

作物覆盖度对土壤侵蚀的影响

彭 琼¹, 刘宝元^{1,2}, 曹 琦³, 刘逸滨³

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点室,陕西 杨凌 712100;
2.北京师范大学自然科学高等研究院,广东 珠海 519087;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为研究传统耕作模式下坡耕地作物覆盖度对土壤侵蚀的影响,利用冬小麦不同的种植密度和生长期来模拟作物不同的覆盖度情况。采用人工模拟降雨方法测定 0,150 万,250 万,350 万,450 万株/hm² 5 种不同密度处理在不同生育期的覆盖度、地表径流和土壤侵蚀,分析作物覆盖度对土壤侵蚀的影响。结果表明:(1)坡耕地作物种植密度的不同导致覆盖度产生差异,对土壤侵蚀有明显的影响,作物覆盖度一般随种植密度的增加而增加,但如果密度过大,由于生长状况不佳,覆盖度反而变小,表现为 7.5 万株/hm² 时覆盖度最大,种植密度最大的 9 万株/hm² 的覆盖度却不是最大;(2)侵蚀量和径流量与作物覆盖均呈较好的指数函数关系,分别为 $Y = 44.37e^{-0.09x}$ ($p < 0.01$), $Y = 1089.19e^{-0.02x}$ ($p < 0.01$),即随作物覆盖度的增加,径流量和侵蚀量减少;(3)土壤侵蚀和地表径流之间存在显著的指数函数关系($R^2 = 0.96$)。研究结果对分析传统耕作农地的土壤侵蚀,量化耕作措施因子和准确预测土壤侵蚀,指导农田水土保持有重要意义。

关键词: 土壤侵蚀; 坡耕地; 作物覆盖度; 地表径流; 水保效益

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)05-0097-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.05.014

Effect of Crop Coverage on Soil Erosion

PENG Qiong¹, LIU Baoyuan^{1,2}, CAO Qi³, LIU Yibin³

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Advanced Institute of Natural Sciences, Beijing Normal University, Zhuhai, Guangdong 519087; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to study the effects of different planting densities on soil erosion of sloping cropland under the conventional tillage, different planting densities and growth periods of winter wheat were used to simulate the different crop coverages. The artificial rainfall simulation method was used to measure coverage, surface runoff and soil erosion of five different density treatments (0, 1 500 000, 2 500 000, 3 500 000 and 4 500 000 plants/hm²) in different growth periods, and to analyze the effect of crop coverage on soil erosion. The result showed that: (1) The difference of crop planting density on sloping cropland lead to the difference of coverage, which had a significant impact on soil erosion. Crop coverage generally increased with the increasing of planting density, however, if the density was too high, due to poor growth conditions, the coverage became smaller. The coverage was the largest at 75 000 plants/hm², but the coverage of 90 000 plants/hm², which was the highest planting density, was not the largest. (2) There was a good exponential function relationship between erosion and runoff and crop cover, and the function was $Y = 44.37e^{-0.09x}$ ($p < 0.01$), $Y = 1089.19e^{-0.02x}$ ($p < 0.01$), respectively. That is, with the increasing of crop coverage, runoff and erosion decreased. (3) There was a significant exponential function relationship between soil erosion and surface runoff ($R^2 = 0.96$). These conclusions were of great significance for analyzing soil erosion in conventional tillage cropland, quantifying the factors of tillage measures, accurately predicting soil erosion, and guiding cropland water and soil conservation.

Keywords: soil erosion; sloping cropland; crop coverage; surface runoff; soil and water conservation benefits

收稿日期:2022-03-08
资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1500704)
第一作者:彭琼(1996—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:Jonespq@163.com
通信作者:刘宝元(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:Baoyuan@bnu.edu.cn

土壤侵蚀使土壤退化,它不光造成土壤的流失,同时还能引起许多其他潜在的土壤问题^[1-3]。随着对有限土壤资源的需求不断增加和人均耕地的不断减少,土壤侵蚀已经成为了影响作物生产和农业可持续发展的一个全球性问题^[4]。坡耕地更容易遭受侵蚀和破坏,土壤侵蚀更为严重。中国坡耕地面积广,且大部分农地仍以传统粗放式耕作为主。农作物的种植与坡耕地管理对土壤侵蚀的发生发展有着重大的影响^[5]。

目前有大量学者从各自不同的目的出发,根据植被影响土壤侵蚀的不同角度进行了研究,其中植被覆盖度作为表征地表植被生长状况的重要指标,是研究植被与土壤侵蚀中应用最多的参数。其中,关于林草覆盖对土壤侵蚀的减少作用已经有了较为明确的认识。已有研究^[6-7]表明,与裸地相比,不同的植被覆盖均具有较好的减少地表径流和土壤侵蚀效果。覆盖度在导致冠层降雨拦截和地面入渗差异的同时也引起产流和产沙的差异^[8]。对于作物来说,当前的研究主要集中的方面有:(1)不同作物类型的土壤侵蚀特征,包括玉米、大豆、谷子和红薯等不同作物种类^[7,9-11];(2)作物冠层对降雨的再分配和对侵蚀的削减作用^[9-10];(3)作物根系对土壤侵蚀的控制作用。合理密植在增大地上作物覆盖的同时,也提高了地下根系网的密集程度。由于植被根系在土壤中纵横交错,相互固结缠绕,能够有效地减少地面土壤流失,抵御径流的冲刷^[12-15]。Gyssels 等^[16]根据比利时黄土带的研究数据分析得出,作物种植密度的增加显著改变了沟蚀形态,减少了土壤侵蚀。然而,现有的关于作物覆盖度与土壤侵蚀的定量关系研究还很少。作物覆盖度除了与其本身的生育期有关之外,还与其种植密度有着密不可分的关系^[17]。随着施肥等耕作技术的提高,作物的种植密度发生了较大的变化,这将对土壤侵蚀造成很大的影响。

为了探讨农作物覆盖度对土壤侵蚀的影响,通过室内人工降雨试验,利用不同种植密度的小麦在不同生长期的变化来模拟不同覆盖度情况,对比作物不同覆盖度的坡面产流产沙差异,分析在采用传统耕作模式下作物不同覆盖度与土壤侵蚀的定量关系。这将对量化耕作措施因子和准确预测土壤侵蚀、指导坡耕地的水土流失防治、推动农业生产和生态环境保护的和谐发展有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验通过作物不同的种植密度和生长期来控

制作物覆盖度。作物种植密度参考大田生产的实际情况,共设置 4 个密度水平,分别为 150 万,250 万,350 万,450 万株/hm²以及 1 个裸地对照 CK 处理,2 次重复。供试小麦品种为“小偃 22 号”,于 2020 年 10 月中旬播种,2021 年 6 月初成熟收割。采用传统耕作的模式,等行距种植,行距 0.5 m。播种前按 750 kg/hm²水平施复合磷酸二铵、187.5 kg/hm²水平施尿素作为基肥,其余田间管理同大田保持一致。选取 10 个钢制长方体土槽,长×宽×高为 2.0 m×1.0 m×0.5 m,土槽的坡度设置为 15°,试验用土为陕西杨凌耕层(0—20 cm)土壤,属于黄土母质上形成的人为土壤,质地为壤土。

土壤侵蚀试验采用室内人工模拟降雨法进行,实验场地位于中国科学院水利部水土保持研究所人工模拟降雨大厅,降雨是模拟该地区常见天然暴雨雨强 60 mm/h。降雨机是侧喷式,降雨高度 18 m,每场降雨历时 60 min。由于冬小麦是在秋天种植,夏季收获,且实际秋冬季降雨较少,因此考虑作物生育期与降雨季节的实际相符情况,人工降雨土壤侵蚀试验在夏初 5 月 10 日、5 月 25 日和 6 月 10 日分别进行,这 3 个时期分别相当于美国通用土壤流失方程 USLE 中划分的发育期、成熟期和残茬期^[18]。

作物的覆盖度每间隔约 15 天进行 1 次观测,共观测到 8 次:(1)前 3 次(2020 年 12 月 17 日至 2021 年 3 月 1 日)的覆盖度观测采用测针法。具体操作为:从土槽两侧每隔 40 cm 拉 1 条长 1 m 的皮尺,共 5 条。每隔 1 cm 使用与 2 mm 直径雨滴大小相似的笔芯向下探测,触及作物叶片即在表格内做记号,否则不记,5 组记号所占比(%)的平均值即为该小区覆盖度。(2)其余 6 次利用无人机测植被覆盖度的变化状况,并采用 ImageJ 2x 计算。

1.2 数据处理

为了分析不同种植密度在各个生育期的减流减沙效益,将每次降雨试验数据为独立的试验结果,以裸地小区作为对照。

径流深是单位小区面积上产生的径流量,公式为:

$$R=W/1000F \quad (1)$$

式中: R 为径流深(mm); W 为径流总量(L); F 为小区面积(m²)。

侵蚀模数是单位面积所产生的侵蚀量,计算公式为:

$$A=E/100S \quad (2)$$

式中: A 为侵蚀模数(t/hm²); E 为总侵蚀量(g); S 为面积(m²)。

使用公式(3)计算减流减沙效益:

$$L_i=(R_f-R_p)/R_f \times 100\% \quad (3)$$

式中: L_i 为种植密度 i 小区的减少径流或土壤侵蚀效

益; R_f 为对照裸地小区径流深或土壤侵蚀模数; R_p 为种植密度为*i*作物小区的径流深或土壤侵蚀模数。

使用 SPSS Statistics 23 和 Origin 2018 软件对数据进行方差分析、相关分析、回归分析和制图。

2 结果与分析

2.1 种植密度与植被覆盖度的关系

随着不同种植密度的改变,作物茎叶的生长情况

等也会根据播种量的多少发生或大或小的变化,不同的种植密度同时也意味着作物覆盖度的不同(表 1),本文以不同的种植密度来表征作物覆盖度的差异。小麦作为一种密植作物,虽相较于玉米、大豆等其他作物的叶片较少且小,根茎更细,但在一定的管护下能够大量分蘖生长成簇状,直至其植株所在坡面几乎被密集叶片所覆盖。

表 1 作物覆盖度随生长期的变化

种植密度/ (万株·hm ⁻²)	覆盖度/%							
	12月17日	1月20日	3月1日	3月17日	4月6日	4月23日	5月10日	5月25日
150	13.0	15.0	23.6	29.8	39.0	55.3	57.6	32.7
250	16.4	20.6	27.7	34.2	42.6	57.2	62.8	41.4
350	20.2	25.0	35.5	42.2	58.8	64.8	70.2	46.8
450	26.9	30.5	38.5	39.2	44.9	60.5	65.8	41.8

由图 1 可知,随着时间递增,不同密度处理下的作物覆盖度均呈现逐渐增加的趋势,在 5 月 10 日均达到最大值。在 5 月 25 日作物的覆盖度反而下降,这是因为小麦进入成熟期后,麦株枝叶会逐渐变干黄,直到全部干枯,此时的覆盖度相较前期更低。在小麦生长初期,覆盖度与播种密度呈极显著正相关关系,即随着种植密度的增加,作物覆盖度也增大,450 万株/hm²最大,150 万株/hm²最小,因为在春季,安全越冬的小麦叶片开始生长,分蘖节开始逐渐分蘖,覆盖度同时也随着分蘖数的增加而增大。在进入 3 月后,350 万株/hm²快速生长,超过 450 万株/hm²为各处理中覆盖度最大,4 月初时为 58.8%,分别是 150 万,250 万,450 万株/hm²的 1.5,1.4,1.3 倍,这是因为播种量越大总茎蘖数越多,覆盖度也越大^[19],但当密度持续增加后,会导致植株徒长,争肥夺水,土壤养分不足,从而长势弱,覆盖度相较于合理密植的小区降低。在 5 月初,各小区均达到最大值,其中 350 万株/hm²为最大 70.2%,此后小麦因为成熟逐渐变得干枯,作物小区的覆盖度也随之快速下降,在 5 月 25 日时仅为 5 月 10 日的 57%~67%。

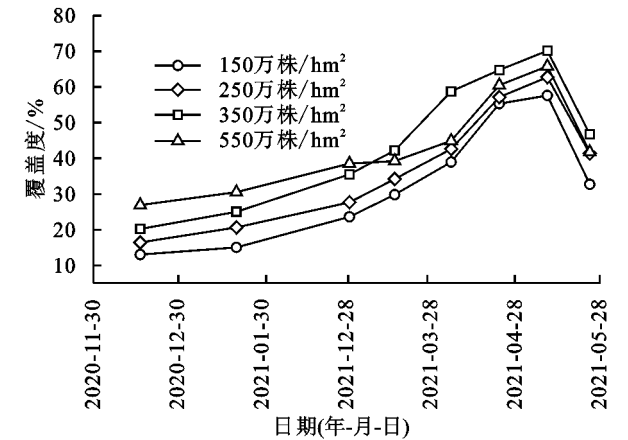


图 1 作物覆盖度随生长期的变化

2.2 种植密度对径流的影响

从图 2 可以看出,不同种植密度对坡面产流有着重要的影响:裸地坡面的径流量均大于种植作物的小区,且随着密度的增加,径流量呈现着大致相同的趋势,都是先降后升。小麦全育期裸地对照的平均径流深为 42.8 mm,各种植密度的平均径流深为 37.0, 32.9, 31.4, 32.8 mm,分别是裸地的 86%, 77%, 73% 和 77%。不同种植密度的减流效益不同,其中 150 万株/hm²对坡面径流的削弱作用最弱,与裸地相比,其径流量减少了 14%。350 万株/hm²对径流的控制作用最强,相较于裸地减少了 27%。这表明坡面种植作物在一定程度上起着稳定和消减径流的作用。但残茬期时,作物小区的径流量基本与裸地对照小区一致,约 43 mm,其平均坡面产流量为发育期和成熟期的 1.51, 1.26 倍。

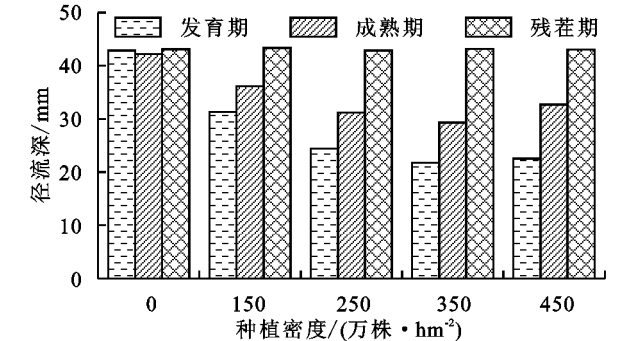


图 2 不同种植密度在不同生育期的径流深对比

由于残茬期较为特殊,将对残茬期单独进行讨论,下文仅分析作物发育期和成熟期时的坡面产流规律。对比相同密度下不同生育期的径流深,各处理均表现为发育期<成熟期,发育期和成熟期时作物小区径流量分别约为裸地对照小区的 51%~73% 和 69%~86%。可以发现,150 万株/hm²处理为 4 种密度处理中径流量最大,但在生长期的差距最小,仅增

加了 15%;250 万~450 万株/hm²在发育期和成熟期的径流量分别维持在 23.31 mm 左右,其中,350 万株/hm²在发育期时径流量最小,为 21.75 mm。这是因为农作物在发育期进入生长旺盛阶段,有着较强的蓄水能力。相差较大的是 450 万株/hm²处理,成熟期较发育期增幅为 45%。

不同种植密度的坡面产流情况的差异,同时也表明其减流特征有所不同。表 2 显示了不同种植密度的径流深及其减流效益,可以看出,裸地在试验期内均没有显著差异,但作物小区在发育期和残茬期之间的差异均达到了显著水平($p<0.05$)。总体来说,发育期和成熟期之间差异并不显著,但它们与残茬期均存在显著差异($p<0.05$)。这说明当覆盖度达到一定程度时,径流量之间的变化并不明显。不同生育期的减流效益表现为发育期>成熟期>残茬期。

种植密度/ (万株·hm ⁻²)	径流深/mm			减流效益/%		
	发育期	成熟期	残茬期	发育期	成熟期	残茬期
0(CK)	42.9a	42.3a	43.1a	—	—	—
150	31.4b	36.2a	43.4a	27	14	0
250	24.4c	31.2b	42.9a	43	26	0
350	21.8b	29.3b	43.2a	49	31	0
450	22.53b	32.7ab	43.1a	47	23	0
平均	28.6b	34.3b	43.1a	42	23	0

注:—表示对照小区不计算减流效益;同列不同小写字母表示不同生育期的径流深在 0.05 水平有显著差异。下同。

与裸地对比,有作物覆盖的小区具有显著的减流作用。发育期时裸地小区径流深为 42.9 mm,不同密度的减流效益表现为 350 万株/hm²>450 万株/hm²>250 万株/hm²>150 万株/hm²,其径流深与裸地相比分别减少了 49%,47%,43%和 27%。成熟期则为 350 万株/hm²>250 万株/hm²>450 万株/hm²>150 万株/hm²,减流效益为 14%~31%。说明不同种植密度在不同生长阶段均具有明显的抑制径流产生的效果,能够有效地减少径流量,且密度增大后,减流效益会减弱。

径流量与相应的植被覆盖度的相关和回归分析结果(图 3)表明,径流量与覆盖度呈极显著负相关($p<0.01$),且表现出良好的指数函数关系: $Y=44.37e^{-0.09x}$, $R^2=0.844$ 。即随着覆盖度的增加,径流量逐渐减少,反之则增加。随着作物种植密度的增加,覆盖度也随之从裸地增加至最大盖度 350 万株/hm²处理的 70.15%,坡面径流由 42.9 mm 减小到 21.8 mm,减少 49%。种植密度 150 万株/hm²时的覆盖度 32.7%为 4 种密度中最小,此时的径流深为 36.2 mm,高达 350 万株/hm²处理的 3.08 倍,是裸地的 84%,此时对径流的控制作用最弱,但

仍具有一定的减流效益。残茬期时作物小区的径流量基本与裸地对照小区一致,约 43 mm;其平均坡面产流量为发育期和成熟期的 1.51,1.26 倍,相较于裸地的减流作用并不明显,介于-1%~1%。

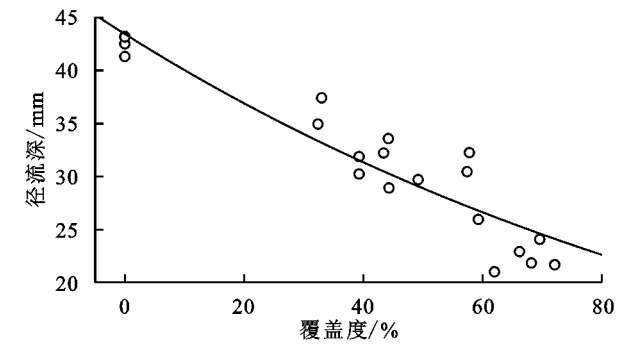


图 3 作物覆盖度与径流的关系

总体来说,在作物的不同生长阶段,不同种植密度减流效益各不相同,均表现为种植密度较大时减流效益较好。农作物种植密度小,径流截留作用弱,随着密度的增加,土壤耕层根系越密集,冠层对坡面产流的抑制作用逐渐加强,产流时间变长,有效地增加了降雨入渗,减少地表径流。当密度持续增加时,虽然仍具有一定的减流效益,但是作物的减流作用开始减弱。结果显示,种植密度为 350 万株/hm²时,减流效益最佳。

2.3 种植密度对侵蚀的影响

不同种植密度产流差异必然导致坡面产沙特征的差异,与径流量类似,地表作物在拦截降雨的同时也减少了土壤侵蚀量。为了便于了解坡面侵蚀动态变化规律,用侵蚀模数反映土壤流失量的变化。由图 4 可知,随着种植密度的增加,侵蚀量呈先降低后回升的趋势。小麦全育期裸地对照的平均侵蚀模数为 10.1 t/hm²,各种种植密度的平均侵蚀模数为 8.5,7.5,6.9,7.1 t/hm²,分别是裸地的 85%,74%,68%和 70%。不同种植密度的减沙效益不同,其中 150 万株/hm²对泥沙的削弱作用最弱,与裸地相比,泥沙量减少了 15%。350 万株/hm²的控制作用最强,相较于裸地减少了 32%。在相同的雨强和降雨历时的情况(60 mm/h,1 h)下,作物小区的侵蚀均明显小于裸地对照小区,这表明坡耕地的作物能显著影响坡面产沙。

不同生长期不同种植密度的减沙作用各不相同。由表 3 可知,与径流深规律一致,裸地在试验期内均没有显著差异,但作物小区在发育期和残茬期之间的差异均达到了显著水平($p<0.05$)。总体来说,发育期和成熟期之间差异并不显著,但它们与残茬期均存在显著差异($p<0.05$)。减沙效益大小顺序为发育期>成熟期>残茬期。发育期时裸地小区的侵蚀模数为 9.6 t/hm²,4 个种植密度水平的侵蚀模数分别

是 4.6, 3.3, 2.2, 2.3 t/hm², 相比裸地分别减少 52%, 66%, 77%, 76%, 减沙效益大小顺序依次为 350 万株/hm² > 450 万株/hm² > 250 万株/hm² > 150 万株/hm², 且种植密度 150 万株/hm² 的土壤侵蚀是种植密度 350 万株/hm² 时的 2.1 倍。成熟期的减沙效益则为 36%~63%, 表现为 350 万株/hm² 最佳, 150 万株/hm² 最弱, 其余 2 种密度减沙效果相当。作物种植密度从 150 万株/hm² 增加到 250 万株/hm² 时, 减沙效益迅速增强, 增幅为 27% 和 82%, 之后减沙效益趋于较稳定状态。

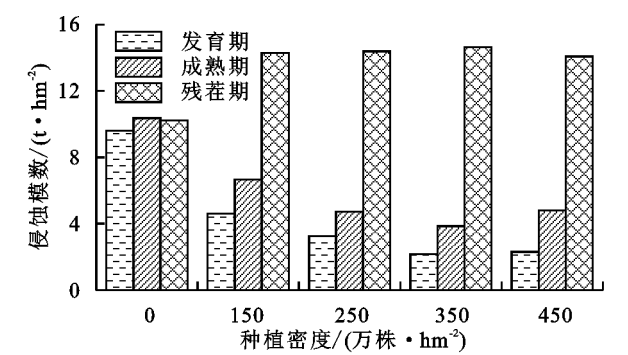


图 4 不同种植密度在不同生育期的侵蚀模数对比

表 3 作物不同种植密度在不同生育期的侵蚀模数及减沙效益

种植密度/ (万株·hm ⁻²)	侵蚀模数/(t·hm ⁻²)			减沙效益/%		
	发育期	成熟期	残茬期	发育期	成熟期	残茬期
0(CK)	9.6a	10.4a	10.2a	—	—	—
150	4.6b	6.7b	14.3a	52	36	-40
250	3.3c	4.7b	14.4a	66	54	-41
350	2.2b	3.9b	14.6a	77	63	-43
450	2.3b	4.8ab	14.1a	76	54	-38
平均	4.4b	6.1b	13.5a	68	52	-40

残茬期时平均侵蚀模数为 13.52 t/hm², 高达发育期和成熟期的 2~3 倍, 此时 CK 处理侵蚀模数为 10.2 t/hm², 作物种植小区侵蚀量则均约为对照小区的 1.4 倍。残茬期是作物收割后仅留在地表留有约为 10 cm 高的干枯麦茬地。作物的小区在植株发育时由于冠层的拦截, 能保护叶片下的地表不受雨滴打击, 但收获后的残茬期由于没有了植被的覆盖, 且收割过程对地面有着一定的扰动作用。降雨后, 雨滴直接打击地表, 在麦茬的汇聚作用下, 地表的径流流速增大, 加速的径流不断冲刷着地表的土壤, 从而发生更为严重的土壤侵蚀。而裸地对照小区地表由于结皮的出现, 减缓了雨滴对土壤的打击, 减少了坡面产沙^[20]。

土壤侵蚀与植被覆盖度的相关和回归分析结果表明, 与径流类似, 也呈极显著负指数相关, $Y=1089.19e^{-0.02x}$ ($p<0.01$), 即随着覆盖度的增加, 泥沙量逐渐减少, 反之则增加。由图 5 可知, 覆盖度 72% 最小, 侵蚀量也最低, 为 2.2 t/hm², 相较于裸地的侵蚀量 10.4 t/hm²

减少了 79%。4 种处理中, 150 万株/hm² 的覆盖度 32.7% 最低, 此时的侵蚀模数 6.7 t/hm² 高达 350 万株/hm² 的 1.66 倍, 仅为裸地的 64%, 此时对泥沙的控制作用最弱。这说明作物对坡面产沙影响较大, 即使在作植被的覆盖度较小的情况下, 也能减少泥沙; 当覆盖度达到一定时, 减沙效果极为显著。肖继兵等^[17]、吴蕾等^[21]的研究也得出相似结论。

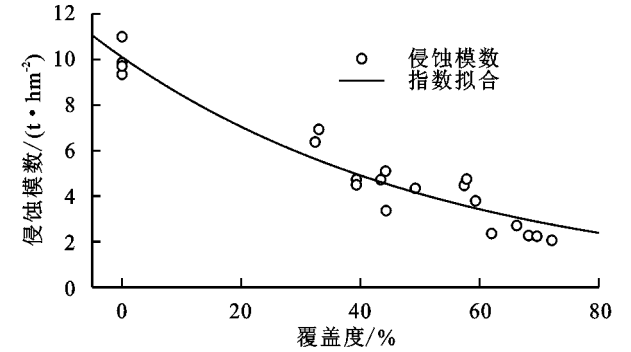


图 5 作物覆盖度与侵蚀量的关系

从上述分析可以看出, 在相同的雨强、地形和土壤条件下, 坡耕地产沙的差异主要是由地上植被覆盖所决定的。随着作物覆盖度的增加, 植被对地面的保护作用增强, 在拦截降雨的同时削弱雨滴动能, 冠层的遮蔽能降低雨滴对地面的击溅作用, 减少土壤侵蚀量。

2.4 径流和侵蚀量的关系

坡面径流是影响土壤流失的主要动力, 是导致土壤侵蚀发生的一个关键因素^[22], 土壤侵蚀与径流有着密切的关系。由图 6 可知, 侵蚀量与径流量之间呈极显著指数函数关系 ($Y=38.12e^{0.08x}$, $R^2=0.96$)。

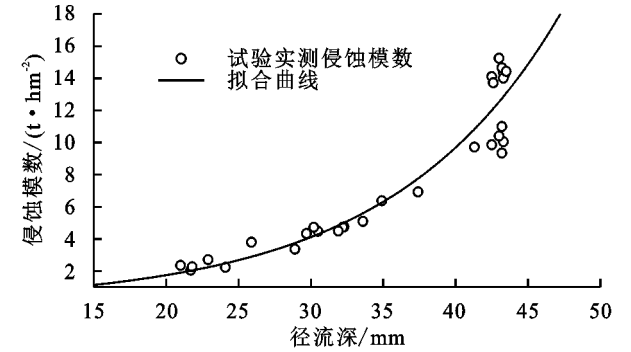


图 6 人工降雨试验径流和泥沙的关系

试验分别在 3 个不同的生长季进行, 同一季节有 4 个种植密度和 1 个裸地。作物盖度的变化随季节变化较大, 随种植密度也有变化。地表径流和土壤侵蚀随作物盖度的变化同步增加和减少。作物覆盖最大的发育期径流深和侵蚀速率都最小, 覆盖最小的残茬期都最大。发育期的地表径流深在 20~30 mm, 成熟期的地表径流深在 30~35 mm, 残茬期和裸地的径流深都在 40~45 mm。相应的土壤侵蚀速率发育期在 2~4 t/hm², 成熟期的在 4~8 t/hm², 残茬期

在 14 t/hm^2 左右,而裸地在 10 t/hm^2 左右。裸地和残茬期盖度都为 0,土壤侵蚀速率差异较大,这是因为裸露地有生物结皮的原因,但径流和侵蚀之间的关系仍然没变。

3 讨论

本研究结果显示,作物覆盖度的差异通过不同的种植密度来表示。随着种植密度的增加,作物覆盖度呈现先上升,随后到达峰值后开始降低的趋势,且作物覆盖度随着时间递增,也会发生变化。作物植密度越大,在进入生长旺盛阶段后覆盖度越大,拦截泥沙的效果越好。对比不同密度在不同生长期的侵蚀量和径流量,均表现为发育期 7.5 万株/hm^2 为最小。此外,作物覆盖度对坡面径流和侵蚀的影响达到了极显著水平($p < 0.01$),径流量和侵蚀量与覆盖度均呈负指数函数关系,作物植被的减沙效益大于减流效益,这与肖继兵等^[23]的研究结果一致。尤其是在种植密度为 9 万株/hm^2 时的覆盖度和减流减沙效益相较于 7.5 万株/hm^2 时降低了,主要是因为密度过高,作物所需养分不足,长势更差,从而覆盖度相对下降,对径流和泥沙的削弱作用也减小。大致表现为覆盖度增大时,径流和侵蚀也会随之降低。

径流与侵蚀之间也有着密不可分的关系,坡面径流是引起地表侵蚀的直接动力,二者为正相关关系,表现为径流越大,侵蚀量也越大。影响坡面径流和侵蚀的因素诸多,地表被覆、降雨强度、坡度、土壤含水量等因素及其相互作用都能在不同程度引起变化。作物枝叶的遮蔽可以抑制土壤水分蒸发,土壤含水量也随之增加,土壤含水量越大,降雨时土壤越快到达田间饱和含水率,产流越快。此外,作物冠层能够削弱雨滴动能,枝叶的截留作用可以减缓雨滴降落到地面的速度,增加降雨入渗,导致坡面径流冲刷减少,侵蚀也随之减少。

本研究所观测的降雨场次土壤前期含水量存在一定的误差,且地表结皮对径流和侵蚀的产沙均有较大的影响。若更加充分地考虑地表结皮和前期含水量的影响,能更好地表征覆盖度与侵蚀之间的关系。后续继续对结皮、含水量进行相应的试验设计,以便于更好地获取不同覆盖度下的侵蚀变化规律。作物植被是影响土壤侵蚀主要因素之一,而种植密度变化必然引起作物覆盖度的变化,从而导致坡耕地土壤侵蚀的差异。本研究开展作物覆盖度对土壤侵蚀的研究,有利于更好地认识区域土壤侵蚀作物植被的防蚀机理,加强对坡耕地的土壤侵蚀防治,便于区域土壤侵蚀的调查与预测。

4 结论

(1)种植密度是作物覆盖度的直接影响因素,随着种植密度的增加作物覆盖度也在增加,但当种植密度大于某一值时,由于生长状况不良而导致作物覆盖度反而下降。发育期时,种植密度 150 万株/hm^2 的土壤侵蚀是种植密度 350 万株/hm^2 时的 2.1 倍。覆盖度也同时随着种植时间的递进而发生变化,在不同生长期,作物对减少地表径流和土壤侵蚀的作用也不同,表现为发育期 > 成熟期 > 残茬期。

(2)作物覆盖明显减少地表径流和土壤侵蚀,当作物覆盖度为 70% 时,减少地表径流和土壤侵蚀分别高达 63% 和 77%。地表径流和土壤侵蚀与作物覆盖度均呈极显著的负指数函数关系($p < 0.01$),即随着覆盖度的增加,地表径流和土壤侵蚀逐渐减少,反之则增加。

(3)土壤侵蚀与径流量之间呈指数函数关系($p < 0.01$), $Y = 38.10e^{0.08x}$,即随着径流量的增加,侵蚀量也显著增加。

参考文献:

- [1] Bosco C, De Rigo D, Dewitte O, et al. Modelling soil erosion at European scale: Towards harmonization and reproducibility [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(2): 225-245.
- [2] Hlavcova K, Studvova Z, Kohnova S, et al. Estimating effectiveness of crop management for reduction of soil erosion and runoff [J]. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2017, 92(1): e012017.
- [3] Zhang X C, Shao M A. Effects of vegetation coverage and management practice on soil nitrogen loss by erosion in a hilly region of the Loess Plateau in China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(10): 1195-1203.
- [4] Lal R, Reicosky D L, Hanson J D. Evolution of the plow over 10 000 years and the rationale for no-till farming [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 93(1): 1-12.
- [5] Preiti G, Romeo M, Bacchi M, et al. Soil loss measure from Mediterranean arable cropping systems: Effects of rotation and lineage system on C-factor [J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 170: 85-93.
- [6] 孙佳美,余新晓,梁洪儒,等.模拟降雨条件下不同覆被减流减沙效益与侵蚀影响因子[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(2): 46-51.
- [7] 王全九,赵光旭,刘艳丽,等.植被类型对黄土坡地产流产沙及氮磷流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(14): 195-201.
- [8] 彭文英,张科利.不同土地利用产流产沙与降雨特征的

关系[J].水土保持通报,2001,21(4):25-29.

[9] 马璠.作物植被对坡耕地土壤侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2009.

[10] 马波.大豆对坡面土壤侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.

[11] 唐寅.紫色丘陵区坡耕地土壤侵蚀特征及植被覆盖与管理因子研究[D].重庆:西南大学,2012.

[12] 李勇,徐晓琴,朱显谟,等.植物根系与土壤抗冲性[J].水土保持学报,1993,7(3):11-18.

[13] 农淦.黄土小麦根系对坡地土壤防蚀作用研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2014.

[14] 杨晓芬.坡耕地玉米作物根系对土壤侵蚀的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2012.

[15] 朱显谟,田积莹.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J].水土保持学报,1993,7(3):1-10.

[16] Gyssels G, Poesen J. The importance of plant root characteristics in controlling concentrated flow erosion rates [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003,28(4):371-384.

[17] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西地区农耕坡地土壤侵蚀影响因素及相关关系[J].水土保持学报,2015,29(5):13-19.

[18] Wischmeier W H. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning [J]. Agriculture Handbook,1978,537:17-18.

[19] 王夏,胡新,孙忠富,等.不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J].中国农学通报,2011,27(21):170-176.

[20] 张宝琦.生物结皮覆盖对坡面产流产沙过程的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2021.

[21] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):133-138,144.

[22] 郑海金.赣北红壤坡面水土保持措施保水减沙作用研究[D].北京:北京林业大学,2012.

[23] 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.

(上接第 96 页)

[12] 王克林,岳跃民,陈洪松,等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报,2019,39(20):7432-7440.

[13] 杨皓,范明毅,李婕羚,等.喀斯特山区无籽刺梨种植基地土壤酶活性与肥力因子的关系[J].山地学报,2016,34(1):28-37.

[14] 杨皓,李婕羚,范明毅,等.贵州无籽刺梨基地土壤及树体特征对种植年限的响应[J].土壤通报,2016,47(4):797-804.

[15] 陈静,陈海,朱大运,等.石漠化地区林草复合治理对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J].水土保持研究,2020,27(4):1-7.

[16] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感-GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.

[17] 盘礼东,李瑞,黎庆贵,等.黔西喀斯特区秸秆覆盖对坡耕地产流产沙特征的响应[J].水土保持学报,2021,35(1):9-16.

[18] 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.

[19] Zhang Q, Zhao L S, Wang J Y, et al.Spatiotemporal variability and simulation of tillaged loess microtopography in water erosion [J].Journal of Soil and Water Conservation,2014,69(4):343-351.

[20] 杜波,唐丽霞,潘佑静,等.喀斯特小流域坡面与流域降雨产流产沙特征[J].水土保持研究,2017,24(1):1-6.

[21] 王涵,刘琦,任标,等.典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2019,37(3):6-12.

[22] 温永福,高鹏,穆兴民,等.野外模拟降雨条件下径流小区产流产沙试验研究[J].水土保持研究,2018,25(1):23-29.

[23] 曹媛,孙鹏,姚蕊,等.不同雨强条件下工程措施对坡地产流产沙影响[J].水土保持学报,2020,34(6):1-7.

[24] 孙泉忠,刘瑞禄,陈菊艳,等.贵州省石漠化综合治理人工种草对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):67-72,77.

[25] 张琳卿,覃莉,刘忠仙,等.黔中喀斯特地区坡面种植措施对土壤水分及产流产沙的影响[J].水土保持通报,2021,41(3):15-21,30.