

耕作措施对玉米生长期黄壤坡耕地径流及 可溶性有机碳流失的影响

安龙龙, 郑子成, 王永东, 李廷轩, 杨李娇

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 为探明黄壤坡耕地不同耕作措施下径流及可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)迁移途径与流失特征。以顺坡垄作、平作和横坡垄作措施下玉米种植坡耕地为研究对象, 采用野外径流小区监测与室内分析相结合的方式, 探讨自然降雨条件下坡耕地地表径流、壤中流及其 DOC 流失特征。结果表明: (1)种植玉米坡耕地径流量及 DOC 通量均受雨量等级影响显著, 随雨量等级增大而增大, 且玉米成熟期流失量均最大。(2)地表径流、0—20 cm 壤中流和 20—40 cm 壤中流分别占总径流量的 78.98%, 9.05%, 11.97%, DOC 流失通量分别占总通量的 74.90%, 11.97%, 13.13%。(3)横坡垄作 DOC 流失量显著小于顺坡垄作, 横坡垄作径流量分别是平作的 0.93 倍, 是顺坡垄作的 0.86 倍; 横坡垄作 DOC 通量是平作的 0.85 倍, 是顺坡垄作的 0.79 倍。雨量等级增加将显著加剧玉米种植坡耕地径流及 DOC 流失, 研究区玉米成熟期径流及 DOC 流失最为严重, 地表径流是坡面径流及 DOC 流失的主要途径, 横坡垄作措施可以有效减少坡面径流及 DOC 流失。

关键词: 可溶性有机碳; 耕作措施; 玉米生长期; 地表径流; 壤中流

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0075-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.05.011

Effects of Tillage Practices on Runoff and Dissolved Organic Carbon Loss from Yellow Soil Sloping Farmland During Maize Growth Periods

AN Longlong, ZHENG Zicheng, WANG Yongdong, LI Tingxuan, YANG Lijiao

(College of Resource Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130)

Abstract: The purpose of this study was to explore the migration path and loss characteristics of runoff and dissolved organic carbon (DOC) in sloping farmland of yellow soil at each maize growth period under different tillage measures. Taking the down slope ridge planting, flat planting and cross ridge planting as the research object, the surface runoff, interflow and DOC loss under natural rainfall were discussed by combining field runoff plot and laboratory analysis. The results showed that: (1) The slope runoff and DOC flux at each growth stage of maize were significantly affected by rainfall levels, and increased with the increase of rainfall levels and the losses were the largest at maturity. (2) The surface runoff, interflow of 0—20 cm and interflow of 20—40 cm accounted for 78.98%, 9.05% and 11.97% of the total runoff respectively, and DOC flux accounted for 74.90%, 11.97% and 13.13% of the total loss flux respectively. (3) The amount of DOC loss on the slope of cross ridge planting was significantly less than that of down slope ridge planting, and the runoff of cross ridge planting was 0.93 times that of flat planting and 0.86 times that of down slope ridge planting. The DOC flux of cross ridge planting was 0.85 times that of flat planting and 0.79 times that of down slope ridge planting. The increase of rainfall levels would significantly aggravate the slope runoff and DOC loss. Surface runoff and DOC flux had the largest loss during maize maturity in the study area and the surface runoff was the main way of slope runoff and DOC loss, the cross ridge planting could effectively reduce slope runoff and DOC loss.

收稿日期: 2022-01-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41271307)

第一作者: 安龙龙(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事养分流失及环境效应研究。E-mail: anlonglong97@163.com

通信作者: 郑子成(1976—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zichengzheng@aliyun.com

Keywords: dissolved organic carbon; tillage measures; maize growth periods; surface runoff; interflow

可溶性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)是土壤碳素中极为活跃的化学组分之一,易受径流对土壤的浸提作用而发生迁移,从而造成土壤碳库的损失,加速土壤“碳排放”,致使大气 CO_2 浓度升高^[1]。坡耕地是水土流失的主要策源地,坡面水土资源及有机碳流失受到降雨特征、植被覆盖和耕作措施等方面的影响显著^[2-3]。有研究^[4]表明,降雨是诱发径流产生和养分流失的主要驱动力。随降雨强度的增大,坡面径流中碳素流失量增大,碳素流失量与降雨强度之间存在明显线性关系^[5]。降雨过程中,植被可以对坡面起到良好的保护作用。提高植被覆盖度,可以抑制径流冲刷,减轻降雨对土壤颗粒有机碳的浸提作用,植被覆盖度的提高有效防止了土壤中有机碳的流失^[6]。合理的耕作措施不仅可有效减少坡面水土流失,也有利于土壤碳固持^[7]。横垄措施作为良好的保护性耕作措施之一,能够有效控制地表径流,减少坡面养分流失^[8]。黄壤是四川省旱坡耕地第二大土壤类型^[9],主要分布在东部盆地及其盆周山区,区域内水土流失较为严重^[10]。玉米作为该区域主栽作物,具有生育期与降雨期相重叠的特点。目前学者虽开展了大量相关研究,但多集中于紫色土区、红壤区、黄土区等,且多采用人工模拟降雨的方法,而针对山地黄壤区的研究较少,且自然降雨、植被覆盖存在动态变化差异,不同耕作措施下坡耕地 DOC 流失特征尚不明确。鉴于此,本研究以黄壤坡耕地为对象,采用野外径流小区定位监测与室内分析相结合的方法,开展自然降雨条件下不同耕作措施下玉米生长期坡耕地有机碳流失特征研究,并就不同耕作措施间径流及 DOC 流失差异进行分析,以期服务于山地黄壤区坡耕地有机碳流失有效防控与农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川农业大学教学科研园内($31^{\circ}00'34''\text{N}$, $103^{\circ}36'52''\text{E}$),地处岷江上游与中游结合部的出山口,隶属于都江堰市灌口镇。属中亚热带湿润气候区,多年平均降水量 1 218.4 mm,夏玉米为当地主栽作物。

土壤类型为黄壤,砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 36.30%, 22.50%, 41.20%, pH 为 6.92, 土壤有机碳、全氮含量分别为 11.69, 1.46 g/kg, 土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 26.18, 67.92, 69.19 mg/kg。

1.2 研究方法

1.2.1 径流小区 基于研究区野外实地调查,结合

当地坡耕地分布特点,设置试验小区为 $4\text{ m} \times 2\text{ m}$,坡度设置为 15° 。基于研究区降雨特征和黄壤特点,径流小区设置地表径流和壤中流(0—20, 20—40 cm)收集装置(图 1)。

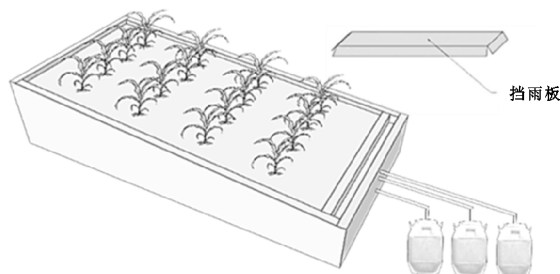


图 1 径流小区示意

根据当地农耕习惯,设置顺坡垄作、平作和横坡垄作 3 种措施,垄高 20 cm,垄宽 50 cm,垄距 90 cm。每种措施设 3 个重复,共计 9 个径流小区。于 2020 年 4 月上旬,供试玉米品种为当地主栽品种“资玉 22 号”,采用垄面穴播,单行双株种植。每个小区栽种 16 株,株距 45 cm,行距 90 cm。播种前施基肥尿素(N 46.4%) 140 kg/hm^2 ,过磷酸钙(P_2O_5 12%) 75 kg/hm^2 和氯化钾(K_2O 60.0%) 75 kg/hm^2 ,于玉米拔节期追施尿素 140 kg/hm^2 ,其他管理措施与当地农耕习惯一致。

1.2.2 测定项目及方法 降雨特征:降雨测量采用雨量筒法;根据中国气象局颁布的降雨等级划分标准(GB/T 28592—2012)^[11]划分雨量等级。

径流量:采用体积法测定地表径流量和壤中流量。待水体静置澄清后用 250 mL 聚乙烯塑料瓶分别采集地表径流与壤中流样。

DOC 质量浓度测定:经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜过滤后,采用总有机碳分析仪(Vario TOC)测定^[12]。

1.2.3 数据处理及分析 可溶性有机碳流失通量 Q 的计算公式为:

$$Q = C \times q$$

式中: Q 为径流可溶性有机碳迁移通量(mg/m^2); C 为径流可溶性有机碳迁移质量浓度(mg/L); q 为单位面积径流量(L/m^2)。

试验数据采用 SPSS 22.0 软件进行统计分析,选择 LSD 法进行多重比较,采用 Origin 2018 和 Excel 2016 软件进行图表制作。

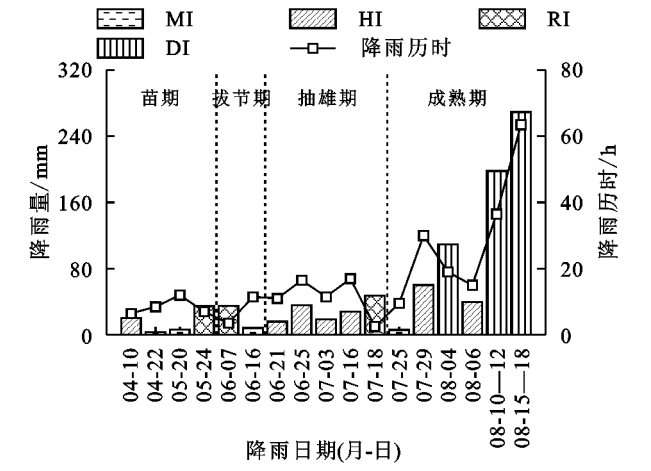
2 结果与分析

2.1 玉米生长期坡耕地径流特征

2.1.1 坡耕地降雨特征 研究区玉米全生育期共监测到侵蚀性降雨 17 场,其中 4 场中雨、7 场大雨、3 场暴雨和 3 场大暴雨。由图 2 可知,中雨主要出现于玉

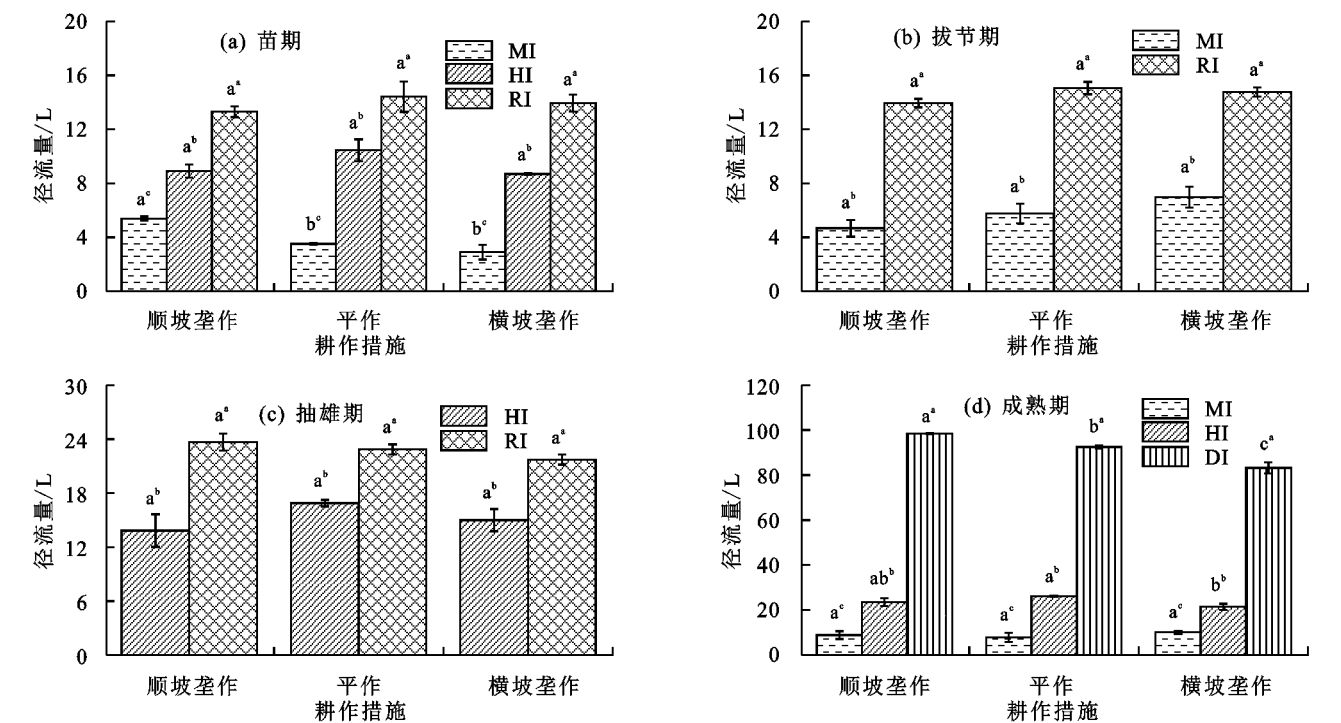
米苗期,大雨主要出现于抽雄期,暴雨除玉米成熟期外均有出现,大暴雨全部出现于玉米成熟期。玉米生长期次降雨量 7.45~273.27 mm,累计降雨量达 1 005.70 mm,拔节期降雨场次最少,降雨量最小;成熟期降雨场次最多,降雨量最大,成熟期降雨量占总降雨量的 69.27%。

2.1.2 地表径流特征 由图 3 可知,随玉米生育期推进,地表径流总体表现为成熟期>抽雄期>拔节期、苗期,玉米各生育期地表径流受雨量等级影响显著。玉米苗期,中雨等级下顺坡垄作地表径流显著高于其他耕作措施。玉米成熟期,大雨等级下平作地表径流显著高于横坡垄作,大暴雨等级下则呈现出顺坡垄作>平作>横坡垄作的趋势,其中顺坡垄作与平作地表径流分别是横坡垄作的 1.18,1.11 倍。



注:MI表示中雨等级;HI表示大雨等级;RI表示暴雨等级;DI表示大暴雨等级。下同。

图2 玉米生长期降雨特征



注:图柱上不同小写字母表示同一生育期内不同耕作措施差异显著($p<0.05$);上标不同小写字母表示同一生育期不同雨量等级间差异显著($p<0.05$)。下同。

图3 不同耕作措施下玉米季地表径流量变化特征

2.1.3 壤中流特征 由图 4 可知,随玉米生育期推进,0—20 cm 壤中流总体表现为成熟期>抽雄期、苗期>拔节期。顺坡垄作 0—20 cm 壤中流表现出随雨量等级增加而增加的趋势,平作除抽雄期、横坡垄作在成熟期表现出相同的变化趋势。玉米苗期,暴雨等级下 0—20 cm 壤中流呈现出平作>横坡垄作的现象。玉米拔节期暴雨、抽雄期和成熟期大暴雨等级下 0—20 cm 壤中流表现出顺坡垄作>平作、横坡垄作的趋势,顺坡垄作分别是平作的 2.02,1.73,1.57 倍,是横坡垄作的 2.10,2.38,1.55 倍。

由图 5 可知,随玉米生育期推进,20—40 cm 壤中流呈现出成熟期显著大于其他生育期的现象。顺

坡垄作 20—40 cm 壤中流表现出随雨量等级增加而增加的趋势,平作与横坡垄作仅在成熟期表现出随雨量等级增加而增加。玉米抽雄期,暴雨等级下 20—40 cm 壤中流呈现出顺坡垄作>平作的现象,顺坡垄作是平作的 3.26 倍。玉米成熟期中雨、大雨等级下表现为顺坡垄作>平作的现象。玉米成熟期大暴雨等级下表现出顺坡垄作>平作、横坡垄作的趋势,顺坡垄作是平作的 1.79 倍,是横坡垄作的 1.77 倍。

2.2 玉米生长期坡耕地 DOC 流失特征

2.2.1 地表径流 DOC 流失通量 由图 6 可知,玉米生长期地表径流 DOC 通量与地表径流的变化趋势较为一致,玉米各生育期地表径流 DOC 流失通量受

雨量等级影响显著,均随雨量等级的增加而呈增加的趋势。玉米苗期,大雨、暴雨等级下顺坡垄作 DOC 流失通量显著高于其他耕作措施。玉米拔节期,中雨等级下平作 DOC 流失通量显著低于其他耕作措施。玉米抽雄期,大雨等级下顺坡垄作 DOC 流失通量显著

高于其他耕作措施。玉米成熟期,中雨等级下 DOC 流失通量表现为平作>横坡垄作的现象,大雨等级下 DOC 流失通量却表现为平作>顺坡垄作、横坡垄作的现象。经分析可知,大暴雨等级下顺坡垄作 DOC 流失通量是横坡垄作的 1.19 倍。

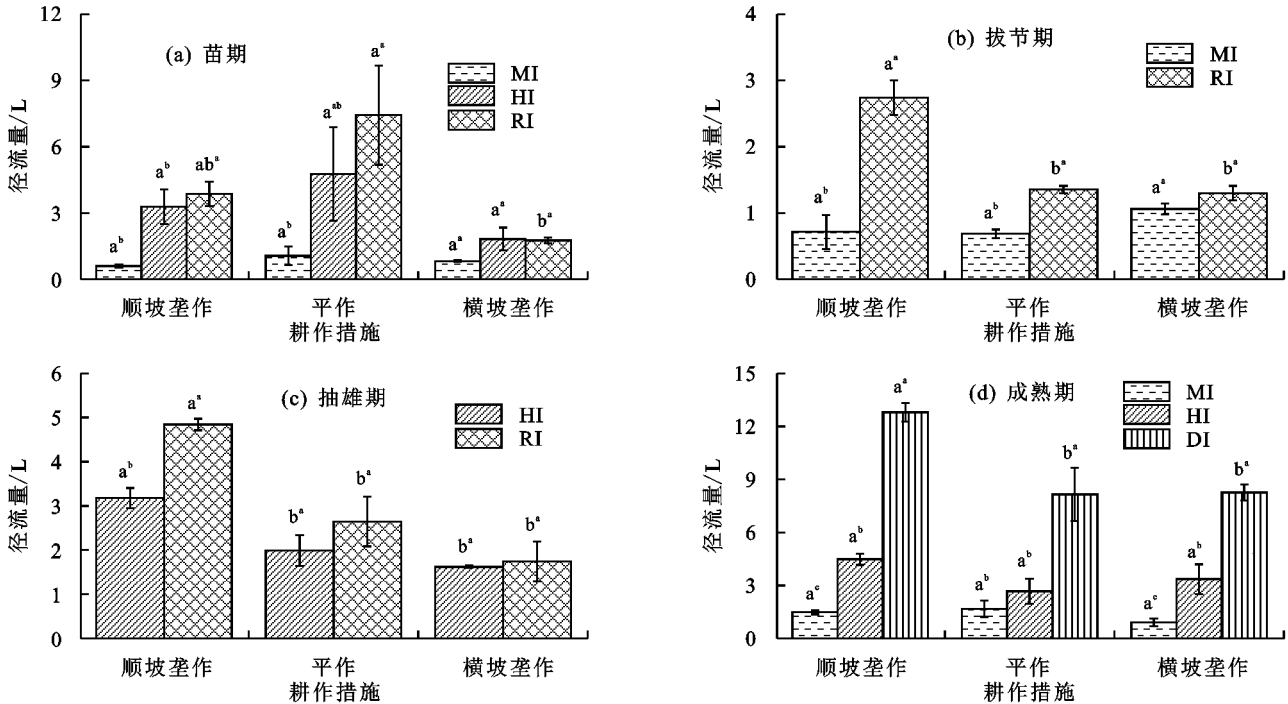


图 4 不同耕作措施下玉米季 0—20 cm 壤中流量变化特征

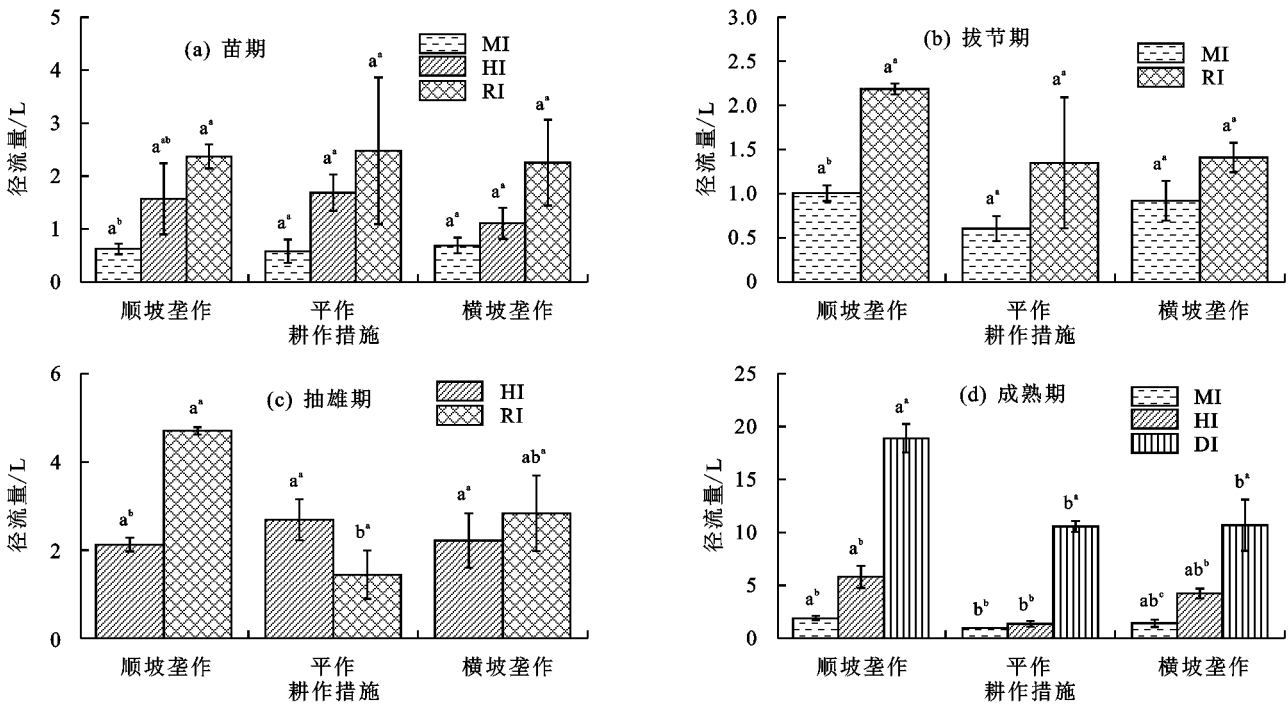


图 5 不同耕作措施下玉米季 20—40 cm 壤中流量变化特征

2.2.2 壤中流 DOC 流失通量 由图 7 可知,0—20 cm 壤中流 DOC 通量呈现成熟期显著大于其他生育期的现象。除抽雄期外,玉米各生育期 DOC 通量随雨量等级增加而呈增加趋势。玉米苗期,大雨等级下 DOC 通量表现为平作>顺坡垄作、横坡垄作,暴雨等

级下表现为顺坡垄作>横坡垄作。玉米拔节期,暴雨等级下 DOC 通量表现为顺坡垄作>平作、横坡垄作。玉米抽雄期,大雨等级下横坡垄作显著小于其他耕作措施,暴雨等级下顺坡垄作显著大于其他耕作措施。玉米成熟期,大雨等级下表现为顺坡垄作>平

作、横坡垄作,顺坡垄作流失量分别是平作的 2.22 倍,是

横坡垄作的 1.86 倍。

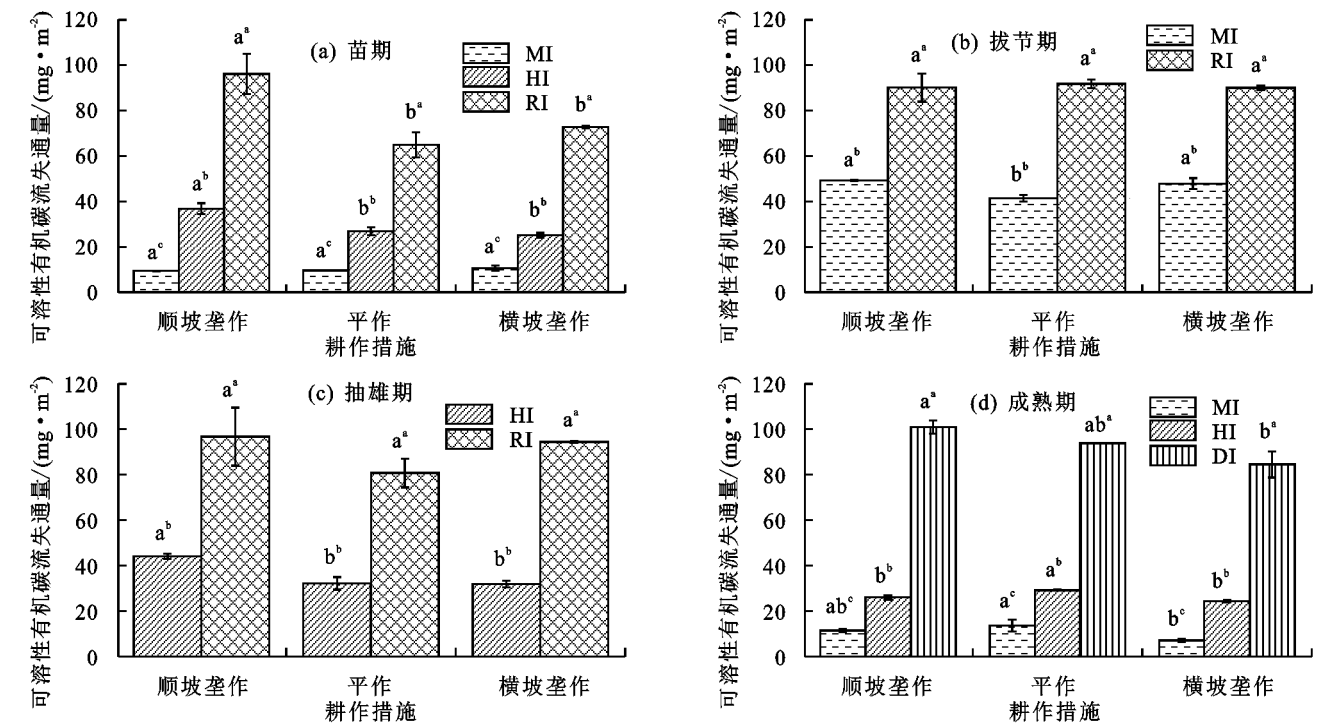


图 6 不同耕作措施下玉米季地表径流可溶性有机碳流失通量特征

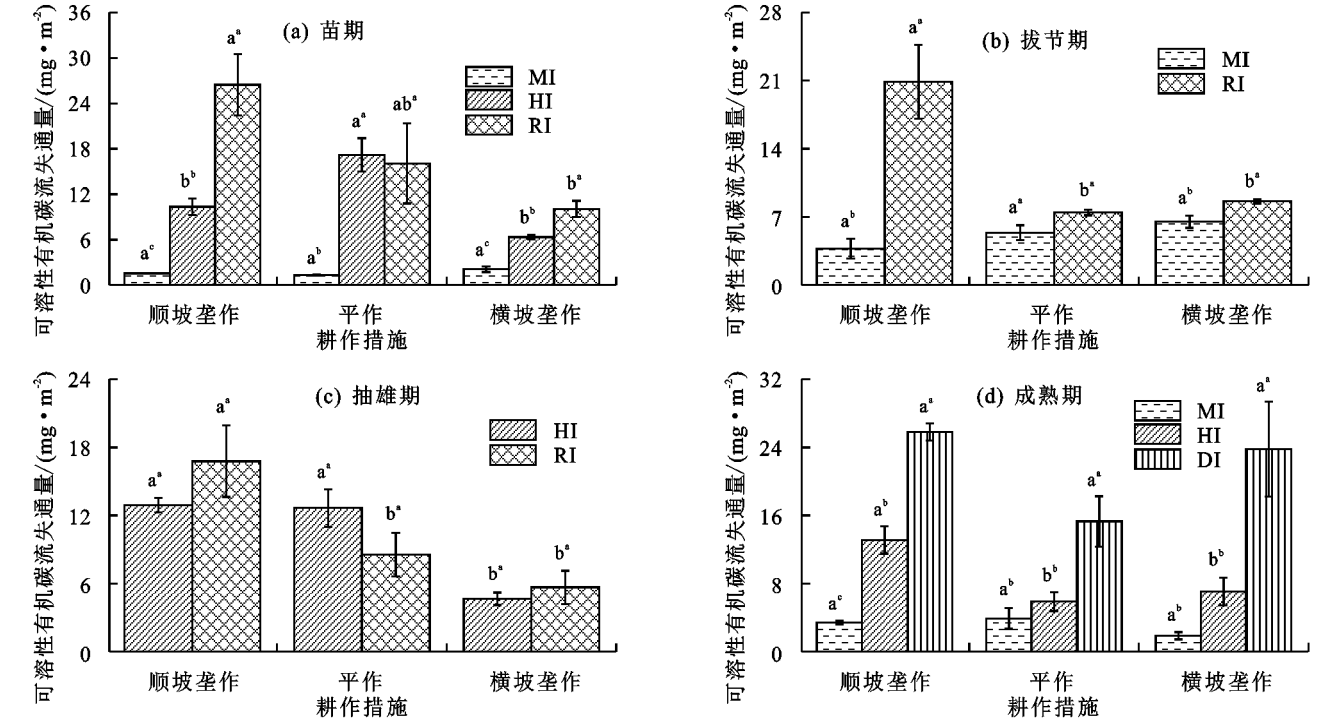


图 7 不同耕作措施下玉米季 0—20 cm 壤中流可溶性有机碳流失通量特征

由图 8 可知,20—40 cm 壤中流 DOC 通量呈现成熟期显著大于其他生育期的现象。顺坡垄作 DOC 通量随雨量等级增加而增加,平作在拔节期,横坡垄作在苗期、成熟期表现出相同的趋势。玉米拔节期,暴雨等级下 20—40 cm 壤中流 DOC 通量表现为顺坡垄作显著大于横坡垄作。玉米成熟期,中雨、大暴雨等级下顺坡垄作 DOC 通量显著大于其他措施,顺坡垄作径流量分别是平作的 2.15,1.90 倍,是横坡垄作的 1.93,2.06 倍。

2.3 玉米生长期径流与 DOC 通量的关系

由表 1 可知,玉米全生育期地表径流 DOC 流失量占总流失量的 66.07%~82.64%,0—20 cm 壤中流 DOC 流失量占总流失量的 7.04%~21.86%,20—40 cm 壤中流的 DOC 流失量占总流失量的 6.80%~17.84%。顺坡垄作与横坡垄作坡面通过地表径流流失的 DOC 在玉米拔节期最高,平作坡面通过地表径流流失的 DOC 在玉米成熟期最高。

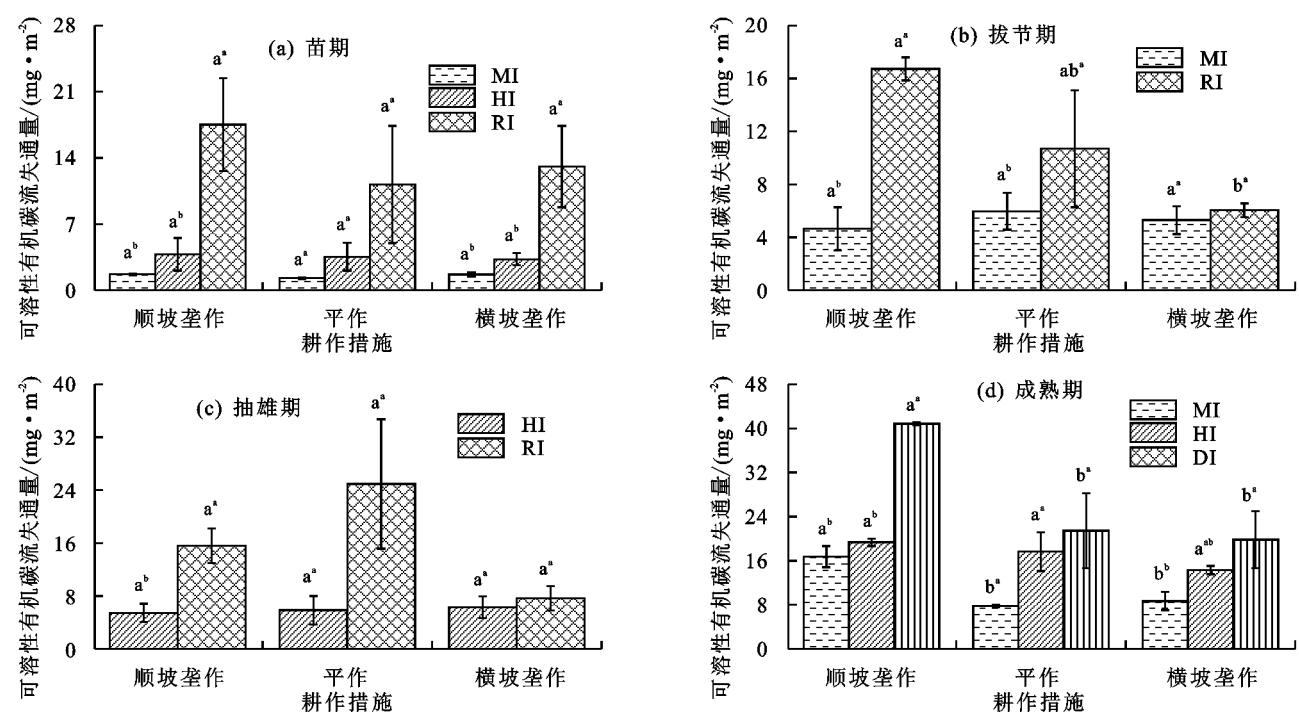
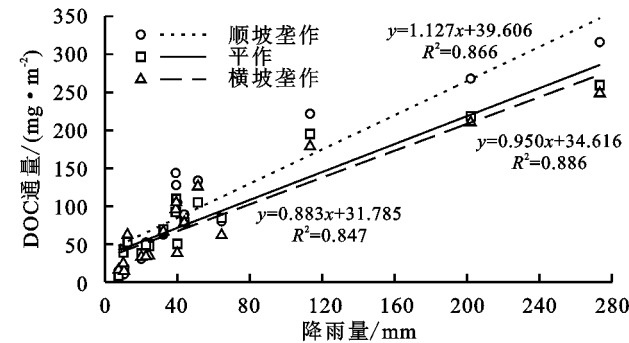


图 8 不同耕作措施下玉米季 20—40 cm 壤中流可溶性有机碳流失通量特征

表 1 不同途径 DOC 流失量及流失比例

耕作措施	生育期	不同流失途径 DOC 流失量/ $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-2})$			不同流失途径占 DOC 流失比例/%		
		地表径流	0—20 cm 壤中流	20—40 cm 壤中流	地表径流	0—20 cm 壤中流	20—40 cm 壤中流
顺坡垄作	苗期	151.80	43.45	24.71	69.01	19.75	11.24
	拔节期	139.42	24.08	21.38	75.41	13.03	11.56
	抽雄期	272.94	68.42	30.88	73.32	18.38	8.30
	成熟期	732.92	107.08	177.89	72.00	10.52	17.48
平作	苗期	111.07	35.92	17.30	67.61	21.86	10.53
	拔节期	133.09	16.20	16.67	80.19	9.76	10.05
	抽雄期	209.49	59.20	48.38	66.07	18.67	15.26
	成熟期	706.80	61.63	107.40	80.70	7.04	12.26
横坡垄作	苗期	119.27	22.58	19.73	73.82	13.97	12.21
	拔节期	137.97	17.63	11.35	82.64	10.56	6.80
	抽雄期	221.91	24.53	51.09	74.58	8.25	17.17
	成熟期	618.66	87.39	96.73	77.06	10.89	12.05

由图 9 可知,玉米生育期内 DOC 通量表现出随降雨量、径流量增加而增加的趋势,总 DOC 通量与



降雨量、径流量均呈现线性关系,拟合系数 R^2 均大于 0.81,拟合度较高,均呈极显著正相关。

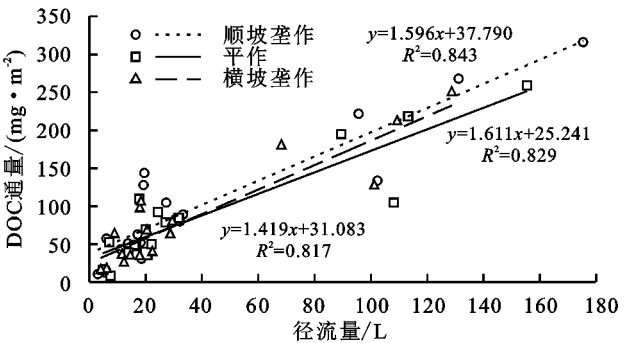


图 9 降雨量和径流量与坡面 DOC 通量的关系

3 讨论

径流量随雨量等级的增加而增加,在玉米成熟期径流量最大。有研究^[3]表明,坡面水土流失主要受到

极强降雨、极大降雨量的降雨类型所致,小雨量条件下黄壤坡面径流与降雨特征相关性极低,随降雨级别增加,径流与降雨特征呈现良好的线性关系^[13]。研

究区内大暴雨等级降雨全部发生于玉米成熟期,且成熟期内降雨场次最多,高强度的降雨是造成坡面水土及养分流失的主要驱动因素。随玉米生育期推进,植被覆盖度在抽雄期达到最大,玉米成熟期,一方面植株及叶片逐渐枯萎^[14],截留降雨作用减弱,穿透雨量增加,致使坡面径流量增加;另一方面,玉米成熟期茎秆流现象明显,产生的茎秆流加剧了地表径流的形成,加快了地表径流的汇集速度^[15],上述因素共同作用导致成熟期径流量明显增加。地表径流量总体表现为顺坡垄作、平作>横坡垄作的趋势,这可能是由于顺坡垄作垄沟方向与坡面水流方向一致,形成了良好的坡面径流通道,且垄面高于坡面,径流加速向垄沟汇聚,使得径流量增加^[16]。而横坡垄作坡面垄沟方向垂直于水流方向,对地表径流起到了良好的阻挡作用,使得降雨与径流在垄沟内汇集,促进了坡面径流的下渗,减少了地表径流量^[17],这与郑江坤等^[11]研究结果相似。壤中流需经土壤充分下渗,且变化较为复杂,受降雨强度和降雨再分配作用影响较小^[14],不同耕作措施间变化趋势与地表径流基本一致。有研究^[18]表明,坡面水分下渗受到土壤容重的影响显著,通过对不同耕作措施的土壤容重测定发现,顺坡垄作垄面土壤容重分别为平作、横坡垄作的 0.88,0.86 倍,这使得顺坡垄作坡面具有较好的水分下渗条件,故壤中流也呈增加的变化趋势。

DOC 流失量随雨量等级增加而增加,在玉米成熟期最大。DOC 流失量由径流量与浓度共同决定,除上述玉米成熟期径流量增加显著外,DOC 主要由简单的碳水化合物、氨基酸及有机酸组成,吸附能力受土壤温度影响明显,升温有助于土壤对可溶性有机酸的吸附^[19],本研究中玉米成熟期已处于秋季,相较于抽雄期温度有所下降,土壤对 DOC 吸附能力衰减,DOC 易于流失。土壤水分是影响 DOC 含量及其储量的重要因素,在玉米成熟期降雨频繁、降雨量大,土壤含水率高,土壤含水率较高时加剧了溶解性有机质流动的和渗出^[20]。根系分泌物是土壤有机碳的主要来源^[21],随玉米生育期推进根系分泌物逐渐增加,土壤有机碳含量显著提高^[22-23],加剧了径流对土壤有机碳的浸提作用,上述因素共同作用导致成熟期 DOC 流失量加剧。地表径流 DOC 流失量表现为顺坡垄作>平作、横坡垄作,这可能是由于平作坡面相较于顺坡垄作坡面,地表粗糙度较小^[24],相同的径流小区下地表径流与土壤的接触面积减小,降低了径流的浸提作用;而横坡垄作坡面较低径流量是导致横坡垄作坡面 DOC 流失量小的主要原因。地表径流 DOC 流失量占总流失量的 74.90%,0—20 cm 壤中流和 20—40 cm 壤中流分别只占 11.97%,13.13%。

地表径流是本研究中 DOC 流失的主要途径,0—20 cm 壤中流和 20—40 cm 壤中流 DOC 流失量无显著差异,但随土层深度增加 DOC 浓度呈现增加的趋势。这可能是由于径流下渗过程中,增加了与土壤的接触时间,对土壤的浸提作用加强,20—40 cm 壤中流 DOC 浓度增加。这与王双等^[25]对于该地区土壤氮素流失的研究具有相似之处。

4 结论

- (1)玉米季坡耕地径流量及 DOC 流失量随雨量等级增加而增加。研究区玉米成熟期以大暴雨降雨为主,且降雨场次最多,应注意玉米成熟期坡耕地水土资源与有机碳流失。
- (2)地表径流量占总径流量的 78.98%,地表径流 DOC 流失量占总流失量的 74.90%;壤中流量与 DOC 流失通量占比较小,研究区径流及 DOC 流失的主要途径为地表径流。
- (3)玉米全生育期内,坡面径流量及 DOC 流失量受耕作措施影响显著,总体表现为顺坡垄作>平作、横坡垄作。各耕作措施下 DOC 通量与降雨量、径流量均呈线性正相关。横坡垄作可以有效减少坡面水土及可溶性有机碳流失,是研究区内较好的保护性耕作措施之一。

参考文献:

[1] Ritson J P, Bell M, Graham N J D, et al. Simulated climate change impact on summer dissolved organic carbon release from peat and surface vegetation: Implications for drinking water treatment [J]. Water Research, 2014, 67: 66-76.

[2] 林超文, 陈一兵, 黄晶晶, 等. 不同耕作方式和雨强对紫色土养分流失的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2241-2249.

[3] 杨青, 杨广斌, 赵青松, 等. 喀斯特地区不同降雨和植被覆盖的坡面产流产沙特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1): 9-16.

[4] 彭遥, 周蓓蓓, 陈晓鹏, 等. 间歇性降雨对黄土坡地水土养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 54-60.

[5] 费凯, 张丽萍, 邓龙洲, 等. 极端暴雨下裸地坡面径流及壤中流中碳素输移特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 623-635.

[6] 李灿, 曾和平. 不同空间尺度下植被覆盖对土壤有机碳流失的影响研究进展[J]. 云南大学学报, 2019, 41(1): 194-204.

[7] 武均, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对旱作农田土壤颗粒态有机碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 728-736.

[8] 安娟, 刘前进, 吴希媛. 横坡垄作下土壤湿润速率对褐土坡面侵蚀特征的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 101-107.

[9] 邓良基, 侯大斌, 凌静. 四川旱耕地的特征、问题及持续利用探讨[J]. 西南农业学报, 2001, 14(增刊 1): 96-102.

坡面土壤侵蚀的影响[J].应用生态学报,2021,32(1): 271-280.

[13] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等.黔西高原侵蚀性降雨特征分析[J].水土保持研究,2016,23(2):39-43,48.

[14] 杨坪坪,李勇,宋涛,等.典型喀斯特区侵蚀性降雨特征及坡面生物措施水土流失防控效应[J].生态环境学报,2021,30(1):53-62.

[15] 顾礼彬,张兴奇,杨光橄,等.黔西高原坡面次降雨产流产沙特征[J].中国水土保持科学,2015,13(1):23-28.

[16] 纪启芳,张兴奇,张科利,等.贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J].水土保持研究,2012,19(4):1-5.

[17] 王万忠,黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究研究Ⅲ:关于侵蚀性降雨的标准问题[J].水土保持通报,1984,4(2):58-63.

[18] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.

[19] 黄凯,李瑞,李勇,等.贵州省黔南区不同侵蚀性雨型条件下生物措施对坡面产流产沙的响应[J].水土保持学报,2020,34(6):14-21.

[20] 黄国平,张文太,陈景梅,等.伊犁河谷次降雨特征对坡面产流产沙的影响[J].甘肃农业大学学报,2021,56(3):109-116.

[21] 严友进,戴全厚,伏文兵,等.喀斯特坡地裸露心土层产流产沙模拟研究[J].土壤学报,2017,54(3):545-557.

[22] 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.

[23] Jean J S, Ai K F, Shih K, et al. Stone cover and slope factors influencing hillside surface runoff and infiltration: Laboratory investigation [J]. Hydrological Processes,2000,14(10):1829-1849.

[24] Liu D D, She D L. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation? [J].Catena,2017,151:213-224.

[25] Dai Q H, Peng X D, Zhao L S, et al. Effects of underground pore fissures on soil erosion and sediment yield on karst slopes [J]. Land Degradation and Development,2017,28(7):1922-1932.

[26] Bunte K, Poesen J. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of noncohesive sediment by shallow overland flow [J]. Water Resources Research,1993,29(5):1415-1424.

(上接第 81 页)

[10] Miao C, Ashouri H ,Hsu K L, et al. Evaluation of the PERSIANN-CDR daily rainfall estimates in capturing the behavior of extreme precipitation events over China[J].Journal of Hydrometeorology,2015,16(3):1387-1396.

[11] 郑江坤,杨帆,王文武,等.不同降雨等级下耕作措施对坡地产流产沙的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(1):38-45.

[12] Moore S, Evans C D, Page S E, et al. Deep instability of deforested tropical peatlands revealed by fluvial organic carbon fluxes [J].Nature,2013,493(7434):660-663.

[13] 陈美洪,张卓栋,王晓岚,等.西南黄壤和西北黄土坡面侵蚀产沙规律比较研究[J].中国水土保持科学,2016,14(6):53-60.

[14] 武万华,何淑勤,宫渊波,等.玉米季横垄坡面径流及可溶性有机碳流失特征[J].中国水土保持科学,2017,15(5):31-38.

[15] 尹晓爱,方乾,杨通杭,等.模拟玉米茎秆流对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):67-72.

[16] 杨帅,尹忠,郑子成,等.四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J].水土保持学报,2016,30(4):7-12.

[17] 何超,王磊,郑粉莉,等.垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):24-28.

[18] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18,78.

[19] 喻艳红,张桃林,李清曼,等.温度和水土比对红壤吸附低分子量有机酸的影响[J].土壤,2011,43(1):50-55.

[20] Humphrey V, Berg A, Ciais P, et al. Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability[J].Nature,2021,592(7852):65-69.

[21] 赵富王,王宁,苏雪萌,等.黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J].水土保持学报,2019,33(5):105-113.

[22] 马瑞,郑子成,王双,等.山地黄壤区玉米不同生育期土壤抗蚀性特征[J].农业工程学报,2020,36(19):107-114.

[23] 郑子成,林代杰,李廷轩,等.不同耕作措施下成熟期玉米对径流及侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):24-28.

[24] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.不同农业耕作措施下坡耕地填洼量特征与变化[J].农业工程学报,2017,33(12):249-254.

[25] 王双,叶良惠,郑子成,等.玉米成熟期黄壤坡耕地径流及其氮素流失特征研究[J].水土保持学报,2018,32(6):28-33.