

兰州市南北两山不同灌丛土壤渗透特性

苏世平, 刘小娥, 李毅

(甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070)

摘要:为了探讨不同灌丛类型对土壤渗透特性的影响,通过双环渗透法对兰州市南北两山 4 种灌木类型(千头柏、红砂、红花锦鸡儿、怪柳)的土壤渗透特性(土壤初渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量)进行了研究。结果表明:(1)随着土层深度(0—80 cm)的增加,土壤的渗透性逐渐降低。(2)不同灌丛类型间土壤渗透性表现为红花锦鸡儿>红砂>千头柏>怪柳,主成分分析评价土壤的渗透能力,排序为红花锦鸡儿>红砂>千头柏>怪柳;(3)Horton 模型方程对各灌丛类型土壤渗透性的拟合效果最好,比较适合于描述本研究区 4 种灌丛土壤水分入渗过程。(4)土壤渗透性和土壤理化性质的相关性分析表明,土壤渗透性与总孔隙度、土壤有机质含量、土壤全氮、土壤无机氮、土壤速效磷、土壤速效钾之间分别呈极显著正相关;与土壤初始含水率、土壤非毛管孔隙度之间分别呈显著或极显著正相关;与土壤容重呈极显著负相关。(5)结合相关性分析,筛选出 9 个极显著或显著影响土壤渗透性的土壤理化性质因子,综上,结果为今后该区域在人工林营建过程中树种的选择及现有林分抚育管理提供一定的理论依据。

关键词:兰州市南北两山;灌丛;土壤渗透性;土壤理化性质

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0149-06

Soil Infiltration Characteristics Under Four Shrub Types in Southern and Northern Mountains of Lanzhou City

SU Shiping, LIU Xiaoe, LI Yi

(College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Soil infiltration characteristics including initial infiltration, stable infiltration, average infiltration and accumulative water quantity were studied under four different shrub types including *Platycladus orientalis* cv. *sieboldii*, *Reaumuria soongorica*, *Caragana rosea* and *Tamarix chinensis* in southern and northern mountains of Lanzhou City based on double ring infiltration method. The results showed that soil infiltration characteristics decreased with the increase of soil depth in the 0—80 cm soil layers; the soil infiltration characteristics under different forest types were in the following order: *C. rosea* > *R. soongorica* > *P. orientalis* cv. *sieboldii* > *T. chinensis*, while the order was the same among shrubs using principal component analysis. The Horton infiltration model gave the best performance on the infiltrating processes in the four shrub types, followed by Common empirical, Philip and the Kostiakov model. Correlation analysis between soil infiltration characteristics and soil physical and chemical properties showed that soil infiltration characteristics had extremely significant positive correlations with total porosity, soil organic matter, soil total nitrogen, mineral nitrogen, available phosphorus, available potassium, and had significant positive correlations with soil water content, noncapillary porosity, and had significant negative correlation with soil bulk density. Based on the correlation analyses, nine factors which have extremely significant or significant effect on soil infiltration capability were selected. These research results may be useful for providing a theoretical basis for the selection of tree species in the construction of artificial forests in the northern and southern mountains of Lanzhou City.

Keywords: southern and northern mountains of Lanzhou City; shrub; soil infiltration characteristics; soil physical and chemical properties

收稿日期:2021-05-07

修回日期:2021-08-22

资助项目:甘肃农业大学林学一级学科建设基金(GAU-XKJS-2018-103, GAU-XKJS-2018-102);国家自然科学基金(32060335)

第一作者:苏世平(1981—),男,甘肃庄浪人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:susp008@163.com

通信作者:刘小娥(1981—),女,甘肃定西人,博士,讲师,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:liuxiaoe81@126.com

土壤是林木赖以生存的物质基础,也是森林水源涵养功能发挥的重要场所,降水到达林地后,绝大部分以土壤水的形式储存在土壤中供植物吸收利用,因此土壤水分渗透过程的快慢以及渗透能力的高低能严重影响土壤对水分的再分配^[1]。土壤的理化性质严重制约着土壤对降水的再分配,有研究表明^[2],土壤容重、孔隙度等物理性质对土壤渗透能力影响显著或极显著,土壤有机质、氮素、磷素、钾素等化学性质也与土壤渗透能力有直接或间接关系。也有研究表明土壤的渗透能力与立地条件、土壤特性、林分树种组成以及土壤生物因子有关^[3-5],目前有关土壤渗透特性研究多集中在土壤物理性质对渗透能力的研究方面^[3,6],而对化学性质和渗透性的关系研究中,多集中在有机质含量方面^[7],而对氮、磷、钾等化学性质关注不够。在土壤入渗过程研究方面,国内外学者建立了诸如菲利普(Phillip)、霍顿(Horton)、霍尔坦(Holtan)等著名的模型及经验公式,定量的描述和模拟了土壤水分的入渗过程,但是,不同的林分及立地条件下,所得到的最佳模型各有不同,有人认为 Horton^[8]模型最优,也有人认为 Horton 模型以及 Kostiaikov 模型拟合精度不及 Philip 模型^[9],而杨海龙等通过对三峡库区林地土壤入渗过程研究表明, Kostiaikov 模型能更好的描述林地土壤入渗过程^[10],造成这种不同结论的原因可能与研究区树种组成和立地条件有关。因此,对相同立地条件下,起源、林龄相同的林分渗透特性以及其与土壤理化性质关系的研究,有助于揭示树种在土壤渗透能力方面的改良能力,可为特定区域植被恢复时人工林营造时树种的选择以及对现有林分改造时提供一定的参考依据。

表 1 样地基本情况

灌丛类型及代号	盖度/ %	海拔/ m	林龄/ a	平均 高度/m	土壤 类型	群落内其他 植物组成
千头柏(POS)	85	1813	30	6.02	灰钙土	少量沙枣、枸杞
红砂(RS)	—	1801	25	0.25	灰钙土	蝎虎蹄瓣、山蒿、狗尾草、猪毛蒿
红花锦鸡儿(CR)	95	1920	30	0.75	灰钙土	极少量多裂骆驼蓬、狗尾草、猪毛蒿
怪柳(TC)	55	1825	30	2.28	灰钙土	少量田旋花、鹅绒藤、紫穗槐、中亚紫菀木

1.2 试验设计

2019年8月在兰州市南北两山选择造林时间基本一致、立地条件基本相同的4种类型人工灌丛(千头柏、红砂、红花锦鸡儿、怪柳),每灌丛类型选取3个海拔、灌木密度基本一致的代表性灌丛,其中,北山两个,为九州台和徐家山,南山一个为大洼山,每灌丛设立10 m×10 m代表性样地3个,调查各灌丛内的植物种类(表1),之后沿对角线方向在样地内随机设立

兰州市南北两山位于黄土高原西端,属半干旱区,干旱少雨,土壤瘠薄,保水能力差,降水后易发生径流,造成水土流失,因此,自1926年进行人工造林^[11],经过80多年的人工植被恢复,目前,两山基本被绿化,大面积的人工林在保持水土、减少地表径流方面发挥着重要的作用。本文以兰州市南北两山不同类型灌丛为研究对象,对相同立地条件下,起源和林龄相同的人工灌丛的土壤渗透特性以及影响因子进行研究,探讨土壤理化性质与土壤渗透性的关系,旨在揭示植被—土壤在相互作用过程中,不同林分土壤渗透特性及渗透规律,明确影响林分土壤水分渗透性能的主要因子,为兰州市南北两山今后在人工林营建及现有林分抚育管理中,通过林学措施,改善林地渗透能力,最大限度地利用降水,增加林地土壤水分含量,促进林分生长提供科学的理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

兰州市南北两山位于黄土高原丘陵区,区内气候干旱,降水稀少,且降水多集中在秋季,年降水量327.7 mm,年蒸发量1468 mm,年均气温9.1℃,属于典型的中温带半干旱区温带草原气候^[12],区内天然植被稀少,以人工植被为主,主要灌木造林树种为千头柏(*Platycladus orientalis* cv. *sieboldii*)、红砂(*Reaumuria soongorica*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、红花锦鸡儿(*Caragana rosea*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)等耐旱树种^[13]。本研究选取该区域面积较大、分布较广的4种人工灌丛行土壤渗透特性研究,样地树种组成及其他基本情况见表1。

3个1 m×1 m小样方进行土壤剖面挖掘,在挖好的剖面上,按照0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm土层深度,用100 cm³的环刀取原状土,每土层3个重复,带回实验室进行土壤渗透性测定。

1.3 土壤理化性质的测定

采用双环刀法测定土壤入渗过程^[14];初渗率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间;平均渗透速率=稳渗时的渗透总量/稳渗时的时间;稳渗率=单位时

间内渗透量稳定后的渗透速率;渗透总量=前 150 min 内的渗透量;物理性质:土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度采用双环刀法测定;土壤自然含水率用烘干法测定。化学性质:电位法测定土壤 pH;土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定;土壤无机氮采用 KCl 浸提后用连续流动分析仪测定;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定;土壤速效磷采用 NaHCO_3 浸提比色法测定;土壤全钾采用火焰光度法测定;土壤速效钾采用乙酸铵浸提,火焰光度法测定。以上方法参考《土壤农业化学分析方法》进行测定^[15]。

1.4 土壤水分渗透过程模拟

结合前人研究结果^[16-17],本研究选取 4 个常用的土壤水分渗透模型对 4 种灌丛各土壤层水分入渗过程进行过拟合。Kostiakov 模型为 $y = at^{-\beta}$; Horton 模型为 $y = \alpha + \beta e^{-mt}$; Philip 模型为 $y = \alpha + \beta t^{-1/2}$; 通用经验模型为 $y = \alpha + \beta t^{-n}$; 式中: y 为入渗速率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); α, β, n 为拟合参数。

1.5 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件进行相关性分析、主成分分析和水分渗透过程拟合。

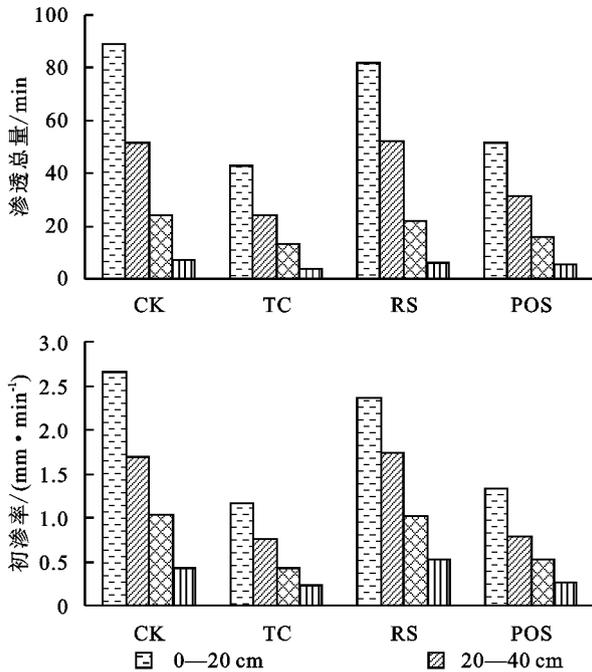


图 1 不同灌丛类型土壤渗透性

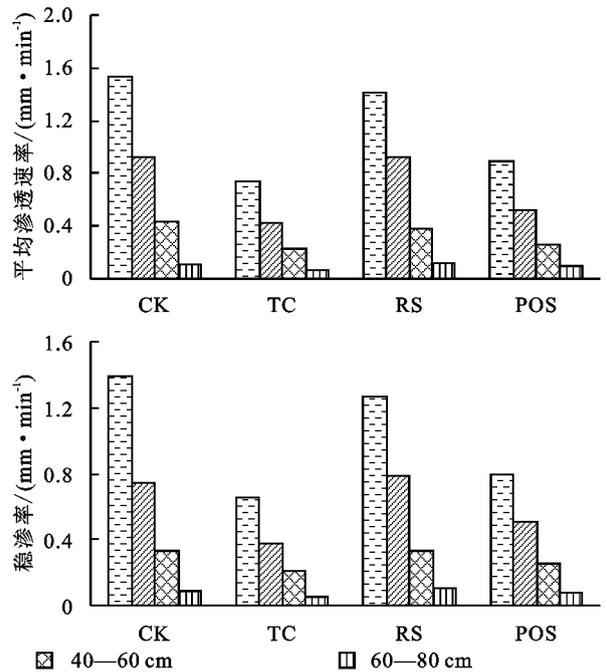
为准确评价 4 种灌丛土壤渗透能力,对土壤渗透性相关的 4 个入渗参数进行 PCA(主成分)分析,以解释他们对土壤渗透能力的贡献。PCA 分析结果表明(表 2),第一主成分的贡献率达到 99.64%,可以解释整个方差,第一主成分因子正荷载量相差不大,以渗透总量和平均渗透速率最大,均为 0.999 6,可以解释为土壤入渗能力的量度,其次为平均初渗率和稳渗

2 结果与分析

2.1 不同灌丛类型土壤渗透性能

土壤水分入渗过程是一个复杂的水文过程,受到林地生物因素和非生物因素的影响^[18-19],要提高林地的水土保持能力,最重要的措施是提高林地的土壤水分入渗能力,而土壤水分的初渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量是评价土壤水分入渗的重要指标。通过对兰州市南北两山 4 种不同类型灌丛土壤渗透参数测定发现,4 个土壤渗透参数在土层之间差异显著,各灌丛类型随土层深度的增加(0—80 cm)呈现降低趋势(图 1),初渗率在 0.22~2.66 mm/min ,稳渗率在 0.06~1.39 mm/min ,平均渗透速率在 0.06~1.53 mm/min 之间,渗透总量在 3.59~88.83 mm 。0—20 cm 土壤层的初渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量分别是 60—80 cm 的 5.20,12.51,11.78,11.72 倍。

土壤渗透性能在不同灌丛类型间差异较大,总体表现为红花锦鸡儿>红砂>千头柏>怪柳,其中,红花锦鸡儿的初渗率、稳渗率、平均渗透速率和渗透总量分别为 1.46 mm/min ,0.64 mm/min ,0.75 mm/min 和 42.91 mm ,分别是怪柳灌丛的 2.27,1.98,2.07,2.05 倍。



率,表明渗透总量和平均渗透速率是影响土壤渗透性的关键因子。主成分方程为 $\alpha = 0.5025\alpha_1 + 0.5032\alpha_2 + 0.4930\alpha_3 + 0.5012\alpha_4$ ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 为渗透总量、平均渗透速率、初渗率、稳渗率经过 Z 标准化的值)。

为准确评价 4 个灌丛类型土壤水分的入渗能力,根据主成分分析结果,采用第一主成分方程对各灌丛各土层土壤渗透性能进行计算,根据得分进行排序。

尽管不同灌丛在同一土层排序高低有别,但红花锦鸡儿和红砂灌丛均排在前两名,平均得分排序为红花锦鸡儿>红砂>千头柏>桤柳(表 3)。

表 2 土壤渗透性主成分分析

参数	主成分		
	P1	P2	P3
渗透总量	0.9996	-0.0271	-0.0078
平均渗透速率	0.9996	-0.0050	-0.0272
初渗率	0.9957	0.0923	0.0115
稳渗率	0.9979	-0.0600	0.0235
特征值	3.9856	0.0129	0.0015
贡献率	99.6409	0.3219	0.0371
累计贡献率	99.6409	99.9629	100.0000

2.2 不同灌丛类型土壤水分入渗过程模拟

土壤入渗模型可以表征土壤水分入渗速率与入渗时间之间的变化规律,能定性或定量的评价土壤水分的入渗过程,是研究土壤渗透能力的重要手段^[2]。本研究利用考斯加科夫(Kostiakov)等 4 个模型对兰

州市南北两山 4 种灌丛 0—80 cm 各土壤层入渗速率与入渗时间的变化过程进行拟合。4 个模型的相关系数 R^2 介于 0.784~0.997(表 4),相关性均达到了显著水平,但不同模型平均拟合优度存在变化,其中, Kostiakov 方程拟合优度为 0.784~0.997,平均值为 0.924; Horton 方程拟合优度为 0.963~0.997,平均值为 0.985, Philip 方程拟合优度为 0.870~0.993,平均值为 0.957,通用经验方程拟合优度为 0.943~0.997,平均值为 0.980,从拟合优度(R^2)考虑, Horton 方程最佳,通用经验方程次之, Philip 方程较差, Kostiakov 方程最差。从拟合残差看,通用经验方程的残差均值为 0.219, Horton 方程为 0.193, Philip 方程为 0.304, Kostiakov 方程为 0.256,结合残差和 R^2 ,以 30% 的入选率从 64 个拟合方程中选出 19 个土壤水分入渗最优模型,其中 Horton 方程 9 个,通用经验方程 6 个, Philip 方程 4 个, Kostiakov 方程 0 个,所以 Horton 模型方程比较适合于描述本研究区 4 种灌丛土壤水分入渗过程。

表 3 不同灌丛类型林地土壤渗透性评价

灌丛类型	0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm		60—80 cm		平均得分	排序
	得分	排序	得分	排序	得分	排序	得分	排序		
CR	2.0350	1	1.6135	2	1.9465	1	1.1598	2	1.6887	1
TC	-2.0453	4	-2.1053	4	-2.1598	4	-2.4643	4	-2.1937	4
RS	1.3581	2	1.7843	1	1.4075	2	1.76498	1	1.5787	2
POS	-1.3478	3	-1.2926	3	-1.1942	3	-0.4604	3	-1.0738	3

表 4 不同灌丛类型不同土层土壤入渗方程

灌丛类型	土层/cm	Kostiakov 方程	R^2	Horton 方程	R^2	Philip 方程	R^2	通用经验方程	R^2
CR	0—20	$2.566 \times t^{-0.174}$	0.956	$1.391 + 1.519e^{-0.212t}$	0.992	$1.135 + 1.564t^{-1/2}$	0.988	$1.096 + 1.592t^{-0.468}$	0.989
	20—40	$1.738 \times t^{-0.223}$	0.986	$0.736 + 1.015e^{-0.112t}$	0.992	$0.592 + 1.219t^{-1/2}$	0.943	$-0.546 + 2.262t^{-0.150}$	0.988
	40—60	$1.025 \times t^{-0.305}$	0.987	$0.350 + 0.818e^{-0.209t}$	0.987	$0.210 + 0.851t^{-1/2}$	0.993	$0.169 + 0.881t^{-0.442}$	0.994
	60—80	$0.429 \times t^{-0.482}$	0.958	$0.084 + 0.465e^{-0.295t}$	0.997	$0.011 + 0.414t^{-1/2}$	0.962	$0.048 + 0.393t^{-0.679}$	0.972
TC	0—20	$1.121 \times t^{-0.143}$	0.975	$0.673 + 0.544e^{-0.181t}$	0.967	$0.578 + 0.599t^{-1/2}$	0.992	$0.513 + 0.649t^{-0.387}$	0.997
	20—40	$0.720 \times t^{-0.183}$	0.958	$0.379 + 0.449e^{-0.224t}$	0.990	$0.303 + 0.454t^{-1/2}$	0.989	$0.293 + 0.461t^{-0.472}$	0.989
	40—60	$0.405 \times t^{-0.194}$	0.929	$0.208 + 0.291e^{-0.291t}$	0.984	$0.161 + 0.266t^{-1/2}$	0.989	$0.180 + 0.254t^{-0.633}$	0.994
	60—80	$0.213 \times t^{-0.429}$	0.941	$0.053 + 0.254e^{-0.399t}$	0.997	$0.016 + 0.196t^{-1/2}$	0.96	$0.042 + 0.184t^{-0.843}$	0.991
RS	0—20	$2.277 \times t^{-0.162}$	0.961	$1.285 + 1.267e^{-0.204t}$	0.987	$1.070 + 1.326t^{-1/2}$	0.991	$1.014 + 1.366t^{-0.449}$	0.992
	20—40	$1.713 \times t^{-0.215}$	0.988	$0.780 + 1.032e^{-0.151t}$	0.980	$0.609 + 1.182t^{-1/2}$	0.98	$0.342 + 1.400t^{-0.314}$	0.991
	40—60	$0.974 \times t^{-0.318}$	0.923	$0.330 + 0.905e^{-0.284t}$	0.996	$0.186 + 0.817t^{-1/2}$	0.957	$0.255 + 0.777t^{-0.662}$	0.966
	60—80	$0.505 \times t^{-0.497}$	0.869	$0.105 + 0.660e^{-0.431t}$	0.982	$0.016 + 0.472t^{-1/2}$	0.877	$0.092 + 0.448t^{-1.007}$	0.943
POS	0—20	$1.293 \times t^{-0.129}$	0.982	$0.807 + 0.534e^{-0.137t}$	0.963	$0.719 + 0.633t^{-1/2}$	0.976	$0.537 + 0.783t^{-0.286}$	0.992
	20—40	$0.725 \times t^{-0.104}$	0.785	$0.508 + 0.416e^{-0.387t}$	0.987	$0.448 + 0.323t^{-1/2}$	0.929	$0.492 + 0.303t^{-0.866}$	0.966
	40—60	$0.469 \times t^{-0.183}$	0.801	$0.253 + 0.389e^{-0.385t}$	0.982	$0.196 + 0.302t^{-1/2}$	0.917	$0.240 + 0.284t^{-0.903}$	0.961
	60—80	$0.228 \times t^{-0.297}$	0.784	$0.087 + 0.286e^{-0.513t}$	0.984	$0.051 + 0.184t^{-1/2}$	0.870	$0.083 + 0.176t^{-1.130}$	0.958
R^2 均值			0.9239		0.9854		0.9571		0.9802

2.3 土壤理化性质对土壤渗透性能的影响

土壤生态系统是一个有机整体,其理化性质对土壤渗透性能存在直接或间接的影响,为了探索土壤渗透性能与土壤理化性质之间的关系,对初渗率等 4 个

渗透参数与土壤容重等 13 个理化参数进行相关性研究发现,土壤的渗透性能与土壤容重等 9 个理化性质存在相关性(表 5)。其中,土壤渗透性与总孔隙度、有机质含量、全氮、无机氮、速效磷、速效钾呈极显著

正相关,与土壤初始含水率、非毛管孔隙度呈显著或极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关。

选择与土壤渗透性关系显著或极显著的 9 个土壤理化参数进行主成分分析(表 6),结果表明,第一主成分贡献率为 68.046,为土壤容重、总孔隙度、有机质含量、全氮、无机氮、速效磷、速效钾 7 个因子,因子负荷量均在 0.640 9 以上,以土壤有机质、土壤容重和总孔隙度最高,分别为 0.984 2, -0.964 7, 0.964 7;第二主成分为非毛管孔隙度,第三主成分为土壤初始含水率。其中第一主成分表达了绝大多数信息,与土壤渗透性关系极显著,其成分方程为 $\beta = -0.3909\beta_1 + 0.2429\beta_2 + 0.3909\beta_3 + 0.16138\beta_4 + 0.3977\beta_5 + 0.3719\beta_6 + 0.3119\beta_7 + 0.2590\beta_8 - 0.3855\beta_9$ (β_i 为各参数经过 Z 标准化的值)。

根据主成分分析结果,将 α 解释为土壤渗透性,将 β 解释为土壤理化性质主成分,将 α 定义为土壤渗透性综合参数, β 为土壤理化性质参数,将渗透总量等 4 个土壤渗透参数以及土壤渗透性综合参数的标准化主成分分为因变量,以土壤理化性质参数 β 为自变量进行回归分析,得到他们之间的回归方程(表 7)。

3 讨论

通过对兰州市南北两山 4 种典型灌丛土壤渗透特性研究表明,在研究土层深度范围内(0—80 cm),各灌丛类型土壤渗透性随土层深度的增加而降低,渗

透性在灌丛类型间差异明显,整体表现为红花锦鸡儿 > 红砂 > 千头柏 > 怪柳,PCA 分析结果表明,同一灌丛在不同土层深度其渗透性排序不尽相同,但总体排序为红花锦鸡儿 > 红砂 > 千头柏 > 怪柳。原因可能与红花锦鸡儿灌丛比较高的密度和郁闭度有关。高的密度能为林地提供更多的凋落物,凋落物分解形成有机质,而有机质能改善林地的土壤结构。高的郁闭度能有效减少林地水分蒸发,提高林地土壤含水量和林内湿度,为土壤动物和微生物的生长和栖息提供有利的条件。而本研究中,千头柏作为大灌木,尽管其密度和郁闭度相对比较高,但是由于其特殊的树种生物学特性,导致其林地土壤渗透能力不高,这可能与侧柏凋落物含油脂分解缓慢,鳞叶养分含量低、对林地有机质返还数量有限^[20],林地自肥能力差有关^[21]。也可能与千头柏的树冠结构和叶型有关,在相同郁闭度的情况下,千头柏林分要比其他林分具有更厚的冠层和叶表面积,对降水的截留量也会更高,导致降落到林地的降水量减少^[22],造成林地干燥,凋落物的分解缓慢,有机质输入减少,林地生物也少。有研究表明,森林通过凋落物来增加土壤有机质含量,有机质在改善土壤结构,增加土壤孔隙,进而提高土壤的水源涵养能力^[7]。高的土壤有机质含量,能为土壤动物、微生物的生长提供碳源,土壤生物的活动,也能改善土壤结构^[23]。

表 5 土壤理化性质与渗透性相关关系矩阵

土壤渗透性	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}
初渗率	-0.742 **	0.502 *	0.747 **	0.417	0.608 *	-0.027	0.913 **	0.916 **	0.759 **	0.245	0.853 **	-0.167	0.762 **
稳渗率	-0.623 **	0.508 *	0.629 **	0.254	0.661 **	0.150	0.919 * ⁰	0.852 **	0.774 **	0.443	0.856 **	0.012	0.869 **
平均渗透速率	-0.645 **	0.525 *	0.652 **	0.301	0.626 **	0.112	0.928 **	0.880 **	0.782 **	0.408	0.860 **	-0.025	0.856 **
渗透总量	-0.638 **	0.519 *	0.644 **	0.285	0.638 **	0.124	0.925 **	0.871 **	0.778 **	0.419	0.859 **	-0.012	0.861 **

注: X_1 容重; X_2 土壤初始含水率; X_3 总孔隙度; X_4 毛管孔隙度; X_5 非毛管孔隙度; X_6 pH; X_7 有机质; X_8 全氮; X_9 无机氮; X_{10} 全磷; X_{11} 速效磷; X_{12} 全钾; X_{13} 速效钾。

表 6 9 个土壤理化性质参数主成分分析

参数	主成分		
	P1	P2	P3
土壤容重	-0.9674	-0.2047	0.1494
土壤初始含水率	0.6011	-0.2312	0.7650
总孔隙度	0.9674	0.2047	-0.1494
非毛管孔隙度	0.3991	0.9044	0.1509
有机质含量	0.9842	-0.0273	-0.1747
全氮	0.9203	0.3886	0.0456
无机氮	0.7718	-0.4968	0.3968
速效磷	0.6409	-0.4358	-0.6320
速效钾	-0.9539	0.3000	0.0025
特征值	6.124	1.634	1.242
贡献率	68.046	18.152	13.801
累计贡献率	68.046	86.199	100.000

表 7 土壤渗透参数及 α 与 β 之间的回归方程

参数	回归方程	R^2	P
渗透总量	$y = 32.6 + 3.738\beta$	0.735	0.0001
平均渗透速率	$y = 0.565 + 0.067\beta$	0.746	0.0001
初渗率	$y = 1.057 + 0.153\beta$	0.761	0.0001
稳渗率	$y = 0.498 + 0.052\beta$	0.679	0.0001
α (土壤渗透性综合参数)	$\alpha = 0.005 + 0.690\beta$	0.733	0.0001

本研究发现,在所测定的 13 个土壤理化性质中,有 8 个因子与土壤的渗透性关系极显著或显著,表明土壤的理化性质综合作用于土壤的渗透能力,PCA 分析表明,土壤容重、有机质含量以及总孔隙度对土壤渗透能力具有决定性的作用,属于主导因子(因子负荷量均在 0.967 4 以上),是因为有机质具有疏松多孔、质轻的特点^[24-25],土壤中有有机质含量如果高,则

单位体积土壤的重量(土壤容重)相应降低。土壤孔隙度升高,尤其是非毛管孔隙度升高,会导致土壤的透水渗水能力显著增加。有研究表明,土壤的渗透性与土壤容重呈负相关,与总孔隙度、土壤有机质呈正相关^[26-28],也有研究表明,土壤中凋落物的增加,能够增加结构孔隙,促进土壤非毛管孔隙的发育,而非毛管孔隙的增加有利于土壤水分的入渗^[29]。

土壤入渗过程是一个复杂的水文过程,不能简单的以拟合优度(R^2)的大小来评判模型的好坏,需要结合拟合后的残差以及各模型的参数意义来对模型做出综合评价。通过综合考虑 R^2 以及拟合残差,本研究在获得的 64 个模型中选出 19 个最优模型,其中 Horton 方程 9 个,通用经验方程 6 个,这与吴长文等^[8]对北京市密云水库周边 8 种人工林土壤渗透性最优拟合模型相似。

4 结论

(1) 在 0—80 cm 土层范围内,各灌丛类型土壤渗透性随土层深度的增加而降低,渗透性在灌丛间差异明显,整体表现为红花锦鸡儿>红砂>千头柏>怪柳。

(2) 在所测定的 13 个土壤理化性质中,有 8 个因子与土壤的渗透性关系极显著或显著,表明土壤的渗透能力受土壤理化性质的综合影响,其中土壤容重、有机质含量以及总孔隙度对土壤渗透能力具有决定性的作用,属于主导因子(因子负荷量均在 0.967 4 以上)。

(3) Horton 模型方程对各林分土壤渗透性的拟合效果最好,比较适合于描述本研究区 4 种灌丛土壤水分入渗过程,通用经验方程的拟合效果次之,Kostiakov 方程最差。

(4) 通过对 4 个土壤渗透参数以及土壤渗透性综合参数 α 与土壤理化性质参数 β 进行回归发现, β 与其他 5 个参数间存在线性关系, R^2 在 0.697 以上,表明土壤渗透性高低与土壤理化性质的好坏有密切的关系。

参考文献:

- [1] 张昌顺,范少辉,官凤英,等.闽北毛竹林的土壤渗透性及其影响因子[J].林业科学,2009,45(1):36-42.
- [2] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等.渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J].生态学报,2010,30(15):4162-4172.
- [3] 孙昌平,刘贤德,雷蕾,等.祁连山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持通报,2010,30(4):68-72,77.
- [4] 张伟,杨新兵,张汝松,等.冀北山地不同林分枯落物及土壤的水源涵养功能评价[J].水土保持通报,2011,31(3):208-212.
- [5] Ampoorter E, Nevel L V, Vos B D, et al. Assessing the effects of initial soil characteristics, machine mass and traffic intensity on forest soil compaction[J]. Forest Ecology and Management, 2010,260:1664-1676.
- [6] 王勤,张宗应,徐小牛.安徽大别山区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能[J].水土保持学报,2003,17(3):59-62.
- [7] 吴发启,赵西宁,余雕.坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J].水土保持通报,2003,23(1):16-18,78.
- [8] 吴长文,王礼先.林地土壤的入渗及其模拟分析[J].水土保持研究,1995,2(1):71-75.
- [9] 王玉杰,王云琦.重庆缙云山典型林分林地土壤入渗特性研究[J].水土保持研究,2006,13(2):193-195.
- [10] 杨海龙,朱金兆,毕立东.三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J].水土保持学报,2003,17(3):63-65,69.
- [11] 吴庆龙.兰州南北两山绿化造林工程的适宜性分析[J].水土保持研究,2003,10(3):134-136.
- [12] 景阳.浅析兰州市气候资源与自然资源的特点和利用[J].农业科技与信息,2015(16):40-42.
- [13] 武田英文,何存成,泽田智志,等.兰州市南北两山造林树种的生长过程解析[J].干旱区研究,2017,34(4):832-836.
- [14] 张万儒,许本彤.森林土壤定位研究方法[M].北京:中国林业出版社,1986.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [16] 秦华军,何丙辉,赵旋池,等.西南喀斯特山地林下经济模式对土壤渗透性的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(11):1386-1394.
- [17] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey lakes watershed, central Ontario [J]. Journal of Hydrology, 2005,306(1/4):1-20.
- [18] 刘广路,范少辉,漆良华,等.不同类型毛竹林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2008,22(6):44-46,56.
- [19] 漆良华,张旭东,周金星,等.湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性[J].林业科学,2007,43(4):1-8.
- [20] 周卫卫,余雪标,王旭,等.海南 3 种典型森林土壤蓄水和渗透能力比较研究[J].安徽农业科学,2009,37(14):6789-6792.
- [21] 吕刚,顾宇书,魏忠平,等.白石砬子自然保护区几种主要植被类型土壤入渗特性研究[J].生态环境学报,2013,22(5):780-786.
- [22] 王磊,孙长忠,周彬.北京九龙山不同结构侧柏人工纯林降水的再分配[J].林业科学研究,2016,29(5):752-758.

- [16] 刘俊杰,潘自武,秦奋,等.基于 MODIS 的秦巴山地气温估算与山体效应分析[J].地理研究,2020,39(3):735-748.
- [17] 刘荷,邓晨晖,邵景安,等.1964—2017 年秦岭山地降水时空变化特征及其南北差异[J].水土保持研究,2021,28(2):210-216,223.
- [18] 齐贵增,白红英,孟清,等.1959—2018 年秦岭南北春季气候时空变化特征[J].干旱区研究,2019,36(5):1079-1091.
- [19] Hutchinson M. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1995,9(4):385-403.
- [20] Hutchinson M. ANUSPLIN version 4,36 user guide [Z]. Canberra:Australian National University, 2006.
- [21] 赵芳,张久阳,刘思远,等.秦巴山地 NPP 及对气候变化响应的多维地带性与暖温带—亚热带界线[J].生态学报,2021,41(1):57-68.
- [22] 邓晨晖,白红英,高山,等.1964—2015 年气候因子对秦岭山地植物物候的综合影响效应[J].地理学报,2018,73(5):917-931.
- [23] 郭少壮,白红英,黄晓月,等.秦岭太白红杉林遥感物候提取及对气候变化的响应[J].生态学杂志,2019,38(4):1123-1132.
- [24] 陈婷,夏军,邹磊.汉江上游流域水文循环过程对气候变化的响应[J].中国农村水利水电,2019(9):1-7.
- [25] 牛最荣,张芮,陈学林,等.1970—2016 年气候变化对渭河源头清源河流域降水和地表径流的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):9-14.
- [26] 田晶,郭生练,刘德地,等.气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J].地理学报,2020,75(11):2307-2318.
- [27] 卞娟娟,郝志新,郑景云,等.1951—2010 年中国主要气候区划界线的移动[J].地理研究,2013,32(7):1179-1187.

~~~~~

(上接第 148 页)

- [13] 周卓丽,张卓栋,罗建勇,等.河北坝上地区草地坡面尺度土壤容重空间变异特征[J].土壤通报,2020,51(1):9-17.
- [14] 刘宇,张洪江,张友焱,等.晋西黄土丘陵区主要人工林土壤饱和导水率研究[J].水土保持通报,2013,33(4):131-135.
- [15] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J].土壤,2019,51(2):381-389.
- [16] 张锐.垄作沟灌土壤水分入渗规律的试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [17] 郑纪勇,邵明安,张兴昌.黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [18] 吴强.川西北高山/亚高山主要森林土壤水土保持功能研究[D].成都:四川农业大学,2017.
- [19] 马思文,张洪江,程金花,等.三峡库区典型城郊防护林土壤饱和导水率特征研究[J].南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(5):99-106.
- [20] 迟春明,王志春.碱化盐土饱和导水率特征与影响因素研究[J].土壤通报,2014,45(3):601-607.
- [21] Wang Y, Shao M A, Liu Z, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 487:13-23.

~~~~~

(上接第 154 页)

- [23] 郭子武,俞文仙,陈双林,等.林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响[J].生态学报,2013,33(18):5623-5630.
- [24] 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.
- [25] 王清奎,田鹏,孙兆林,等.森林土壤有机质研究的现状与挑战[J].生态学杂志,2020,39(11):3829-3843.
- [26] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(1):33-36.
- [27] 王纪杰,俞元春,陈容,等.不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J].水土保持学报,2011,25(2):78-82,103.
- [28] 李文凤,张晓平,梁爱珍,等.不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J].应用生态学报,2008,19(7):1506-1510.
- [29] 丁奠元,冯浩,赵英,等.氮化秸秆还田对土壤孔隙结构的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):650-658.