

内蒙古地区不同撂荒年限草地与沙棘地的入渗能力比较

屈媛媛¹, 李梦瑶¹, 徐学选^{2,3}, 徐远慧¹, 程帅¹, 王龙⁴

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 北京良乡蓝鑫水利工程设计有限公司, 北京 102488)

摘要: [目的] 研究内蒙古地区不同植被覆盖对土壤入渗能力的影响, 为该区的生态恢复和植被配置提供理论依据。[方法] 以该区 3 种不同年限撂荒草地 (13, 25, 30 a) 与 13 a 沙棘地为研究对象, 采用圆盘入渗仪法并结合土壤水分特征曲线比较各样地土壤导水率, 土壤大孔隙度及大孔隙连通性的差异。[结果] ① 土壤入渗能力与撂荒年限正相关, 随着撂荒年限的增加而变强, 土壤稳定入渗速率表现为 30 a 撂荒草地 > 25 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘地, 分别为 1.38, 1.29, 1.24, 1.11 mm/min。相同年限的撂荒草地入渗速率较沙棘地更大。② 大孔隙度及大孔隙连通性均依次为: 30 a 撂荒草地 > 25 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘, 占土壤体积 0.000 4% ~ 0.003 4% 的土壤大孔隙对土壤饱和入渗速率的贡献高达 44.35% ~ 86.92%。③ > 0.25 mm 水稳性团聚体含量是影响土壤入渗速率的主要因素。[结论] 撂荒可以改善草地的入渗能力, 并且随年限的延长而增强, 相同年限下撂荒草地的入渗性能大于种植沙棘地, 其主要影响因素为土壤大孔隙数目及连通性、> 0.25 mm 水稳团聚体。

关键词: 土壤入渗率; 大孔隙度; 大孔隙连通性; 撂荒草地; 沙棘地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0034-07

中图分类号: S157.1, P333.5

文献参数: 屈媛媛, 李梦瑶, 徐学选, 等. 内蒙古地区不同撂荒年限草地与沙棘地的入渗能力比较[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 34-40. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.005; Qu Yuanyuan, Li Mengyao, Xu Xuexuan, et al. Comparison of infiltration capacity between grassland of different time lengths of abandonment and sea buckthorn land in Inner Mongolia [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 34-40.

Comparison of Infiltration Capacity Between Grassland of Different Time Lengths of Abandonment and Sea Buckthorn Land in Inner Mongolia

Qu Yuanyuan¹, Li Mengyao¹, Xu Xuexuan^{2,3}, Xu Yuanhui¹, Cheng Shuai¹, Wang Long⁴

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Beijing Liangxiang Lanxin Hydraulic Engineering & Design Co., Ltd, Beijing 102488, China)

Abstract: [Objective] The effect of different vegetation covers on soil infiltration capacity in Inner Mongolia was analyzed in order to provide a theoretical basis for ecological restoration and vegetation allocation of the region. [Methods] Three ages of abandoned grassland (13 years, 25 years, and 30 years) and 13 years of sea buckthorn land in this region were used as treatments. The disc infiltration method and soil water characteristic curves were used to compare differences in soil hydraulic conductivity, soil macroporosity, and macropore connectivity. [Results] ① Soil infiltration capacity was positively correlated with the length of abandoned years, and became stronger as the number of abandoned years increased. The stable infiltration rate of soil followed the order of 30-year abandoned grassland > 25-year abandoned grassland > 13-year abandoned grassland > 13-year sea buckthorn land. ② Macroporosity and macropore connectivity followed the order of

收稿日期: 2022-09-10

修回日期: 2022-10-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426)

第一作者: 屈媛媛(1995—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为草地生态。Email: quyuanyuan@nwafu.edu.cn。

通信作者: 徐学选(1966—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 主要从事流域水文、草地生态相关研究。Email: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn。

30-year abandoned grassland > 25-year abandoned grassland > 13-year abandoned grassland > 13-year sea buckthorn land. Soil macropores accounted for 0.0004%—0.0034% of the soil volume and accounted for 44.35%—86.92% of the soil saturated infiltration rate. ③ The content of water stable aggregates >0.25 mm was the main factor affecting soil infiltration rate. [Conclusion] Abandonment improved the infiltration capacity of grassland, and the infiltration capacity increased with increasing number of years of abandonment. The infiltration capacity of abandoned grassland was greater than that of sea buckthorn land having the same number of years of abandonment. The main influencing factors were the number and connectivity of soil macropores, and water stable aggregates >0.25 mm.

Keywords: soil infiltration rate; macro porosity; macropore connectivity; abandoned grassland; sea buckthorn land

内蒙古自治区鄂尔多斯市地处生态脆弱带,特别是在砒砂岩区的水土流失、植被退化情况极为严重。21世纪初,退耕还草还林工程给内蒙古地区带来了巨大的改变,特别是鄂尔多斯地区的生态环境相关建设,具体措施有封禁、自然恢复育草以及人工种草造林,这些举措增加了地面植被覆盖度,使地上植被开始逐步恢复,如撂荒恢复草地和人工种植沙棘,区域土壤性质及生态环境得以恢复和改善^[1]。已有在黄土高原其他区域的研究表明,自然撂荒可提高土壤入渗能力^[2],随着植被撂荒年限增加,土壤容重降低,土壤孔隙度、入渗性能等增大^[3]。但在内蒙古地区相关研究较少,自然撂荒使得内蒙古草地植被得以恢复,土壤状况得以改善,但具体对草地的入渗性能改善效果需要进一步探究说明。人工沙棘林因其顽强的生命力,强大的适应性,可以在干旱、瘠薄的土壤上正常生长,是内蒙古砒砂岩区主要生态经济树种^[4],因而内蒙古砒砂岩地区沙棘人工林土壤的性质变化有较多研究^[5-7],比较内蒙古地区的种植沙棘地对土壤的入渗能力的影响也更为重要。

对于生态脆弱区而言,土壤的入渗能力在一定程度上决定了降雨侵蚀危害的大小,因而备受关注,在植被恢复进程中,土壤入渗能力变化的驱动因子辨识对于消除水土流失危险意义重大。目前研究多在植被恢复后土壤物理性质的变化上取得成果,对于这个恢复过程中土壤入渗能力的变化过程缺少明确的机理探索。我们以空间代替时间的方法,选择当地撂荒地和沙棘林的年限作为一个时间指标,探索土壤入渗能力的变化进程、影响因素,揭示土地撂荒后地上植被生长恢复在土壤入渗能力发育中的贡献。土壤大孔隙是可以使水流绕过部分土壤基质优先传导到土壤深层的孔隙^[8],土壤大孔隙的孔隙度、连通性都会对土壤内水流的速度产生直接影响^[9]。这些已有研究表明,将不同水力梯度下的入渗能力测定与水分特征曲线测定的静态大孔隙相结合,能够很好地揭示土壤孔隙度、孔隙连通性等特征,有助于阐明入渗能力变

化内在机理。

面对日趋严重的气候暖干化,内蒙古地区植被面临的高蒸发,低降水的气候条件^[10],比较不同植被的入渗能力,构建合理的植被,就尤为重要。因此本文以内蒙古地区两项重要生态措施不同年限的撂荒恢复草地以及沙棘地为对象,研究不同植被覆盖下土壤入渗能力变化,土壤大孔隙特征及土壤理化性质响应关系,以期更好地了解当地植被恢复状况和植被配置的合理性,探究各类植被对涵养水源,减少降雨侵蚀能力提供科学依据,为内蒙古地区的生态恢复和植被配置提供参考。

1 研究区概况

内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗,地理位置介于 106°42'40"—111°27'20"E, 37°35'24"—40°51'40"N 之间,属温带半干旱大陆性气候,冬夏寒暑变化大,每年降雨多集中于 7—8 月,降水量为 250~400 mm,水分蒸发量大,年蒸发量为 2000~3 000 mm。试验区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗圪秋沟小流域内,土壤类型有风沙土和黄绵土,实施退耕还林还草工程后,现存植被主要为退耕和封禁等生态恢复措施下形成的次生演替植被和人工植被,主要植物种为:达乌里胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、刺藜(*Dysphania aristata*)、大针茅(*Stipa grandis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)。

2 研究方法

2.1 样地的选择

在该研究区内选取 4 种植被类型,13 a 撂荒草地、25 a 撂荒草地、30 a 撂荒草地以及 13 a 沙棘地为对象进行研究,样地土壤为黄绵土,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic condition of sample plots

样地	海拔/m	平均坡度	盖度	优势种
13 a 撂荒草地	1 159.57	5°	0.87	苜蓿+艾蒿+大针茅(<i>Medicago sativa</i> + <i>Artemisia argyi</i> + <i>Stipa grandis</i>)
25 a 撂荒草地	1 184.9	8°	0.95	百里香+猪毛蒿+长芒草(<i>Thymus mongolicus</i> + <i>Artemisia scoparia</i> + <i>Stipa bungeana</i>)
30 a 撂荒草地	1 120.7	13°	0.92	长芒草+达乌里胡枝子(<i>Stipa bungeana</i> + <i>Lespedeza bicolor</i>)
13 a 沙棘	1 168.9	4°	0.85	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)

2.2 样品的采集及土壤基本性质测定

于 2020 年 7 月在研究区 4 类植被中每个类型选取 3 个坡度、坡向比较一致的代表样地,在每个样地 S 型布设 5 个采样点,样点使用环刀法分层采集土样,取样深度分别为 0—10,10—20,20—30 cm。土壤机械组成使用马尔文激光分析仪测定,有机质含量通过重铬酸钾法测定,土壤容重使用环刀法,根系生物量使用烘干法测定,土壤水稳团聚体含量通过干—湿筛法测得。

2.3 土壤水分特征曲线测定

采用环刀法在各样地内分 3 层采集土壤不同深度原状土样每层 10 cm,每个样地重复 3 次。将原状土样带回实验室,充分饱和后,放入高速恒温冷冻离心机中进行离心,共设定 11 个不同转速,离心至平衡时间,可计算获得吸力值 0,1,10,20,40,60,80,100,200,400,600,800 kPa 下的土壤体积含水率,测得土壤在脱湿过程的水分特征曲线。

土壤孔隙的数量及大小可以通过茹林公式 $d=3/p^{[1]}$,计算得到与吸力相当的孔隙直径 d 。其中 p 为施加吸力的水柱高(cm)。

2.4 土壤入渗能力及大孔隙特征测定

土壤入渗能力的测定使用圆盘入渗仪法,使用前将入渗仪水势设置好,给储水管吸水,检查装置气密性。记录储水管中的水位高度,并记录水温。清理地表,在地表铺设细砂,并且保证入渗仪水平以及底盘与细砂充分接触,打开阀门,等湿润锋通过沙层后开始计时。在入渗前 1.5 min,每隔 10 s 记录数据,1.5 min 到 3 min,30 s 计时一次;3 min 后,每隔 1 min 记录一次,连续记录直到稳定入渗,重复 5 次。

土壤入渗速率 f_s :

$$f_s = \frac{\Delta h D_2^2}{\Delta t D_1^2 (0.7 + 0.03T)} \quad (1)$$

式中: f_s 为标准水温 10 °C 时的土壤入渗速率 (mm/min); D_1 为圆盘入渗仪底盘的有效直径 (cm); D_2 为圆盘入渗仪的储水管直径 (cm); Δt 为时段 (min); Δh 为某时段 Δt 储水管读数差值 (mm); T 为某时段的平均水温 (°C)。

通过在不同负压下(0, -1, -3, -6, -12 cm)进

行入渗试验,获得不同等效孔径参与传导水分的入渗速率。

土壤大孔隙计算方法为 Watson 和 Luxmoore 法^[12]:

$$N = \frac{8\mu K_m}{\pi \rho g (r_m)^4} \quad (2)$$

$$\theta_m = N \pi (r_m)^2 = \frac{8\mu K_m}{\rho g (r_m)^2} \quad (3)$$

式中: N 为单位面积有效大孔隙的最大数目; μ 为水的黏滞系数 [g/(m·s)]; K_m 为大孔隙的张力传导度 (m/s); r_m 为设定孔隙范围的最小值 (m); θ_m 为大孔隙度 (%)。

2.5 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理,SPSS 22 进行统计分析,Origin 2021 进行制图。

3 结果与分析

3.1 土壤基本性质

土壤容重可以反映土壤的紧实程度,是评价土壤退化程度的重要指标之一。由表 2 可以看出,随撂荒年限的增加,土壤容重随之减少,各样地的容重变化范围在 1.33~1.53 g/cm³ 之间,并且表现出随土层深度增加而增加的趋势。在各样地土壤机械组成中,0—30 cm 土层平均砂粒含量 (>0.02 mm) 表现为 13 a 撂荒草地最高而 13 a 沙棘地最低,粉粒含量 (0.02~0.002 mm) 占整体的 9%~14%,黏粒含量占整体的 6%~11%,其中 13 a 沙棘的粉粒含量与黏粒含量均处于较高水平,13 a 撂荒草地的粉粒和黏粒含量最低。

土壤有机质含量随土层增加而明显降低,其中 13 a 沙棘 0—10 cm 土层的有机质含量是其 20—30 cm 土层有机质含量的 1.7 倍。在 20—30 cm 土层中,30 a 撂荒草地有机质含量明显高于 25 a 撂荒草地。4 类样地有机质含量整体表现为:13 a 沙棘 > 25 a 撂荒草地 > 30 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地。各样地根系生物量在 0.26~2.53 mg/cm³ 之间,其中 25 a 撂荒草地 0—10 cm 土层的根系生物量最高,大于相同土层其他样地的根系生物量,不同土层间表现出与有机质相同的趋势随土层增加而下降。>0.25 mm 水稳性团聚体含量

($WR_{0.25}$) 的含量反映了土壤结构的稳定性和抗侵蚀能力,其在 0—10 cm 土层中表现为:25 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘 > 30 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地,在 10—

30 cm 土层中, 25 a 撂荒草地 > 30 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘 > 13 a 撂荒草地。总体来看,25 a 撂荒草地水稳团聚体含量较高而 13 a 撂荒草地含量较低。

表 2 4 类样地 0—30 cm 土层土壤基本性质

Table 2 Soil basic properties of four plots among 0—30 cm

样地	土层/cm	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	>0.25 mm 水稳 团聚体含量/%	有机质含量/ %	根系生物量/ ($mg \cdot cm^{-3}$)	机械组成/%		
						>0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
13 a 撂荒草地	0—10	1.37±0.02	37.38±4.07	0.96±0.06	1.15±0.18	82.00±0.12	9.713±0.14	8.28±0.26
	10—20	1.48±0.03	49.02±6.50	0.53±0.04	1.28±0.30	82.77±0.51	9.42±0.27	7.81±0.23
	20—30	1.52±0.06	39.40±6.26	0.39±0.09	0.90±0.52	82.53±1.69	9.46±0.93	8.00±0.77
	0—30	1.45±0.07	41.93±8.12	0.58±0.25	1.10±0.38	82.49±0.99	9.51±0.53	8.00±0.48
25 a 撂荒草地	0—10	1.36±0.02	80.72±3.17	1.07±0.23	2.53±0.38	76.15±0.39	12.42±0.268	11.43±0.12
	10—20	1.45±0.01	84.50±1.42	0.63±0.07	0.55±0.10	78.56±1.84	12.97±0.59	8.47±1.25
	20—30	1.53±0.01	86.93±2.38	0.35±0.07	0.26±0.003	84.24±1.813	9.78±0.84	5.98±1.00
	0—30	1.45±0.72	84.05±3.43	0.68±0.34	1.03±1.04	79.79±4.01	11.56±1.59	8.65±2.62
30 a 撂荒草地	0—10	1.33±0.05	56.39±4.87	0.93±0.14	1.45±0.75	80.15±0.87	11.12±0.37	8.73±0.05
	10—20	1.42±0.03	63.01±8.64	0.49±0.09	0.55±0.10	83.04±1.55	9.52±0.99	7.44±0.56
	20—30	1.50±0.02	72.71±1.62	0.52±0.12	0.33±0.20	76.33±2.48	12.99±1.57	10.67±0.91
	0—30	1.42±0.08	62.95±8.61	0.66±0.25	0.74±0.55	79.89±3.04	11.20±1.62	8.92±1.43
13 a 沙棘	0—10	1.40±0.04	58.02±8.82	1.13±0.39	1.60±0.10	78.25±2.51	11.42±1.69	10.33±0.84
	10—20	1.43±0.05	65.58±3.63	0.74±0.18	1.18±0.25	74.85±1.89	12.88±1.13	12.27±0.76
	20—30	1.46±0.014	56.60±10.1	0.68±0.05	0.42±0.26	72.73±2.48	13.94±2.58	13.33±3.28
	0—30	1.43±0.43	60.85±7.36	0.86±0.31	1.14±0.86	75.33±4.31	12.73±2.07	11.94±2.31

3.2 土壤水分入渗特征

图 1 为 4 类样地的土壤入渗过程。图 1a 显示:不同植被条件下,土壤入渗速率存在明显差异,入渗过程整体表现为开始阶段为快速波动下降,6 min 后开始缓慢下降,最终逐渐达到稳定入渗状态。在水分入渗初期,由于植被根系活动以及腐烂死亡形成了根孔,这些入渗通道使水分在基质势和重力势的作用下快速运移至土壤更深层。在此过程中,由于上层土壤的颗粒被随水流进入并堵塞了水分运移通道,使得入渗速率上下波动,当上层土壤含水量逐渐增加,基质势随之增加到一定程度时,水势差降低,入渗速率趋于稳

定。结合图 1b 累积入渗量可以看出,在整个水分入渗过程中,入渗前期,25 a 撂荒草地的累积入渗最多,30 a 撂荒草地次之,这与土壤初始含水量的差异有关。到达稳定入渗后,各样地稳定入渗速率依次为:30 a 撂荒草地 > 25 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘,其数值分别为 1.38, 1.29, 1.24, 1.11 mm/min。整体来看,稳定入渗速率表现为随撂荒年限增加而增大的趋势,并且 13 a 沙棘地的入渗速率小于 13 a 撂荒草地。这说明在草地自然撂荒恢复过程中对土壤产生了较沙棘更明显的改善作用,使得土壤入渗能力增强较多,相同年限草地的入渗能力比沙棘的入渗能力强。

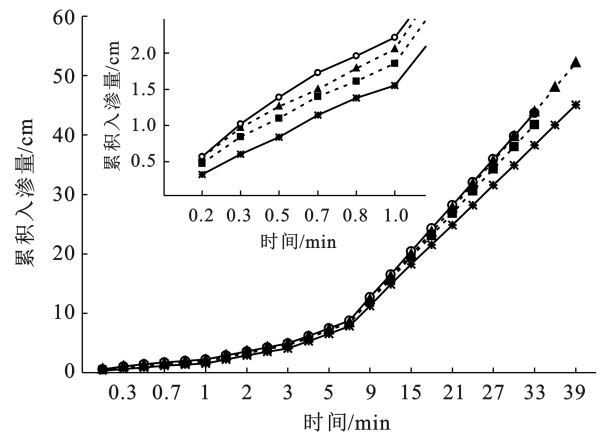
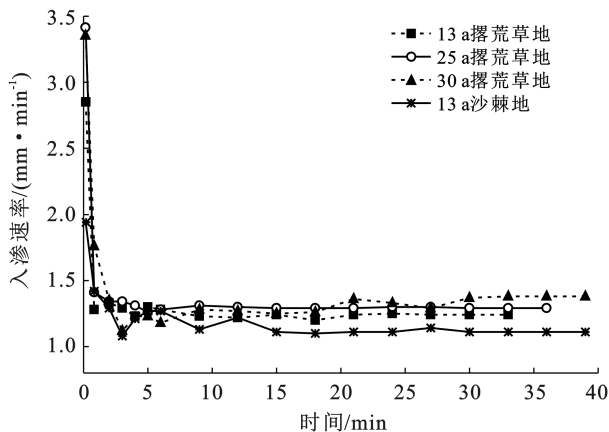


图 1 4 类样地土壤水分入渗过程

Fig.1 Soil infiltration process of four plots

3.3 大孔隙特征

根据试验测得的不同负压下的土壤稳定入渗速率,使用 WL 法计算出内蒙古地区 4 类样地的土壤大孔隙情况见表 3。13 a 撂荒草地、25 a 撂荒草地、30 a 撂荒草地和 13 a 沙棘地单位面积孔径为 1~3 mm 的孔隙数量分别为 9,10,14,11 个/m²,0.5~1 mm 的孔隙数量分别为 116,130,174,87 个/m²,>3 mm 的有效孔隙度大小为 0.000 4%,0.000 8%,0.000 6%,0.000 5%。仅占土壤体积 0.000 4%~0.003 4%的土

壤大孔隙对土壤饱和入渗速率的贡献高达 44.35%~86.92%。表 4 所示的大孔隙连通性是指通过土壤水分特征曲线法计算出的>1 mm 的大孔隙度(WRC),即静态的大孔隙度,与表 3 中参与水分传导的>1 mm 有效大孔隙度的比值。结合表 3—4 可以看出随着撂荒年限的增加,土壤大孔隙发育越好,数量越多,连通性也更好。13 a 沙棘地的发育出的静态大孔隙度较多,仅次于 30 a 撂荒草地,但其大孔隙连通性最差。

表 3 4 类样地的大孔隙数量

Table 3 Amounts of macropores of four plots

地类	孔隙分布	孔隙数量/ (ind·m ⁻²)	有效孔隙度/ %	各级孔隙对饱和 导水率的贡献率/%	累计各级孔隙对饱和 导水率的贡献率/%
13 a 撂荒草地	>3	1	0.000 4	44.35	44.35
	1~3	9	0.000 7	8.06	52.42
	0.5~1	116	0.002 3	6.45	58.87
25 a 撂荒草地	>3	1	0.000 7	71.32	71.54
	1~3	10	0.000 8	8.53	80.00
	0.5~1	130	0.002 6	6.98	86.92
30 a 撂荒草地	>3	1	0.000 6	54.35	54.35
	1~3	14	0.001 1	11.59	65.94
	0.5~1	174	0.003 4	8.70	74.64
13 a 沙棘	>3	1	0.000 5	61.26	61.26
	1~3	11	0.000 9	10.81	72.07
	0.5~1	87	0.001 7	5.41	77.48

表 4 4 类样地的大孔隙(>1 mm)连通性

Table 4 Macropore connectivity (>1 mm) of four plots

地类	静态大孔隙度/%	大孔隙连通性/%
13 a 撂荒草地	0.261 4	0.438 3
25 a 撂荒草地	0.283 5	0.532 5
30 a 撂荒草地	0.318 9	0.542 7
13 a 沙棘	0.306 7	0.453 6

3.4 影响土壤入渗能力的因素

由表 5 可知,土壤初始入渗速率、土壤稳定入渗

速率与黏粒含量极显著负相关($p<0.01$),与砂粒含量显著正相关($p<0.05$),与>1 mm 有效大孔隙度以及大孔隙连通性极显著正相关($p<0.01$)。土壤稳定入渗速率与>0.25 mm 水稳团聚体含量显著正相关($p<0.05$),而土壤初始入渗速率与其呈极显著正相关关系($p<0.01$)。这表明了土壤>0.25 mm 水稳团聚体含量越高,土壤结构稳定性越好,土壤的大孔隙发育越优,水流更易通过,土壤入渗速率也越快。

表 5 土壤物理性质与土壤入渗速率的相关性

Table 5 Correlation among soil physical properties soil infiltration rates

指标	容重	>0.25 mm 水稳团聚体含量	砂粒	粉粒	黏粒	大孔隙度 (>1 mm)	大孔隙连通性
初始入渗速率	0.026	0.549 **	0.374 *	-0.194	-0.494 **	0.461 **	0.937 **
稳定入渗速率	-0.034	0.386 *	0.384 *	-0.223	-0.488 **	0.611 **	0.956 **

注:*,**表示差异显著($p<0.05$)及差异极显著($p<0.01$)。

4 讨论与结论

4.1 讨论

植被在自然恢复生长过程中,掉落了大量的枝叶

堆积于土壤表层,这些枯枝落叶经微生物分解后养分进入土壤,土壤有机质大部分来源于此^[13]。随植被生长其根系在土壤内活动以及腐烂死亡也是土壤有机质的重要来源之一,根系死亡后留下的大量的根孔,

对土壤的基本性质以及结构造成影响。在本试验中这种影响表现为,随着植被恢复时间增加,土壤的容重降低,变得更加松散,孔隙度增加,大孔隙数量变多,并且连通性更好。土壤基本性质中,土壤机械组成除了受到其成土母质、土壤质地的影响,主要与其地上植被类型密切相关。植被覆盖可以拦截降雨、减弱地表径流的侵蚀,保存土壤表层的粉粒、黏粒含量;从本试验中可以看出 13 a 沙棘的砂粒含量较少而粉粒、黏粒含量较多,这与 13 a 沙棘地较多的凋落物、强大的根系和丰富的有机质含量相关。本试验发现土壤入渗能力与撂荒年限正相关,随着撂荒年限的增加而变强。陈文媛等^[14]在黄土丘陵区对不同退耕年限草地的入渗能力研究获得了相同结果。李超等^[15]对不同撂荒阶段的草地研究发现,其入渗能力与撂荒时间关系表现为随时间延长先显著增加后趋于稳定。有试验对比沙棘与草地入渗性能,其结果为草地的稳定入渗速率高于沙棘地,这与本试验结果一致,但缺少相同年限植被的入渗性能比较。Bodhinayake 等^[16]研究时发现天然草地相较于人工草地,无论是其土壤大孔隙度还是数量都显著更多,入渗能力也更强。不同植被以及管理方式引起土壤结构的变化同时,其地下孔隙结构也发生变化。

在土壤水分入渗过程中,有效大孔隙即可传导水分的大孔隙中起到至关重要的作用。本试验结果中,沙棘地发育出的静态大孔隙度较多但其大孔隙连通性最差,即在实际水分入渗过程中,参与水分在土壤中的运移的有效大孔隙数量占所发育出的所有大孔隙数量的比例最小,这也是 13 a 沙棘地土壤入渗速率最小的主要原因。30 a 撂荒草地无论是静态的大孔隙度,还是有效大孔隙数量都是最多的,其大孔隙连通性也最好,这就解释了土壤稳定入渗速率表现出 30 a 撂荒草地最大的原因。在土体中占极小部分的土壤大孔隙,却对水分在土壤中的运移有着决定性影响^[16]。也有研究者发现耕作方式会对大孔隙特征的产生影响,非耕作土壤的大孔隙的连通性更好^[17]。Nachabe 和 Member^[18]通过张力渗透仪测得含有 >1 mm 大孔隙的土壤时,发现大孔隙的水分传导能力是没有大孔隙的土壤基质的 3.6 倍。赵世伟^[19]对黄土高原自然恢复植被的土壤孔隙进行定量分析时发现,植被恢复增加了大孔隙度,这与本研究结果一致。Tinashe 的试验发现了丰富发达的根系交织成的网络有助于大孔隙的发育形成^[20],而且由植物根系穿插和土壤动物活动形成的孔隙结构稳定性较强^[21],可以长时间保持。土壤大孔隙数量及大孔隙连通性在土壤水分入渗过程中起到至关重要的作用。

通过对本试验结果分析得出, >0.25 mm 水稳性团聚体含量对土壤入渗能力至关重要,其含量的多少,不仅影响土壤入渗速率,还代表了土壤团聚体结构稳定性,反映了土壤的抗侵蚀能力。团聚体结构稳定性良好才能保障土壤大孔隙的连通性,而土壤有机质和黏粒是土壤团聚结构形成的重要物质。Paul 等^[22]研究发现不同土地管理方式下土壤团聚体稳定性差异显著,少耕模式的土壤团聚体稳定性要优于传统耕作方式的农地,并且土壤团聚体稳定性与其土壤黏粒含量正相关^[23]。植被随着生长发育时间增加,日趋发达的地下根系可以固结土壤,根系在土壤内的活动有助于促进团聚体形成,枯落的枝叶和腐烂的根系也通过增加土壤有机质含量促进了团聚体的形成^[24],同时也增强了团聚体的稳定性。在本试验中,草地随着撂荒年限延长,其土壤有机质含量在 25 a 中达到高峰,随后开始下降。 >0.25 mm 水稳性团聚体含量也表现出相似特征,其整体表现为 25 年撂荒草地 >30 a 撂荒草地 >13 a 沙棘 >13 a 撂荒草地。这是由于 30 a 撂荒草地的植被逐渐开始出现灌木植物,草地灌丛化的发展会限制草本植被生长,使土壤的空间异质性增强,降低群落中草本植被盖度^[25]。从长远来看,随灌丛化发展,灌木生长年限增加,土壤养分含量会逐渐增加。而在 4 类样地中,沙棘地较撂荒草地有机质含量更高。

随着地上植被自然生长恢复,土壤中的孔隙逐渐发育,其地下土壤大孔隙度也随之增加^[19]。撂荒年限越长,地上植被就留下更多的死根,穿插在土壤中的草地根系死亡腐烂后会形成大孔隙,成为导水通道,土壤优先流水流可以绕过周围土壤母基质并且短时间内到达土壤深层。而较好的团聚体稳定性保障了这些通道在传导水分时保持连通性,进而影响土壤导水速率。25 a 撂荒草地相较其他撂荒年限草地的初始入渗率更高,这与其更好的团聚体稳定性以及土壤表层较多的有机质含量和根系生物量有关。王国梁等^[26]在纸坊沟试验时也发现沙棘地的稳定入渗速率低于长芒草、铁杆蒿、芨蒿等草本群落恢复草地,本试验中比较了 13 a 沙棘地的入渗速率,其入渗性能低于相同年限草地,这与沙棘地的种植年限较短有关,有研究发现内蒙古地区不同年限的沙棘林其土壤养分含量随种植年限增加而显著增加,种植 21 a 的沙棘林土壤养分显著高于 12 a 沙棘林^[27],后续研究可探讨较长种植年限沙棘地的入渗能力与相同年限撂荒草地入渗性能比较。

4.2 结论

(1) 土壤入渗能力与撂荒年限正相关,随着撂荒

年限的增加而变强,土壤稳定入渗速率表现为:30 a 撂荒草地 > 25 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘,相同年限的撂荒草地入渗速率较沙棘地更大,入渗能力更强。

(2) 不同植被覆盖下的大孔隙度及大孔隙连通性均依次为:30 a 撂荒草地 > 25 a 撂荒草地 > 13 a 撂荒草地 > 13 a 沙棘,占土壤体积 0.000 4%~0.003 4% 的土壤大孔隙对土壤饱和入渗速率的贡献高达 44.35%~86.92%。

(3) >0.25 mm 水稳性团聚体含量是影响土壤入渗速率的主要原因之一,>0.25 mm 水稳团聚体含量越高,土壤稳定性越好,土壤的结构和土壤大孔隙发育越优,更易产生优先流,土壤入渗速率也越快。

[参 考 文 献]

- [1] 张琨,吕一河,傅伯杰.黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(1):23-31.
- [2] 徐远慧,冯璐,屈媛媛,等.黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):57-63.
- [3] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
- [4] 王浩,杨方社,李怀恩,等.沙棘柔性坝对砒砂岩沟道泥沙粒径分布及有机质影响[J].水土保持学报,2017,31(5):158-163.
- [5] 卢立娜,赵雨兴,胡莉芳,等.沙棘(*Hippophae rhamnoides*)种植对鄂尔多斯砒砂岩地区土壤容重、孔隙度与贮水能力的影响[J].中国沙漠,2015,35(5):1171-1176.
- [6] 何京丽,殷丽强,郭建英,等.砒砂岩地区沙棘生态工程的土壤修复效果分析[J].国际沙棘研究与开发,2013,11(3):19-23.
- [7] 郭建英,何京丽,殷丽强,等.砒砂岩地区人工沙棘群落结构及多样性分析[J].国际沙棘研究与开发,2011,9(1):24-29.
- [8] 高朝侠,徐学选,赵娇娜,等.土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J].生态学报,2014,34(11):2801-2811.
- [9] 高朝侠,徐学选,宇宙子,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.
- [10] 张永旺,万珊珊,王俊,等.黄土高原植被演替过程中土壤水分亏缺[J].水土保持研究,2020,27(5):120-125.
- [11] 程亚南,刘建立,张佳宝.土壤孔隙结构定量化研究进展[J].土壤通报,2012,43(4):988-994.
- [12] Watson K W, Luxmoore R J. Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3):578-582.
- [13] 刘文祥,李勇,于寒青.草灌植被恢复提高坡地土壤水稳性团聚体和碳、氮含量的有效性:退耕年限的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):164-170.
- [14] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [15] 李超,周正朝,朱冰冰,等.黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性研究[J].水土保持学报,2017,31(2):61-66.
- [16] Bodhinayake W, Si Bingcheng. Near-saturated surface soil hydraulic properties under different land uses in the St Denis National Wildlife Area, Saskatchewan, Canada [J]. Hydrological Processes, 2004,18(15):2835-2850.
- [17] Soto-Gómez D, Pérez-Rodríguez P, Vázquez-Juiz L, et al. Linking pore network characteristics extracted from CT images to the transport of solute and colloid tracers in soils under different tillage managements [J]. Soil and Tillage Research, 2018,177:145-154.
- [18] Nachabe M H. Estimating hydraulic conductivity for models of soils with macropores [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995,121(1):95-102.
- [19] 赵世伟,赵勇钢,吴金水.黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析[J].中国科学(D辑),2010(2):223-231.
- [20] Mawodza T, Menon M, Casson S, et al. Visualisation and quantification of wheat root system architecture and soil moisture distribution in an aggregated soil using neutron computed tomography [J]. Geoderma, 2020, 359:113988.
- [21] Hagedorn F, Bundt M. The age of preferential flow paths [J]. Geoderma, 2002,108(1/2):119-132.
- [22] Paul B K, Vanlauwe B, Ayuke F, et al. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013, 164: 14-22.
- [23] 黄茹,黄林,何丙辉,等.三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究[J].环境科学,2013,34(7):2800-2808.
- [24] Zhang Bin, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China [J]. Geoderma, 2001,99(1/2):123-145.
- [25] 彭海英,李小雁,童绍玉.内蒙古典型草原灌丛化对生物量和生物多样性的影响[J].生态学报,2013,33(22):7221-7229.
- [26] 王国梁,刘国彬,周生路.黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响[J].自然资源学报,2003,18(5):529-535.
- [27] 刘军,党晓宏.露天煤矿排土场边坡不同年限沙棘对林下土壤肥力质量的影响[J].浙江林业科技,2017,37(6):9-14.