

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.046.

刘卓昕, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 206-213.

LIU Zhuoxin, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Effects of Vegetation Restoration on Soil Hydrophysical Properties in Loess Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 206-213.

黄土区植被恢复对土壤水文物理性质的影响

刘卓昕¹, 高鹏^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 邱德勋², 丁莹莹¹

(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实验室,
陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 阐明黄土高原长期退耕还林(草)对土壤水文物理性质的影响, 有利于完善黄土高原土壤水文研究, 为黄土高原后续生态恢复提供理论依据。 [方法] 通过采样分析和原位双环入渗试验, 针对不同植被恢复类型的土壤有机质、容重、孔隙度、含水量以及入渗性能等土壤水文物理性质进行了分析。 [结果] 植被恢复对土壤物理性质影响显著 ($p < 0.05$), 造成的变化在 0—40 cm 土层表现得最为明显, 有机质、孔隙度和 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量显著增加, 容重显著降低。退耕还林(草)增强了土壤的入渗能力, 相较于农地, 绥德和神木草地的初始入渗分别增加了 50% 和 31%; 绥德和神木地区的草地、灌木、林地的稳定入渗速率分别增加了 76%, 11%, 19% 和 53%, 128% 和 58%。土壤稳定入渗和平均入渗与容重呈显著负相关关系 ($p < 0.05$), 与总孔隙度、毛管孔隙度 ($p < 0.05$) 和有机质含量 ($p < 0.01$) 呈显著正相关。 [结论] 植被恢复对土壤水文物理性质影响显著, 土壤入渗性能显著提高, 有机质含量、容重和孔隙度对入渗性能有显著影响。

关键词: 植被恢复; 土壤水文物理性质; 黄土高原

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0206-08

Effects of Vegetation Restoration on Soil Hydrophysical Properties in Loess Region

Liu Zhuoxin¹, Gao Peng^{1,2}, Mu Xingmin^{1,2}, Qiu Dexun², Ding Yingying¹

(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, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Elucidating the influence of long-term returning farmland to forest, shrubland, and grassland on soil hydrophysical properties on the Loess Plateau is conducive to improving soil hydrology research and providing a theoretical basis for the subsequent ecological restoration of the Loess Plateau. [Methods] Through sampling analysis and double-ring infiltrometer test, the soil hydrophysical properties such as soil organic matter, bulk density, porosity, soil moisture and infiltration capacity of different vegetation restoration types were analyzed. [Results] Vegetation restoration had a significant impact on soil physical properties ($p < 0.05$), and the resulting changes were most obvious in the 0—40 cm soil layer. The content of organic matter, porosity and the stability of water-stable aggregates significant increased, the soil bulk density decreased significantly. Converting farmland to forest, shrubland, and grassland enhanced soil infiltration capacity. Compared with farmland, the initial infiltration of Suide and Shenmu grassland increased by 50% and 31%, respectively; the stable infiltration rates of grassland, shrubs and forest in Suide area

收稿日期: 2022-08-23

修回日期: 2022-09-20

资助项目: 国家自然科学基金“黄土区地表产流机制变化对植被恢复的响应”(42077075)

第一作者: 刘卓昕(1997—), 女, 山西介休人, 在读硕士研究生, 研究方向为生态水文及水土保持。E-mail: Lzx7050@163.com

通信作者: 高鹏(1976—), 男, 陕西扶风人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态水文及水土保持研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

increased by 76%, 11% and 19%, respectively; those in Shenmu area increased by 53%, 128% and 58%, respectively. Soil stable infiltration and average infiltration were significantly negatively correlated with bulk density ($p < 0.05$), and significantly positively correlated with total porosity, capillary porosity ($p < 0.05$) and organic matter content ($p < 0.05$). [Conclusion] Vegetation restoration has a significant effect on soil hydrophysical properties, soil infiltration performance has been significantly improved, and organic matter content, bulk density and porosity have significant effects on infiltration performance.

Keywords: vegetation restoration; soil hydrophysical properties; Loess Plateau

自20世纪50年代以来,为治理黄土高原严重的水土流失,该地区就开展了有组织的规模化水土保持治理工作^[1-2],特别是1999年以来退耕还林(草)措施的实施,植被盖度从20世纪80年代的28.8%增长到2018年的60%以上,植被恢复已经成为该地区控制水土流失、改善生态系统服务功能的重要措施^[3]。退耕还林(草)使得植被覆盖发生了显著变化,缓慢改变了土壤的理化性质,导致土壤水文过程发生改变,促使超渗产流转变为蓄满产流和壤中流,降低了产流和产沙量^[4-5]。所以,研究植被恢复对土壤水文物理性质的影响在黄土高原水土保持工作中具有重要意义。

植被恢复对土壤物理性质的影响一直是土壤学及水土保持工作的研究重点。植被和土壤的相互作用导致土壤物理性质变化,从而显著改变了土壤结构。退耕还林(草)显著提高了表层土壤质量^[6],植被通过增加地表枯落物和土壤有机质提高了土壤团聚体的含量和稳定性,从而促进退化土壤性质恢复^[7],使土壤容重显著降低^[8]。土壤容重的大小可以反映植被恢复对土壤孔隙状况与通气透水能力的改善程度^[9-10]。焦梦妍等发现,安塞地区不同植被恢复阶段表层土壤容重总体表现为先减少后增加的趋势,在30 a时降到最低值,孔隙度变化趋势则与之相反^[11]。但是李同川发现土壤大孔隙特征随植被年龄的增加而逐渐优化,40 a生柠条比22 a生柠条覆盖下的土壤拥有更好的孔隙结构^[12]。土壤结构的变化对土壤水文性质产生显著影响。目前,植被恢复可以改善土壤结构,从而提高土壤入渗和持水能力这点已有普遍共识。大量研究^[13-16]表明,土壤入渗性能与土壤容重、孔隙度、水稳性团聚体以及有机质含量显著相关。在植被恢复过程中,植被类型是影响土壤入渗的重要因素,而且在不同地区,植被恢复类型对土壤入渗性能呈现出不同的影响。王国梁等^[14]发现安塞纸坊沟流域的灌木和草地土壤稳定入渗速率显著大于林地。但是刘畅等^[17]发现吉县蔡家川流域的林地土壤入渗速率明显大于灌木和草地。随着退耕年限的增加,土壤容重减小,水稳性团聚体和有机质含量增加,土壤结构更加稳定,更有利于水分入渗^[18]。

综上所述,针对不同植被类型和恢复年限的土壤性质变化已经进行了大量的研究,但是黄土高原的植被生态恢复是一个长期工作,而且在不同地区,由于气候、地形以及土壤等因素的不同,植被类型对土壤水文物理性质的影响也不尽相同,所以仍需要对黄土高原进行大量持续的研究以明确黄土高原长期大范围的植被恢复对土壤水文过程的影响,从而针对不同地区进行合理的植被恢复及水土保持治理规划。绥德和神木位于陕西省北部,属于典型的黄土区,土壤侵蚀活动强烈而且具有很强的代表性,两个地区自20世纪50年代开始进行水土保持治理措施,生态环境显著改善,在黄土高原的水保治理工作中具有代表性作用。选择这两个区域为研究区,探讨黄土区典型流域植被恢复对土壤水文物理性质的影响,有助于进一步认识黄土高原典型黄土区的土壤水文过程,对于黄土高原生态恢复和水土保持治理具有重要作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辛店沟(110°16'45"—110°20'00"E, 37°29'00"—37°31'00"N)和桥沟流域(110°17'24"—110°17'43"E, 37°29'33"—37°30'13"N)位于陕西省榆林市绥德县,属于黄土高原丘陵沟壑区,土壤类型主要为黄绵土。气候类型为半干旱大陆性季风气候,多年平均气温约为10.1℃,平均降雨量约为480 mm,集中在6—9月,且多以暴雨形式出现。研究区代表性植物类型有柠条(*Caragana korshinskii*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

六道沟流域(110°21'—110°23'E, 38°46'—38°51'N)位于陕西省榆林市神木市,位于黄土高原北部水蚀风蚀交错带,土壤类型以风沙土和黄绵土为主。气候属于半干旱大陆性季风气候,多年平均年降雨量为440.8 mm,年均温为8.9℃,降水年内分配不均,集中在6—9月。该流域主要植被类型有长芒草(*Stipa bungeana*)、柠条、沙柳(*Salix cheilophila*)等。

1.2 研究方法

为了明确陕北黄土区典型流域植被恢复对土壤水文物理性质的影响,对黄土区典型流域的农地与草地、灌木以及林地 3 种植被恢复类型的土壤水文物理性质进行分析。

1.2.1 试验样地选择 为了研究植被恢复对土壤水文物理性质的影响,选择陕北黄土高原两个典型的退耕还

林(草)地区进行野外试验,分别是陕西省绥德县的辛店沟和桥沟流域以及陕西省神木市的六道沟流域。对小流域进行充分的野外踏查,在了解研究区域主要植被恢复模式以及沟坡主要植物群落、生长状况和分布特征的基础上,选择坡度、坡向、海拔以及恢复年限等条件大致相同的草地、灌木地和林地作为试验样地。同时选择农地作为植被恢复样地的对照组。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic conditions of sample plots

地区	样地	主要植被类型	纬度 N	经度 E	海拔/m	坡度/(°)
陕西绥德	耕地	高粱	37°30'25"	110°17'41"	945	2
	草地	紫花苜蓿	37°30'08"	110°17'34"	922	34
	灌木	紫穗槐、柠条	37°31'13"	110°17'34"	1001	37
	林地	油松	37°30'54"	110°17'01"	934	38
陕西神木	耕地	玉米	38°47'09"	110°21'37"	1199	2
	草地	长芒草	38°47'36"	110°21'46"	1179	36
	灌木	柠条	38°47'24"	110°21'55"	1184	39
	林地	山杏	38°47'19"	110°21'58"	1187	37

1.2.2 样品采集与试验 在每种植被类型样地选择植被生长较为典型的地块布设样方,样方面积为 20 m×20 m。样方布设好后,在样方中部沿水平方向等间距选取 3 个采样点重复采样。在每个采样点挖 100 cm 深土壤剖面,前 20 cm 以 10 cm 为间隔用 100 cm³ 环刀进行取样,20—100 cm 以 20 cm 为间隔进行取样,用于测定容重和孔隙度。同时每个土层取 500 g 左右原状土样用于测定水稳性团聚体,用自封袋在每层取 2 次土样测定土壤机械组成和有机质。在剖面旁打 1 m 深土钻,每隔 10 cm 用小铝盒取样,测得土壤质量含水量。

在每个剖面旁边选择一块较平坦的土地进行野外双环入渗试验,每个样地均进行 3 次重复试验。用小铲子去除地表植被和枯落物,并将地表铲平。用铁锤将内环 30 cm,外环 45 cm 的双环垂直打入土壤表面以下 5 cm。试验开始后,同时向内外环迅速注水,当内外环水位达到 4 cm 开始计时,采用定水头注水法测定入渗速率。试验以 0.5 min,1 min,3 min,5 min,7 min,10 min,15 min,20 min,25 min,...,为时间间隔计数,每次双环入渗试验进行 50 min。将前 1 min 的平均入渗速率视为初始入渗速率,最后 10 min 的平均入渗速率视为稳定入渗速率,0~50 min 的平均入渗速率为平均入渗速率。

1.2.3 土壤性质测定与计算 土壤有机质采用重铬酸钾热容量法测定。粒径使用马尔文 MS2000 型激光粒度仪测定,根据美国农业部土壤分类法,土壤颗粒按粒径分为 3 类,2~0.05 mm 为砂粒,0.05~0.002 mm 为粉粒、小于 0.002 mm 为黏粒。水稳性团聚体含量

采用 Yoder 法测定。土壤含水量使用烘干法测得。土壤容重和孔隙度采用环刀法测定。具体测定方法参照《土壤理化分析》^[19]。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型的土壤物理特征

根据不同植被类型和不同深度土层土壤的主要物理性质(表 2,表 3)可以发现土壤物理性质受植被恢复类型影响显著($p<0.05$),土层深度对土壤有机质、团聚体、容重、孔隙度以及含水量有显著影响($p<0.05$),植被恢复对土壤造成的影响在 40 cm 以上的土层中表现最为明显。

农地的容重普遍高于其他植被类型,其总孔隙度则较小,尤其在 0—20 cm 土层差异显著($p<0.05$)。在 0—20 cm 土层中,绥德和神木地区容重最小的植被类型分别为草地(1.17 g/cm³)和灌木(1.28 g/cm³),容重最大的样地均为农地(1.30 g/cm³,1.47 g/cm³),神木地区的土壤容重在整体上大于绥德。相较于农地,其他 3 种植被类型的>0.25 mm 水稳性团聚体和有机质含量增加,随着土层的加深,团聚体和有机质的含量显著降低($p<0.05$)。0—20 cm 土层中,草地的有机质含量较高,特别在绥德地区,草地土壤表层的有机质含量显著大于农地。灌木和林地 在 20 cm 以下土层中的有机质含量要大于草地和农地,特别是在 40—100 cm 土层中,绥德灌木(2.75 g/kg)地以及神木林地(1.31 g/kg)、灌木(1.28 g/kg)样地的有机质含量显著大于农地,表明灌木和林地更有利于增加较深层土壤的有机质含量。植被恢复后,神木地区土

壤黏粒含量显著增加,砂砾含量显著减少($p<0.05$),黏粒含量受灌木的影响最大。相较于农地,灌木 3 个土层的黏粒含量从浅到深依次增加了 49%,92%和 106%。在不同土层,绥德地区农地含水量均显著大于其他 3 种植被类型,说明草地、灌木和林地的耗水量要显著大于农地。神木地区 4 种类型样地的含水量随着土层的加深而增加,表明浅层土壤水分的消耗更强。

表 2 绥德地区不同深度和土地利用类型的土壤特征

Table 2 Soil characteristics at different depths and land use types in the Suide area

土层/ cm	植被类型	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂砾/%	团聚体/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	土壤 含水量/%
0—20	耕地	2.99(0.50)Ac	13.55(0.76)Aa	63.47(0.79)Ba	22.98(1.40)Ac	22.46(2.50)Ac	1.30(0.07)Aa	49.20(1.70)Bb	46.71(2.47)Ab	2.49(1.07)Aa	7.11(0.68)Aa
	草地	<u>6.44</u> (2.35)Aa	12.47(1.35)Aab	60.10(2.14)Ab	27.43(1.72)Ab	30.76(5.08)Ab	1.17(0.05)Bb	<u>53.47</u> (1.78)Aa	<u>50.74</u> (1.91)Aa	2.73(1.70)Aa	5.80(0.68)Aab
	灌木	4.10(0.34)Aab	11.27(0.93)Ab	57.79(1.90)Ac	<u>30.95</u> (1.16)Aa	22.82(6.36)Ac	1.22(0.08)Bab	51.72(1.40)Aa	49.05(1.20)Aab	2.67(0.62)Ba	5.09(1.49)Ab
	林地	4.86(0.77)Aab	11.39(1.08)Ab	58.10(0.99)Abc	30.52(1.93)Aa	37.29(2.72)Aa	1.17(0.03)Bb	53.14(1.71)Aa	49.85(1.32)Aa	<u>3.29</u> (1.75)Aa	4.80(0.30)Ab
20—40	耕地	2.30(0.63)Ba	<u>14.33</u> (0.69)Aa	<u>64.79</u> (0.37)ABa	20.88(1.06)ABa	14.45(4.30)Bb	<u>1.33</u> (0.02)Aa	49.12(1.06)Bb	46.87(0.78)Aa	2.25(0.57)Aa	<u>6.80</u> (0.46)Aa
	草地	2.66(0.53)Ba	14.28(3.08)Aa	62.64(2.87)Aab	23.09(5.95)Aa	16.60(5.52)Bb	1.29(0.02)Aa	51.30(1.30)Bab	<u>48.41</u> (1.31)Ba	2.88(0.15)Aa	3.56(0.54)Bb
	灌木	2.87(0.19)Ba	10.95(2.92)Aa	57.27(2.37)Ac	31.78(10.57)Aa	15.56(8.24)Bb	1.31(0.03)Aa	49.43(1.02)Bb	47.29(1.31)Ba	2.14(1.13)Ba	3.52(0.34)Bb
	林地	<u>3.22</u> (0.24)Ba	12.17(1.71)Aa	58.81(2.52)Abc	29.02(5.21)Aa	<u>32.42</u> (5.31)Ba	1.28(0.03)Aa	<u>52.05</u> (0.66)Aa	48.33(0.56)Aa	<u>3.72</u> (0.80)Aa	3.95(0.19)Bb
40—100	耕地	1.93(0.32)Bb	<u>14.09</u> (0.71)Aa	<u>65.42</u> (0.98)Aa	20.48(1.62)Bc	9.55(3.07)Cb	<u>1.33</u> (0.03)Aa	52.03(1.41)Aa	48.73(0.96)Aa	3.30(0.78)Aa	<u>7.18</u> (0.72)Aa
	草地	2.23(0.43)Bb	13.12(1.73)Aab	62.30(2.09)Ab	24.57(3.81)Abc	8.18(2.62)Cb	1.31(0.04)Aa	51.86(0.92)Ba	48.82(0.90)Ba	3.04(0.73)Aa	3.75(0.54)Bb
	灌木	<u>2.75</u> (0.35)Ba	10.67(1.62)Ac	59.56(3.94)Ab	<u>29.76</u> (5.50)Aa	11.96(2.78)Ba	1.31(0.03)Aa	<u>52.10</u> (0.82)Aa	48.54(0.60)ABa	<u>3.56</u> (0.77)Aa	3.81(0.42)Bb
	林地	1.96(0.18)Cb	11.63(1.38)Abc	60.01(2.34)Ab	28.36(3.61)Aa	<u>14.25</u> (2.61)Ba	1.32(0.02)Aa	51.79(0.98)Aa	<u>48.95</u> (0.88)Aa	2.85(0.90)Aa	4.00(0.16)Bb

注:下划线数据表示同一深度土层 4 种植被类型中的最大值,带下划线表示相同植被类型在 3 个深度土层中的最大值。大写字母表示同一土地利用方式下,同列不同土层的土壤特征指标差异显著($p<0.05$);小写字母表示相同深度下,同列不同植被类型差异显著($p<0.05$)。下表同。

表 3 神木地区不同深度和土地利用类型的土壤特征

Table 3 Soil characteristics at different depths and land use types in the Shenmu area

土层/ cm	植被 类型	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂砾/%	团聚体/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	土壤 含水量/%
0—20	耕地	2.76(0.96)Aa	12.05(1.42)Ab	44.50(1.13)Ab	<u>43.45</u> (2.36)Aa	15.92(3.27)Ac	<u>1.47</u> (0.03)Aa	43.56(1.48)Bc	41.81(1.99)Bc	1.75(0.99)Aa	4.38(0.57)Bb
	草地	4.04(2.23)Aa	12.34(2.27)Ab	<u>52.40</u> (3.94)Aa	35.26(4.23)Ab	<u>48.80</u> (16.55)Aa	1.38(0.07)Ab	46.51(1.39)Bb	44.39(2.70)Abc	2.13(1.50)Aa	3.56(0.35)Bc
	灌木	<u>4.47</u> (2.20)Aa	<u>17.97</u> (3.37)Aa	49.27(6.19)Aab	32.77(3.80)Ab	44.17(6.03)Aab	1.28(0.03)Bc	49.73(1.45)Aa	<u>47.51</u> (0.70)Aa	<u>2.22</u> (0.98)Ba	5.02(0.62)Bab
	林地	3.55(0.98)Aa	13.54(1.88)Ab	51.18(2.51)Ba	35.28(3.39)Ab	33.17(7.66)Ab	1.38(0.06)Bb	46.54(1.63)Ab	44.84(1.66)Ab	1.71(0.76)Aa	<u>5.22</u> (0.66)Ba
20—40	耕地	1.24(0.16)Ba	9.88(0.89)Bb	44.68(1.52)Aa	<u>45.44</u> (2.07)Aa	8.23(1.78)Bd	<u>1.45</u> (0.02)Aa	49.32(1.66)Aa	47.05(1.54)Aa	2.27(0.13)Ab	5.15(0.53)ABa
	草地	1.40(0.14)Ba	12.97(3.15)Aab	<u>55.20</u> (5.48)Aa	31.83(1.55)Ab	14.33(2.43)Bc	1.43(0.02)Aa	49.91(1.78)Aa	<u>47.08</u> (1.31)Aa	2.83(0.76)Ab	4.20(0.18)Bb
	灌木	<u>1.64</u> (0.38)Ba	<u>18.93</u> (4.92)Aa	51.37(8.93)Aa	29.70(0.99)Ab	22.46(3.39)Bb	1.39(0.01)Ab	<u>50.04</u> (1.00)Aa	44.70(1.06)Ba	<u>5.34</u> (0.31)Aa	<u>5.24</u> (0.80)Ba
	林地	1.46(0.18)Ba	13.91(3.85)Aab	54.57(3.45)ABa	31.52(0.88)Ab	<u>38.84</u> (5.01)Aa	1.45(0.02)Aa	46.72(2.25)Aa	44.88(1.50)Aa	1.84(0.77)Ab	4.93(0.46)Bab
40—100	耕地	1.00(0.12)Bb	9.78(0.99)Bc	48.00(3.58)Ab	<u>42.22</u> (4.73)Aa	11.44(3.11)Bb	<u>1.48</u> (0.03)Aa	46.25(3.08)ABb	44.26(2.60)ABb	1.99(1.40)Ab	5.97(0.83)Aab
	草地	1.13(0.20)Bab	14.66(2.13)Ab	54.19(4.44)Aa	31.15(3.71)Ab	11.80(2.66)Bb	1.39(0.01)Ab	49.16(1.85)Aa	45.89(1.07)Aab	3.27(1.97)Aab	5.49(0.75)Ab
	灌木	1.28(0.12)Ba	<u>20.19</u> (2.93)Aa	52.17(6.77)Aab	27.65(6.70)Ab	18.57(3.47)Ba	1.37(0.05)Ab	<u>50.18</u> (1.49)Aa	<u>47.66</u> (1.13)Aa	2.52(0.76)Bab	6.40(0.76)Aa
	林地	1.31(0.38)Ba	12.49(2.80)Ab	<u>56.43</u> (2.39)Aa	31.07(3.51)Ab	<u>18.83</u> (6.05)Ba	1.45(0.04)ABa	47.52(2.94)Aab	43.62(3.85)Ab	<u>3.90</u> (1.86)Aa	5.82(0.44)Aab

2.2 不同植被类型的土壤入渗特征

退耕还林(草)增强了土壤的入渗能力,而且不同植被类型的入渗性能差异显著(图 1)。土壤入渗速率在前 5 min 内迅速下降,在 15 min 后基本趋于稳定(图 2)。草地的土壤表层具有发达的根系,两个地区草地的初始入渗速率均显著大于其他植被类型($p<0.05$),相较于农地,绥德和神木草地的初始入渗分别增加了 50%和 31%。两个地区灌木和林地的初始入渗速率与农地无显著差异(图 1)。

随着入渗过程的进行,两个地区草地和其他植被类型入渗速率的关系呈现不同的变化(图 2)。绥德地区草地的入渗速率在整个人渗过程中基本上均大于其他植被类型。草地的稳定入渗速率显著大于农地、灌木和林地($p<0.05$)。相较于农地,草地的稳定入渗增加了 76%,灌木、林地和农地的稳定入渗无显著差异。神木地区,草地的入渗速率在前 5 min 内迅速下降。从入渗过程曲线可以看出,草地的入渗速率从 3 min 后始终明显小于灌木,与林地的入渗速率没

有明显差距。相较于农地,草地、灌木和林地的稳定入渗速率明显增加,增加幅度分别为 53%,128%和 58%,灌木的稳定入渗速率显著大于农地($p<0.05$)。

绥德和神木各植被类型的平均入渗和稳定入渗速率的次序相同,在整个入渗过程中,入渗速率在前 5 min 内迅速下降(图 2),所以平均入渗速率的大小

主要取决于土壤稳定入渗。两个地区植被恢复样地的平均入渗速率相较于农地均有不同程度的增加,绥德地区草地、灌木和林地相比农地分别增加了 65%,2%和 26%,草地的平均入渗速率显著高于农地;神木地区分别增加了 43%,103%和 37%,灌木的平均入渗速率显著高于农地。

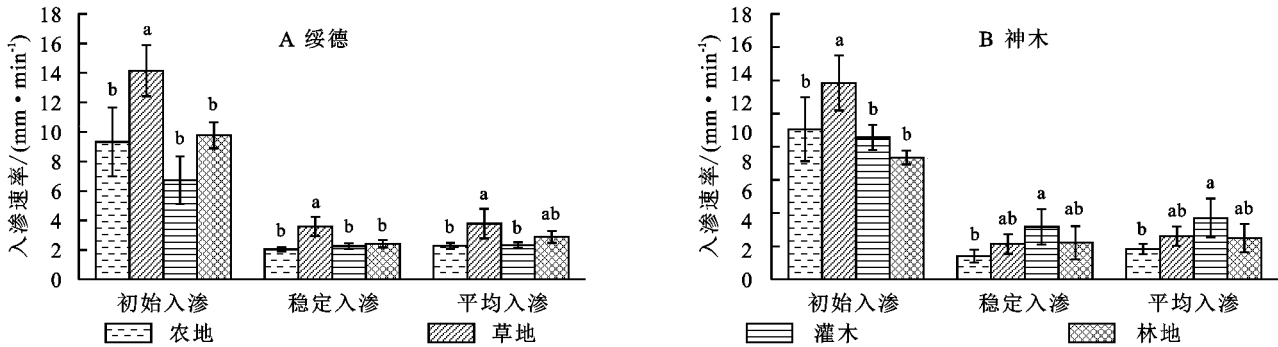


图 1 绥德和神木地区各植被类型的不同入渗参数对比

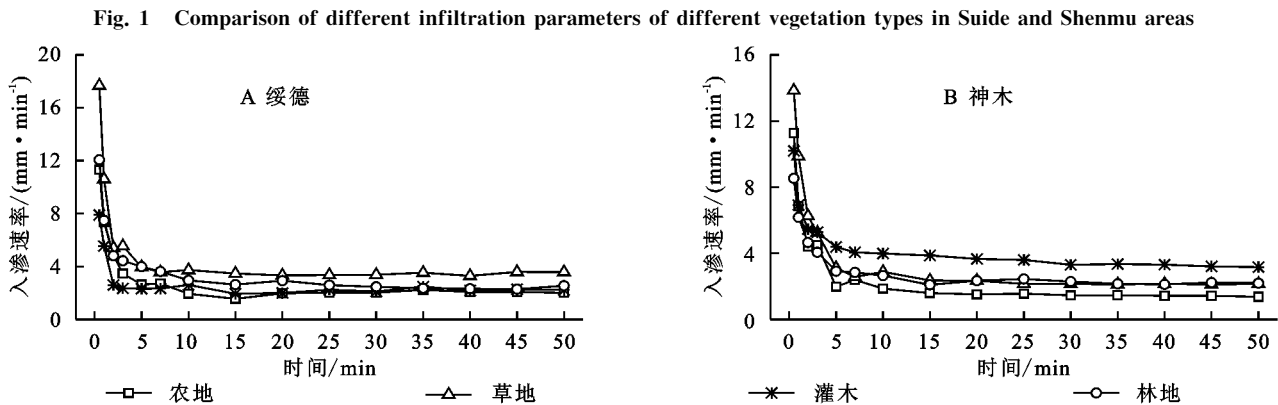


图 2 绥德和神木地区不同植被类型的土壤入渗过程

Fig. 2 Soil infiltration process of different vegetation types in Suide and Shenmu areas

2.3 土壤水分入渗影响因素分析

植被恢复通过增加土壤有机质,改善土壤结构与性质从而影响土壤的入渗能力。为了明确土壤入渗能力的影响因素及其相关关系,对土壤各项物理性质和入渗能力进行了相关性分析(表 4)。

土壤有机质、容重和孔隙度对土壤稳定入渗速率和平均入渗速率有显著影响,土壤颗粒组成、水稳性团聚体含量以及土壤含水量与土壤入渗能力无显著相关关系。土壤稳定入渗和平均入渗与容重呈显著负相关关系($p<0.05$),与总孔隙度、毛管孔隙度($p<0.05$)和有机质含量($p<0.01$)呈显著正相关。

团聚体和非毛管孔隙度对土壤入渗能力有重要影响,和土壤的入渗速率呈正相关关系。

对与土壤入渗能力有显著相关关系($p<0.05$)的因素进行线性回归分析(图 3),发现有机碳与土壤入渗的拟合程度最好,稳定入渗和平均入渗的 R^2 为分别 0.783, 0.719。容重、总孔隙度和毛管孔隙度与稳定入渗和平均入渗的相关系数表明这 3 种因素与土壤稳定入渗的关系更加密切。因此,这 3 种因素与稳定入渗进行拟合的 R^2 大于平均入渗。容重、总孔隙度和毛管孔隙度与稳定入渗线性拟合的 R^2 分别是 0.502, 0.514, 0.571, 平均入渗的 R^2 分别为 0.382, 0.387, 0.429。

表 4 土壤性质与入渗特征值的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil properties and infiltration parameters

入渗特征值	有机质	黏粒	粉粒	砂砾	团聚体	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	土壤含水量
初始入渗速率	0.638	-0.144	0.262	-0.221	0.293	-0.250	0.259	0.253	0.262	-0.038
稳定入渗速率	0.886 **	0.415	0.336	-0.496	0.446	-0.709 *	0.718 *	0.756 *	0.414	0.232
平均入渗速率	0.848 **	0.513	0.194	-0.383	0.583	-0.617 *	0.621 *	0.654 *	0.361	0.100

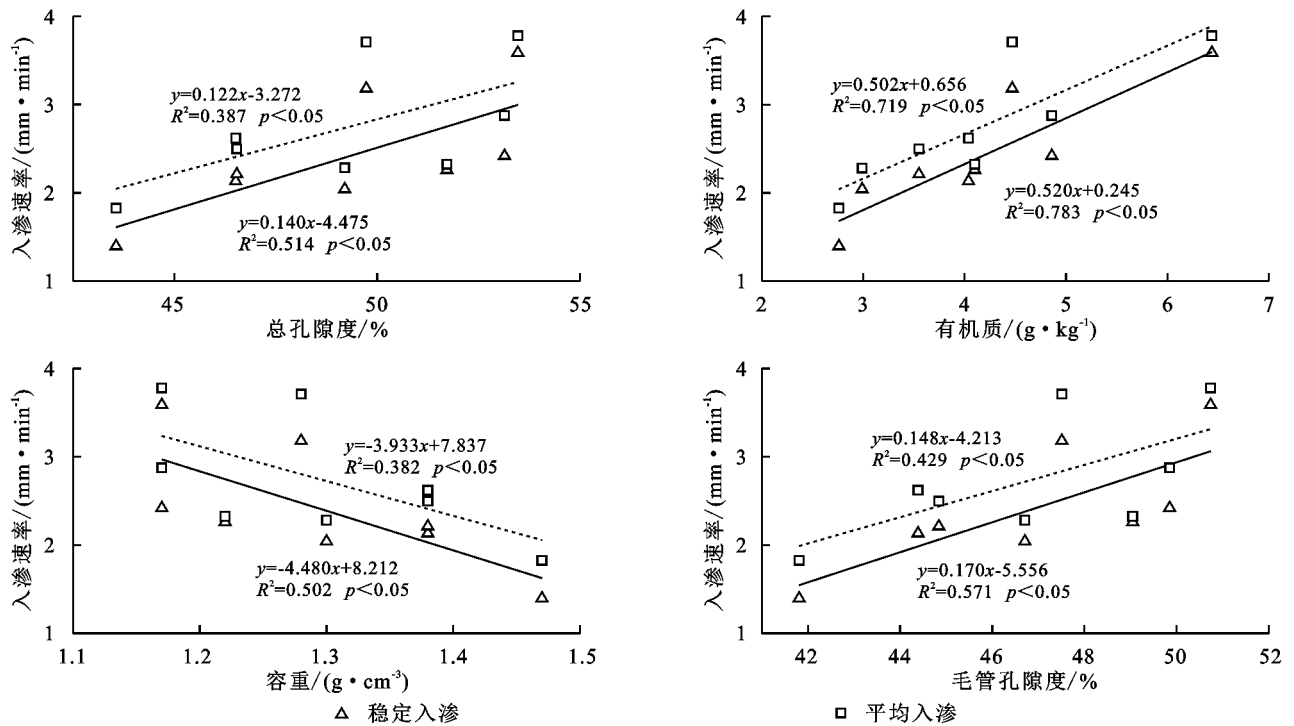


图3 稳定入渗和平均入渗速率与不同土壤特征参数的回归分析

Fig. 3 Regression analysis of stable infiltration and average infiltration rate with different soil characteristic parameters

3 讨论

3.1 植被恢复对土壤物理特征的影响

大量研究表明,植被恢复可以提高土壤有机质含量、降低土壤容重、增加孔隙度、影响土壤结构,从而改善退化土壤性质^[18,20-22]。本研究通过分析两个地区不同植被恢复类型的土壤特征,研究了植被恢复对土壤水文物理特征的影响。研究发现植被恢复后土壤物理性质变化显著,土壤有机质和水稳性团聚体含量显著增加,土壤结构发生变化,尤其是对0—40 cm土层的土壤结构影响显著。这是由于土壤结构与土壤有机质含量密切相关^[21]。植被枯枝落叶以及根系的分布决定了土壤有机质的垂直分布特征^[23],枯枝落叶在土壤表层大量累积,而且浅层土壤的根系活动明显强于深层土壤^[24],因此植被恢复对0—40 cm土层的土壤影响尤为显著,0—20 cm土层的有机质含量显著大于20 cm以下的土层。与之相比,农地没有枯枝落叶层,并且由于作物的吸收生长导致土壤中有有机质损失,造成了土壤的退化。

土壤性质是经过地形、成土母质、土地利用类型以及气候等多种因子综合作用的结果,黄土高原地貌类型多样,地形、坡位、坡向、海拔共同影响水热条件和土壤物质的再分配^[25],所以相同植被类型在不同地区对土壤的影响呈现不同的效果。研究发现在绥德地区,草地对表层土壤物理性质的影响更加明显,

随着土层的加深,灌木和林地对土壤的影响强于草地,而在神木地区,灌木对土壤质量的改善要强于其他植被类型。植被恢复在绥德对土壤性质的影响表现在0—40 cm的土层中,但是神木地区,只对表层20 cm的土壤影响较为明显。

3.2 植被恢复对土壤水分入渗的影响

植被恢复可以显著提高土壤水分入渗速率^[14]。植被恢复使得土壤有机质含量增加以及土壤环境发生变化,从而导致根系和土壤生物量增加^[26],这促进了土壤团聚体和孔隙度的增加,进而改善了土壤结构并导致土壤渗透性增强^[20]。同时,植物根系和土壤生物在土壤中产生的大孔隙使得土壤水入渗时出现优先流^[21],这也会导致土壤入渗速率变快。

研究发现,土壤渗透性与土壤有机质、容重和孔隙度显著相关。植被恢复对0—40 cm土层的影响更显著,浅层土壤的结构优于深层土壤,这样使得浅层土的渗透性能比深层土强。同时由于表层土壤发达的根系和地表植被,造成土壤入渗量增多,使得植被恢复后,流域的产流由原本的超渗产流转变为蓄满产流和壤中流^[5]。本研究发现农地的初始入渗速率要高于灌木和林地,这是由于农地耕作层经过人为的翻耕以及除草等活动使得土层疏松,发达的孔隙造成了农地的初始入渗速率较高,之后农地的入渗速率便迅速下降,小于其他植被恢复样地的入渗速率。

4 结论

(1) 土壤性质受土地利用类型影响显著($p < 0.05$), 植被恢复对土壤造成的变化在 40 cm 以上的土层中表现最为明显。有机质、孔隙度和 >0.25 mm 水稳性团聚体含量显著增加, 土壤容重显著降低。

(2) 植被恢复增强了土壤的入渗能力, 相较于荒地, 绥德和神木草地的初始入渗和稳定入渗显著增加($p < 0.05$); 绥德地区草地、灌木和林地的稳定入渗速率分别增加了 76%, 11% 和 19%; 神木地区草地、灌木和林地的稳定入渗速率增加幅度分别为 53%, 128% 和 58%。

(3) 土壤有机质($p < 0.01$)、容重和孔隙度($p < 0.05$)对土壤稳定入渗速率和平均入渗速率有显著影响。

参考文献:

- [1] 高鹏. 黄河中游水沙变化及其对人类活动的响应[D]. 陕西杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
Gao P. Streamflow and sediment discharge change trend and its response to human activities in the middle reaches of the Yellow River[D]. Yangling, Shaanxi: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Research Center for Soil and Water Conservation and Eco-Environment, Ministry of Education), 2010.
- [2] Mu X M, Zhang X Q, Shao H B, et al. Dynamic changes of sediment discharge and the influencing factors in the Yellow River, China, for the recent 90 years[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2012, 40(3): 303-309.
- [3] 李依璇, 朱清, 石若莹, 等. 2000—2018 年黄土高原植被覆盖时空变化及影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 60-68.
Li Y X, Zhu Q, Shi R Y, et al. Spatial and temporal changes of vegetation cover and its influencing factors in the Loess Plateau from 2000 to 2018[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(4): 60-68.
- [4] 穆兴民, 顾朝军, 赵广举, 等. 植被恢复对黄土高原产流模式变化影响初探[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 30-39.
Mu X M, Gu C J, Zhao G J, et al. Preliminary assessment effect of vegetation restoration on runoff generation pattern of the Loess Plateau[J]. Yellow River, 2019, 41(10): 30-39.
- [5] Ran Q H, Hong Y Y, Chen X X, et al. Impact of soil properties on water and sediment transport: A case study at a small catchment in the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 211-215.
- [6] 董莉丽. 渭北旱塬植被恢复对土壤有机质和水稳性团聚体含量的影响[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 709-714.
Dong L L. Effects of Vegetation regeneration on soil organic matter content and water stable aggregates in the Weibei Dryland[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 709-714.
- [7] 李裕元, 邵明安, 陈洪松, 等. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(16): 4306-4316.
Li Y Y, Shao M A, Chen H S, et al. Impacts of vegetation recovery on soil physical properties in the cross area of wind-water erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(16): 4306-4316.
- [8] Cao C Y, Jiang D M, Teng X H, et al. Soil chemical and microbiological properties along a chronosequence of Caragana microphylla Lam. Plantations in the Horqin sandy land of Northeast China[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40(1): 78-85.
- [9] 史德明, 韦启潘, 梁音, 等. 中国南方侵蚀土壤退化指标体系研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 1-9.
Shi D M, Wei Q P, Liang Y, et al. Study on degradation index system of eroded soils in southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 1-9.
- [10] Liu X, Zhang G C, Gary C, et al. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested of Mountain Yimeng, China[J]. Geoderma, 2009, 154(1/2): 123-130.
- [11] 焦梦妍, 从怀军, 姚静, 等. 自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化及其蓄水性能效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 128-133.
Jiao M Y, Cong H J, Yao J, et al. Soil bulk density changes and its water-storage capacity of abandoned farmland in natural restoration series gradient of Loess Hilly-gully Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 128-133.
- [12] 李同川. 黄土高原土壤大孔隙特征及其对土壤水分的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
Li T C. Characteristics of soil macropore on the loess plateau and three effects on soil water[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2017.
- [13] 王梦军, 张光灿, 刘霞, 等. 沂蒙山林区不同森林群落土壤水分贮存与入渗特征[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 26-31.
Wang M J, Zhang G C, Liu X, et al. Characteristics of soil water infiltration and water-holding under different forest community in Yimeng Mountainous forest area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 26-31.
- [14] 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.
- Wang G L, Liu G B, Zhou S L. The effect of vegetation restoration on soil stable infiltration rates in small watershed of loess gully region[J]. Journal of Natural Resources, 2003,18(5):529-535.
- [15] 谭学进,高鹏,穆兴民,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.
- Tan X J, Gao P, Mu X M, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the loess plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2):713-722.
- [16] 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.
- Chen W Y, Zhang S N, Hua R, et al. Effects of forestland and grassland restoration process on soil infiltration characteristics in loess hilly region[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017,39(1):62-69.
- [17] 刘畅,张建军,张海博,等.晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J].水土保持学报,2021,35(5):101-107.
- Liu C, Zhang J J, Zhang H B, et al. Characteristics of soil infiltration and soil quality evaluation after conversion of farmland to forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):101-107.
- [18] 顾朝军.黄土区土壤水文物理特性及流域产汇流机制变化对植被恢复的响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- Gu C J. Response of soil hydrological physical properties and changes of runoff yield and confluence to vegetation restoration in the loess region[D]. Yangling, Shannxi: Northwest A & F University, 2019.
- [19] 查同刚.土壤理化分析[M].北京:中国林业出版社,2017.
- Zha T G. Soil Physicochemical Analysis[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2017.
- [20] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019,19(3):1456-1466.
- [21] Qiu D X, Xu R R, Wu C X, et al. Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2022,609:1-12.
- [22] Wang R, Dong Z B, Zhou Z T, et al. Effect of vegetation patchiness on the subsurface water distribution in abandoned farmland of the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2020,746:1-15.
- [23] 杨娥女,王宝荣,姚宏佳,等.黄土高原生物土壤结皮发育过程中颗粒态和矿物结合态有机碳变化特征[J].水土保持研究,2023,30(1):25-33,40.
- Yang E N, Wang B R, Yao H J, et al. Dynamics of Particulate and Mineral-Associated Organic Carbon During the Development of Biological Soil Crusts in the Loess Plateau Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(1):25-33,40.
- [24] 常恩浩,李鹏,肖列,等.黄土丘陵沟壑区植被恢复演替过程中根系行为特征[J].生态学报,2017,39(6):2090-2100.
- Chang E H, Li P, Xiao L, et al. The characteristics of root system behavior in vegetation succession in Loess Hilly and Gully Region Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,39(6):2090-2100.
- [25] 赵明月,赵文武,刘源鑫.不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因子:以黄土丘陵沟壑区为例[J].生态学报,2015,35(14):4625-4632.
- Zhao M Y, Zhao W W, Liu Y X. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: a case study in the Loess Hilly-gully area Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(14):4625-4632.
- [26] Belsky A J., Mwonga S M., Amundson R G., et al. Comparative effects of isolated trees on their undercanopy environments in high-and low-rainfall savannas[J]. Journal of Applied Ecology, 1993,30(1):143-155.