以下表达式:

$$T_{ro} = R_{T2} / T。$$

式中: T_{ro} 为穿透雨形成径流部分的比例, T 为穿透雨量(L)。

根据水量平衡原理,有:

$$T_i = 1 - T_{ro}。$$

式中: T_i 为穿透雨形成渗漏部分的比例。

1.5 数据处理与分析

利用 Microsoft Office Excel 2016 和 SPSS 24 软件进行数据处理分析,采用 Duncan 法($P=0.05$)

表 1 不同降雨强度下烤烟植株的降雨再分配

Table 1 Rainfall redistribution by flue-cured tobacco canopy under different rainfall intensities

降雨强度/(mm·h ⁻¹) Rainfall intensity	茎秆流量/L Stemflow	茎秆流率/% Stemflow ratio	穿透雨量/L Throughfall	穿透雨率/% Throughfall ratio
40	2.45±0.03 c	28.79±0.37 a	6.04±0.03 c	71.21±0.37 b
80	4.38±0.12 b	25.79±0.69 b	12.60±0.22 b	74.21±0.69 a
120	6.28±0.27 a	24.66±1.09 b	19.18±0.28 a	75.34±1.09 a
相关系数(<i>r</i>) Correlation coefficient	0.996**	-0.909**	0.999**	0.909**

降雨强度/(mm·h ⁻¹) Rainfall intensity	垄沟穿透雨量/L Throughfall on furrow	垄沟穿透雨率/% Ratio of throughfall on furrow	垄体穿透雨量/L Throughfall on ridge	垄体穿透雨率/% Ratio of throughfall on ridge
40	4.89±0.08 c	57.60±0.99 b	1.15±0.06 b	13.61±0.65 a
80	11.08±0.15 b	65.25±0.86 a	1.52±0.20 b	8.96±1.18 b
120	15.88±0.06 a	62.37±2.28 a	3.30±0.57 a	12.97±2.45 a
相关系数(<i>r</i>) Correlation coefficient	0.995**	0.573	0.893**	-0.109

注:同列数据后标不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。* * 代表在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$ level. " * * " indicates significant correlation at $P<0.01$ level.

由表 1 可知,烤烟茎秆流量随降雨强度的上升而增加,两者呈极显著正相关关系($P<0.01$),且不同降雨强度下茎秆流量间差异达到显著水平($P<0.05$),这主要是因为降雨强度越大,单位时间内叶面汇集的雨水量越多,导致沿叶柄至茎秆下流的水量增大;茎秆流率随降雨强度的增加而呈下降趋势,两者呈极显著负相关关系($P<0.01$),与茎秆流量随降雨强度的变化趋势相反。不同降雨强度下的平均茎秆流率为 26.42%。

2.1.2 穿透雨 降雨经烤烟植株冠层再分配后,穿透雨部分主要由垄沟穿透雨和垄体穿透雨两部分组成。由表 1 可知,穿透雨量、垄沟穿透雨量和垄体穿透雨量均随降雨强度的增加而上升,且均与降雨强度呈极显著正相关关系($P<0.01$),这与茎秆流量随降雨强度而变化的趋势一致。穿透雨量和垄沟穿透雨量在不同降雨强度下均存在显著性差异,而垄体穿透雨量在 40 和 80 mm/h 降雨强度下无显著差异,但均显著低于 120 mm/h 降雨强度($P<0.05$)。不同降雨强度下垄沟穿透雨量约为垄体穿透雨量的 4.3~7.3 倍(试验设计中垄体与垄沟面积为 1:1),这说明烤烟旺长期穿透雨主要分布于垄沟,而到达

进行多重比较,采用 Pearson 相关系数法(双侧, $P=0.01$)进行相关性分析。采用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 烤烟植株对降雨再分配的影响

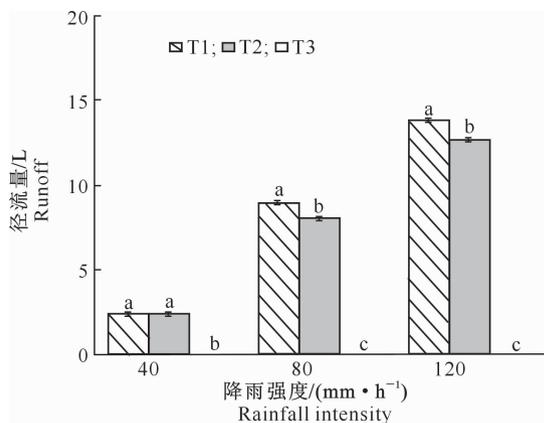
2.1.1 茎秆流 不同降雨强度下烤烟植株茎秆流量及茎秆流率如表 1 所示。

垄体的部分相对较少。穿透雨率随降雨强度的增加而上升,两者呈极显著正相关关系($P<0.01$)(表 1),这与茎秆流率随降雨强度的变化趋势相反。由此可见,在相同降雨强度下,穿透雨与茎秆流呈此消彼长的关系。总体而言,垄沟穿透雨率和垄体穿透雨率分别呈先上升后下降和先下降后上升的趋势,但两者与降雨强度的相关性均未达到显著水平。穿透雨率、垄沟穿透雨率和垄体穿透雨率在不同降雨强度下平均分别为 73.58%,61.74%和 11.84%,其中穿透雨率约为茎秆流率的 2.8 倍,这说明穿透雨是烤烟旺长期冠层降雨再分配后的主要部分。

2.2 降雨再分配对径流的影响

由图 3 可以看出,除 40 mm/h 降雨强度下 T2 处理径流量与 T1 无显著差异外,80 和 120 mm/h 降雨强度下 T2 处理径流量均显著低于 T1 处理($P<0.05$),这说明不同降雨强度下,茎秆流对产流的影响存在差异,当降雨强度较小时,茎秆流对产流影响不显著,而降雨强度较大时茎秆流对产流会产生明显影响。这可能是由于不同降雨强度下茎秆流的速率差异所致。在不同降雨强度下,T3 处理均无径流产生,导致这一现象的原因可能是由于一方面

茎秆穿透雨量占降雨量比例较小(11.84%),下落后渗入土壤形成渗漏,另一方面虽然茎秆流在80和120 mm/h降雨强度下与垄沟穿透雨共同参与了地表径流的形成,但由于垄沟穿透雨被拦截后,茎秆流在茎秆上超渗产生的少量径流汇集于垄沟后最终下渗形成渗漏而无径流产生。由此可见,垄沟穿透雨对产流的影响远大于茎秆流的影响,是径流的主要来源。



图柱上不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著。下图同
Different lowercase letters represent significant difference
at $P < 0.05$ level. The same below

图3 不同降雨强度下烤烟植株降雨再分配对径流量的影响

Fig. 3 Effect of rainfall redistribution on runoff of tobacco plants under different rainfall intensities

降雨经冠层再分配后主要以穿透雨和茎秆流形成径流。因此,径流量中茎秆流和穿透雨部分的占比之和应为100%,T1与T2处理径流量之差即为茎秆流形成径流的部分。据此计算,在40,80和120 mm/h降雨强度下,径流量中茎秆流部分占比分别为0.82%,10.07%和7.75%。根据水量平衡原理可知,径流中穿透雨占比则分别为99.18%,89.93%和92.25%,这进一步说明降雨强度较小时,茎秆流主要通过土壤入渗形成渗漏;而当降雨强度较大时,由于部分茎秆流无法及时入渗而形成径流汇入垄沟,与穿透雨共同参与径流形成,但其对径流的贡献较小。

2.3 降雨再分配对渗漏的影响

由于T1处理渗漏来源于穿透雨和茎秆流,T2处理(截取茎秆流后)渗漏全来源于穿透雨。因此,T2处理的渗漏量即为穿透雨所形成,T1与T2处理渗漏量差值则为茎秆流所产生。据此计算,在40,80和120 mm/h降雨强度下,渗漏量中茎秆流和穿透雨的比例分别为42.19%,42.66%,44.21%

和57.81%,57.34%,55.79%,这表明茎秆流和穿透雨均是渗漏的主要来源。由图4可知,不同降雨强度下T3处理渗漏量显著低于T1($P < 0.05$),这说明垄沟穿透雨是渗漏的主要来源之一。由于截取垄沟穿透雨后,T3处理无产流,使茎秆流全部形成了渗漏,而T1处理条件下有部分茎秆流参与径流形成,并未全部形成渗漏(图3)。因此,垄沟穿透雨形成的渗漏部分应为T1与T3渗漏量之差再减去参与径流形成的茎秆流部分。据此计算,在40,80和120 mm/h降雨强度下,截取垄沟穿透雨后T3处理渗漏量则较T1分别降低了40.68%,36.40%和25.78%,这表明降雨强度越大,垄沟穿透雨对渗漏的影响越小,而对产流的贡献越大。造成该结果的原因可能是,土壤稳定入渗速率在一定范围内随降雨强度的增加呈上升趋势,但上升幅度低于雨强增加幅度^[22-23],这就使单位时间内垄沟雨水入渗量虽然随降雨强度的增加而变大,但其增加幅度却小于雨强增幅,从而导致垄沟穿透雨入渗转化为渗漏的比例呈下降趋势。

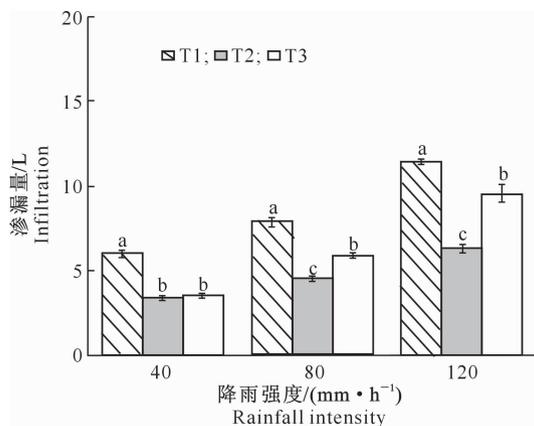


图4 不同降雨强度下烤烟植株降雨再分配对渗漏量的影响

Fig. 4 Effect of rainfall redistribution on infiltration of tobacco plants under different rainfall intensities

2.4 茎秆流和穿透雨的再分配

由表2可知,在降雨强度为40 mm/h时,茎秆流几乎全部转化为渗漏;而当降雨强度为80和120 mm/h时,茎秆流转化为径流和渗漏的比例平均分别为18.72%和81.28%,这进一步说明茎秆流主要通过入渗形成了渗漏。不同降雨强度下,穿透雨转化为径流和渗漏的平均比例分别为56.79%和43.21%;随着降雨强度的增加,穿透雨中参与径流形成的比例呈上升趋势,而参与渗漏形成的比例呈下降趋势,这表明降雨强度越大,穿透雨对径流的贡献越大,而对渗漏的贡献越小。

表 2 茎秆流和穿透雨的再分配结果

Table 2 Redistribution of stemflow and throughfall

降雨强度/(mm·h ⁻¹) Rainfall intensity	茎秆流/% Stemflow		穿透雨/% Throughfall	
	形成径流部分比例 Ratio of partitioning into runoff	形成渗漏部分比例 Ratio of partitioning into infiltration	形成径流部分比例 Ratio of partitioning into runoff	形成渗漏部分比例 Ratio of partitioning into infiltration
40	0.74	99.26	40.14	59.86
80	20.54	79.46	64.04	35.96
120	16.90	83.10	66.19	33.81

3 讨 论

本研究中,烤烟植株茎秆流量和穿透雨量随降雨强度的增加而上升,且均与降雨强度呈极显著正相关关系,这与前人在其他作物上的研究结果^[9-11]一致,但茎秆流率与降雨强度呈极显著负相关。造成上述结果的可能原因是,烤烟旺长期叶片较宽,且主脉粗壮,其抗雨滴冲击的稳定性相对较好,当降雨强度较小时(40 mm/h),雨滴冲击力较小,叶片摆动幅度较小,雨滴被叶面拦截后多沿主脉汇流至叶柄到达茎秆;而当降雨强度较大时(80 和 120 mm/h),雨滴冲击力较强,使叶片摆动幅度较大,增加了雨水从叶缘流失的比率,再者由于叶尖的引流作用,雨滴冲击力和叶片拦截的雨水重力会加大靠近叶尖部分叶面下垂的幅度,改变原有叶面雨水的汇流路径,致使部分雨水沿叶尖流失,这就使茎秆流量的增幅低于雨强增幅,从而导致茎秆流量随降雨强度的增大而增大,茎秆流率却反而降低。本研究结果还表明,降雨经烤烟植株再分配后,其穿透雨主要分布于垄沟,而到达垄体的则较少,这可能是由于烤烟旺长期叶片覆盖度较大,垄体被叶片分层覆盖,垄体上方降雨经叶片拦截后无法直接穿透而汇集于叶面,其中大部分沿主脉汇流至叶柄后形成茎秆流,致使到达垄体的雨水较少;再者,雨水降落至烤烟中上部较小叶片后(未能生长延伸至垄沟),除部分转化为茎秆流外,其余则沿叶尖和叶缘降落至下层叶片,从而被逐步引流至垄沟,致使垄沟穿透雨较高。

土壤入渗性能是影响地表产流和雨水入渗的重要因素^[24],当降雨强度小于土壤入渗速率时,雨水以入渗为主,而当降雨强度大于土壤入渗速率时,无法及时入渗的雨水则在地表汇集形成径流^[25]。本研究中,当降雨强度较小时,茎秆流几乎不参与地表径流的形成;而当降雨强度较大时,约 1/5 的茎秆流参与了地表径流形成,导致这一现象的原因可能是:当降雨强度较小时,因单位时间内茎秆流量小于垄体土壤入渗量,茎秆流全部下渗;随着降雨强度的增大,单位时间内茎秆流量也随之增大,当其大于土壤

入渗量后,垄体开始出现超渗产流并向垄沟汇集,与垄沟穿透雨共同参与地表径流的形成。本试验在观测过程中也发现,80 和 120 mm/h 降雨强度下烤烟茎秆根部周边垄体表面有径流产生并形成了侵蚀沟。

地表径流是导致坡耕地养分流失和土壤侵蚀的主要因素^[2],而入渗的雨水则是坡耕地土壤水分的主要来源。因此,弄清茎秆流和穿透雨的再次分配,对降低坡耕地水土流失具有重要意义。本研究结果表明,穿透雨不仅是烤烟植株降雨再分配的主要组成部分,还是径流和渗漏的主要来源,且降雨强度越大,穿透雨对径流的贡献也越大,而对渗漏的贡献则越小。由此可见,穿透雨是影响坡耕地产流和雨水入渗的关键因素。垄沟穿透雨约占穿透雨的 80%,与垄体穿透雨相比,其对径流和渗漏的影响具有主导作用。因此,在坡耕地烤烟生产中需对穿透雨引起足够重视,尤其是垄沟穿透雨部分。本研究区域内烤烟种植土壤多为黏性红壤,降雨时极易造成表层土壤结皮,降低土壤入渗性能,从而加剧茎秆流转化为地表径流;另外,当降雨强度较大时,茎秆流无法及时入渗而在垄体形成细沟,加剧土壤侵蚀,破坏土壤结构,阻碍作物生长发育。由此可见,虽然本研究中茎秆流在降雨强度较小时几乎不参与地表径流形成,且在 80 和 120 mm/h 降雨强度下其转化为地表径流的比例也不高(平均 18.72%),但茎秆流对土壤侵蚀的影响仍不容忽视。

由于本研究仅观测了 1 个生育时期,不能系统地反映烤烟全生育期坡耕地的降雨再分配及产流状况。因此,在后续工作中需进一步研究烤烟全生育期降雨再分配情况,并进一步探讨茎秆流与穿透雨共同参与土壤侵蚀的机制,以便取得更为系统的成果,用于指导坡耕地土壤侵蚀的防治。

4 结 论

降雨强度与茎秆流量、穿透雨量和穿透雨率呈极显著正相关关系,而与茎秆流率呈极显著负相关关系。同时,茎秆流是渗漏的主要来源之一,且当降

雨强度较小时,茎秆流几乎不参与径流形成;而穿透雨则是径流和渗漏的主要来源,其中以垄沟穿透雨贡献最大。

[参考文献]

- [1] Mwango S B, Msanya B M, Mtakwa P W, et al. Effectiveness of mulching under miraba in controlling soil erosion, fertility restoration and crop yield in the Usambara Mountains, Tanzania [J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(4): 1266-1275.
- [2] Napoli M, Dalla M A, Zanchi C A, et al. Assessment of soil and nutrient losses by runoff under different soil management practices in an Italian hilly vineyard [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 168: 71-80.
- [3] Frasson R P D M, Krajewski W F. Characterization of the drop-size distribution and velocity-diameter relation of the throughfall under the maize canopy [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1244-1251.
- [4] Liu J, Liu W, Zhu K. Throughfall kinetic energy and its spatial characteristics under rubber-based agroforestry systems [J]. *Catena*, 2018, 161: 113-121.
- [5] Thompson A, Davis J D, Oliphant A J. Surface runoff and soil erosion under eucalyptus and oak canopy [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(8): 1018-1026.
- [6] Zhang Y, Wang X, Hu R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, Northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1084-1095.
- [7] 孙忠林, 王传宽, 王兴昌, 等. 两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2014, 34(14): 3978-3986.
- Sun Z L, Wang C K, Wang X C, et al. Rainfall redistribution patterns and their influencing factors of two temperate deciduous forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(14): 3978-3986.
- [8] 胡珊珊, 于静洁, 胡 堃, 等. 华北石质山区油松林对降水再分配过程的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30(7): 1751-1757.
- Hu S S, Yu J J, Hu K, et al. Impacts of Chinese Pine (*Pinus tabulaeformis*) plantations on rainfall redistribution processes: a case study for the mountainous area of North China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1751-1757.
- [9] 马 波, 马 璠, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 136-146.
- Ma B, Ma F, Li Z B, et al. Effect of crops on rainfall redistribution processes under simulated rainfall [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(16): 136-146.
- [10] 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 Z 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.
- [11] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米植株对降雨再分配过程的影响 [J]. *中国农业科学*, 2011, 44(12): 2608-2615.
- Lin D J, Zheng Z C, Zhang X Z, et al. Study on the effect of maize plants on rainfall redistribution processes [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(12): 2608-2615.
- [12] 郑子成, 李廷轩, 张锡洲, 等. 模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配的作用 [J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 72-76.
- Zheng Z C, Li T X, Zhang X Z, et al. Effect of maize plants on water distribution under the condition of simulated rainfall [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(4): 72-76.
- [13] 马 波, 李占斌, 马 璠, 等. 模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配过程的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 497-507.
- Ma B, Li Z B, Ma F, et al. Effects of maize plants on the redistribution of water under simulated rainfall conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(2): 497-507.
- [14] Ahmed A, Tomar J, Mehta H, et al. Throughfall, stemflow and interception loss in *Grewia optiva* and *Morus alba* in North-west Himalayas [J]. *Tropical Ecology*, 2017, 58(3): 507-514.
- [15] Zheng J, Fan J, Zhang F, et al. Throughfall and stemflow heterogeneity under the maize canopy and its effect on soil water distribution at the row scale [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 1367-1382.
- [16] 胡 悦, 满秀玲, 魏 红. 降雨特征对兴安落叶松林降雨再分配过程中钾元素影响分析 [J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 307-314.
- Hu Y, Man X L, Wei H. Analysis on the effects of rainfall characteristics on potassium content in *Larix gmelinii* forest during rainfall redistribution [J]. *Forest Research*, 2017, 30(2): 307-314.
- [17] van Stan J T, Stubbins A. Tree-DOM: Dissolved organic matter in throughfall and stemflow [J]. *Limnology and Oceanography Letters*, 2018, 3(3): 199-214.
- [18] Lombardo L, Trujillo C, Vanwallegem T, et al. Organic carbon fluxes by precipitation, throughfall and stemflow in an olive orchard in Southern Spain [J]. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2018, 152(5): 1039-1047.
- [19] 欧阳铨人, 吴伯志, 吴开贤, 等. 玉米间作马铃薯及起垄的水土保持效应 [J]. *西南农业学报*, 2018, 31(9): 1802-1810.
- Ouyang C R, Wu B Z, Wu K X, et al. Effect of ridging on soil erosion under maize and potato intercropping in Southwest China [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 31(9): 1802-1810.
- [20] 赵平伟, 郭 萍, 李成武, 等. 云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(12): 2135-2141.
- Zhao P W, Guo P, Li C W, et al. Characteristic analysis of rainfall erosivity at each level in Yunnan province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(12): 2135-2141.

- [21] 王 迪,李久生,饶敏杰. 玉米冠层对喷灌水量再分配影响的田间试验研究 [J]. 农业工程学报,2006,22(7):43-47.
Wang D,Li J S,Rao M J. Sprinkler water distributions as affected by corn canopy [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2006,22(7):43-47.
- [22] 黄 俊,吴普特,赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响 [J]. 农业工程学报,2010,26(10):29-37.
Huang J,Wu P T,Zhao X N. Impact of slope biological regulated measures on soil water infiltration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2010,26(10):29-37.
- [23] 胡 尧,侯雨乐,李 懿. 模拟降雨入渗对岷江流域红壤坡面产流产沙的影响 [J]. 水土保持学报,2016,30(2):62-67.
Hu Y,Hou Y L,Li Y. Effect of infiltration under simulated rainfall on the runoff and sediment yield of red soil slope in the Minjiang River Valley of Sichuan [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(2):62-67.
- [24] 耿晓东,郑粉莉,张会茹. 红壤坡面降雨入渗及产流产沙特征试验研究 [J]. 水土保持学报,2009,23(4):39-43.
Geng X D,Zheng F L,Zhang H R. Effect of rainfall intensities and slope gradients on characteristics of rainfall infiltration, runoff and sediment on red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(4):39-43.
- [25] Ojha R,Corradini C,Morbidelli R, et al. Effective saturated hydraulic conductivity for representing field-scale infiltration and surface soil moisture in heterogeneous unsaturated soils subjected to rainfall events [J]. Water,2017,9(2):1-17.

(上接第 72 页)

- [26] 李晓锋,朱红芳,朱玉英,等. 不结球白菜抽薹开花性状的主基因+多基因遗传分析 [J]. 核农学报,2016,30(12):2318-2325.
Li X F,Zhu H F,Zhu Y Y, et al. Inheritance of major gene plus polygene underlying bolting and flowering traits in pak-choi [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2016,30(12):2318-2325.
- [27] 张郎郎,刘 斌,李俊星,等. 榨菜瘤状茎膨大性状遗传分析 [J]. 核农学报,2014,28(1):22-28.
Zhang L L,Liu B,Li J X, et al. Genetic analysis of swelling traits of tumor-like stems in tuber mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. et Coss. var. *tumida* Tsen et Lee] [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2014,28(1):22-28.
- [28] 周富亮. 甜玉米茎秆抗倒伏相关性状的遗传分析及 QTL 定位 [D]. 广州:仲恺农业工程学院,2019:44-45.
Zhou F L. Genetic analysis and QTL mapping of lodging resistance traits in stem of sweet corn [D]. Guangzhou:Zhongkai University of Agriculture and Engineering,2019:44-45.
- [29] 李得孝,员海燕,武玉华,等. 玉米抗倒伏性状的遗传分析 [J]. 西北农业学报,2004,13(2):43-46.
Li D X,Yuan H Y,Wu Y H, et al. Analysis of heredity in maize for lodging resistance [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica,2004,13(2):43-46.
- [30] Stojšin R,Ivanović M,Kojić L, et al. Inheritance of grain-yield and several stalk characteristics significant in resistance to stalk lodging in maize (*Zea mays* L.) [J]. Maydica,1991,36:75-82.