

不同土地利用方式下表层土壤稳定入渗速率的时间变化

郭天崎¹, 黄明斌², 朱谥远¹

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.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)

摘要: [目的] 研究土壤稳定入渗速率(f_c)的时间变化规律对土壤剖面水分运动和溶质运移的影响, 为流域水文循环模型研究提供理论支持。[方法] 以中国科学院长武黄土高原农业生态试验站附近典型的土地利用类型为研究对象, 利用双环入渗法采集玉米地、苹果园和刺槐林地 2021 年 4—10 月的 f_c 值。[结果] ① f_c 值空间分布的最大相关距离是 7.12 m; ② 土壤容重与 f_c 值呈显著负相关, 而土壤初始含水量与 f_c 值无显著相关性 ($p > 0.05$); ③ 4—5 月各土地利用类型的 f_c 值随时间增加而增加; 6—10 月, 各土地利用类型的 f_c 值随时间的变化特征存在差异, 表现为玉米地随时间的增加先增加后下降, 苹果园随时间的增加而增大, 刺槐林随时间的增加先增大后趋于稳定。方差分析表明, 不同土地利用类型的 f_c 值受时间影响显著 ($p < 0.05$)。[结论] 观测期内, 受耕作、降雨、根系活动与土壤干湿交替变化以及枯枝落叶层的影响, 不同土地利用方式下 f_c 值的时间变化规律不同。

关键词: 土地利用方式; 稳定入渗率; 双环法; 时间变化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0113-06

中图分类号: S152.5

文献参数: 郭天崎, 黄明斌, 朱谥远. 不同土地利用方式下表层土壤稳定入渗速率的时间变化[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 113-118. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.014; Guo Tianqi, Huang Mingbin, Zhu Miyuan. Temporal change of topsoil steady state infiltration rate under different land uses [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 113-118.

Temporal Change of Topsoil Steady State Infiltration Rate Under Different Land Uses

Guo Tianqi¹, Huang Mingbin², Zhu Miyuan¹

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. The 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)

Abstract: [Objective] The influence of time variation of topsoil steady state infiltration rate (f_c) on water movement and solute transport in the soil profile was studied in order to provide theoretical support for the study of the hydrological cycle model in this region. [Methods] The study was conducted on typical land use types near the Loess Plateau Agricultural Ecological Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences. The f_c values for a corn field, an apple orchard, and a *Robinia pseudoacacia* forestland were collected from April to October 2021 using the double ring infiltrometer method. [Results] ① The maximum correlation distance of f_c spatial distribution was 7.12 m. ② There was a significant negative correlation between soil bulk density and f_c value, while there was no significant correlation between initial soil water content and f_c value ($p > 0.05$). ③ From April to May, the f_c value for each land use type increased. From June to October, the f_c value for each land use type changed differently with time; f_c value for the corn field

收稿日期: 2022-09-27

修回日期: 2022-11-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“重构土壤结构变化对剖面水—溶质耦合迁移过程的影响”(42177287)

第一作者: 郭天崎(1998—), 女(汉族), 山西省原平市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤物理。Email: guotq217@nwfau.edu.cn.

通讯作者: 黄明斌(1968—), 男(汉族), 湖北省钟祥市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态水文和土壤物理方面的研究。Email: hmbd@nwsuaf.edu.cn.

increased first and then decreased, for the apple orchard increased, and for the *Robinia pseudoacacia* forestland increased first and then stabilized. Variance analysis showed that the f_c values for different land uses were significantly affected by time ($p < 0.05$). [Conclusion] Tillage, rainfall, root activity, and alternation of dry and wet soil and litter resulted in different temporal variations of f_c value under different land uses during the observation period.

Keywords: land uses; steady state infiltration rate; double ring infiltrometer; temporal changes

土壤稳定入渗率(f_c)是反映土壤入渗特性的重要参数^[1]。以往研究表明, f_c 易受土壤类型、土壤容重、土壤孔隙度、植物根系等土壤属性的影响而表现出明显的空间差异性^[2]。此外,受耕作措施、作物生长、干湿交替等过程的影响,土壤属性具有明显的季节性波动,可能导致 f_c 出现时间变化^[3-6]。相对于空间变化的研究, f_c 随时间的变化规律研究尚少,且研究的结论不一致。Hu等^[7]人对不同农田研究发现 f_c 随时间的推移逐渐下降;Zeinalzadeh等^[8]人对不同土地利用类型 f_c 进行研究发现,在年际尺度,除玉米地的 f_c 随时间逐渐下降之外,苹果园、小麦地和裸地均随时间而增加;而郁耀闯等^[9]人研究发现农耕地在生长季期间土壤稳渗率呈增加趋势,裸地的稳定入渗率却呈下降趋势;王长燕等^[10]人表明赖草地的 f_c 随时间呈现W形显著变化,但紫花苜蓿却没有明显的时间变化规律。因此,不同土地利用方式下 f_c 随时间变化的规律还需要在较长时间尺度上获取更多的实测数据。

黄土高原地区土质疏松,易发生水土流失。 f_c 的精确测定对该区域水文循环模型的研究具有重要意义。因此,本研究在2021年4—10月选择黄土高原半湿润区的代表性土地利用类型,即玉米地(*Zea mays*)、苹果园(*Malus pumila*)和刺槐林(*Robinia pseudoacacia*),利用双环法,旨在揭示各土地利用方式下 f_c 的差异及随时间的变化规律,同时测定土壤容重和土壤初始含水量的时间变化,分析其对 f_c 的影响。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设于中国科学院院长武黄土高原农业生态试验站附近,海拔为1 200 m的塬面上,隶属于陕西省咸阳市长武县(107.8°E, 35.2°N)。年平均降雨量为584 mm,年平均潜在蒸发量为846 mm,平均干旱指数为1.45,年平均气温9.1 °C,无霜期171 d,属于暖温带半湿润区。主要土壤类型为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土。土地利用方式以农田、果园、林地和居住用地为主。该区域主要农作物为玉米和冬小麦,果园主要为苹果园,林地主要为刺槐和油松。测定期间的降雨量和日平均气温如图1所示。2021

年4月1日在塬面上选择远离居住区的农田、果园和林地3种典型土地利用方式共4块样地进行双环入渗测量。每种土地利用类型的面积大于10 000 m²。农田选择了两块玉米样地,一块是玉米收割耕作后的裸地,用于测定 f_c 的空间变异性,确定 f_c 空间分布的最大相关距离;另一块为多年连作玉米地,用于测定 f_c 的时间变化;果园为30 a树龄的苹果园,林地为10 a生刺槐林,两块样地均用于测定 f_c 的时间变化。各土地利用类型的气候条件一致。玉米地在播种前一周(5月1日),进行大型机械作业深翻,翻耕深度约为30 cm;苹果园在5月15日和9月30日进行旋耕除草,深度约10 cm;刺槐林地测试期间几乎无人扰动。

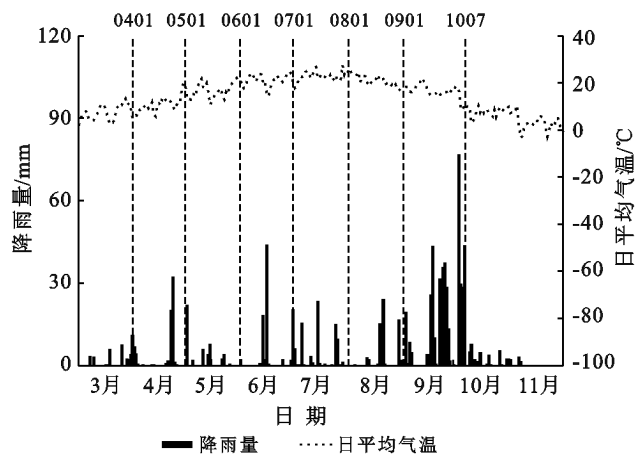


图1 测定期间的降雨量和日平均温度

Fig.1 Precipitation and mean daily air temperature during the infiltration measurement period

1.2 采样与测定

2021年4月上旬对耕作后的裸地(长约25 m,宽约25 m) f_c 的空间变化进行测定。测定点采用均匀网格布置,间距为5 m×5 m,布置5行,每行5列,共25个测定点。在2021年4—10月对玉米地、苹果园和刺槐林进行了7次入渗测定。每次在3 d内完成,每种土地利用方式进行1 d。玉米地的测定时间分别为4月1日、5月1日、6月1日、7月1日、8月1日、9月1日和10月7日,苹果园和刺槐林测定时间依次后移1 d。每次测定时,每种土地类型重复3次,测定点距大于10 m。

本试验利用JZ-IN12型的双环入渗仪原位测定

f_c 。该仪器主要由双环入渗桶和马氏瓶组成。双环入渗桶的内环直径为 30 cm,外环直径为 60 cm,与之匹配的马氏瓶容量分别为 3 和 10 L。测定点的土壤面积大小为 1.5 m×1.5 m。测定前,首先需借助铁铲整平土壤表面,以保证入渗表面平整、干净;其次,检查双环入渗仪是否有损坏的地方,马氏瓶与双环入渗桶连接处是否严密;最后,将入渗环驱动到所选定的土壤中,用吸能锤将内外环压入土壤 5—10 cm。调整马氏瓶插入土壤的深度,以保证与入渗环处于同一水平面。利用马氏瓶向内外环注水,控制内外环水头始终保持一致,防止内环侧渗。当马氏瓶流速稳定以后,设置采样间隔,记录马氏瓶内水量变化。其中,时间间隔根据稳定时的流速设定。利用达西定律计算 f_c :

$$f_c = \frac{\Delta V}{AT} \cdot \frac{L}{(L+H)} \quad (1)$$

式中: f_c 为稳定入渗速率(m/s); ΔV 为在规定时间内的水流量(ml); A 为内环横截面积(cm^2); T 为时间间隔(s); L 为双环压入土壤中的深度(cm); H 为水头高度(cm)。

入渗期间,同时测定每块样地表层 30 cm 的土壤容重和初始含水量。每次测定的位置均选择在距离入渗点 1 m 内无明显扰动的样地。用环刀法^[11]测定土壤容重,烘干法^[12]测定初始体积含水量。

1.3 数据处理

(1) 变差函数^[13]。采用地统计学方法研究 f_c 的空间变异性。采样点距超过某个相关距离时,每个采样点的结果才是相互独立的,所以利用变差函数分析 f_c 的空间分布特征^[9]。本文利用 GS⁺ 9.0 软件,通过理论模型拟合分析,选择高斯模型(2)描述 f_c 变差函数:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e \left(-\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: a 为变程,表示空间变量的最大相关距离; h 为滞后距离; C 为拱高; C_0 为块金值; $C_0 + C$ 为基台值。 $C_0/C_0 + C$ 越接近于 1,则说明该变量空间相关性小。

(2) 方差分析和相关性分析。利用 SPSS 2021 进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用最小显著差异法(least significance difference, LSD)对不同时间 f_c 值的影响进行多重比较,土壤容重和初始土壤含水量与 f_c 的相关性采取斯皮尔曼(Spearman)相关系数分析。利用 Origin 2022 统计软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤稳定入渗率空间结构分析

图 2 为稳定入渗速率变差函数随距离的变化规

律,从图 2 可以看出, f_c 空间分布的最大相关距离是 7.12 m,表明测定点之间的距离在此范围内, f_c 具有相关关系,超过此点距, f_c 的测定结果可以看作是相互独立的样本。因此,在测定 3 块样地 f_c 的时间变化时,3 个重复样点最小距离应该大于 7.12 m,以避免重复样点 f_c 的自相关性对结果的影响。本次试验,所有样地重复样点距离为 10 m,测定的 f_c 值是相互独立的。

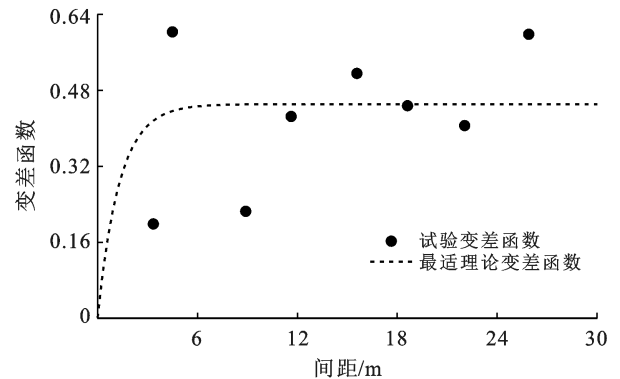


图 2 土壤稳定入渗速率变差函数随距离的变化
Fig.2 Variation function of soil stable infiltration rate with distance

2.2 不同土地利用方式下土壤基本物理性质的时间变化

图 3—4 分别显示了每次测定时玉米地、苹果园和刺槐林地土壤容重和初始土壤含水量。不同土地利用方式下土壤容重随时间变化不同。相比于 4 月份,玉米地 5 月土壤表层 30 cm 容重明显降低,6 月逐步恢复,7 月后达到稳定状态;整个测定期间,苹果地和刺槐林地表层 30 cm 土壤容重无显著时间变化趋势。每次测定时,不同土地利用方式土壤初始含水量大小虽然存在差异,但随时间的波动趋势一致,均呈现先增大后下降再增大的趋势。

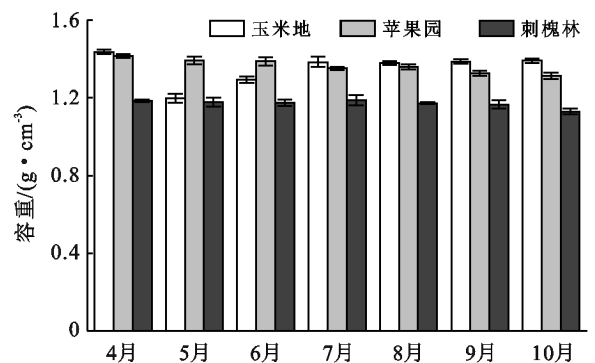


图 3 每次测定时玉米地、苹果园和刺槐林表层 30 cm 的土壤容重

Fig.3 Soil bulk density of 30 cm in the surface layer of corn field, apple orchard and black locust forest at each measurement

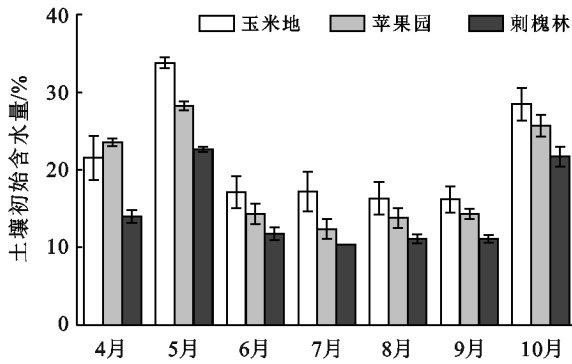


图 4 每次测定时玉米地、苹果园和刺槐林表层 30 cm 的初始土壤含水量

Fig.4 Initial soil water content of 30 cm in the surface layer of corn field, apple orchard and black locust forest at each measurement

2.3 不同土地利用方式下土壤稳定入渗速率的差异及时间变化

表 1 总结了从 4—10 月不同土地利用类型的 f_c 值及其变异系数 (C_v)。玉米地 f_c 值的变化范围为 $2.39 \times 10^{-6} \sim 2.17 \times 10^{-5}$ m/s, 平均值为 8.25×10^{-6} m/s; C_v 值为 28.71 %。苹果园 f_c 值的变化范围为 $3.39 \times 10^{-6} \sim 3.22 \times 10^{-5}$ m/s, 平均值为 1.36×10^{-5} m/s; C_v 值为 30.36 %。刺槐林 f_c 值的变化范围为 $6.85 \times 10^{-6} \sim 3.81 \times 10^{-5}$ m/s, 平均值为 1.55×10^{-5} m/s; C_v 值为 28.85 %。这 3 种土地利用类型, 刺槐林的平均 f_c 值和 C_v 最大, 玉米地的 f_c 值和 C_v 最小。

表 1 玉米地、苹果园和刺槐林地的 f_c 值大小及变异系数

Table 1 Size and variation coefficient of f_c value in maize field, apple orchard and Robinia pseudoacacia forestland

样地类型	最大值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最小值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	C_v /%
玉米地	2.17E-05	2.39E-06	8.25E-06	28.71
苹果园	3.22E-05	3.39E-06	1.36E-05	30.36
刺槐林	3.81E-05	6.85E-06	1.55E-05	28.85

图 5 显示了 3 种土地利用类型 f_c 时间变化。由图 5 可知, 5 月玉米地、苹果园和刺槐林的 f_c 值明显增大, 分别是 4 月的 2.3, 8.3 和 3.4 倍; 6 月, 相比于玉米地, 苹果园和刺槐林的 f_c 值下降幅度较大, 约为 5 月的 10%~20%; 7 月, 相比于苹果园和刺槐林地, 玉米地的 f_c 值明显下降, 仅是 6 月 f_c 值的 33%; 8—9 月, 各土地利用类型的 f_c 值趋于稳定; 10 月, 苹果园的 f_c 值显著增大, 约为 9 月的 2 倍, 而玉米地和刺槐林的 f_c 值变化较小。由方差分析可知时间对 f_c 值影响显著 ($p < 0.05$), 事后检验显示苹果园和刺槐林地均表现为 5 月和 10 月测定的 f_c 值与其他月份存在显著差异 ($p < 0.05$), 而玉米地表现为 5 月和

6 月的 f_c 值与其他月份差异显著 ($p < 0.05$)。总体而言, 不同土地利用方式下 f_c 的时间变化在 4—5 月趋势一致, 均呈现上升趋势, 但 6—10 月变化趋势存在差异, 玉米地的 f_c 值先上升后下降; 苹果园的 f_c 值呈上升趋势; 刺槐林地的 f_c 值先增大后趋于稳定。

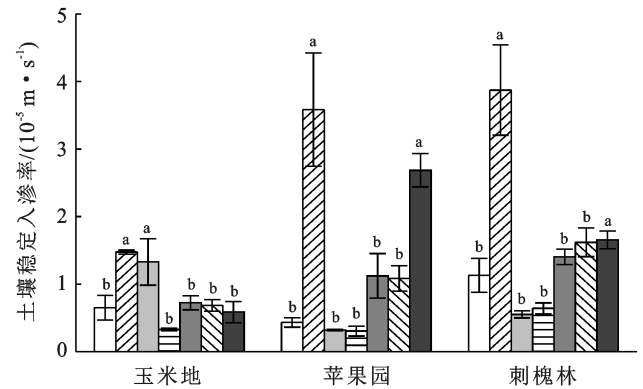


图 5 2021 年 4—10 月玉米地、苹果园和刺槐林地的 f_c 值的时间变化

注: 同一土地利用类型中字母表示处理之间的显著差异 ($p < 0.05$)。

图 5 2021 年 4—10 月玉米地、苹果园和刺槐林地的 f_c 值的时间变化

Fig.5 Time variation of f_c value in maize field, apple orchard and locust forest land from April to October 2021

3 讨论

3.1 土壤基本物理性质对 f_c 的影响

土壤容重和初始土壤含水量会影响水分入渗速率^[3]。因此, 明晰测定期间玉米地、苹果园和刺槐林的这些土壤基本物理性质至关重要(图 3—4)。本研究测定的玉米地在 5 月容重明显下降, 这是由于大型机械作业进行深翻以后, 导致土壤表层(30 cm)颗粒松散, 土壤容重下降^[14]; 6—10 月, 因重力作用土壤颗粒逐渐沉降, 容重逐渐增大, 最终趋于稳定。测定期间各土地利用之间的土壤初始含水量波动趋势一致, 主要受降水量和潜在蒸散发决定^[15]; 不同土地利用方式的差异主要受不同植物耗水量的大小影响^[16]。通过相关性分析可知(表 2), 土壤容重与 f_c 值呈显著负相关 ($p < 0.05$), 这是因为双环入渗仪测定的 f_c 值代表了表层的剖面导水特性^[17], 而且主要受该深度内不同土层内最小 f_c 值的影响, 不同土地利用类型 30 cm 以内土壤容重、孔隙度年内变化了能够反映此深度的变化特征, 因而测定 f_c 值与表层 0—30 cm 土壤容重相关性显著 ($p < 0.05$); 而土壤初始含水量与 f_c 表现为不显著的负相关性 ($p > 0.05$), 土壤初始含水量只影响着初始入渗速率, 随着入渗时间的增加, 土壤含水量增大, 入渗速率近似稳定时, 土壤基质势接近 0, 此时的土壤含水量对入渗速率的影响较

小,所以初始含水量与 f_c 的相关性是不显著的($p > 0.05$)。崔艳红^[18]和 Nishiwaki^[19]也得到了相同的结论,主要是土壤剖面初始含水量只显著影响初始入渗速率,对 f_c 值的影响较小。

表 2 土壤容重和初始含水量与 f_c 的相关性分析

项目	表层 30 cm 土壤容重	表层 30 cm 初始土壤含水量	f_c
表层 30 cm 土壤容重	1	0.212	-0.493*
表层 30 cm 初始土壤含水量		1	-0.250
f_c 值			1

注: * 表示显著性水平为 $p < 0.05$ 。

3.2 不同土地利用类型下 f_c 时间变化特征的影响因素

从 4—10 月,玉米地、苹果园和刺槐林表层 f_c 值的时间变化存在一定差异(图 5)。方差分析结果表明,时间显著影响 f_c 值。以往研究表明, f_c 存在明显季节性变化^[20-23]的机理主要分为人为和自然两大方面。例如,长期的管理措施^[23]、降雨^[24]、干湿交替过程^[25]以及土壤侵蚀和沉积等^[26]。在本研究中,玉米地在 5 月 f_c 值最大(图 5),主要是因为测定当天进行大型机械翻耕作业,深翻后的土质疏松,孔隙增加,土壤容重下降, f_c 值明显增大^[27]。6—7 月,土壤颗粒由于降雨和重力作用逐渐压实^[28],大孔隙数量下降,土壤容重增加, f_c 值明显下降(图 5)。8 月测定时,玉米处于生长期,根系活动导致土壤孔隙变大, f_c 值增加^[5];9—10 月,玉米处于成熟期,根系生长活动减弱,受降雨量的影响,尤其是 9 月的降雨量高达 285 mm,阻塞了大孔隙,导致 f_c 值变小^[29]。苹果园和刺槐林地 5 月的 f_c 值同样显著增大,但在测定前苹果园并没有进行翻耕,刺槐林无人扰动,其 f_c 值的变化可能是根系活动造成的^[30]。Schwen 等^[3]人认为,春季由于生物活动、根系发育和干湿循环诱导等过程,水力有效孔隙逐渐增加, f_c 会增大。6—7 月,二者的 f_c 值显著降低,与 Zhao 等^[31]人研究表明夏季 f_c 会增加的结论不同,可能是气候因素导致,降雨量少,蒸发量大,土壤表面易形成结皮。8 月,苹果园和刺槐林地的 f_c 值略有增加,可能是由于频繁的干湿交替和生物活动的综合效应使得土壤松动^[32]。8—9 月,苹果园的 f_c 值略有下降,主要受降雨的影响;10 月,受旋耕的影响, f_c 值明显增加^[33]。而刺槐林的 f_c 值从 8—10 月逐渐增大,主要是由于根系活动增加了土壤大孔隙,同时林下植被和地表的枯枝落叶层(10 月)削弱了降雨对土壤的冲击^[34-36],较好地保护了土壤孔隙的连通性, f_c 值得到恢复。另外,由图 2 知该样地区 f_c 的最大相关点距

为 7.12 m,而本试验每次采样的点距离均大于 10 m,因此,空间分布差异并不是造成测定值变异程度的原因。综上所述,本研究认为, f_c 的时间变化特征主要影响因素可归为耕作、降雨、根系活动与土壤干湿交替以及枯枝落叶层的影响。

4 结论

(1) 研究样区 f_c 空间分布的最大相关距离为 7.12 m。

(2) 土壤容重与 f_c 值呈显著负相关($p < 0.05$),而土壤初始含水量与 f_c 值无显著相关性($p > 0.05$)。

(3) 不同土地利用类型的 f_c 受时间影响显著($p < 0.05$)。4—5 月各土地利用类型的 f_c 值随时间增加而增加,6—10 月,各土地利用类型的 f_c 值随时间的变化特征存在差异,表现为玉米地随时间的增加先增加后下降,苹果园随时间的增加而增大,刺槐林随时间的增加先增大后趋于稳定。

[参 考 文 献]

- [1] 彭正凯,李玲玲,谢军红,等.保护性耕作对陇中旱作农田水分特征的影响[J].应用生态学报,2018,29(12):4022-4028.
- [2] Lnc A, Lct B, Kr C, et al. Identifying regionalized covariate driving factors to assess spatial distributions of saturated soil hydraulic conductivity using multivariate and state-space analyses [J]. Catena, 2020, 191(C): 104583-104597.
- [3] Schwen A, Bodner G, Scholl P, et al. Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water-conducting porosity under different tillage [J]. Soil & Tillage Research, 2011,113(2):89-98.
- [4] Jirku V, R Kodešová, Nikodem A, et al. Temporal variability of structure and hydraulic properties of topsoil of three soil types [J]. Geoderma, 2013,204/205(C):43-58.
- [5] Lu J, Zhang Q, Werner A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties: A review [J]. Journal of Hydrology, 2020,589:125203-125286.
- [6] Hu Wei, Shao Mingan, Si Bingcheng. Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes [J]. European Journal of Soil Science, 2012,63(6):820-830.
- [7] Hu Wei, Shao Mingan, Wang Quanjiu, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses [J]. Geoderma, 2009,149(3/4):355-366.
- [8] Zeinalzadeh K, Kashkuli H A, Naseri A A, et al. Temporal variation of soil hydraulic parameters under different land uses [J]. Journal of Food, Agriculture & Environment, 2011,9(2):693-698.

- [9] 郁耀闯,张光辉.黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化[J].水土保持通报,2016,36(2):8-11.
- [10] 王长燕,郁耀闯.黄土丘陵区退耕草地土壤稳定入渗率生长季变化[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):107-113.
- [11] Al-Shammmary A, Kouzani A Z, Kaynak A, et al. Soil bulk density estimation methods: A review [J]. *Pedosphere*, 2018,28(4):581-596.
- [12] Akrafi S A. Comparison of time domain reflectometry and the gravimetric method for the determination of soil water content [J]. *Ghana Journal of Science*, 1991,31(1):231-235.
- [13] 刘燕楠,孙贯芳,毛威,等.基于地统计分析的河套灌区土壤水盐空间变异规律分析[J].灌溉排水学报,2022,41(9):101-109.
- [14] 田效琴,田佳乔,李卓,等.保护性耕作下西南黄壤坡地的土壤结构效应[J].中国农学通报,2017,33(14):62-68.
- [15] 姚俊强,李漠岩,迪丽努尔·托列吾别克,等.不同时间尺度下新疆气候“暖湿化”特征[J].干旱区研究,2022,39(2):333-346.
- [16] 刘丙霞,任健,邵明安,等.黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J].生态学报,2020,40(11):3795-3803.
- [17] Huang M B, Barbour S L, Elshorbagy A, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2011,91(2):185-197.
- [18] 崔艳红,毕华兴,侯贵荣,等.晋西黄土残塬沟壑区刺槐林土壤入渗特征及影响因素分析[J].北京林业大学学报,2021,43(1):77-87.
- [19] Nishiwaki J, Horton R. Temporal changes in soil hydraulic conductivity in saturated and unsaturated fields [J]. *Paddy and Water Environment*, 2020,18(4):677-686.
- [20] Starr J L. Spatial and temporal variation of ponded infiltration [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990,54(3):629-636.
- [21] Qu Shen, Wang Guangcai, Shi Zheming, et al. Temporal changes of hydraulic properties of overburden aquifer induced by longwall mining in Ningtiaota coalfield, Northwest China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020,582:124525-124536.
- [22] Singh B P. Effect of different land use on soil physical properties of experimental farms of NDUAT, Ayodhya [J]. *International Journal of Bioresource Science*, 2020,7(2):87-91.
- [23] Ágota H, Eszter T, Györgyi G, et al. Effects of land use and management on soil hydraulic properties [J]. *Open Geosciences*, 2015,7(1):742-754.
- [24] Hoorman J J, Carlos J, M Sá, et al. Fact sheet agriculture and natural resources [J]. *the Biology of Soil Compaction*, 2011,44:4-10.
- [25] Petersen C T, Trautner A, Hansen S. Spatio-temporal variation of anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a tilled sandy loam soil [J]. *Soil & Tillage Research*, 2008,100(1):108-113.
- [26] Genereux D P, Leahy S, Mitasova H, et al. Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,358(3):332-353.
- [27] Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effects of subsoiling on soil moisture under no-tillage for two years [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008,7(1):88-95.
- [28] Moret D, Arrúe J L. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007,96(1):103-113.
- [29] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析[J].自然资源学报,2019,34(7):1405-1416.
- [30] Ajayi A E, Horn R, Rostek J, et al. Evaluation of temporal changes in hydrostructural properties of regenerating permanent grassland soils based on shrinkage properties and μ CT analysis [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018,185:102-112.
- [31] Zhao Yali, Wang Yunqiang, Zhang Xingchang. Spatial and temporal variation in soil bulk density and saturated hydraulic conductivity and its influencing factors along a 500 km transect [J]. *Catena*, 2021,207:105592-105602.
- [32] Huang Chuanqin, Shao Mingan, Tan Wenfeng. Soil shrinkage and hydrostructural characteristics of three swelling soils in Shaanxi, China [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2011,11(3):474-481.
- [33] Zhu Feihua, Wang Yiquan, Shi Zhonglin, et al. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(22):7454-7463.
- [34] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [35] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils [J]. *Geoderma*, 2008,145(3/4):295-302.
- [36] Marin-Castro, B E, Negrete Y. Litter thickness, but not root biomass, explains the average and spatial structure of soil hydraulic conductivity in secondary forests and coffee agroecosystems in Veracruz, Mexico [J]. *Science Total Environment*, 2017,607:1357-1366.