不同雨强下各生育期玉米坡耕地的侵蚀产沙研究

赵娅君[1]，吴发启[2]，徐 宁[1]，曹博召[1]

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学 资源环境学院，陕西 杨凌 712100)

摘 要：[目的] 研究玉米作物对坡耕地的防蚀效果，为黄土高原坡面水土流失防治提供科学依据。[方法] 采用室外人工模拟降雨试验，分析玉米在幼苗期、拔节初期、拔节中期、拔节后期、抽雄期 5 个不同生育期对坡耕地侵蚀产沙量和过程的影响。[结果] ①随着玉米作物生长，它对坡面产流产沙的抵御作用增强，幼苗期效果微弱，抽雄期最盛，抽雄期相比裸地可减少 48.5%径流量和 73.7%产沙量。不同生长阶段玉米作物的减沙效果优于减流效果。②降雨的产流产沙过程呈现不断波动趋势，玉米作物使初始产流产沙时间延迟，稳定产流产沙阶段平均产流产沙量下降。雨强从 40 mm/h 增加到 80 mm/h 使产流产沙量增长率大于 100%，径流系数和含沙量均增加，侵蚀过程更加剧烈。③叶面积指数与不同生育期玉米地坡面的土壤流失比率有较好的指数相关关系，可使用叶面积指数来估算不同生育期玉米地坡面的土壤流失比率，为估算年植被覆盖与管理因子 C 值奠定基础。[结论] 随着玉米生长，其防蚀效果增强，但幼苗期和拔节初期侵蚀严重，需采取辅助措施防治水土流失。雨强增加使玉米和裸地条件下侵蚀产沙更为严重。

关键词：玉米；坡耕地；产流产沙；土壤流失比率；黄土高原

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)06-0023-06 **中图分类号**：S157.1

文献参数：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. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.004；Zhao Yajun，Wu Faqi，Xu Ning，et al. Runoff and sediment yield of corn plots in different growth stages under different rainfall intensities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(6)：23-28.

Runoff and Sediment Yield of Corn Plots in Different Growth Stages Under Different Rainfall Intensities

Zhao Yajun[1]，Wu Faqi[2]，Xu Ning[1]，Cao Bozhao[1]

(1. *Institute of Soil and Water Conservation，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi* 712100，*China*；2. *College of Resources and Environment，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi* 712100，*China*)

Abstract：[Objective] The anti-erosion effects of corn on slope farmland was studied in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of soil erosion on slope farmland in the Loess Plateau region. [Methods] An outdoor artificial simulated rain test was conducted to analyze the effects of corn on the runoff and sediment production and erosion process on slope farmland at five different growth stages，such as seedling stage，early jointing stage，mid-joint stage，late jointing stage，and tasseling stage. [Results] ① With the growth of crops，the resistance of corn to runoff and sediment yield increased，this effect was the weakest in the seedling stage and the strongest in the tasseling stage. Compared with bare land，the average runoff and sediment yield of corn plot decreased by 48.5% and 73.7% respectively. The sediment reduction effect of corn in different growth stages was better than that of runoff reduction effect. ② The process of runoff and sediment yield showed a continuous fluctuation trend. Corn crops delyaed the initial time of runoff and sediment yield，and the average runoff and sediment yield decreased in stable runoff and sediment yield stage. When rainfall intensity increased from 40 mm/h to 80 mm/h，the increase rate of runoff and sediment yield was more than 100%，the runoff coefficient and sediment concentration increased，and the erosion process became more severe. ③ There was a good exponential correlation between leaf area index and soil

收稿日期：2020-07-05 **修回日期**：2020-08-20

资助项目：国家自然科学基金项目“黄土坡耕地作物覆盖与管理的防蚀作用研究”(41977065)

第一作者：赵娅君(1998—)，女(汉族)，陕西省大荔县人，硕士研究生，研究方向为土壤侵蚀。Email：zhaoyajun19@163.com。

通讯作者：吴发启(1957—)，男(汉族)，陕西省黄陵县人，博士，教授，博士生导师，主要从事水土保持方面的研究。Email：wufaqi@263.net。

loss ratio of corn slope at different growth stages. The leaf area index could be used to estimate the soil loss ratio of corn slope in different growth periods, which laid a foundation for estimating annual vegetation cover and management factor *C* value. [Conclusion] With the growth of corn, the anti-erosion effect of corn is enhanced, but the erosion is serious at seedling stage and early jointing stage, auxiliary measures should be taken to prevent soil and water erosion. The increase of rainfall intensity makes the erosion and sediment yield more serious under various underlying surface conditions.

Keywords: corn; slope farmland; runoff and sediment yield; soil loss ratio

黄土高原地区土壤侵蚀严重,大面积坡耕地产生的侵蚀量占黄土高原侵蚀量的 50%以上,坡耕地仍是造成土壤侵蚀的重要区域[1]。耕地表面作物成为影响坡耕地侵蚀的主要因素,同时也是治理坡耕地水土流失提高经济效益的受益对象。有研究[2]表明坡耕地农作物水土保持作用小于林草,但是相比于裸坡地,坡耕地作物仍有不同程度的抗侵蚀作用。穿透雨是作物耕地产流产沙的主要来源,Kang 等[3]得出喷灌条件下冬小麦冠层截留量受叶面积指数和株高等影响,全生育期截留量占总喷灌量 1.3%,多数为穿透雨。但玉米冠层的截留率为 11.6%,棵间水量和茎秆流占总灌水量的 45.4%和 43.0%,可见玉米作物冠层在降雨分配中有重要作用[4]。玉米叶片汇集形成的大雨滴增加穿透雨的降雨侵蚀力,同时将一半降雨转化为茎秆流的能力减小了降雨侵蚀力[5]。作物通过地上地下的共同作用能减小坡耕地的产流产沙量,王丰等[6]对三峡库区冬小麦、油菜、春玉米 3 种作物研究得出,种植作物坡耕地侵蚀产沙量均小于裸地,春玉米的水土保持功能最好。红薯和花生的产流产沙和养分流失均小于裸地,红薯效果优于花生[7]。这说明作物可以抑制坡面侵蚀产沙过程,但作物防蚀作用有限,雨强和坡度等侵蚀因子同样对坡耕地侵蚀产沙造成影响。王健等[8]认为玉米苜蓿间作可有效控制地表径流,但随着坡度的增加,控制效果减弱。安暄昕等[9]将玉米、辣椒以及混播草带组成不同的间作方式,认为作物间作的水土流失量小于作物单作,随着降雨强度增加,作物坡耕地的水土流失量都增加。

作物覆盖对减少土壤侵蚀有一定作用,尤其是降雨多发的季节恰好为作物生长高峰期,能有效的控制土壤侵蚀。但是作物不同生长期冠幅变化大,防蚀能力有差异。大多研究着眼于作物在成熟期的蓄水减沙效果,对不同生长阶段作物的侵蚀产沙影响缺乏深入的了解。本试验探究在人工模拟降雨条件下玉米作物不同生长阶段对坡面土壤侵蚀的影响,深入了解作物对坡面产流产沙的抑制机理,明确种植作物条件下坡耕地的侵蚀过程,以便在侵蚀严重的作物生长期采取辅助的水土保持措施,减少水土流失,维持耕地生产力,改善农业生产发展现状,为黄土高原坡面水土流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

该研究区域位于西北农林科技大学水土保持工程实验室种植园,地处陕西省杨凌农业高新技术产业示范区(107°59′—108°08′E,34°14′—34°20′N)。该区平均海拔 468 m,总面积为 135 km^2。属大陆性季风半湿润气候,年均气温 12.9 ℃,年均降水量 635～663.9 mm,降水集中在 7—10 月,且降雨有多暴雨、短促的特征。植被类型主要为温带湿润半湿润森林,但分布较少,主要为农田。土壤类型主要是塿土,由褐土经长期耕作和施用土肥形成的一种特殊土壤。有机质含量较高,疏松多孔,一般为灰棕色团粒、团块状结构。土壤有机质含量为 1.33%,土壤颗粒组成为黏粒(<2 μm)占 26.35%、粉粒(2～50 μm)占 43.68%和砂粒(50～2000 μm)占 29.97%,pH 值为 8.22。

1.2 径流小区布设

径流小区长 3 m,宽 1 m,四周用 PVC 板隔开,采用我国的标准小区坡度,坡度均为 10°。小区做玉米作物和裸地对照两种处理,重复两组。小区内土壤为周边农耕地 20 cm 表层土,压实装土使土壤容重约为 1.27 g/cm^3,沉降 6 个月后再次装满,以达到自然耕作土状态。供试玉米品种为郑单 958,播前分别以 50 000 和 400 kg/hm^2 的用量施用有机肥(腐熟羊粪)和磷酸二铵。玉米于 2018 年 6 月 18 日种植于径流小区,按行距 60 cm,株距 25 cm 播种,每穴两粒,每个小区 24 株。小区在播种后整理为平直坡面,除取土样外均不扰动坡面,其余种植和管理依据当地农作习惯。

1.3 人工模拟降雨试验

产流产沙量通过人工模拟降雨试验测定。降雨装置是中科院水利部水土保持研究所的组合侧喷式降雨机,降雨时降雨机放置于径流小区两侧对喷,降雨高度 7 m,能使雨滴终点速度接近自然降雨终点速度,有效降雨面积为 5 m×7 m。根据黄土高原降雨多暴雨的特点,设计 40 和 80 mm/h 两个降雨强度,

降雨历时 60 min。降雨试验选在无风时段,试验过程中尽量保持除植被、雨强之外的自然条件一致。每次降雨试验前,测定当前叶面积指数并采用土钻法(φ=5 cm)测定表层土壤的土壤含水量。开始降雨初期对降雨强度和均匀度进行校正。记录降雨产流的起止时间,产流开始后用塑料桶收集径流量1 min,之后每 3 min 收集 1 次 1 min 的径流量,直至产流结束。测量径流泥沙样品的总质量,静置后倒掉上层清液,在 105 ℃条件下烘干至恒重称量泥沙。此次试验中玉米的生育期划分为幼苗期、拔节初期、拔节中期、拔节后、抽雄期 5 个阶段,在各生长阶段均以裸地小区做对照开展相应的人工模拟降雨试验。其中径流系数(%)是由径流深(mm)和同时段降雨量(mm)之比的百分数所得;含沙率(g/L)即产沙量(g/m^2)与径流量(L/m^2)之比。

1.4　叶面积指数测定

不同生育期选取有代表性的玉米植株,将玉米植株叶片剪下,测量它的最长和最宽处,根据长宽比例法测算总叶面积[10]。计算公式为:

$$A_L=\sum_{i=1}^{n}(k\cdot L_i\cdot W_i) \quad (1)$$

式中:A_L 表示单株玉米叶面积(cm^2);n 表示玉米叶片数;k 表示修正系数(0.75);L_i 表示第 i 片叶的最长长度(cm);W_i 表示第 i 片叶片最宽宽度(cm)。

玉米叶面积指数(LAI)是植物叶片总面积与土地面积的比值。计算公式为:

$$\mathrm{LAI}=\sum_{i=1}^{n}A_{Li}/(n\cdot I\cdot L) \quad (2)$$

式中:LAI 表示叶面积指数;n 表示玉米株数;A_{Li} 表示第 i 株玉米总叶面积(cm^2);I 表示株距(cm);L 表示行距(cm)。

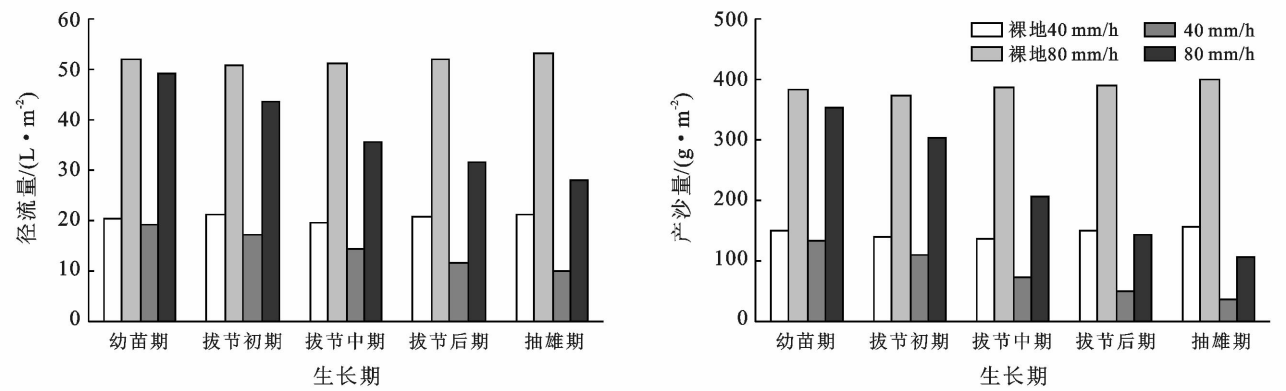
根据以上数据计算坡面产流产沙量,并绘制图表,分析玉米作物对坡面产流产沙的影响。本次试验图表通过 Excel 软件和 SPSS 软件完成。

2　研究结果与分析

2.1　不同生育期玉米坡面产流产沙量

相比于裸地,玉米在各生育期都能有效抑制产流量,且随作物的生长抑制作用加强(图 1)。5 个轮次裸地平均约 51%的降雨入渗,其余形成径流。不同生育期中,幼苗期减流效果微弱平均减小 6.51%径流量。抽雄期最盛,在两个雨强下平均可减少 48.45%径流量。同时可看出在拔节中期产流量较拔节初期显著降低,较裸地平均减小 27.3%径流量。表明裸地小区由于无植被保护,降雨过程中受雨滴的击溅后土壤结构易发生破坏,剥离地表的土粒易被径流冲刷带走,导致土壤侵蚀严重。到拔节中期作物覆盖度提高,行间隙减小,降雨拦截能力增强,抽雄期植株生长最为茂盛时期减流效果最好。

不同生育期作物的产沙量同产流量有着相同的变化趋势,但各生育期的减沙量大于减流量(图 1)。相比于裸坡产沙量,40 mm/h 雨强下玉米幼苗期坡面产沙量减少 12.03%,抽雄期减少 73.83%。当雨强增大到 80 mm/h,幼苗期产沙量比裸坡减少 9.26%,抽雄期减少 70.50%。与产流情况对比,玉米到抽雄期泥沙量的减少远大于径流量的减少,有力的说明了玉米不同生育期的减沙效果优于减流效果。同一生长阶段泥沙量的减小可能是由于玉米植株较高,叶片窄大且在不同高度层叠,冠层拦截降雨极大地减少了穿透雨对地面土粒的击打,加之玉米根系对土壤的固结改良作用使土壤侵蚀量降低。但叶片凹向茎秆的特殊形态又将拦截的降雨转化成茎秆流,研究表明玉米可将 40%～50%降雨转化为茎秆流[11],部分茎秆流又汇聚成为径流,导致玉米减流效果没有减沙明显。



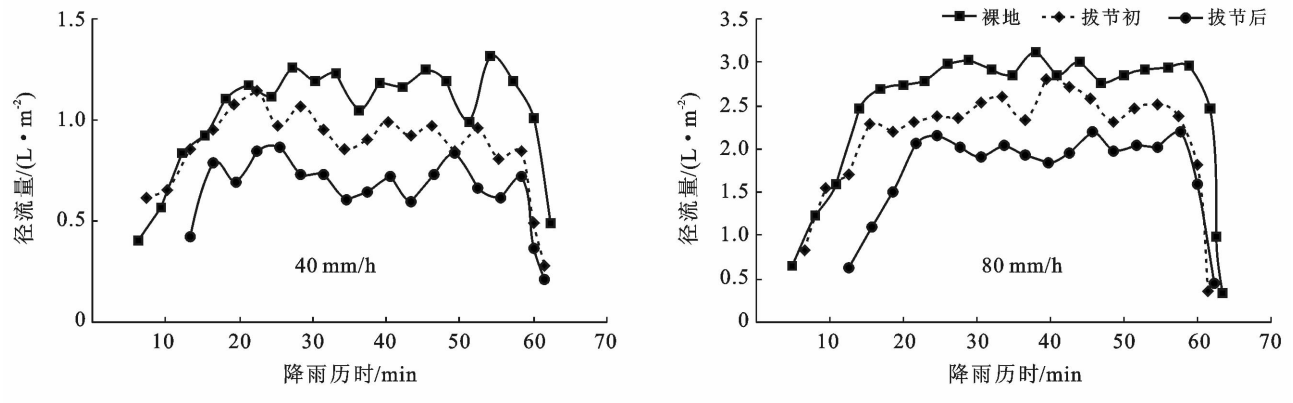
注:径流量和产沙量均取三组重复的平均值。

图 1　不同生育期玉米和裸地的径流量和产沙量

2.2 不同雨强下玉米坡面产流产沙过程

由图 2 可得,产流过程大致可分为快速产流阶段和稳定产流阶段。相比于裸地,玉米的生长首先改变初始产流时间,40 mm/h 雨强下从裸地的 6.25 min 延长到抽雄期 14.5 min,80 mm/h 下从裸地的 5.0 min 延长到抽雄期的 13.3 min。不同生长期玉米在稳定产流阶段产流量是不断波动的,但呈现随着玉米生长而减小的规律。

这些均说明玉米作物对径流具有较好的调控作用。正是玉米对径流的拦截,延缓降雨汇聚地面速度,增加地面入渗,延长了径流汇聚到出口处时间,减少径流量。



注:为使结果简明,仅挑选玉米拔节初期和拔节后期与裸地进行比较。下同。

图 2 不同雨强下生育期玉米和裸地的产流过程

由图 3 可得产流过程与产沙过程相似,但产沙曲线波动大。相比于产流过程,不同生长阶段的产沙量差异显著。随着玉米的生长初始产沙时间延迟,同时初始产沙量也有所减小,80 mm/h 雨强下从裸地的 2.48 g/m² 减小到抽雄期的 0.89 g/m²,这在产流中并未出现。降雨初期径流量增大的同时产沙量增加,达到峰值后产沙量稳定波动或下降波动。稳定产沙阶段曲线呈现多峰多谷的的特点,峰谷差异显著,这说明坡面剥离和搬运泥沙过程不稳定,波动大。不同雨强下产流产沙情况进行对比可得,雨强从 40 mm/h 增加到 80 mm/h,裸地小区平均产流量增加 150%,平均产沙量增加 165%。玉米全生育期的坡地产流量增加 141%,产沙量增加 135%。各个时期产流量在高雨强下比低雨强增加 107%～171%,产沙量增加100%～174%。说明玉米作物小区在高低雨强条件下径流和泥沙量均小于裸地,但玉米无法消除雨强的作用,雨强增加时玉米小区产流产沙量仍显著增加。

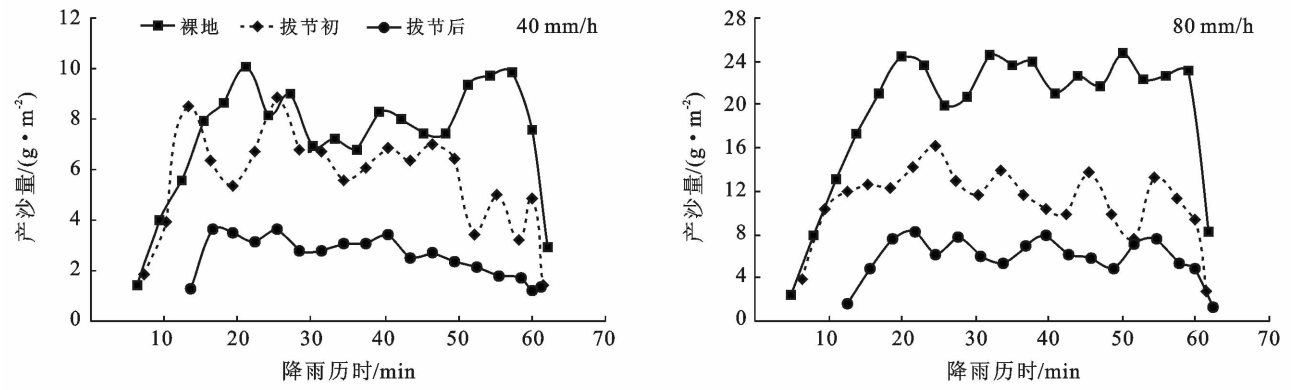


图 3 不同雨强下生育期玉米和裸地的产沙过程

高雨强下初始产流和初始产沙时间提前,初始产流产沙量也有所提高,相比于低雨强的产流产沙量大且波动明显。由表 1 可得随着玉米生长径流系数和产沙量逐渐减小,但同时期 80 mm/h 下的径流系数和含沙量总是大于 40 mm/h。这意味着高雨强下土壤侵蚀更加严重。

2.3 玉米坡耕地的土壤流失比率

植被覆盖与管理 C 因子是指一定条件下有作物等植被覆盖条件下的土壤流失量和同条件下休闲地土壤流失量的比值。由于农作物年内地表冠层变化剧烈,计算 C 值首先划分生育期,计算各生育期的土壤流失比率,根据降雨侵蚀力的分布情况加权平均求平均 C 值。

表 1　不同雨强下生育期玉米和裸地的产流产沙量

生长期	叶面积指数 LAI	雨强/(mm·h^{-1})	径流系数/%	含沙量/(g·L^{-1})
裸地	0.00	40.00	48.89	7.09
		80.00	65.74	7.52
幼苗期	0.41	40.00	47.93	6.85
		80.00	60.65	7.20
拔节初期	1.24	40.00	45.55	6.49
		80.00	56.34	7.12
拔节中期	2.04	40.00	38.63	5.11
		80.00	47.48	6.11
拔节后期	3.47	40.00	34.41	4.43
		80.00	43.17	4.81
抽雄期	4.30	40.00	29.77	3.76
		80.00	38.50	3.89

本研究根据叶面积指数将玉米生育期划分为苗期、拔节初期、拔节中期、拔节后期、抽雄期。农作物土壤流失比率(SLR)可根据小区内降雨观测结果求得,即不同生育期玉米作物与对照裸地土壤流失量之比。C 因子受众多因素影响,本次试验的基准条件统一为以下 3 点:①采取人工模拟降雨,可控制雨强和土壤前期含水量,统一降雨条件;②小区长 3 m,宽 1 m,坡度为 10°,坡面均为平直坡面,无耕作措施;③作物种植方式均为等高横坡种植。如图 4 所示,叶面积指数与土壤流失比率呈指数相关关系。对关系式进行方差分析,显著性概率均小于 0.01,可看出玉米叶面积指数与土壤流失比率有极好的相关性。随着叶面积指数的增加,小区的土壤流失比率而明显下降。玉米生长到抽雄期 40 和 80 mm/h 的土壤流失比率分别为 0.256 和 0.270,生长最为茂盛时期恰好为黄土高原地区年降雨最丰沛时期,故可有效的阻挡土壤侵蚀。作物生长前期由于冠层较小,土壤易遭受侵蚀土壤流失比率较高,应在玉米幼苗期、拔节初期采取相应的水土保持措施控制土壤流失。

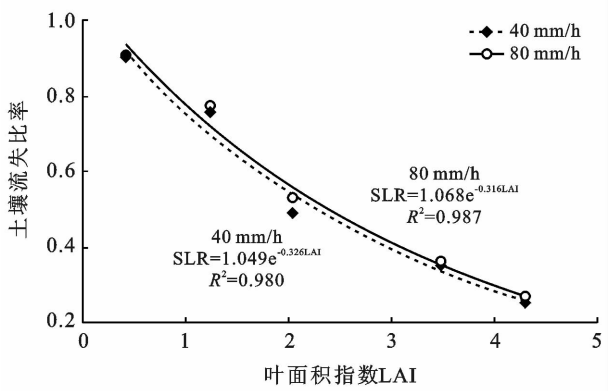


图 4　叶面积指数与土壤流失比率相关关系

3　讨　论

3.1　不同生育期玉米坡面对产流产沙的影响

本文主要研究不同生育期玉米对坡耕地产流产沙的影响,阐明玉米作物抵御降雨减少土壤侵蚀的形式和机理。玉米生长前期坡面产流产沙量减小较少,这是因为幼苗期和拔节初期作物覆盖度较小,行间隙大,作物的拦蓄作用并不稳定。随着玉米作物的生长,主要通过多方面增加入渗的方式减少侵蚀产沙,作物在外部主要通过拦截降雨和对降雨的再分配延缓降雨在地表滞留时间从而增加入渗,内部通过作物根系增加土壤生物大孔隙从而改善土壤性状促进入渗[12-13]。Prieksat[14]指出玉米植株基部土壤入渗率高于田间其他区域,且随着玉米生长基部地表土壤入渗率增加,表明玉米根系对入渗的重要作用。作物生长到拔节中期其拦蓄入渗作用使得径流泥沙量迅速下降。随着玉米的生长发育趋于成熟,作物在拔节后期和抽雄期的减流减沙能力持续且稳定地增强,到抽雄期可减少 48.45%径流量和 71.18%产沙量,研究结果均大于马波[15]所得。且玉米作物在不同生育期的减沙效果优于减流效果,这与郑子成、王丰等人[16-17]研究结果一致。玉米拦截泥沙的能力优于对径流的拦蓄,推测是由于玉米冠层截留少,大部分径流以茎秆流的形式重新组成径流,增加径流量,但是冠层阻碍降雨对地面的打击作用,玉米基部阻碍泥沙的流动以及玉米根系对土壤的固结作用减少泥沙侵蚀量。裸地和玉米各生育期的产流产沙过程是不断波动的,且产沙过程相比产流过程波动更为剧烈,这在朱智勇等人[18]的研究中得出同样结论。植被覆盖度低和雨强增加使得坡面侵蚀产沙过程更加剧烈。本试验结论是在微小尺度进行人工模拟降雨得出玉米防蚀机理,是否适用于野外实践工作需进一步野外降雨试验的验证和修正。

3.2　雨强对坡面产流产沙的影响

降雨强度是影响产流的主要因素之一。径流的形成本质上是降雨量和入渗量之差,降雨强度的增加引起雨量的增加和雨滴动能的增强,从多个方面减小入渗,增大径流。试验结果得裸地和各生育期玉米坡面产流产沙量均随着雨强的增大而增加,与张会茹[19]研究结果相似。雨强增加使相同时间内降雨量增加,形成更多径流;同时地表对降雨的击打作用增强使地表形成光滑密实的结皮层,减少降雨入渗增大径流[20]。因此各时期高雨强下的径流系数均大于低雨强,同时提前初始产流产沙时间。含沙量增加一是由于径流量的增加本身会增强对地表的冲刷力,同时

降雨强度的增大导致雨滴动能增大,对地表的破坏力增加所致。

3.3 玉米坡面的土壤流失比率

植被覆盖与管理因子(*C* 因子)是通用土壤流失方程 USLE 中最重要的因子之一,可评价作物覆盖和管理措施等对土壤侵蚀的作用。由于缺乏地面侵蚀实测数据,常采用作物不同生长阶段植被覆盖度指标估算 *C* 值,但这种方法容易导致评价结果出现偏差。孙佳佳等[21]指出用叶面积指数(LAI)表示土壤侵蚀模数可稳定可靠地评价植被水土保持效益。叶面积指数能较好地表征植被群落的覆盖状况和垂直结构特征。林杰等[22]选择多种植被样地用 LAI 取代植被覆盖度作为评价和估算 *C* 因子的指标,结果可行。本研究结果表明叶面积指数与土壤流失比率具有良好的指数相关关系,这与大豆的叶面积指数与土壤流失比率关系相似[23]。这意味着虽然影响土壤流失比率的因素很多,但可以仅通过叶面积指数估算出一定基准条件下的土壤流失比率,即各生长阶段的 *C* 值,一定程度上弥补植被覆盖度表达结构层次单一的缺点,为估算作物年 *C* 值提供基础。本方程虽然为估算土壤流失比率提供新方法,但此数据是特定基准条件下单次试验所得,方程的准确性还需在标准小区进行长期重复的野外试验验证,进一步增加中国 *C* 因子资料数据库。此外本试验仅测算玉米不同生长阶段的土壤流失比率,缺乏当地降雨侵蚀力数据估算最终的年作物 *C* 值,应在此后深入研究。

4 结 论

(1) 随着作物生长玉米对坡面产流产沙的抵御作用增强,幼苗期效果微弱,抽雄期最盛,抽雄期相比于裸地可减少 48.5%径流量,减少 73.7%产沙量。玉米全生育期平均径流量减少 28.1%,产沙量减少 43.9%。不同生长阶段玉米作物的减沙效果均优于减流效果。

(2) 玉米作物改变侵蚀过程中产流产沙量和时间的分配。种植玉米后初始产流产沙时间延迟,稳定产流产沙阶段平均产流产沙量下降,随着玉米生长效果更为显著。降雨的产流过程和产沙过程呈现不断波动趋势。雨强从 40 mm/h 增加到 80 mm/h 使产流产沙量增长率大于 100%,径流系数和含沙量均增加,侵蚀过程更加剧烈。

(3) 叶面积指数与相应阶段土壤流失比率有较好的指数相关关系。使用叶面积指数来估算不同生育期玉米的土壤流失比率,避免了使用植被覆盖估算 *C* 值产生的误差,为估算年 *C* 值奠定基础。

[参 考 文 献]

[1] 刘莉丽,张建军,聂小妮,等.坡耕地土壤流失规律研究[J].西北林学院学报,2005,20(4):101-103.

[2] Singh R K, Panda R K, Satapathy K K, et al. Simulation of runoff and sediment yield from a hilly watershed in the eastern Himalaya, India using the WEPP model [J]. Journal of Hydrology, 2011, 405(3/4): 261-276.

[3] Kang Yaohu, Wang Qinggai, Liu Haijun. Winter wheat canopy interception and its influence factors under sprinkler irrigation [J]. Agricultural Water Management, 2005, 74(3):189-199.

[4] 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.

[5] Quinn N W, Laflen J M. Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy [J]. Transactions of the ASAE, 1983,26(5):1445-1450.

[6] 王丰,徐佩,严坤,等.三峡库区典型农作物对降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):92-95,101.

[7] 朱司航,王红,周大迈,等.石灰岩地不同作物坡面土壤侵蚀和养分流失的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):12-18.

[8] 王健,尹武君,刘旦旦.玉米苜蓿间作对黄土坡耕地降雨产流产沙的影响[J].节水灌溉,2011(8):43-46.

[9] 安疃昕,周锋,吴珍珍,等.坡耕地间作作物群体水土保持耕作措施[J].水土保持研究,2019,26(2):17-22.

[10] 冯冬霞,施生锦.叶面积测定方法的研究效果初报[J].中国农学通报,2005,21(6):150-152,155.

[11] 马波,吴发启,陈宇,等.玉米不同生育期茎秆流特征及其模型构建[J].农业工程学报,2011,27(1):118-123.

[12] 吴佳,王林华,李占斌,等.黄土高原主要秋作物坡地降雨入渗特征参数研究[J].水土保持学报,2014,28(6):115-119.

[13] 高朝侠,徐学选,宇苗子,等.黄土塬区土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响[J].应用生态学报,2014,25(6):1578-1584.

[14] Prieksat M A, Kaspar T C, Ankeny M D. Positional and temporal changes in ponded infiltration in a corn field [J]. Soil Science Society of America Journal, 1994,58(1):181.

[15] 马波,吴发启,李占斌,等.作物与坡度交互作用对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):33-38.

[16] 郑子成,张锡洲,李廷轩,等.玉米生长期土壤抗蚀性特征及其影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(4):100-108.

[17] 王丰,徐佩,严坤,等.三峡库区典型农作物对降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):92-95,101.

(下转第 35 页)

[4] Wang Chao, Zhao Chuanyan, Xu Zhonglin, et al. Effect of vegetation on soil water retention and storage in a semi-arid alpine forest catchment [J]. Journal of Arid Land, 2013,5(2):207-2019.
[5] 张建利,王加国,李苇洁,等.贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林枯落物储量及持水功能[J].水土保持学报,2018,32(3):167-173.
[6] 宫殷婷.百花山 5 种典型林分枯落物蓄积量及持水特征[J].林业资源管理,2019(3):113-117,146.
[7] 蒲嘉霖,刘亮.亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J].水土保持研究,2019,26(6):165-170.
[8] 吕刚,刘雅卓,李叶鑫,等.海州露天煤矿排土场植被恢复的土壤水文效应评价[J].生态环境学报,2017,26(1):67-72.
[9] 王维.长江经济带旅游—经济—生态环境协调发展评价及其影响因素研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2018,39(5):81-88.
[10] 孙飞达,朱灿,李飞,等.旅游干扰对高寒草地植物多样性和土壤生化特性的影响[J].草业科学,2018,35(11):2541-2549.
[11] 李灵,梁彦兰,江慧华,等.旅游干扰对武夷山风景区土壤重金属污染和土壤性质的影响[J].广东农业科学,2012(19):171-174,181.
[12] 罗庆华,童芳,陶水秀,等.旅游干扰对张家界大鲵生境及水质的影响[J].应用生态学报,2019,30(6):2101-2108.
[13] 李森森,马大龙,臧淑英,等.不同干扰方式下松江湿地土壤微生物群落结构和功能特征[J].生态学报,2018,38(22):7979-7989.
[14] 刘凯,贺康宁,王先棒.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J].2018,40(1):89-97.
[15] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].2018,32(4):115-121.
[16] 王修康,戚兴超,刘艳丽,等.泰山山前平原 3 种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响[J].自然资源学报,2018,33(1):63-74.
[17] 曾江敏,何丙辉,李天阳,等.喀斯特槽谷区不同林草恢复模式下土壤入渗特征[J].水土保持学报,2019,33(4):58-64.
[18] 刘小兰.旅游干扰对九寨沟冷杉林下枯落物及其土壤水文功能的影响[J].水土保持研究,2015,22(2):229-234.
[19] 李学斌,陈林,樊瑞霞,等.围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物输入对土壤理化性质的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2015,41(1):101-110.
[20] 陈婷,郗敏,孔范龙,等.枯落物分解及其影响因素[J].生态学杂志,2016,35(7):1927-1935.
[21] 刘光荣.旅游干扰对庐山风景区微生物多样性的影响[J].山东农业大学学报(自然科学版),2015,46(2):274-279.
[22] 张祎,李鹏,刘晓君,等.黄土丘陵区不同植被类型枯落物持水效能研究[J].水土保持研究,2016,23(5):100-105.
[23] 尤誉杰,王懿祥,张华锋,等.不同人为干扰措施对天然次生灌丛土壤肥力及蓄水能力的影响[J].生态学报,2018,38(3):1097-1105.
[24] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):971-978.
[25] 陈永华,叶权平,张文辉,等.不同间伐强度下桥山麻栎林土壤渗透特性[J].水土保持研究,2019,26(1):113-117.

(上接第 28 页)

[18] 朱智勇,解建仓,李占斌,等.坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J].水土保持学报,2011,25(5):1-7.
[19] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):40-43.
[20] 李朝霞,王天巍,史志华,等.降雨过程中红壤表土结构变化与侵蚀产沙关系[J].水土保持学报,2005,19(1):1-4,9.
[21] 孙佳佳,于东升,史学正,等.植被叶面积指数与覆盖度定量表征红壤区土壤侵蚀关系的对比研究[J].土壤学报,2010,47(6):1060-1066.
[22] 林杰,张金池,顾哲衍,等.基于叶面积指数的植被覆盖管理措施因子 C 的遥感定量估算[J].林业科学,2013,49(2):86-92.
[23] 马波,刘雨鑫,吴发启.植大豆对坡耕地径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):32-36.