

青贮玉米间作大豆合理密植对红壤坡耕地 水土流失的影响

蔡涛, 赵桂茹, 宁鑫, 李海, 舒宇, 陆春志, 安瞳昕

(云南农业大学 农学与生物技术学院 云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 昆明 650201)

摘要: [目的] 探究坡耕地不同密度青贮玉米间作大豆的水土流失规律, 为推广具有较好水土保持效果的青贮玉米间作大豆合理密植模式提供科学依据。[方法] 以青贮玉米||大豆 2:3 模式(2 行玉米间作 3 行大豆)为研究对象, 设置坡度(10°, 15°, 20°)和降雨强度(40, 80, 120 mm/h), 通过人工模拟降雨试验, 设置 T₁—T₅ 共 5 个玉米间作密度处理(52 500, 60 000, 67 500, 75 000, 82 500 株/hm²), 大豆间作密度固定为 180 000 株/hm², 并设置 T₆(高密度玉米单作 82 500 株/hm²)、T₇(常规玉米单作 67 500 株/hm²)、T₈ 处理(大豆单作 300 000 株/hm²)为对照。[结果] 与 T₁, T₂, T₄—T₈ 处理相比, T₃ 处理的地表径流量平均减少 59.31%, 43.67%, 20.57%, 15%, 40.95%, 62.01% 和 16.4%; 侵蚀量平均减少 61.52%, 50.73%, 27.1%, 17.62%, 43.48%, 66.22% 和 8.47%。根据 PLS-SEM 结构模型图可知, 坡度和入渗时间呈极显著负相关($p < 0.01$), 和侵蚀量呈极显著正相关($p < 0.01$), 坡度、雨强和径流量均主要通过直接效应来加剧土壤侵蚀, 入渗时间主要通过间接效应来增大侵蚀; 且在低雨强缓坡条件下, 大豆单作模式(T₈)表现出更优的水土保持效果。[结论] 玉米间作密度为 67 500 株/hm² 时, 在不同雨强和坡度下均展现出良好的水土保持效果, 是一种适合山区坡耕地的作物多样性种植模式。

关键词: 合理密植; 水土流失; 坡耕地; 间作

中图分类号: S157.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0059-12

Effects of rational close planting of silage corn-soybean intercropping on soil erosion in red soil sloping farmland

Cai Tao, Zhao Guiru, Ning Xin, Li Hai, Shu Yu, Lu Chunzhi, An Tongxin

(Key Laboratory of Crop Production and Smart Agriculture in Yunnan Province, College of Agriculture and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

Abstract: [Objective] This study investigates soil erosion pattern in silage corn-soybean intercropping systems under varying planting densities on sloping farmland, aiming to provide a scientific basis for promoting rational close planting intercropping models with enhanced soil and water conservation efficacy. [Methods] Using a 2:3 silage corn-soybean intercropping pattern (two corn rows intercropped with three soybean rows), simulated rainfall experiments were conducted across slope gradients (10°, 15°, 20°) and rainfall intensities (40, 80, 120 mm/h). Five corn intercropping density treatments (T₁—T₅: 52 500, 60 000, 67 500, 75 000, 82 500 plants per hectare) were established, with soybean density being fixed at 180 000 plants per hectare. Control groups included T₆ (corn monoculture, high density: 82 500 plants per hectare), T₇ (corn monoculture, conventional density: 67 500 plants per hectare), and T₈ (soybean monoculture: 300 000 plants per hectare). [Results] Compared with treatments T₁, T₂, and T₄—T₈, T₃ demonstrated average reductions in surface runoff volume of 59.31%,

收稿日期: 2025-06-11

修回日期: 2025-07-05

接受日期: 2025-07-25

资助项目: 国家自然科学基金(31660378); 云南省重大科技专项绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG00902)

第一作者: 蔡涛(1997—), 男, 云南宣威人, 硕士研究生, 研究方向为作物多样性种植与山地可持续农业。E-mail: 15391373961@163.com

通信作者: 安瞳昕(1974—), 男, 陕西西安人, 博士, 教授, 主要从事作物品种与生态农业可持续发展。E-mail: tongxinan2012@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

43.67%, 20.57%, 15.00%, 40.95%, 62.01%, and 16.40%, and in soil erosion of 61.52%, 50.73%, 27.10%, 17.62%, 43.48%, 66.22%, and 8.47%, respectively. The PLS-SEM structural model revealed that slope gradient exhibited a highly significant negative correlation with infiltration time ($p < 0.01$) while showing a highly significant positive correlation with soil erosion ($p < 0.01$). Slope gradient, rainfall intensity, and runoff volume primarily aggravated soil erosion through direct effects, whereas infiltration time increased erosion mainly via indirect effects. Furthermore, under conditions of low rainfall intensity and gentle slopes, the soybean monoculture system (T_8) demonstrated superior soil and water conservation performance. [Conclusion] In summary, at a corn intercropping density of 67 500 plants per hectare, this system demonstrates effective soil and water conservation across varying rainfall intensities and slope gradients, making it a suitable diversified cropping model for sloping farmland in mountainous areas.

Keywords: rational close planting; soil erosion; sloping farmland; intercropping

我国耕地中山丘坡耕地面积 2 400 万 hm^2 , 占全国耕地总面积的 19.7%^[1], 云南省以山地高原地形为主, 山地高原面积占全省国土总面积约 94%^[2], 云南省 820.22 万 hm^2 耕地里, 661.19 万 hm^2 为坡耕地, 占比约 80.61%, 这使得全省耕地质量难以达到理想状态, 随着坡耕地利用强度加大、化肥施用量增加, 由农业活动引起的水土流失问题逐渐受到人们的普遍关注^[3]。水流的持续作用会引发土壤侵蚀、搬运与沉积的一系列连锁反应, 这便是水土流失现象。当前, 全球超七成的国家和地区正遭受水土流失与土地荒漠化的双重威胁。在广袤的 1.49 亿 km^2 陆地版图中, 水土流失区域占比高达 30%, 每年约有 250 亿 t 富含肥力的表层土壤流失^[4], 聚焦我国云南省, 水土流失状况同样不容乐观。该省水土流失面积积达 14.13 万 km^2 , 占全省国土总面积的 36.9%。在每年 5.1 亿 t 的水土流失总量里, 坡耕地贡献的土壤侵蚀量占比高达 40%^[5]。从侵蚀类型来看, 耕作侵蚀与水力侵蚀是土壤侵蚀的两大“主因”, 二者造成的破坏程度难分伯仲, 对土壤资源与生态系统稳定带来严重挑战^[6]。在南方红壤分布区域, 水热条件优越, 但降水集中且强度大, 再加上土层浅薄、地形复杂多山, 同时频繁的人类活动进一步干扰生态平衡, 多重因素叠加使得土壤侵蚀问题突出, 土地退化严重, 其危害程度在国内仅次于黄土高原地区, 成为亟待解决的生态治理难题^[7]。国内外研究表明, 农田土壤水土流失取决于降雨情况、施肥状况、坡度、作物覆盖度、土壤条件及人为管理措施等多种因素^[8]。而坡耕地作为我国高原山区农业重要的土地资源, 其水土资源的流失不断加剧, 需要从耕作栽培技术等多方面采取措施改善坡耕地水土保持能力。间作作为一种重要的多样性种植模式, 若从作物产量、品质以及水土保持效益等方面考量, 其在坡耕地的生产应用中会展现出较大的发展潜力。

间作是一种利用广泛的农业生态系统, 在控制耕地土壤侵蚀中发挥着重要作用, 前人研究证实, 间作能够减少地表径流量和土壤侵蚀量^[9], 显著提高水土保持能力, 除减少土壤侵蚀量之外, 间作种植还能减少泥沙中包括 N, P, K 和有机碳等的养分含量, 从而减少养分流失, 降低面源污染发生的风险^[10]。此外已有研究表明, 叶面积指数与径流和土壤侵蚀呈负相关^[11], 通过将玉米与豆科作物进行间作种植, 能够有效提升土壤表层的植被覆盖程度, 可显著延长雨水下渗的时间, 减缓地表径流速度, 从而极大地降低坡耕地发生水土流失的可能性, 间作已成为应对坡耕地水土流失问题、维系生态稳定的关键举措之一^[12]。长期以来, 大量研究围绕地上和地下部空间探索间作对土壤侵蚀的影响及调控作用。在地上部分, 随着玉米与大豆形成的复合冠层覆盖率增加, 地表受降雨冲刷强度减弱, 土壤中的泥沙与养分流失量显著降低^[13], 且更高的植被覆盖率能够稳固土壤结构, 减少孔隙堵塞, 为降水入渗创造有利条件, 提升土壤的水分渗透效率^[14]。地上部枝叶的存在形成立体防护层, 在雨滴降落过程中通过空气摩擦、枝叶拦截等方式消耗其动能, 极大减弱雨滴对土壤的冲击破坏; 在地下层面, 间作系统中作物根系对土壤侵蚀的调控作用同样关键, 如改变根系的分布格局、提升根系密集程度, 以及优化根系形态和结构^[15]。根据 Kumar 等^[16]研究成果, 豆科植物的微生物生物量存在明显的根部聚集特性, 能够更有效地提升土壤中水稳性团聚体的数量, 相比非豆科植物具备更强的土壤改良能力, 从而减少水土流失。根系的改变使得更多降雨得以渗入土壤, 减少地表径流产生, 从而增强土壤抗侵蚀能力。然而, 作物种植密度对坡耕地水土流失也能带来很大影响, 王安^[17]通过人工降雨保护性耕作水土保持研究发现玉米种植密度由 39 000~78 000 株/ hm^2 递增, 初始产流减

慢,产流产沙量减少,小麦高留茬下,玉米种植密度为78 000株/hm²时,地表径流的产生最慢,产流产沙量最少;朱上卿^[18]在坡耕地上通过玉米和马铃薯4:4间作,设置了玉米间作密度梯度为48 000~81 000株/hm²,发现玉米间作密度在63 000株/hm²下水土流失较少,且产量达到最大;此外,张晓云等^[19]通过玉米间作马铃薯,得出多样性种植群体中植被层化过程不仅提高了覆盖度,还可以通过各层间彼此的耦合来实现水土流失的控制;李海等^[20]通过坡耕地玉米间作大豆行比配置研究发现:玉米间作大豆较大豆、玉米单作水土保持效果更好。与单作相比,玉米大豆间作在冠层空间布局和土壤根系分布上更具优势,通过合理调控种植密度,间作系统能够从多个层面有效遏制水土流失。

国内外研究探讨不同密度玉米||马铃薯和不同密度玉米单作,以及玉米和小麦、大豆等间作下相关水土流失特征,且证明间作种植模式比单作及裸地的地表径流量、养分流失量均有所降低,然而对不同密度青贮玉米2:3间作大豆种植模式下的水土流失规律尚不清楚,本研究突破传统单作密度研究框架,首创“密度—间作—地形—降雨”四维耦合的试验体系,解析作物配置对坡耕地水土过程的调控规律”。为此,本研究聚焦于探究不同种植密度的青贮玉米与大豆间作组合,在多样坡度与降雨强度条件下的水土保持效果。以期山区坡耕地具有较好水土保持效果的青贮玉米间作大豆合理密植模式推广利用提供技术途径和理论参考,促进云南山区农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地点

研究试验于云南农业大学节水灌溉中心实施,所采用的技术方法为微型径流小区技术,所使用的小区载体为自行设计的钢制槽体,其规格参数为长度160 cm、宽度80 cm、深度30 cm,且具备0°~24°的坡度调节功能。在钢槽结构设计上,在槽体下端上方及底部位置分别布设导流管道,用于同步收集地表径流、土壤侵蚀量及水分入渗量。在大田试验区域旁采集种植作物超10年的耕作层(0—20 cm)土壤,经10 mm筛网过筛后,将过筛土壤按5 cm厚度分层填入微型径流小区,使每个小区土壤容重控制在1.10~1.20 g/cm³且保持基本一致。小区底部铺设纱布,以增强土壤水分渗透性。降雨设备采用南京南林电子科技有限公司生产的HQJY型下喷式人工模拟降雨装置,其雨强调节范围为15~150 mm/h,降雨喷头安装高度设定为9 m,降雨均匀系数达85%以上,降雨有效面积为6m×8m。

土壤类型为酸性红壤,其pH值为6.41,土壤有机质含量34.37 g/kg,碱解氮102.85 mg/kg,速效磷20.27 mg/kg,速效钾91.37 mg/kg。试验地区2024年月平均降雨量151.22 mm,月均气温16.96℃。

1.2 试验设计

供试玉米品种为“金耕28”,大豆品种为“云黄13”。试验采用随机区组设计,在室内利用钢槽开展人工模拟降雨试验,所有试验均设置为玉米||大豆2:3间作模式。共设8个处理,具体处理见表1。

表1 作物种植处理参数

Table 1 Parameters of crop planting treatments

处理	种植方式	玉米密度/ (株·hm ⁻²)	玉米 株距/cm	玉米 行距/cm	大豆密度/ (株·hm ⁻²)	大豆 株距/cm	大豆 行距/cm	种间 行距/cm
T ₁	玉米间作大豆	52500	21.2	40	180000	9.3	30	40
T ₂	玉米间作大豆	60000	18.5	40	180000	9.3	30	40
T ₃	玉米间作大豆	67500	16.5	40	180000	9.3	30	40
T ₄	玉米间作大豆	75000	14.8	40	180000	9.3	30	40
T ₅	玉米间作大豆	82500	13.5	40	180000	9.3	30	40
T ₆	高密度玉米单作CK	82500	20.2	60	—	—	—	—
T ₇	常规玉米单作CK	67500	24.7	60	—	—	—	—
T ₈	大豆单作	—	—	—	300000	8.3	40	—

模拟降雨试验于2024年9月10日至9月17日开展(此时正值玉米乳熟期、大豆鼓粒期,地表覆盖度较高)。参考当地坡耕地坡度范围,将试验坡度设定为10°,15°,20°3个梯度;依据当地降雨特征,设置40 mm/h,80 mm/h,120 mm/h共3种降雨强度进行人

工模拟降雨。每次降雨重复3次,总共24个小区,共进行27次降雨,单次降雨历时为30 min。

此外,在降雨试验前24 h,统一采用40 mm/h雨强预降雨1h,以确保各径流钢槽内的土壤含水量保持一致。

1.3 种植规格及田间管理

播种时,玉米和大豆分别播种3粒和4粒,待幼苗整齐长出后,将每穴玉米间苗至1株,大豆间苗至2株,种植规格遵循当地常规标准。玉米与大豆于5月19日同时播种,均采用挖沟条播方式,其中玉米播种深度控制在5 cm,大豆播种深4 cm。施肥方面,玉米施600 kg/hm²复合肥(氮磷钾比例15:15:15)作底肥,225 kg尿素作苗肥,在大喇叭口期再追施375 kg尿素;大豆施450 kg/hm²复合肥作为基肥。玉米和大豆的种肥施肥深度为5~7 cm,追肥深度为6~8 cm,均在种子或植株侧下方5~7 cm处施入。基肥方面,每个小区平均施用143.99 g复合肥;苗肥阶段,每个小区平均追施37.18 g尿素;大喇叭口期,每个小区平均追施61.78 g尿素。在作物整个生长周期内,各处理组在浇水、除草、培土以及病虫害防治等田间管理措施上保持一致,确保试验条件的统一性。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 地表径流及入渗流产生时间测定 模拟降雨试验降雨开始后用秒表记录地表径流和入渗流产生时间,单位以s表示。

1.4.2 地表径流量、入渗量及土壤侵蚀量测定 当人工模拟降雨试验结束后,采用精度达0.1 cm的直尺,对径流及入渗流收集桶内水体深度 h (cm)进行测定,依据圆台体积计算公式,推导出各处理的径流量(V_R)和下渗流量(V_S)的计算公式,测定并计算不同试验处理条件下的地表径流与土壤下渗水量,最终数据以m³/hm²作为标准计量单位进行记录。完成径流和下渗流水深测量后,将桶内径流充分搅拌均匀,分上、中、下三层共采集250 ml水样进行沉淀处理。过滤后,在105℃条件下烘干至恒重(滤纸质量为1.50 g),随后使用精度为0.000 1 g的电子秤对烘干后的样品称重,记录重量为 m 。最后结合径流量 V_R 依据公式计算得到土壤侵蚀量 M ,单位为kg/hm²[21]。

$$V_R = V_S = 1/3\pi h(r^2 + R^2 + rR) / (1.6 \times 0.8 \times 100) \quad (1)$$

$$M = (m - 1.5) \times V_R \times 1000 / 250 \quad (2)$$

式中: V_R 、 V_S 分别表示径流量和下渗流量(m³/hm²); h 代表径流水深(cm); R 为蓄水桶径流入口处半径(cm); r 为蓄水桶底面半径(cm); M 表示土壤侵蚀量(kg/hm²); m 为水样过滤烘干后的重量(g)。

1.5 数据统计分析

所有指标均通过IBM SPSS Statistics 27.0软件进行方差分析及R语言进行偏最小二乘相关分析,采用邓肯(Duncan)法开展多重比较,设定显著水平为 $p < 0.05$,极显著水平为 $p < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 不同密度青贮玉米间作大豆对产流时间和入渗量的影响

2.1.1 不同密度青贮玉米间作大豆对地表径流产流时间的影响 由表2可知,无论雨强和坡度如何改变, T_6 和 T_8 处理较 T_7 处理以及 T_3 处理较 T_2 处理地表径流产流时间均得到延长。在40 mm/h雨强下,10°和15°坡度时, T_8 处理较 T_7 处理径流时间分别显著延长97.45%,50.45%($p < 0.05$), T_3 处理较 T_1 、 T_2 处理分别显著延长32.74%~72.57%($p < 0.05$),坡度10°时 T_8 处理极显著高于其他处理($p < 0.01$)。20°坡度下, T_3 和 T_5 处理较 T_7 处理显著延长133.09%,129.4%($p < 0.05$),其余处理差异不显著($p > 0.05$)。在80 mm/h雨强下,10°和20°坡度下, T_8 处理较 T_7 处理显著延长59.59%,62.57%($p < 0.05$),10°坡度时 T_4 处理较 T_1 处理极显著延长10.95%($p < 0.01$),15°坡度下 T_4 处理极显著高于 T_2 处理($p < 0.01$),20°坡度下, T_6 处理较 T_7 处理显著延长52.92%($p < 0.05$), T_4 处理产流时间为 T_7 处理的2.3倍($p < 0.01$)。在120 mm/h雨强下,10°坡度时, T_6 处理较 T_2 处理显著延长20.52%($p < 0.05$),其余处理差异不显著($p > 0.05$),15°坡度下 T_8 处理较 T_6 处理显著延长27.29%,20°坡度下 T_5 处理较 T_1 处理显著延长51.53%($p < 0.05$)。

综上所述可知, T_7 处理产流时间始终最短, T_8 处理、 T_3 — T_5 处理能显著延长产流时间,且在低雨强缓坡下处理间差异极显著($p < 0.01$),高雨强陡坡时坡度主导产流时间。这可能是因为玉米单作密度低,地表裸露面积大,土壤入渗率低且径流阻力小,产流更快;大豆单作密度高,地表覆盖度大且根系密集,通过延缓水分下渗显著延长产流时间,尤其在低雨强下优势明显;玉米密度与产流时间呈先增后降的趋势,其中 T_3 处理较其他间作处理能显著延长产流时间。

2.1.2 不同密度青贮玉米间作大豆对入渗流产流时间的影响 由表3可知,无论雨强和坡度如何改变, T_8 处理的入渗流产流时间较 T_6 处理和 T_7 处理均有所缩短。在40 mm/h雨强下:15°坡度下, T_3 、 T_8 处理较 T_1 处理分别显著缩短65.16%,70.87%($p < 0.05$), T_8 处理较 T_7 处理显著缩短68.45%($p < 0.05$),20°坡度时各处理差异不显著($p > 0.05$)。在80 mm/h雨强下:随着坡度的增加, T_8 处理较 T_7 处理显著缩短28.05%~51.93%($p < 0.05$),10°坡度下 T_7 处理入渗时间达最大值, T_6 处理较 T_7 处理极显著缩短47.49%($p < 0.01$), T_3 — T_5 处理较 T_2 处理显著缩短31.82%~48.51%($p < 0.05$);15°和20°坡度下, T_3 、 T_4 处理较 T_1

处理分别显著缩短 30.18%~43.63% ($p < 0.05$); 20° 坡度下, T_2, T_6 处理较 T_1, T_7 处理显著缩短 25.21%~27.03% ($p < 0.05$)。在 120 mm/h 雨强下: 10° 和 20° 坡度下, T_8 处理较 T_7 处理分别显著缩短 55.53%, 100.3% ($p < 0.05$); 10° 坡度下 T_4, T_6 处理较 T_1, T_7 处理分别极显著缩短 54.95%, 41.31% ($p < 0.01$), T_2, T_3, T_8 处理较 T_1 显著缩短 40.92%~45.84% ($p < 0.05$); 20° 坡度时, 各处理间差异不显著 ($p > 0.05$)。

在低雨强 40 mm/h 下—15° 坡度的产流时间普遍最长, 而 20° 坡度下时间缩短, 可能是中等坡度兼具较高径流动能与未饱和土壤入渗的竞争效应。间作中 T_4 处理在缓坡下入渗流产流时间最短。在单作系统中, 大豆单作在 40 mm/h—15° 时产流时间最短, 但高密度玉米单作在相同条件下产流时间更长, 可能是玉米单作系统在高密度配置下可通过冠层覆盖延长入渗时间, 但其效果随雨强增加迅速衰减。

表 2 不同雨强和坡度下密植方式对地表径流产流时间的影响方差分析

Table 2 Analysis of variance for effects of close planting pattern on surface runoff generation time under different rainfall intensities and slopes

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理	产流时间/s		
		坡度 10°	坡度 15°	坡度 20°
40	T_1	162.33±1.22BCc	89.45±8.55Ccd	99.21±11.48Aab
	T_2	155.07±8.38BCc	98.95±6.42Ccd	102.33±2.67Aab
	T_3	215.48±24.78Bb	154.36±16.75ABab	185.19±53.95Aa
	T_4	180.1±2.6BCbc	153.7±26.46ABab	86.14±5.25Aab
	T_5	182.57±9.14BCbc	172.87±6.18Aa	182.26±57.88Aa
	T_6	175.89±20.58BCbc	102.82±7.04BCcd	96.7±9.29Aab
	T_7	143.05±11.21Cc	86.09±7.84Cd	79.45±2.76Ab
	T_8	282.45±22.01Aa	129.52±9.92ABCbc	142.82±28.72Aab
80	T_1	74.06±11.95BCcd	76.2±10.11ABabc	49.67±6.83BCDbc
	T_2	89.08±9.35ABCbcd	61.1±6.85Bc	41.17±3.03CDcd
	T_3	110.61±7.69ABab	88.93±6.45ABab	61.2±3.68Bb
	T_4	117.43±9.76Aa	94.36±5.64Aa	81.77±7.07Aa
	T_5	93.17±10.22ABCabc	73.13±8.51ABabc	50.46±2.76BCDbc
	T_6	88.06±6.45ABCbcd	72.02±7.39ABabc	53.69±3.28BCDbc
	T_7	63.25±7.51Cd	70.58±4.88ABbc	35.11±3.55Dd
	T_8	100.94±6.58ABCabc	79.38±6.43ABabc	57.08±4.44BCb
120	T_1	69.54±2.74ABbc	53.33±6.15ABabc	30.43±2.58ABb
	T_2	66.41±3.4ABcd	57.49±2.47ABabc	35.95±4ABab
	T_3	67.7±5.88ABbcd	59.48±2.69ABabc	37.75±0.83ABab
	T_4	74.53±2.57Aabc	60.62±3.42ABab	36.48±3.5ABab
	T_5	67.19±2.63ABcd	65.31±3.55Aa	46.11±4.08Aa
	T_6	80.04±5.55Aab	50.67±4.38ABbc	33.85±3.85ABb
	T_7	55.67±2.55Bd	48.28±4.23Bc	26.56±4.08Bb
	T_8	82.5±4.85Aa	64.5±1.57ABa	36.69±4.72ABab

注: 表中数据为平均值±标准误。同列不同数字后面的小写和大写字母分别表示同一雨强下处理间差异显著 ($p < 0.05$) 和极显著 ($p < 0.01$)。下同。

2.1.3 不同密度青贮玉米间作大豆对土壤入渗量的影响 由表 4 可知, 40 mm/h 雨强下: 10° 坡度时 T_3 处理入渗量最大, T_1 处理较 T_3 处理极显著降低 56.22% ($p < 0.01$), T_7 处理较 T_6, T_8 处理分别极显著降低 62.45%, 68.19% ($p < 0.01$), 15° 和 20° 坡度时, T_7 处理较 T_3, T_2 处理分别显著降低 50.51%, 67.48% ($p < 0.05$)。在 80mm/h 雨强下: 15° 坡度时 T_7 处理较 T_2, T_3 处理显著降低 60.4%, 59.79% ($p < 0.05$), 20° 坡度

时 T_8 处理入渗量最大, T_7 处理较 T_8 处理极显著降低 54.17% ($p < 0.01$), T_1, T_3 处理较 T_8 处理显著降低 45.75%, 38.57% ($p < 0.05$)。在 120 mm/h 雨强下: 坡度 10° 时, T_7 处理较 T_3 处理显著降低 54.71% ($p < 0.05$), 其余各处理差异不显著 ($p > 0.05$), 在坡度 15° 时, 各处理间差异不显著 ($p > 0.05$), 在坡度 20° 时, T_1 和 T_7 处理分别较 T_4 处理显著降低 51.29%, 56.52% ($p < 0.05$)。

表 3 不同雨强和坡度下密植方式对入渗时间的影响方差分析
 Table 3 Analysis of variance for effects of close planting pattern on infiltration time under different rainfall intensities and slopes

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理	入渗时间/s		
		坡度 10°	坡度 15°	坡度 20°
40	T ₁	349.09±6.84ABab	408.1±116.49Aa	223.1±13.45Aa
	T ₂	334.44±8.41ABab	221.29±46.74Aabc	174.52±17.93Aa
	T ₃	266.99±44.44ABb	142.2±12.65Ac	173.22±17.83Aa
	T ₄	235.66±43.23Bb	162.6±21.04Abc	215.88±14.21Aa
	T ₅	284.14±44.92ABab	198.27±16.63Aabc	194.45±18.32Aa
	T ₆	329.21±48.84ABab	307.67±65.15Aabc	220.39±18.39Aa
	T ₇	391.06±7.65Aa	376.7±125.51Aab	209±15.65Aa
	T ₈	295.96±38.51ABab	118.86±6.88Ac	165.89±21.32Aa
80	T ₁	139.21±24.34BCbc	160.07±17.74Aa	151.08±10.97Aa
	T ₂	184.3±16.98ABab	96.61±11.85ABCbc	110.24±10.42Ac
	T ₃	98.86±3.22Cc	90.23±5.89Cbc	105.49±12.78Ac
	T ₄	94.9±6.93Cc	95.44±8.96BCbc	113.12±11.97Abc
	T ₅	125.66±9.63BCc	133.2±8.83ABCab	139.29±11.54Aabc
	T ₆	117.08±14.66BCc	121.37±11.12ABCabc	111.69±7.24Ac
	T ₇	222.95±37.36Aa	156.33±31.87ABa	149.34±14.22Aab
	T ₈	110.93±14.12BCc	75.15±4.26Cc	107.45±15.17Ac
120	T ₁	148.76±23.53ABab	126.08±20.94Aabc	111.02±6.82Aa
	T ₂	80.64±12.86BCcd	89.49±6.5Aabc	81.5±12.98Aa
	T ₃	87.89±9.6BCcd	67.25±4.79Abc	94.54±10.75Aa
	T ₄	67.02±2.99Cd	97.1±17.3Aabc	105.73±9.36Aa
	T ₅	127.82±14.58ABCbc	100.02±27.48Aabc	103.69±11.08Aa
	T ₆	106.33±18.05BCbcd	151.21±37.08Aab	105.38±9.29Aa
	T ₇	181.16±27.79Aa	162.94±49.61Aa	114.26±13.37Aa
	T ₈	80.57±3.8BCcd	62.64±3.91Ac	104.3±9.9Aa

随着雨强的增大,多数处理的下渗量呈现先升后降或波动趋势,但单作玉米整体表现较弱。在低雨强缓坡下,玉米—大豆间作下渗量显著高于单作。其中 T₃处理在各类雨强下表现最优,而密度过高时下渗量下降,可能是密植因植株竞争导致土壤结构破坏。大豆单作在 80 mm/h, 20°坡度时下渗量显著高于玉米单作,凸显豆科植物深层根系对水分下渗的促进作用,而常规玉米单作在所有条件下均表现最差,可能是单一玉米作物易导致土壤板结,从而导致入渗量减少。

2.2 不同密度青贮玉米间作大豆对地表径流量和侵蚀量的影响

2.2.1 不同密度青贮玉米间作大豆对地表径流量的影响 从表 5 可知,无论雨强和坡度如何变化, T₃处理径流量均低于 T₁处理。在 40 mm/h 雨强下, 10°坡度下, T₃处理径流量较 T₇和 T₂处理分别显著降低 88.31%, 89.58% ($p < 0.05$), 15°坡度下, T₇处理显著

高于其他处理 ($p < 0.05$), 其余处理差异不显著, 在 20°坡度下 T₃, T₈和 T₅处理径流量显著低于 T₁和 T₇处理, 其中 T₃处理较 T₁处理极显著降低 84.72% ($p < 0.01$), T₈处理较 T₇处理极显著降低 80.92% ($p < 0.01$)。在 80 mm/h 雨强下, 10°和 15°坡度下, T₃, T₄, T₅处理径流量显著低于 T₁处理, 如 T₃处理较 T₁处理极显著降低 75.3% ($p < 0.01$), 10°坡度下 T₃, T₄处理分别较 T₂处理显著降低 61.48%, 51.42% ($p < 0.05$), 15°和 20°坡度下, T₈处理较 T₇处理显著降低 47.38%, 63.48% ($p < 0.05$), 20°坡度时 T₃处理较 T₁, T₄, T₇处理分别显著降低 60.61%, 57.65%, 61.86% ($p < 0.05$)。在 20mm/h 雨强下, 10°和 15°坡度下, T₃, T₅, T₈处理较 T₁处理分别显著降低 42.82%, 45.66%, 39.88% ($p < 0.05$), 15°坡度下 T₈处理较 T₇处理显著降低 39.92% ($p < 0.05$), 20°坡度下 T₃处理较 T₁处理显著降低 32.69% ($p < 0.05$), 且极显著低于 T₇处理 ($p < 0.01$), 其余处理差异不显著 ($p > 0.05$)。

随着雨强的增加,所有处理的径流量均显著上升, T₇处理径流量最高,显著高于高密度单作玉米,可能是玉米种植密度稀疏导致水土流失加剧。而大豆单作 T₈在低雨强缓坡区表现优异,凸显豆科植物

冠层密集、根系固土的优势。在同一雨强下,间作处理间径流量增加幅度随着坡度的增大而减少,且随着玉米密度的增加,地表径流量有先降低后趋于稳定的趋势。

表 4 不同雨强和坡度下密植方式对入渗量的影响方差分析
Table 4 Analysis of variance for effects of close planting pattern on infiltration volume under different rainfall intensities and slopes

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理	入渗量/(m ³ ·hm ⁻²)		
		坡度 10°	坡度 15°	坡度 20°
40	T ₁	39.77±8.18BCc	59.94±10.77Aab	63.22±13.01Aab
	T ₂	81.32±1.94ABab	77.97±2.36Aab	81.92±13.19Aa
	T ₃	90.84±8.19Aa	84.95±7.23Aa	73±22.38Aa
	T ₄	79.41±1.54ABab	61.7±1.79Aab	51.74±4.21Aab
	T ₅	49.86±1.71ABCbc	43.95±11.91Aab	37.49±2.93Aab
	T ₆	75.07±15.88ABab	61.86±14.22Aab	45.59±4.06Aab
	T ₇	28.19±9.07Cc	42.04±7.06Ab	26.64±4.19Ab
	T ₈	88.62±22.7Aa	77.96±26.06Aab	63.95±23.83Aab
80	T ₁	93.77±30.2Aa	63.59±14.49Aab	73.45±19.11ABb
	T ₂	109.9±16.36Aa	101.65±33.64Aa	109.28±15.96ABab
	T ₃	114.97±6.01Aa	100.09±13.41Aa	83.17±8.89ABb
	T ₄	125.38±4.06Aa	71.33±14.66Aab	89.59±10.57ABab
	T ₅	80.62±7.14Aa	91.13±16.95Aab	85.36±11.67ABab
	T ₆	91.27±31.03Aa	79.41±12.1Aab	95.34±16.52ABab
	T ₇	57.61±11.66Aa	40.25±7.44Ab	62.05±7.91Bb
	T ₈	110.19±41.77Aa	91.24±12.97Aab	135.4±26.59Aa
120	T ₁	53.79±5.9Aab	61.86±13.16Aa	53.29±11.78Ab
	T ₂	104.08±22.09Aab	84.11±7.15Aa	72.24±14.8Aab
	T ₃	112.11±29.02Aa	118.96±23.13Aa	101.05±20.16Aab
	T ₄	88.29±21.15Aab	87.68±11.88Aa	109.41±6.05Aa
	T ₅	88.7±4.19Aab	85.03±34.62Aa	70.64±18.78Aab
	T ₆	100.87±17.92Aab	78.72±14.55Aa	71±29.97Aab
	T ₇	50.78±9.86Ab	60.3±15.67Aa	47.57±11.22Ab
	T ₈	92.28±20.42Aab	92.73±24.58Aa	92.64±7.24Aab

2.2.2 不同密度青贮玉米间作大豆对侵蚀量的影响
 从表 6 可知,无论雨强和坡度如何改变, T₈处理和 T₆处理侵蚀量均低于 T₇处理。在 40 mm/h 雨强下:10°和 15°坡度下, T₇处理侵蚀量最大, T₈处理较 T₇处理极显著降低 69.24%, 85.04% ($p < 0.01$), T₃, T₄处理较 T₁处理分别显著降低 60.3%~63.58% ($p < 0.05$), T₂, T₆, T₈处理较 T₁处理分别显著降低 51.11%~64.49% ($p < 0.05$), 20°坡度下, T₂处理侵蚀量最大, T₁处理较 T₂处理极显著降低 66.44% ($p < 0.01$), T₇处理显著高于其他处理 ($p < 0.05$)。在 80 mm/h 雨强下:10°和 15°坡度下, T₃, T₅, T₈处理较 T₁处理显著降低 73.11%~90.95% ($p < 0.05$), T₈处理较 T₇处理极显著降低 76.94%, 82.51% ($p <$

0.01)。20°坡度下, T₃, T₄处理较 T₂处理分别显著降低 34.41%, 39.61% ($p < 0.05$), T₄处理较 T₆, T₈处理显著降低 36.16%~38.75% ($p < 0.05$)。雨强为 120 mm/h 时:10°坡度下, T₃处理较 T₁, T₂, T₈处理分别显著降低 62.38%~68.29% ($p < 0.05$), 15°坡度下, 各处理间无显著差异 ($p > 0.05$)。20°坡度下, T₃处理较 T₁, T₂处理分别显著降低 53.28%、45.81% ($p < 0.05$)。

侵蚀量随着降雨强度的增加而增加,玉米一大豆间作能显著抑制侵蚀,在中低雨强和坡度下效果最佳;侵蚀量随着玉米间作密度增加呈先减少后增加的趋势,其中 T₃处理整体表现最优,可能是因为适度密植形成的连续冠层能有效拦截雨滴击溅,从而

减少土壤侵蚀,但密度过高时侵蚀量有所回升,可能因植株竞争导致覆盖度下降。单作系统中,大豆单作在 40 mm/h 各坡度下侵蚀量最低,而高密度玉米

单作在 120 mm/h, 20°坡度时侵蚀量较 T₃高,可能是高雨强陡坡下土壤快速饱和,坡度加速径流汇集,削弱了密植处理的调控作用。

表 5 不同雨强和坡度下密植方式对地表径流量的影响方差分析

Table 5 Table 6 Analysis of variance for effects of close planting pattern on surface runoff volume under different rainfall intensities and slopes

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理	径流量/(m ³ ·hm ⁻²)		
		坡度 10°	坡度 15°	坡度 20°
40	T ₁	66.6±27.45Aabc	121.25±31.29Aab	162.77±57.74Aa
	T ₂	100.01±30.84Aab	63.95±14.02Aab	67.52±13.87ABbc
	T ₃	11.69±3.84Ac	60.6±19.6Aab	24.87±2.99Bc
	T ₄	29.74±8.72Abc	35.86±8.09Ab	75.72±25.54ABbc
	T ₅	45.55±16.11Aabc	31.67±2.59Ab	38.55±10.58Bc
	T ₆	76.48±28.5Aabc	103.32±16.98Aab	91.79±13.35ABabc
	T ₇	112.17±43.17Aa	128.34±64.84Aa	148.04±29.05Aab
	T ₈	52.99±14.43Aabc	45.1±11.09Aab	28.25±3.47Bc
80	T ₁	358.49±27.69Aa	364.04±74.73ABa	414.34±9.41Aa
	T ₂	229.82±38.87ABCbc	276.92±50.77ABCab	316.77±66.43ABabc
	T ₃	88.53±15.32Cd	149.58±16.19Cb	163.19±8.55Bc
	T ₄	111.64±24.48Cd	126.7±7.64Cb	385.3±61.72Aab
	T ₅	142.5±47.22Ccd	185±65.33BCb	249.58±98.53ABbc
	T ₆	191.24±47.55BCcd	247.37±58.37ABCab	235.29±52.57ABbc
	T ₇	323.63±19.4ABab	393.7±11.73Aa	427.89±14.65Aa
	T ₈	184.73±45.37BCcd	207.17±43.5ABCb	156.28±23.49Bc
120	T ₁	492.87±55.07ABab	566.46±78.46Aa	546.85±47.78ABab
	T ₂	380.17±33.27BCbc	445.1±53.29ABabc	476.85±29.65ABabc
	T ₃	281.83±6.2Cc	304.03±27.34Bc	368.08±27.6Bc
	T ₄	372.3±37.53BCbc	374.53±62.99ABbc	476.95±60.1ABabc
	T ₅	267.84±67.28Cc	394.58±79.13ABabc	396.15±106.71Bbc
	T ₆	316.68±34.38Cc	357.42±26.16ABbc	459.01±31.54ABabc
	T ₇	583.92±26.61Aa	538.21±24.79ABab	621.46±9.99Aa
	T ₈	296.29±26.39Cc	323.37±76.4ABc	390.48±30.38Bbc

2.3 降雨强度和坡度与水土流失相关参数的相关性分析

由图 1 可知,降雨强度与入渗量存在显著正相关关系($p<0.05$),与径流产生时间呈极显著负相关关系($p<0.01$);坡度和入渗时间呈极显著负相关关系($p<0.01$),和侵蚀量呈极显著正相关关系($p<0.01$);径流产生时间与侵蚀量呈极显著负相关($p<0.01$),入渗时间和入渗量呈极显著负相关关系($p<0.01$)。

由图 2 结构方程模型的效应分解可知,雨强是影响水土流失的主要因素,坡度、雨强和径流量均主要通过直接效应来加剧侵蚀,可能是强降雨会在短时间内产生大量的坡面径流以及加剧土壤溅蚀,从而增加侵蚀量,入渗时间主要通过间接效应来增大侵

蚀,可能是随着产生入渗流时间的延长,导致径流量增加,进一步增大侵蚀量,入渗量通过直接效应抑制侵蚀,但作用较弱。

3 讨论

本试验表明,青贮玉米密度配置间作大豆对地表径流产生时间、入渗特性及土壤侵蚀过程具有显著调控作用($p<0.05$),在径流调控和土壤侵蚀分析显示方面,间作体系较单作模式表现出更优的水土保持性能,间作处理中,随着玉米种植密度的增加,地表径流产流时间得到有效延缓,地表径流量和侵蚀量显著降低。当玉米密度从 52 500 株/hm²增至 67 500 株/hm²时,在 40 mm/h 径流量和侵蚀量有

效降低,且玉米密度达到67 500株/hm²时,径流产流时间较常规玉米单作有效延长,地表径流量则有效减少,这与前人研究相符,间作和增加种植密度均能通过提升地表植被覆盖度实现水土保持,二者可增大群体叶面积指数与覆盖度^[22]。从入渗特性来看,间作体系显著改善土壤渗透性能,在80 mm/h(10°坡度)降雨下,T₃处理入渗时间较单作对照T₇有效缩短,且对应入渗量达到较大值,可能与间作系统形成的立体冠层结构有关,大豆的矮生特性有效延缓雨滴击溅作用,同时玉米的深根系增强了土壤抗剪强

度,这种差异可能源于间作体系促进的土壤孔隙连通性改善:玉米主根形成的垂直孔隙与大豆须根构建的水平孔隙网络协同作用,形成立体渗流通道,表明适宜密度的间作种植模式通过冠层截留和根系网络改善土壤入渗性能。此外已有研究显示,作物覆盖是控制土壤侵蚀的关键手段,高地表覆盖可直接拦截降雨径流,促进雨水入渗^[23],同时,作物根系通过改变土壤结构,影响水分入渗与土壤侵蚀过程^[11],因此适宜的青贮玉米密度间作大豆能有效提高地表覆盖率,对水土流失有较好的阻控作用。

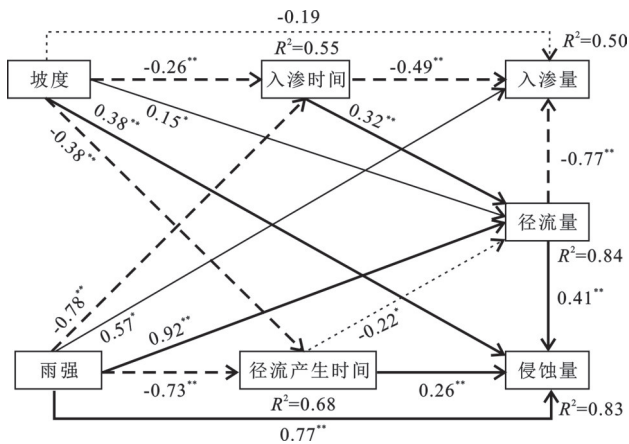
表6 不同雨强和坡度下密植方式对侵蚀量的影响方差分析
Table 6 Analysis of variance for effects of close planting pattern on erosion amount under different rainfall intensities and slopes

雨强/ (mm·h ⁻¹)	处理	侵蚀量/(kg·hm ⁻²)		
		坡度10°	坡度15°	坡度20°
40	T ₁	63.27±1.61ABab	126.11±32.97ABa	113.56±52.79BCbc
	T ₂	30.93±1.13BCc	118.14±26.06ABCab	338.36±52.54Aa
	T ₃	25.12±5.78Cc	45.93±10.1BCbc	28.02±4.92Cc
	T ₄	37.05±16.95BCc	46.03±4.93BCbc	59.21±23.15Cc
	T ₅	42.38±3.09ABCbc	48.36±12.48BCbc	86.08±20.61BCc
	T ₆	29.68±1.68BCc	81.79±36.09ABCabc	57.7±6.38Cc
	T ₇	73.05±11.03Aa	149.64±30.65Aa	210.72±57.52ABb
	T ₈	22.47±8.39Cc	22.38±2.01Cc	23.44±8.05Cc
80	T ₁	986.62±177.18ABab	1919.25±241.97Aab	2437.33±160.95ABa
	T ₂	318.41±89.66ABc	909.19±273.6ABCbc	1794.35±293.76BCb
	T ₃	189.5±47.3Bc	173.35±103.64Cc	1176.97±309.42Ccd
	T ₄	396.36±184.69ABbc	1523.6±410.25ABCab	1056.38±48.63Cd
	T ₅	120.22±69.39Bc	336.2±117.62BCc	1582.71±162.6Cbcd
	T ₆	762.44±293.22ABabc	1751.42±484.32ABab	1724.78±114.19BCbc
	T ₇	1150.74±395.61Aa	2322.09±630.32Aa	2858.26±81.68Aa
	T ₈	265.32±98.07Bc	406.24±114.51BCc	1654.84±125.49Cbc
120	T ₁	3308.62±251.76ABa	3189.26±380.53Aa	8483.78±1352.51Aa
	T ₂	2796.15±356.37ABab	3687.76±73.91Aa	7314.61±352.92ABab
	T ₃	1051.99±15.97Bc	2916.85±532.42Aa	3963.6±263.46Bc
	T ₄	1319.86±249.13Bbc	2762.45±415.84Aa	4648±495.29ABbc
	T ₅	1242.31±371.79Bbc	3077.39±99.84Aa	4325.87±761.61ABbc
	T ₆	2336.9±683.02ABabc	2801.28±54.19Aa	5905.45±404.03ABabc
	T ₇	3684.07±719.25Aa	3986.52±942.55Aa	6748.74±2078.58ABabc
	T ₈	3317.6±956.58ABa	3376.01±83.72Aa	4720.84±361.53ABbc

此外,王安^[17]发现玉米种植密度由78 000~117 000株/hm²递增,初始产流加快,径流量和产沙量增加,本研究发现间作密度超过75 000株/hm²后入渗量有所下降,反而使20°坡面径流量增加,且间作密度增至82 500株/hm²时侵蚀量出现反弹,在120 mm/h降雨下,T₅处理在10°和15°坡面下入渗时间较T₂—T₄均

延长,可能是高密度种植导致的冠层郁闭抑制大豆生长,玉米种植密度过大导致根系发育不良,地表覆盖质量下降,与熊焱宁^[24]通过麦/玉/豆带状间作复合种植发现随着玉米种植密度的增加,均显著抑制大豆的生长的研究结果一致。大豆单作在40 mm/h,坡度为10°径流时间最长,但在20°陡坡条件下的径流延迟效

应显著弱于间作系统,印证禾本科与豆科作物间作的协同保水优势。此外,大豆单作较玉米单作可显著减少地表径流量与侵蚀量,同时加快雨水下渗速率、提升入渗量,这一结果与相关研究结论相符^[25],这可能是由于大豆拥有密集的浅层根系,能够增强表层土壤的持水能力,且大豆植株较为低矮,地表覆盖度更高,可有效削弱雨滴的动能,进而增加土壤入渗量,减少地表径流量和侵蚀量^[26]。根据已有研究成果,植被结构的垂直分层对于雨水径流调控具有显著作用。当植被垂直分层数量增多时,处于高位的玉米冠层会先承接降雨冲击,形成第一层缓冲屏障,随后,低位大豆冠层能够对穿透上层冠层的雨滴进行二次截留,通过多层植被的协同作用持续衰减雨水动能^[27],这种分层拦截机制能够有效降低雨滴对土壤表面的击溅侵蚀力,这一理论能够很好地阐释本试验中,相较于单作种植模式,间作模式下水土流失量显著减少的现象。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$, 图中部分不显著路径未显示。

图 1 降雨强度、坡度对水土流失相关参数影响的 PLS-SEM 结构模型

Fig. 1 PLS-SEM structural model of effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion parameters

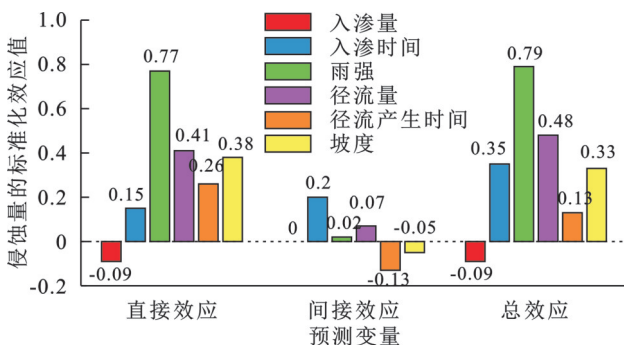


图 2 预测变量对侵蚀量的 PLS-SEM 效应分解图: 直接效应与间接效应

Fig. 2 PLS-SEM effect decomposition of effects of predictor variables on erosion amount: direct effects and indirect effects

已有研究表明,降雨是驱动坡耕地地表径流形成的核心动力因子^[28],降雨强度的变化直接关系到

地表径流量的多寡与土壤侵蚀的剧烈程度。本研究根据降雨强度、坡度对水土流失相关参数影响的 PLS-SEM 结构模型图表明:雨强是影响水土流失的主要因素,主要通过直接效应来加剧侵蚀,降雨强度与地表径流量、土壤侵蚀量均存在高度显著的正相关关系($p < 0.01$)。这一现象或可归因于高强度降雨情境下,植株叶片对雨滴的拦截缓冲作用大幅降低。大量雨水难以被植被有效截留,而是迅速在地表汇聚形成径流。快速生成的地表径流显著增强坡面水流的冲刷能力,促使水流向低洼处集中,进而诱发沟蚀现象,加剧土壤侵蚀程度^[29]。作物多样性种植群体中植被不仅提高覆盖度,而且不同植被彼此的耦合影响了对水土流失的控制效果^[19],使得不同雨强下对水土流失的影响不同。针对玉米间作大豆的种植模式,本研究发现:相比高雨强,低强度降雨环境下,随着玉米种植密度的提升,间作体系中不同密度配置的土壤侵蚀情况差异更为明显。

已有研究显示,随着坡度增大,地表径流量产生时间缩短,径流量与侵蚀量增加,入渗量减少^[30],即坡度增大会加剧坡耕地水土流失。与本试验结果一致:由 PLS-SEM 结构模型图可知,随着坡度上升,地表径流量和侵蚀量增大,入渗量减少,坡度与地表径流产生时间呈极显著负相关($p < 0.01$),坡度主要通过直接效应来影响侵蚀量,值得注意的是,当雨强增大时,易促使集中流形成,进而削弱坡度对地表径流产生时间的影响。本研究结果表明坡度与入渗时间存在负相关关系,这与李海等^[20]通过模拟降雨玉米间作大豆行比配置研究中发现:随着坡度增加,相应的下渗时间能得到延长的结果不一致,可能是因为坡度增大后通过增强重力驱动的水流速度、提高剪切力破坏土壤入渗条件、加速径流汇集,从而缩短雨水在地表的滞留时间和实际入渗时间,最终导致入渗流产生时间提前。在 20°陡坡下所有处理的径流量和侵蚀量较 10°坡度显著增加($p < 0.05$),但间作系统对坡度的敏感性低于单作,且本研究进一步揭示,间作体系的保土效益随坡度增加呈非线性衰减。在低雨强下,随着坡度的增加大豆单作地表径流量有所降低,且坡度增加对各处理的侵蚀量影响小,在高雨强下,随着坡度增加同处理的侵蚀量剧增。此外,在间作模式中,随着玉米密度的提高,坡度变化对侵蚀量的影响幅度有所减弱,且在 40 mm/h 雨强、10°坡度条件下,大豆单作的径流产生时间最长,侵蚀量最低,但在中高雨强或陡坡下效果弱于间作。需要说明的是,本研究采用微型径流小区人工模拟降雨方式开展,作物种植面积较小,且未完全模拟自然降雨条件。因

此,若要明确不同密度青贮玉米间作大豆在大面积坡耕地上对水土流失的实际阻控效果,需进一步开展多年自然降雨条件下的田间试验进行验证。

4 结论

大豆单作与高密度青贮玉米单作的土壤侵蚀控制效果均优于常规玉米单作。在间作种植模式中,地表径流量和侵蚀量随青贮玉米密度增加呈现先减少后升高的趋势。其中,当青贮玉米间作密度为67 500株/hm²时,较其他处理的地表径流量平均减少15%~62.01%,侵蚀量平均减少8.47%~66.22%,展现出更优的水土保持效果,是一种对山区坡耕地具有较好水土保持效果的青贮玉米间作大豆合理密植模式,通过推广该密植模式可促进云南山区农业的可持续发展。

降雨强度是影响水土流失的主导因素,雨强与坡度均通过直接效应来影响侵蚀量,在低雨强缓坡条件下,大豆单作模式展现出更优的水土保持效果。

参考文献(References):

- [1] 鄂竞平. 中国水土流失与生态安全综合科学考察总结报告[J]. 中国水土保持, 2008(12):3-6.
E J P. Summary report on the comprehensive scientific investigation of soil erosion and ecological security in China[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12):3-6.
- [2] 张丽,张乃明,张仕颖,等. AMF和间作对作物产量和坡耕地土壤径流氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2019,35(22):216-224.
Zhang L, Zhang N M, Zhang S Y, et al. Effects of AMF and intercropping on crop yield and soil nitrogen and phosphorus loss by runoff on slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(22):216-224.
- [3] 李锐,上官周平,刘宝元,等. 近60年我国土壤侵蚀科学研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2009,7(5):1-6.
Li R, Shangguan Z P, Liu B Y, et al. Advances of soil erosion research during the past 60 years in China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(5):1-6.
- [4] 王彪东,单晓翠. 我国水土流失现状和防治对策[J]. 农业与技术, 2016,36(5):83-84.
Wang B D, Shan X C. Current status of soil erosion and prevention and control countermeasures in China[J]. Agriculture and Technology, 2016,36(5):83-84.
- [5] 赵璟,武平,王克勤,等. 云南省政府系统决策咨询研究课题组,云南省坡耕地高效水土保持对策研究[J]. 水利发展研究, 2013,13(1):34-38.
Zhao J, Wu P, Wang K Q, et al. Research group of decision-making consultation in Yunnan Provincial government system, research on high-efficiency soil and water conservation countermeasures for sloping farmland in Yunnan Province [J]. Water Resources Development Research, 2013,13(1):34-38.
- [6] Lee S, Chu M L, Guzman J A, et al. A comprehensive modeling framework to evaluate soil erosion by water and tillage[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279:111631.
- [7] 陈世发. 南方红壤区典型流域土壤侵蚀格局与风险评价[D]. 福州:福建师范大学, 2018.
Chen S F. Evaluation of soil erosion patterns and risk in typical watershed of southern red soil region [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2018.
- [8] Walter M T, Gao B, Parlange J Y. Modeling soil solute release into runoff with infiltration[J]. Journal of Hydrology, 2007,347(3/4):430-437.
- [9] Laloy E, Biielders C L. Modelling intercrop management impact on runoff and erosion in a continuous maize cropping system: part II. Model Pareto multi-objective calibration and long-term scenario analysis using disaggregated rainfall [J]. European Journal of Soil Science, 2009,60(6):1022-1037.
- [10] VAN DE N, Douglas I, McMorro J, et al. Erosion and nutrient loss on sloping land under intense cultivation in southern Vietnam [J]. Geographical Research, 2008,46(1):4-16.
- [11] 王婷,王强学,李永梅,等. 玉米大豆间作对作物根系及土壤团聚体稳定性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021,36(3):507-515.
Wang T, Wang Q X, Li Y M, et al. Effect of maize and soybean intercropping on root system and soil aggregate stability[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2021,36(3):507-515.
- [12] Nguyen X H, Pham A H. Assessing soil erosion by agricultural and forestry production and proposing solutions to mitigate: a case study in son La province, Vietnam [J]. Applied and Environmental Soil Science, 2018, 2018(1):1-10.
- [13] 高林林. 典型紫色土坡耕地不同施肥处理径流的氮素流失特征研究[D]. 南充:西华师范大学, 2018.
Gao L L. Study on nitrogen loss characteristics of runoff in typical purple soil slope[D]. Nanchong: China West Normal University, 2018.
- [14] 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.
Feng X J, Zheng Z C, Li T X, et al. Characteristics of nitrogen loss in sloping cropland of purple soil during maize growth stage under rainstorm [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018,51(4):738-749.
- [15] 张志兰,范志伟,王永刚,等. 玉米马铃薯间作系统中玉

- 米的恢复性生长[J].西南农业学报,2018,31(2):284-288.
- Zhang Z L, Fan Z W, Wang Y G, et al. Restorative growth of maize in maize and potato intercropping system[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2018,31(2):284-288.
- [16] Kumar S, Meena R S, Lal R, et al. Role of legumes in soil carbon sequestration[M]//Legumes For Soil Health and Sustainable Management. Singapore: Springer Singapore, 2018:109-138.
- [17] 王安.人工降雨条件下保护性耕作的水土保持效应研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.
- Wang A. Effects of conservation tillage on soil and water conservation under artificial rainfall [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2013.
- [18] 朱上卿.云南省坡耕地青贮玉米间作马铃薯水土保持效应研究[D].昆明:云南农业大学,2023.
- Zhu S Q. Soil conservation of silage maize and potato intercropping on upland in Yunnan Province [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
- [19] 张晓云,郎凤莲,李永贤,等.坡地玉米马铃薯间作群体地上部垂直层化对水土流失的影响[J].云南农业大学学报:自然科学,2017,32(5):903-911.
- Zhang X Y, Lang F L, Li Y X, et al. Effects of vertical stratification on the soil and water loss of maize and potato intercropping on sloping land [J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2017,32(5):903-911.
- [20] 李海,沈鹏,吕凯,等.玉米间作大豆行比配置对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持研究,2024,31(4):11-19.
- Li H, Shen P, Lü K, et al. Effect of row ratio configuration of maize intercropping soybean on soil and water loss in slope farmland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(4):11-19.
- [21] 赵桂茹,安瞳昕,欧阳铖人,等.青贮玉米氮投入对坡耕地土壤侵蚀及水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):72-79.
- Zhao G R, An T X, Ouyang C R, et al. Impact of nitrogen input of silage maize on soil erosion and water-stable aggregates in sloping farmland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):72-79.
- [22] Xia L Z, Hoermann G, Ma L, et al. Reducing nitrogen and phosphorus losses from arable slope land with contour hedgerows and perennial alfalfa mulching in Three Gorges Area, China [J]. Catena, 2013,110:86-94.
- [23] El Kateb H, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: a field experiment in Southern Shaanxi Province, China [J]. Catena, 2013,105:1-10.
- [24] 熊焱宁.不同种植模式、品种、密度对玉米产量和品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2024.
- Xiong Y N. The influence of different planting modes, varieties, and densities on maize yield and quality [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2024.
- [25] 马志鹏,范茂攀,陈小强,等.间作模式下作物根系与坡耕地红壤抗蚀性的关系[J].水土保持学报,2016,30(4):68-73.
- Ma Z P, Fan M P, Chen X Q, et al. Study on root system and red soil anti-erodibility of slope farmland under intercropping of maize and soybean [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016,30(4):68-73.
- [26] Hou J, Wang H Q, Fu B J, et al. Effects of plant diversity on soil erosion for different vegetation patterns [J]. Catena, 2016,147:632-637.
- [27] Fan Z W, An T X, Wu K X, et al. Effects of intercropping of maize and potato on sloping land on the water balance and surface runoff [J]. Agricultural Water Management, 2016,166:9-16.
- [28] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow [J]. Catena, 2019,173:494-504.
- [29] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China [J]. Journal of Hydrology, 2007,335(3/4):247-258.
- [30] Brivois O, Bonelli S, Borghi R. Soil erosion in the boundary layer flow along a slope: a theoretical study [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2007,26(6):707-719.