

黄土高原典型退耕草地植被特征对土壤入渗过程的影响

蒋忙舟

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院),西安 710043)

摘要: 植被恢复过程可显著影响土壤入渗性能。通过选取黄土高原典型草地白羊草和铁杆蒿草地,设置不同种植密度(5,10,15,20,25,30株/m²)和采用人工模拟降雨试验(60 mm/h,60 min),系统研究了草地植被特征对土壤入渗过程的影响。结果表明:(1)种植密度增加可显著延缓产流,不同种植密度下白羊草草地和铁杆蒿草地初始产流时间分别为0.76~5.74,0.87~2.08 s,且随盖度、根系生物量和有机质的增加呈幂函数增加($R^2 \geq 0.18, p < 0.05$)。(2)不同种植密度下白羊草草地的平均入渗速率、稳定入渗速率、入渗总量分别为0.47~0.82,0.46~0.82 mm/min和7.12~11.84 mm,铁杆蒿草地分别为0.38~0.67,0.35~0.60 mm/min和5.70~10.07 mm。当种植密度为20株/m²时,土壤入渗各参数均最大;平均入渗速率、稳定入渗速率、入渗量总量、入渗系数(K)随土壤有机质的提高呈幂函数增大($R^2 \geq 0.26, p < 0.01$),衰减系数(α)随生物结皮盖度呈降低趋势($p > 0.05$)。(3)白羊草草地具有较高的根系生物量、生物结皮盖度和有机质含量,其初始产流时间、平均入渗速率、稳定入渗速率、入渗量总量及入渗系数(K)均不同程度高于铁杆蒿草地,衰减系数(α)低于铁杆蒿草地,土壤入渗性能较强。总体而言,对于典型退耕草地,土壤入渗总量(A)可表征为根系生物量密度(RMD)和土壤有机质(SOC)的拟合函数($A = 2.77 \times RMD^{0.149} SOC^{0.614}, R^2 = 0.663, NSE = 0.653$)。研究结果可为黄土高原退耕草地生态水文过程和植被建设提供数据来源和理论依据。

关键词: 种植密度; 初始产流时间; 稳定入渗速率; 入渗总量; Kostiakov土壤入渗模型

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0099-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.013

Effects of Vegetation Characteristics on Soil Infiltration Process in Typical Abandoned Grasslands on the Loess Plateau

JIANG Mangzhou

(State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), Xi'an 710043)

Abstract: Vegetation restoration can significantly affect soil infiltration process. On this basis, two typical abandoned grasslands, *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng and *Artemisia vestita* Wall. ex Bess, from the Loess Plateau were studied under six planted densities of 5, 10, 15, 20, 25, and 30 plants/m², and an artificial simulated rainfall experiment was adopted to determine the effect of vegetation characteristics on the soil infiltration process. The result showed that: (1) The increasing of planting density could significantly delay runoff. The initial runoff time ranged from 0.76 s to 5.74 s for *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng grassland and ranged from 0.87 s to 2.08 s for *Artemisia vestita* Wall. ex Bess grassland under six densities. The initial runoff time increased with vegetation cover, root mass density and organic matter as power functions ($R^2 \geq 0.18, p < 0.05$). (2) For *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng grassland, the average infiltration rate, stable infiltration rate and infiltration amount ranged from 0.47 to 0.82 mm/min, 0.46 to 0.82 mm/min and 7.12 to 11.84 mm respectively; for *Artemisia vestita* Wall. ex Bess grassland, the infiltration parameters above mentioned ranged from 0.38 to 0.67 mm/min, 0.35 to 0.60 mm/min and 5.70 to 10.07 mm respectively. When the planting density was 20 plants/m², the soil infiltration parameters were the maximum. The average infiltration rate, stable infiltration rate, infiltration amount and infiltration coefficient K increased with soil organic matter as power functions ($R^2 \geq 0.26, p < 0.01$), and the attenuation coefficient α decreased with the increase of biological crust coverage ($p > 0.05$). (3) The initial runoff time, average infiltration

rate, stable infiltration rate, infiltration amount and infiltration coefficient K of *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng grassland were all higher than those of *Artemisia vestita* Wall. ex Bess grassland, while the attenuation coefficient α was lower than that of the attenuation coefficient. It showed that the *Bothriochloa ischcemum* (Linn.) Keng grassland had high soil infiltration capacity. In general, infiltration amount (A) would be simulated by root mass density (RMD) and soil organic matter (SOC) ($A = 2.77 \times \text{RMD}^{0.149} \text{SOC}^{0.614}$, $R^2 = 0.663$, $\text{NSE} = 0.653$). The purpose of this study was to provide data sources and theoretical basis for the eco-hydrological process and vegetation construction of the abandoned grassland on the Loess Plateau.

Keywords: plant density; initial runoff time; stable infiltration rate; infiltration amount; Kostiakov soil infiltration model

土壤入渗性能对于降水、蒸发、下渗、径流等水文循环过程以及坡面产流产沙过程有着重要的影响^[1-2]。土壤水分入渗过程往往受到植被特征和土壤性状等多种因素的影响^[3]。植被地上部分可通过拦蓄降雨延缓产流,削弱降雨动能,抑制雨滴打击造成的土壤孔隙堵塞,增加地表糙度、降低流速、增强入渗时间等方式来提高土壤入渗能力,植物根系则通过生长穿插分割土壤造成的土体裂隙来增强土壤入渗能力^[4-8]。植被也可通过改善土壤性状来影响土壤入渗过程。植物生长过程中根系死亡及枯落物降解过程可降低土壤容重,增加土壤黏结力,提高土壤有机质,促进团聚体的形成,增加土壤孔隙,进而改善土壤结构,增强土壤入渗能力^[8]。

黄土高原是我国生态安全屏障,也是世界上水土流失最为严重的地区之一^[9]。充分利用黄土入渗速率强,实施“拦蓄降雨,就地入渗”是该地区水土流失治理的重要措施^[10]。1999年“退耕还林(草)”工程的实施^[8],植被得以显著恢复,植被特征及其对土壤性状的影响也发生显著性变化,导致其对土壤入渗能力的影响也存在很大差异^[11]。然而植被恢复影响土壤入渗能力的相关研究多集中于土地利用类型差异,且多以生态系统为研究单元,植被演替过程中土壤入渗能力变化相关研究仍不系统,尤其是演替过程中典型物种对土壤入渗过程的影响相对薄弱。基于此,本研究选取黄土高原撂荒演替后期白羊草和铁杆蒿草本植被,系统研究不同种植密度及其导致的植被特征和土壤性状差异对土壤入渗过程的影响,量化初始产流时间、入渗速率和入渗量与植被特征及土壤性状的相互关系,构建基于植被特征及土壤性状的典型草地土壤入渗量模拟方程,以为揭示植物群落的水土保持功能、评价植物群落促进生态恢复效果提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验处理

选取黄土高原撂荒演替后期典型物种白羊草和

铁杆蒿,采用穴播种植的方式,按照 5, 10, 15, 20, 25, 30 株/ m^2 种植密度进行种植。经过 1 个完整的生长季,采用网格法测定不同种植密度下白羊草和铁杆蒿植被盖度及其土壤生物结皮盖度(表 1)。

白羊草和铁杆蒿均种植于土槽内(长 \times 宽 \times 高为 2 m \times 0.5 m \times 0.5 m),每个种植密度设置 2 个重复,并设置 1 个裸地对照,共计 26 个土槽。种植前对土槽进行填土,土壤容重控制在 1.2 g/ cm^3 。土壤类型为黄绵土,取自延安市安塞区坡耕地表层 0—40 cm。填土前将供试土壤过 2 mm 筛,去除草根和砾石。为保证土壤水分均匀下渗,土槽底部铺 10 cm 细砂,并用纱布隔开土和砂。填土过程中,上部土壤分 4 层填装,每层填土时铺平、压实,并在填装下层土壤之前将表土打毛,消除土壤之间的分层现象,填土厚度为 40 cm。

填土结束后按照预设种植密度种植白羊草和铁杆蒿,种植方式为穴播。按种植密度将土槽划分为不同大小的正方形格子进行种植,在格子中心位置挖取 0.2~0.3 cm 深度的种穴进行播种。种植结束后,将土槽放置于光照充足的地方,并定期洒水,为种子萌芽提供适宜水热条件。

1.2 降雨入渗过程

采用人工模拟降雨系统进行降雨入渗试验。降雨设备采用组合式喷头,高度 18 m,雨滴大小 0.4~6.0 mm,降雨均匀度 $>80\%$,雨滴终点速度近似天然降雨。降雨强度设置为 60 mm/h,降雨历时 60 min。降雨前试验土槽坡度调整为 15°。降雨开始后,记录初始产流时间,降雨过程中收集径流泥沙,降雨前 10 min 每隔 2 min 收集 1 次径流泥沙,后 50 min 每隔 5 min 收集 1 次径流泥沙。降雨结束后采用袖珍式黏结力仪测定土壤黏结力,每个土槽重复 6~9 次;静置 3 天后测定土壤容重(环刀法),重复 3 次,并采集土壤混合样用以测定土壤有机质(重铬酸钾外加热氧化法),最后挖取整个土槽植物根系测定根系生物量(水洗法,表 1)。土壤理化性见表 2。

表1 不同种植密度下植被特征的变化

种植密度/ (株·m ⁻²)	植被盖度/%		生物土壤结皮盖度/%		根系生物量密度/(kg·m ⁻³)	
	白羊草	铁杆蒿	白羊草	铁杆蒿	白羊草	铁杆蒿
5	12.30±1.70	13.45±1.34	18.67±6.60	9.33±13.20	2.07±0.05	1.34±0.11
10	20.81±1.99	21.60±2.55	65.33±12.26	18.67±8.49	1.30±0.57	1.37±0.05
15	34.00±0.99	31.10±0	40.00±6.60	26.67±7.54	2.13±0.17	2.21±0
20	45.70±5.52	45.80±1.98	33.33±9.43	18.67±25.46	4.57±0.43	2.21±0.03
25	60.95±2.19	60.85±1.20	36.00±7.54	56.00±16.03	2.84±0.66	3.61±0.12
30	80.35±2.47	81.80±3.68	22.67±14.14	16.00±4.71	2.65±0.05	2.45±0.46

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

表2 不同种植密度下土壤理化性状的变化

种植密度/ (株·m ⁻²)	黏结力/kPa		容重/(g·cm ⁻³)		土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	
	白羊草	铁杆蒿	白羊草	铁杆蒿	白羊草	铁杆蒿
5	4.18±0.06	4.68±0.03	1.24±0.01	1.22±0.01	6.60±0.04	12.74±0.61
10	4.36±0.66	4.68±0.13	1.24±0.01	1.20±0	4.00±3.47	7.64±0.27
15	4.83±0.35	4.72±0.08	1.24±0.01	1.22±0.01	7.22±0.15	13.15±0.29
20	4.49±0.45	4.54±0.14	1.22±0.02	1.22±0	5.09±0.71	6.44±0.05
25	4.95±0.06	4.10±0	1.23±0.01	1.22±0.01	7.69±4.77	16.75±0.28
30	4.58±0.06	4.68±0.03	1.24±0.02	1.22±0.01	5.97±3.71	8.11±1.11

1.3 土壤入渗参数指标计算

土壤入渗速率和入渗总量均是表征土壤入渗性能的重要参数,可分别按公式(1)和公式(2)计算。

$$I = P - \frac{10 M_r}{St \cos \theta} \quad (1)$$

$$A = \int_0^t I dt \quad (2)$$

式中: I 为土壤入渗率(mm/min); P 为降雨强度(mm/min); θ 为土槽坡度(°); M_r 为降雨时间内产生的径流量(kg); S 为土槽面积(m²); t 为入渗历时(min); A 为累积入渗量(mm)。

Kostiakov 土壤入渗模型^[16]能够很好地拟合实测入渗过程,基于上述测定土壤入渗速率及对应时间,可按公式(3)拟合出入渗系数(K)和衰减系数(α),用以评估植被特征对土壤入渗过程的影响。

$$I_t = \frac{i_1}{1-\alpha} \times t^{1-\alpha} = K \times t^{1-\alpha} \quad (3)$$

式中: I_t 为 t 时刻的入渗速率(mm/min); i_1 为第1时间单位末尾时的入渗速率(mm/min); t 为入渗历时(min); I_t 为 t 时刻的累积入渗量(mm); K 、 α 为经验入渗系数。

2 结果与分析

2.1 不同种植密度下初始产流时间的变化

不同种植密度坡面初始产流时间存在显著差异(图1)。白羊草草地和铁杆蒿草地不同种植密度下初始产流时间分别为0.76~5.74,0.87~2.08 s。对于白羊草草地,初始产流时间在最大种植密度(30株/m²)时最大,是其他种植密度1.15~7.60倍;铁杆蒿草地初始产流时间在种植密度25株/m²时最大,是其他种植密度的1.04~2.40倍。总体而言,随着

种植密度的增加,白羊草草地和铁杆蒿草地坡面初始产流时间均呈幂函数增加($R^2 \geq 0.84$, $p < 0.01$,图1a、图1b)。由于植被类型的差异,白羊草草地和铁杆蒿草地其初始产流时间也存在显著差异。白羊草草地最大种植密度下初始产流时间是最小种植密度的7.6倍,铁杆蒿草地最大种植密度初始产流时间是最小种植密度的2.4倍。这一结果表明,相对于铁杆蒿草地,白羊草草地可显著延长初始产流时间。当种植密度 ≥ 25 株/m²时,白羊草草地初始产流时间随种植密度依然表现为增加趋势,而铁杆蒿草地则趋于平稳,甚至略有降低,这在一定程度上表明白羊草草地在延缓初始产流时间方面仍有潜力。除种植密度为5株/m²时白羊草草地初始产流时间略低于铁杆蒿草地外(12.71%),其他种植密度下白羊草草地初始产流时间均不同程度高于铁杆蒿草地,是其1.27~2.86倍。总体而言,白羊草草地不同种植密度可平均延缓初始产流时间1.42 s,是铁杆蒿草地的1.78倍。

2.2 不同种植密度下坡面入渗过程

白羊草和铁杆蒿草地土壤入渗速率均在降雨前10 min迅速减小,随后减小幅度减缓,降雨30 min后趋于稳定,即土壤稳定入渗速率(图2)。白羊草和铁杆蒿草地降雨30 min后土壤稳定入渗速率分别为0.45~0.82,0.34~0.60 mm/min,分别较降雨前10 min土壤平均入渗速率减少7.71%~16.98%和17.25%~25.37%。总体而言,土壤入渗速率随降雨历时的增加呈幂函数降低关系($0.219 \leq R^2 \leq 0.89$, $p < 0.01$ 或 $p < 0.05$)。在不同种植密度下,白羊草草地和铁杆蒿草地土壤稳定入渗速率和土壤平均入渗速率均在种

植密度为 20 株/m²时最大,分别为 0.82,0.82 mm/min 和 0.67,0.60 mm/min。其中白羊草草地在种植密度为 20 株/m²时土壤平均入渗速率和土壤稳定入渗速率是其他种植密度的 1.01~1.73,1.1~1.80 倍;铁杆蒿草地在种植密度为 20 株/m²时土壤平均入渗速率和土壤稳定入渗速率是其他种植密度的 1.24~1.77,1.26~1.76 倍;此外,白羊草草地和铁杆蒿草地土壤稳定入渗速率和土壤平均入渗速率均随种植密

度的增加呈增大趋势,且白羊草草地土壤稳定入渗速率和土壤平均入渗速率均与种植密度存在幂函数关系($R^2 \geq 0.71, p < 0.01$, 图 3)。由于植被类型的差异,白羊草草地和铁杆蒿草地土壤入渗过程也存在显著差异。白羊草草地土壤稳定入渗率和土壤平均入渗速率在不同种植密度下均高于铁杆蒿草地,其中土壤平均入渗速率是铁杆蒿草地的 1.16~1.70 倍,土壤稳定入渗速率是铁杆蒿草地的 1.27~1.79 倍。

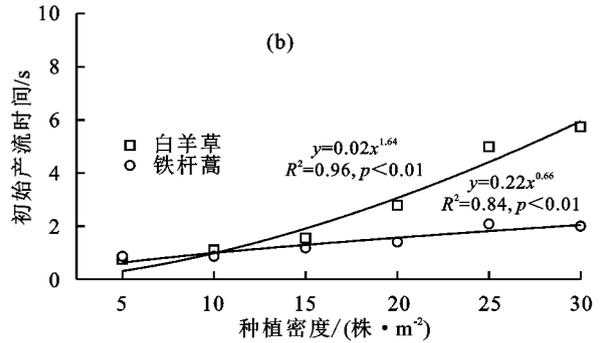
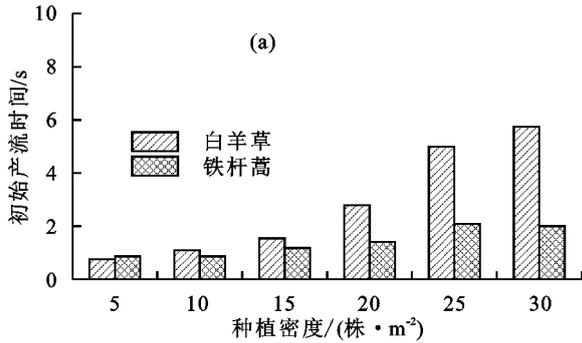


图 1 不同种植密度下白羊草草地和铁杆蒿草地初始产流时间的变化

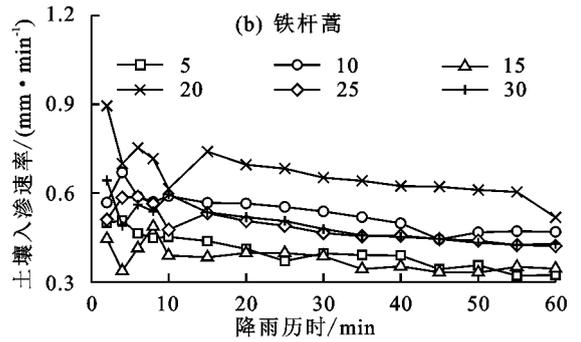
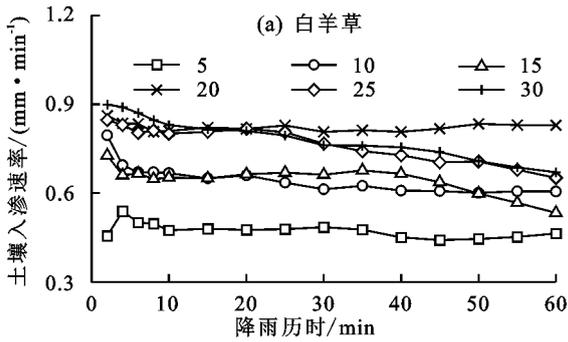


图 2 白羊草和铁杆蒿草地土壤入渗速率随降雨历时的变化

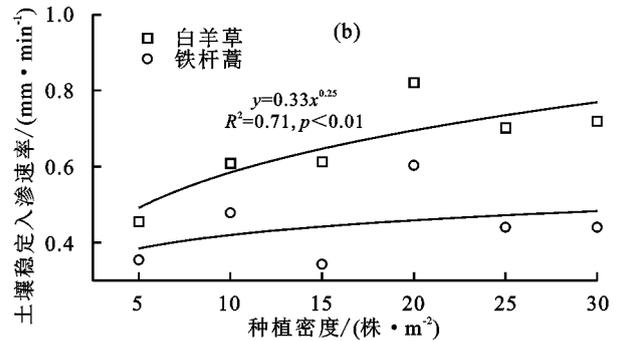
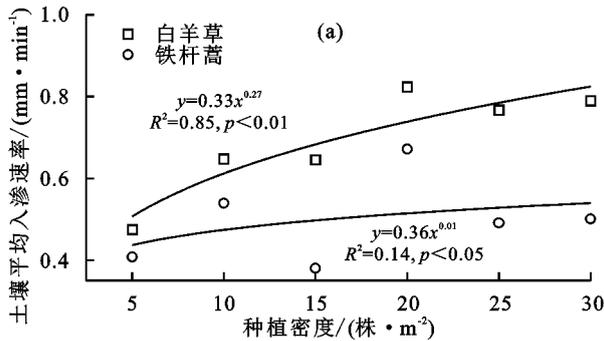


图 3 种植密度与土壤平均入渗速率和稳定入渗速率的关系

不同种植密度间入渗量总量存在显著差异(图 4)。当植被种植密度为 20 株/m²时,白羊草草地和铁杆蒿草地入渗总量均最大,分别为 12.35,10.07 mm,是其他种植密度的 1.04~1.74,1.25~1.77 倍。总体而言,随种植密度的增加,白羊草草地和铁杆蒿草地入渗总量均呈增加趋势,且可表示为种植密度的幂函数。受植被类型差异的影响,白羊草草地不同种植密度下土壤入渗总量显著高于铁杆蒿草地,是铁杆蒿草地的 1.16~1.70 倍。

2.3 植被特征及土壤性状对土壤入渗过程的影响

种植密度可显著影响植被特征及其土壤理化性

状,进而对土壤入渗过程产生影响。对于白羊草草地和铁杆蒿草地,初始产流时间均随植被盖度、根系生物量密度和土壤有机质含量的增加呈幂函数增加($R^2 \geq 0.18, p < 0.05$)(图 5);平均入渗速率、稳定入渗速率及入渗总量均随土壤有机质含量增加呈显著的幂函数增加($0.29 \leq R^2 \leq 0.74, p < 0.05$)(图 6)。Kostiakov 土壤入渗模型可用于非均质土壤中入渗速率的模拟,基于公式(3),通过输入入渗时间及其对应的土壤入渗速率,计算不同种植密度下白羊草草地和铁杆草地入渗系数(K)和衰减系数(α)。白羊草草地入渗系数(K)和

衰减系数(α)变化范围分别为 0.36~0.70 mm/min 和 0.26~0.31, 铁杆蒿草地则分别为 0.33~0.67 mm/min 和 0.29~0.33(表 3)。白羊草草地和铁杆蒿草地入渗系数(K)和衰减系数(α)均与种植密度呈增加趋势, 但白羊草草地入渗系数(K)与种植密度存在幂函数关系; 衰减系数(α)与生物结皮盖度呈增加趋势, 但并不显著($p > 0.05$)。白羊草草地和铁杆蒿草地入渗系数(K)均随土壤容重的增加呈幂函数减小, 随土壤有机质含量的增加呈显著的幂函数增大。

考虑到本研究中土壤容重变化范围仅为 1.20~1.24, 容重对入渗系数(K)的影响并没有统计学意义。总体而言, 植被类型及种植密度对土壤入渗的影响可表征为植被特征和土壤性状的函数关系。逐步回归结果表明, 土壤入渗量(A)可表征为根系生物量密度(RMD)和土壤有机质(SOC)的拟合函数(公式(4)), 其 R^2 为 0.66, NSE 为 0.65, 拟合效果较好。

$$A = 2.77 \times RMD^{0.149} SOC^{0.614} \quad (R^2 = 0.663, NSE = 0.653) \quad (4)$$

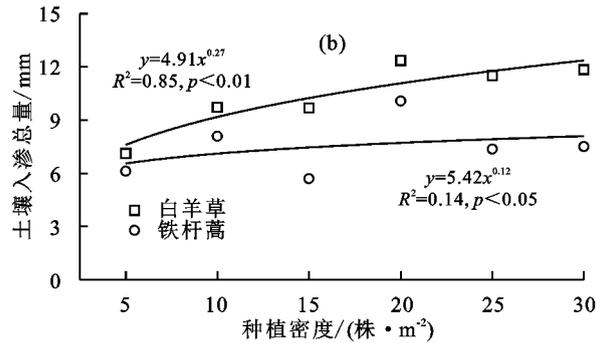
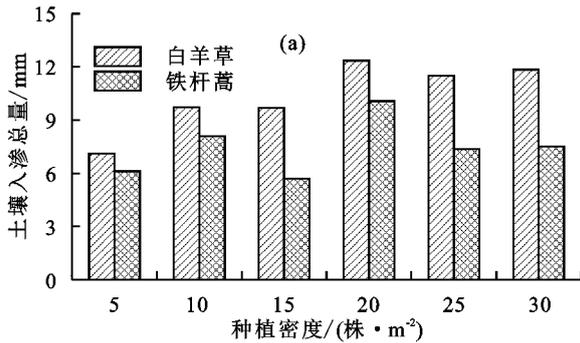


图4 不同种植密度下土壤入渗总量的变化

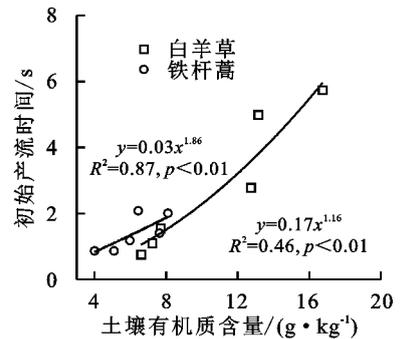
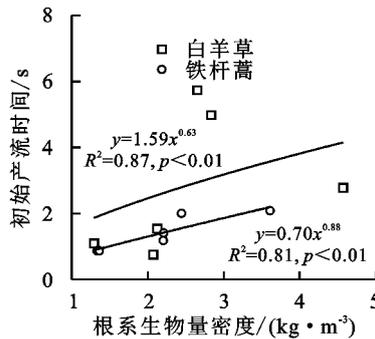
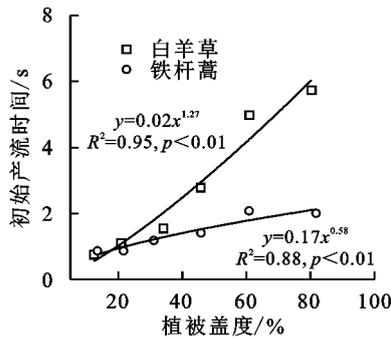


图5 植被盖度、根系生物量密度及土壤有机质与初始产流时间的函数关系

3 讨论

3.1 植被特征和土壤性状差异对入渗过程的影响

不同种植密度导致植被特征和土壤性状的差异是影响坡面土壤入渗过程的主要原因。对于初始产流时间而言, 由于白羊草和铁杆蒿的覆盖, 降雨后并未立即产流, 存在不同程度的滞后。这主要是由于植被覆盖拦蓄降雨、根系生长增加土壤孔隙度和改变土壤理化性状所造成的^[12-13]。且随着种植密度、覆盖度、根系生物量密度和有机质的增加, 其延缓初始产流时间的作用增强, 初始产流时间可表示为植被盖度、根系生物量和有机质的幂函数($0.95 \geq R^2 \geq 0.18$, $p < 0.05$)。对于平均入渗速率、稳定入渗速率和入渗量总量而言, 随种植密度的增加整体呈增加趋势。但当种植密度为 20 株/m² 时, 白羊草草地和铁杆蒿草地平均入渗速率、稳定入渗速率和入渗量总量均最大, 这主要是由于随种植密度的增加, 植物生长受到种间竞争影响, 存在一定的水分和养分限制, 从而导致植被生长趋于缓慢^[14-15], 这也在一定程度上说明对

于不同种植密度导致的植被特征变化, 其对土壤入渗的影响存在阈值或上限, 当种植密度过大时, 土壤入渗性能趋于稳定。

白羊草草地和铁杆蒿草地平均入渗速率、稳定入渗速率、入渗量总量及入渗系数(K)均随土壤有机质的提高而增大, 且存在显著幂函数关系。这主要是由于有机质可促进土壤团聚体的形成, 进而使土壤结构进一步改善, 土壤孔隙进一步增加, 土壤入渗性能增强^[16]。 α 作为 Kostiakov 土壤入渗方程中表征入渗衰减速率的指标, 其随生物结皮盖度的增加呈降低趋势, 很可能是由于生物结皮遇水膨胀后糙率增大, 可降低流速从而加强土壤入渗, 其加强作用与生物结皮组成有关^[17]。

3.2 植被类型对土壤入渗性能的影响

由于物种的不同, 白羊草草地和铁杆草地入渗过程也存在显著差异。白羊草在不同种植密度下初始产流时间均在不同程度高于铁杆蒿草地, 其平均初始产流时间是铁杆蒿的 2.01 倍。植物根系生长发育过

程中通过穿插和挤压土壤,增加土壤孔隙,从而提高入渗,延缓坡面产流^[18-19];而相较于直根系铁杆蒿而言,须根系白羊草根系大都集中分布于表层 30 cm 土层中,其根系生物量是铁杆蒿的 1.18 倍,因而对坡面产流具有较强的延缓作用。

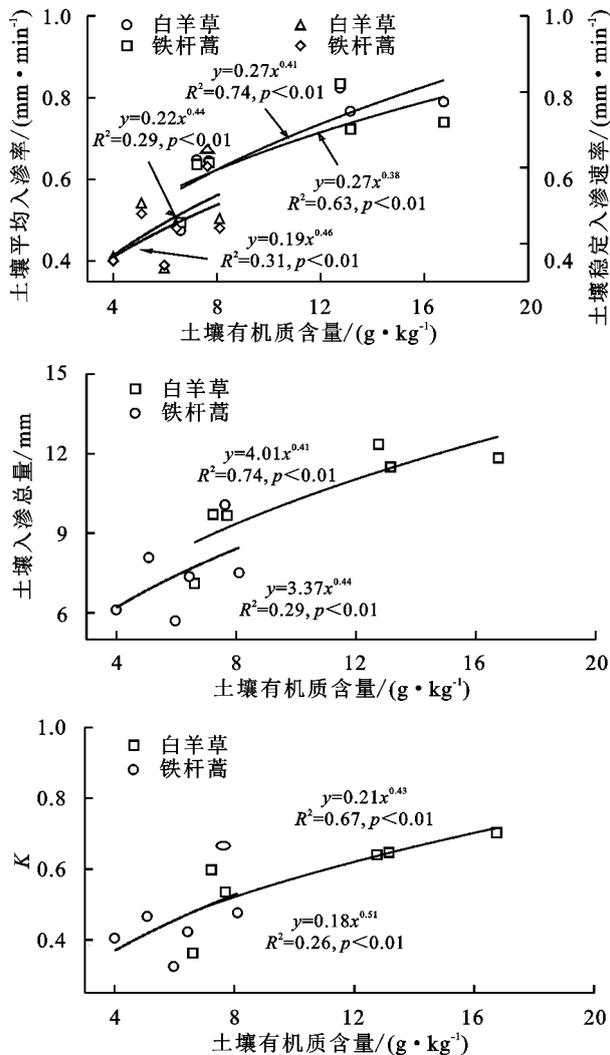


图 6 土壤有机质与土壤入渗性能参数的函数关系

表 3 土壤累积入渗量随降雨历时的拟合结果

种植密度/ (株·m ⁻²)	白羊草			铁杆蒿		
	K	α	R ²	K	α	R ²
5	0.363	0.261	0.984	0.405	0.322	0.980
10	0.598	0.312	0.991	0.466	0.287	0.978
15	0.536	0.283	0.990	0.325	0.288	0.983
20	0.641	0.272	0.990	0.666	0.327	0.990
25	0.647	0.284	0.986	0.423	0.286	0.976
30	0.703	0.298	0.984	0.476	0.314	0.984

对于平均入渗速率、稳定入渗速率和总入渗量,白羊草草地土壤入渗能力均不同程度高于铁杆蒿草地。一方面是由于白羊草根集中分布于表层土壤导致的土壤孔隙度较高;另一方面,生物结皮尤其是苔藓结皮可显著降低流速,从而增强土壤入渗^[16]。本研究中白羊草草地生物土壤结皮盖度是铁杆蒿草地的 1.49 倍,与此同时,白羊草草地有机质含量是铁

杆蒿草地的 1.72 倍,这也表明白羊草草地较高的有机质含量能更强地促进土壤团聚体形成,进而增强土壤入渗性能^[20]。此外,白羊草相对于铁杆蒿具有较大根基,其地表起伏/糙度较大,因而也可降低流速增强土壤入渗^[21]。对于 Kostiakov 模型,白羊草草地入渗系数(K)是铁杆蒿草地的 1.26 倍,衰减系数(α)较铁杆蒿草地减少 6.25%,这与白羊草草地上述土壤入渗参数变化一致,表明白羊草草地入渗性能总体高于铁杆蒿草地。

4 结论

(1)种植密度增大可显著延缓产流时间,白羊草草地和铁杆蒿草地的初始产流时间和植被盖度、根系生物量和有机质均存在幂函数关系,且随植被盖度、根系生物量和有机质的增加,初始产流时间增大。

(2)种植密度增大可显著增强土壤入渗能力,过高的种植密度一定程度加剧植物种内竞争,导致种植密度为 20 株/m²时,土壤入渗能力最强。白羊草草地和铁杆蒿草地平均入渗速率、稳定入渗速率、入渗量总量及入渗系数(K)均随土壤有机质的提高而呈幂函数增大,衰减系数(α)随生物结皮盖度呈降低趋势。

(3)植被类型差异可显著影响土壤入渗能力。白羊草草地有较高的根系生物量、生物结皮盖度和有机质含量,其初始产流时间、平均入渗速率、稳定入渗速率、入渗量总量及入渗系数(K)均不同程度高于铁杆蒿草地,衰减系数(α)低于铁杆蒿草地。总体而言,土壤入渗量可表征为根系生物量密度和土壤有机质的拟合函数(R²为 0.66,NSE 为 0.65)。

参考文献:

- [1] 李裕元,邵明安.土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J].农业工程学报,2003,19(1):46-50.
- [2] Yu G M, Feng J, Che Y, et al. The identification and assessment of ecological risks for land consolidation based on the anticipation of ecosystem stabilization: A case study in Hubei Province, China[J].Land Use Policy,2010,27(2):293-303.
- [3] 姚文艺,李占斌,康玲玲,黄土高原土壤侵蚀治理的生态环境效应[M].北京:科学出版社,2005.
- [4] 李坤,姚文艺,肖培青,等.植被对土壤入渗和地表产流过程的影响研究进展[J].中国水土保持,2017(3):2-30.
- [5] 李毅,邵明安.人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J].农业工程学报,2007,23(3):18-23.
- [6] 戴全厚,喻理飞,薛蕙,等.植被控制水土流失机理及功能研究[J].水土保持研究,2008,15(2):32-35.
- [7] 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.

- flow directions and upslope areas in grid digital elevation models[J]. *Water Resources Research*, 1997, 33: 309-319.
- [19] 郑粉莉, 徐锡蒙, 覃超. 沟蚀过程研究进展[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 48-59, 116.
- [20] 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书[M]. 土壤卷. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [21] Poesen J, Valentin C. Gully erosion and global change[J]. *Catena*, 2003, 50: 2-4.
- [22] Wells R R, Momm H G, Rigby J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows-ScienceDirect[J]. *Catena*, 2013, 101(2): 114-121.
- [23] Qin C, Zheng F L, Wells R R, et al. A laboratory study of channel sidewall expansion in upland concentrated flows[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 22-31.
- [24] Mararakanye N, Sumner P D. Gully erosion: A comparison of contributing factors in two catchments in South Africa[J]. *Geomorphology*, 2017, 288(1): 99-110.
- [25] Bacellar L, Netto A, Lacerda W A. Controlling factors of gully erosion in the Maracujá Catchment, southeastern Brazil[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 30(11): 1369-1385.
- [26] Wells N A, Andriamihaja B, Rakotovololona H. Patterns of development of lavaka, Madagascar's unusual gullies[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1991, 16(3): 189-206.
- [27] 丁树文, 蔡崇法, 张光远. 鄂东南花岗岩地区重力侵蚀及崩岗形成规律的研究[J]. *南昌水专学报*, 1995(增刊1): 50-54.
- [28] 马鹏飞, 许文年, 夏栋, 等. 基于瓮深及其上覆土层稳定性的崩壁崩坍形成条件研究[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 316-328.
- [29] Montgomery D R, Dietrich W E. Source areas, drainage density, and channel initiation[J]. *Water Resources Research*, 1989, 25(8): 1907-1918.
- [30] Dunne T. Formation and controls of channel networks[J]. *Progress in Physical Geography*, 1980, 4(2): 211-239.
- [31] Schumm S A, Boyd F K, Wolff C G. A ground-water sapping landscape in the Florida Panhandle[J]. *Geomorphology*, 1995, 12(4): 281-297.
- [32] Lamb M P, Dietrich W E, Aciego S M, et al. Formation of box canyon, Idaho, by megaflood: Implications for seepage erosion on earth and Mars[J]. *Science*, 2008, 320: 1067-1070.
- [33] Stefanovic J R, Bryan R B. Experimental study of rill bank collapse[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(2): 180-196.
- [34] 鲁胜利. 加快花岗岩区崩岗治理的措施建议[J]. *中国水利*, 2005(10): 44-46.
- [35] 林敬兰, 郑锦文. 南方红壤区崩岗侵蚀治理研究进展[J]. *亚热带水土保持*, 2014, 26(3): 34-37.
- (上接第104页)
- [8] 王国梁, 刘国彬. 黄土丘陵区长芒草群落对土壤水分入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 227-231.
- [9] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 50-55.
- [10] 董三孝. 黄土丘陵区退耕地植被自然恢复过程及其对土壤入渗过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(4): 1-5.
- [11] 杨亚辉. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤理化性质影响分析[D]. 陕西 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [12] 蒋定生, 范兴科, 黄国俊. 黄土高原坡耕地水土保持措施效益评价试验研究(I): 坡耕地水土保持措施对降雨入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 1990, 4(2): 1-10.
- [13] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. The effects of varied soil properties induced by natural grassland succession on the process of soil detachment[J]. *Catena*, 2018, 166: 192-199.
- [14] 谢国勋, 王增吉, 王占军, 等. 宁夏干旱风沙区不同种植密度柠条林对土壤水分及植被生物量影响研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 12-14.
- [15] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(3): 55-58.
- [16] 王珊珊, 毕华兴, 刘俊, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 231-243.
- [17] 张思琪, 张科利, 曹梓豪, 等. 喀斯特坡面生物结皮发育特征及其对土壤水分入渗的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2875-2885.
- [18] 意锟, 金爱武, 方升佐. 浙西南毛竹林覆盖对土壤渗透性及生物特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1431-1440.
- [19] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40-45.
- [20] 高婵婵, 赵传燕, 王超, 等. 黑河上游天老池流域不同植被下土壤理化性质和入渗特征[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 117-121.
- [21] Leguédou S, Planchon O, Legout C, et al. Splash projection distance for aggregated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(1): 30-37.