兰州市南北两山 5 种典型人工林土壤的渗透特性

刘小娥，苏世平，李 毅

（甘肃农业大学 林学院，甘肃，兰州 730070）

摘 要：[目的] 探讨不同树种组成的人工纯林和混交林在生长过程中对土壤渗透特性的改良程度，为该区域人工林营建过程中树种选择及现有林分的抚育管理提供科学依据。[方法] 采用双环渗透法对甘肃省兰州市南北两山 5 种典型人工林分类型（侧柏林、新疆杨林、刺槐林、侧柏＋刺槐混交林和新疆杨＋刺槐混交林）的土壤渗透特性（土壤初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量）进行了研究。[结果] 随土层深度（0—80 cm）的增加，土壤渗透性逐渐降低。不同林分类型土壤渗透性均表现为：新疆杨＋刺槐混交林＞侧柏＋刺槐混交林＞刺槐林＞侧柏林＞新疆杨林，混交林大于纯林；通用经验方程对各林分土壤渗透性的拟合效果最好，比较适合于描述研究区 5 种人工林土壤水分入渗过程，Horton 方程次之，Kostiakov方程最差。土壤渗透性与土壤初始含水率、总孔隙度、有机质含量、全氮、无机氮呈极显著正相关，与毛管孔隙度、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。[结论] 在今后兰州市南北两山植被重建过程中，应营造不同树种所组成的混交林人工植被，不宜大面积营造人工纯林植被类型。

关键词：兰州市南北两山；人工林；土壤渗透性；土壤理化性质

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2021)03-0069-07 **中图分类号**：S152.7^{+}5

文献参数：刘小娥，苏世平，李毅.兰州市南北两山 5 种典型人工林土壤的渗透特性[J].水土保持通报，2021,41(3):69-75.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.010；Liu Xiaoe, Su Shiping, Li Yi. Soil infiltration characteristics under five forest types in southern and northern mountains of Lanzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):69-75.

Soil Infiltration Characteristics Under Five Forest Types in Southern and Northern Mountains of Lanzhou City

Liu Xiaoe, Su Shiping, Li Yi

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

Abstract: [Objective] The improvement degree of soil permeability in the artificial pure forest and mixed forest with different tree species conposition during the growth process was investigated, in order to provide a scientific basis for the selection of tree species during forest construction and during the tending and management of existing tree stands in this area. [Methods] Soil infiltration characteristics based on the double ring infiltration method, including initial infiltration, stable infiltration, average infiltration, and accumulative water quantity, were studied under five different forest types that included *Platycladus orientalis*, *Populus alba* var *pyramidalis*, *Robinia pseudoacacia*, *P. orientalis* + *R. pseudoacacia*, and *P. alba* var *pyramidalis* + *R. pseudoacacia* in the southern and northern mountains of Lanzhou City, Gansu Province. [Results] Soil infiltration characteristics decreased with increasing soil depth in the 0—80 cm soil layer. Soil infiltration characteristics under different forest types followed the order of *P. alba* var *pyramidalis* + *R. pseudoacacia* > *P. orientalis* + *R. pseudoacacia* > *R. pseudoacacia* > *P. orientalis* > *P. alba* var *pyramidalis*, indicating that infiltration characteristics of mixed forests were better than those of pure forests. A common empirical infiltration model

收稿日期：2021-01-07 **修回日期**：2021-01-20

资助项目：甘肃农业大学林学一级学科建设基金“基于外源 ABA 作用的红砂抗旱机理及分子响应机制研究”(GAU-XKJS-2018-103)，“全膜双垄集雨沟播玉米对土壤氮素矿化的影响”(GAU-XKJS-2018-102)；国家自然科学基金项目“基于外源 ABA 作用的红砂抗旱机理及分子响应机制研究”(32060335)；对发展中国家常规性科技援助项目 (KY202002011)；中央财政林业科技推广示范资金项目([2020]ZTYG15)资助

第一作者：刘小娥(1981—)，女(汉族)，甘肃省定西市人，博士，讲师，主要从事水土保持与荒漠化防治研究。Email:liuxiaoe81@126.com。

通讯作者：苏世平(1981—)，男(汉族)，甘肃省庄浪县人，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。Email:susp008@163.com。

provided the best estimates of infiltration processes for the five forest types, followed by the Horton, the Philip, and the Kostiakov models. Soil infiltration characteristics had extremely significant positive correlations with soil water content, total porosity, soil organic matter, soil total nitrogen, and mineral nitrogen. Additionally, soil infiltration characteristics had significant positive correlations with capillary porosity, and noncapillary porosity, and had significant negative correlations with soil bulk density. [Conclusion] These research results would 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; artificial forest; soil infiltration characteristics; soil physical and chemical properties

水源涵养功能是森林生态系统的重要功能之一，森林土壤是森林涵养水源的主体，该功能的85%以上由土壤层实现[1]。土壤渗透性是评价土壤入渗快慢的重要参数之一[2]，渗透性好，对降水及灌溉水的下渗速度和下渗量就多，可有效减少和减缓地表径流。有研究表明，土壤渗透能力与土壤容重、孔隙度等物理性质关系显著或极显著，与土壤有机质、氮、磷、钾等化学性质有直接或间接的关系[3]。也有研究表明，土壤渗透能力与林分立地条件和树种组成以及土壤生物因子等有密切关系[4-6]。目前，有关不同立地、不同林分条件下土壤渗透能力的研究较多[1,4]，但所研究的林分林龄或立地条件不尽相同，可能不能准确评价林分对土壤渗透特性的影响。因此，探讨同一立地、相同起源条件下的同一林龄、不同树种组成的林分土壤渗透能力，有助于揭示树种对土壤改良的能力，可为特定区域人工林营造时树种选择提供一定的理论依据。

甘肃省兰州市南北两山是兰州市重要的生态屏障，由于地处黄土高原半干旱区，土壤贫瘠，保水能力差，导致植被天然恢复困难，在植被人工恢复过程中，大规模采用侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、新疆杨(*Populus alba* var *pyramidalis*)作为该区域的主要造林树种，所营造的人工林在保持水土、涵养水源方面发挥着重要的作用。目前，对兰州市南北两山人工林的研究主要集中在树种选择[7-8]、群落结构[9]、林分养分、水分、微生物等[10-11]方面，而对于土壤渗透性方面的研究仅见对侧柏林地土壤渗透性的研究[12]。因此，研究不同林分类型土壤渗透特性，揭示其渗透规律，探讨影响林分渗透能力的主导因子，为该区域人工林营建过程中树种选择及现有林分的抚育管理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

兰州市南北两山位于黄土高原丘陵区，年均降水量327.7 mm，年均蒸发量1 468 mm，年均气温9.1 ℃；气候干旱，降水稀少，属中温带半干旱区温带草原气候[13]。南山东起榆中县和平镇营盘水，西至西固区新城乡新城桥，南至七里河区阿干镇现子口；北山东起城关区青白石乡张儿沟，西至西固区达川乡达家沟，南临黄河，北至兰州中川机场，东西长约60 km，南北宽约5～50 km。

1.2 试验设计

本研究选取该区域面积较大、分布较广的5种人工林进行土壤渗透特性研究。各林分组成为：侧柏林(*Platycladus orientalis*)，乔木层为侧柏，林内无其他乔木和灌木；刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)，乔木层为刺槐，灌木层为极少量白榆(*Ulmus pumila*)幼苗和甘蒙柽柳(*Tamarix austromongolica*)；新疆杨(*Populus alba* var *pyramidalis*)林，乔木层为新疆杨，灌木层为少量紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinkii*)和沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)；新疆+杨刺槐混交林，乔木层由新疆杨和刺槐组成，树种组成比例为5新疆杨+5刺槐(数量比例)，灌木层为少量柽柳和白榆幼苗；侧柏+刺槐混交林，乔木层为侧柏和刺槐组成，树种组成比例为3侧柏+7刺槐(数量比例)，灌木层为少量柠条锦鸡儿、甘蒙柽柳和白榆。5种人工林基本情况见表1。

2019年8月，在兰州市南北两山选择造林时间基本一致、土壤类型、坡向、坡位相同的5种人工林林分类型，每种林分类型选取3个海拔和林相基本一致的代表性林分，北山2个(为九州台和徐家山)，南山1个(为大洼山)；每种林分类型设立3个10 m×10 m代表性样地，调查林分树种组成及生长状况(表1)。在每个样地内沿对角线方向随机选取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—20，20—40，40—60 cm和60—80 cm土层深度，用100 cm^3的环刀取原状土，每土层3个重复，每种林分类型每土层总共取样27个；将所取样品带回实验室进行土壤渗透性测定。

表 1　兰州市南北两山不同林分类型基本概况

林分类型	郁闭度	海拔/m	林龄/a	平均树高/m	林分密度/(株·hm^{-2})	土壤类型	树种组成比例(数量比)	群落内其他植物
侧柏林(PO)	0.85	1 813	30	6.02	2 977	灰钙土	10 侧柏	
刺槐林(RP)	0.70	1 782	35	9.39	2 700	灰钙土	10 刺槐	少量白榆幼苗,甘蒙柽柳
新疆杨林(PA)	0.60	1 772	35	11.06	2 500	灰钙土	10 新疆杨	少量紫穗槐、柽柳、柠条锦鸡儿、沙枣
侧柏+刺槐混交林(PO+RP)	0.70	1 761	30	6.13	2 740	灰钙土	3 侧柏+7 刺槐	少量柠条锦鸡儿、甘蒙柽柳、白榆
新疆杨+刺槐混交林(PA+RP)	0.65	1 804	30	10.92	2 801	灰钙土	5 新疆杨+5 刺槐	少量柽柳,白榆幼苗

1.3　土壤理化性质测定

采用双环渗透法测定土壤入渗过程[14]。在室外用环刀取原状土,带回室内浸入水中 12 h,然后将环刀取出,上面套上一个大小相似的空环刀,接口处先用胶布封好。往上面的空环刀中加水,水层厚 5 cm。加水后,自漏斗下面滴下第一滴水时开始计时,之后隔 1,2,3,4,5,6 min,…,测量并记录一次通过土柱渗透出的水量。测定过程中要不断将上面环刀水面加至原来高度,一直测到 4 个单位时间内渗出水量相等时为止。

初渗速率=最初入渗时段内渗透量/入渗时间

平均渗透速率=达到稳渗时的渗透总量/达到稳渗时的时间

稳渗速率=单位时间内渗透量稳定后的渗透速率

渗透总量=前 150 min 钟内的渗透量

物理性质:采用环刀法测定土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度;用烘干法测定土壤自然含水率。化学性质:土壤 pH 值采用电位法测定;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,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。

1.4　土壤水分渗透过程模拟

结合前人研究结果[15-16],本研究选取 4 个常用的土壤水分渗透模型对不同林分不同土壤层入渗过程进行过拟合。Kostiakov 模型为:$y=\alpha t^{-\beta}$,Horton 模型为:$y=\alpha+\beta e^{-nt}$,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^{-1});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 软件进行主成分分析、相关性分析和土壤水分渗透过程拟合。

2　结果与分析

2.1　不同林分土壤渗透性能

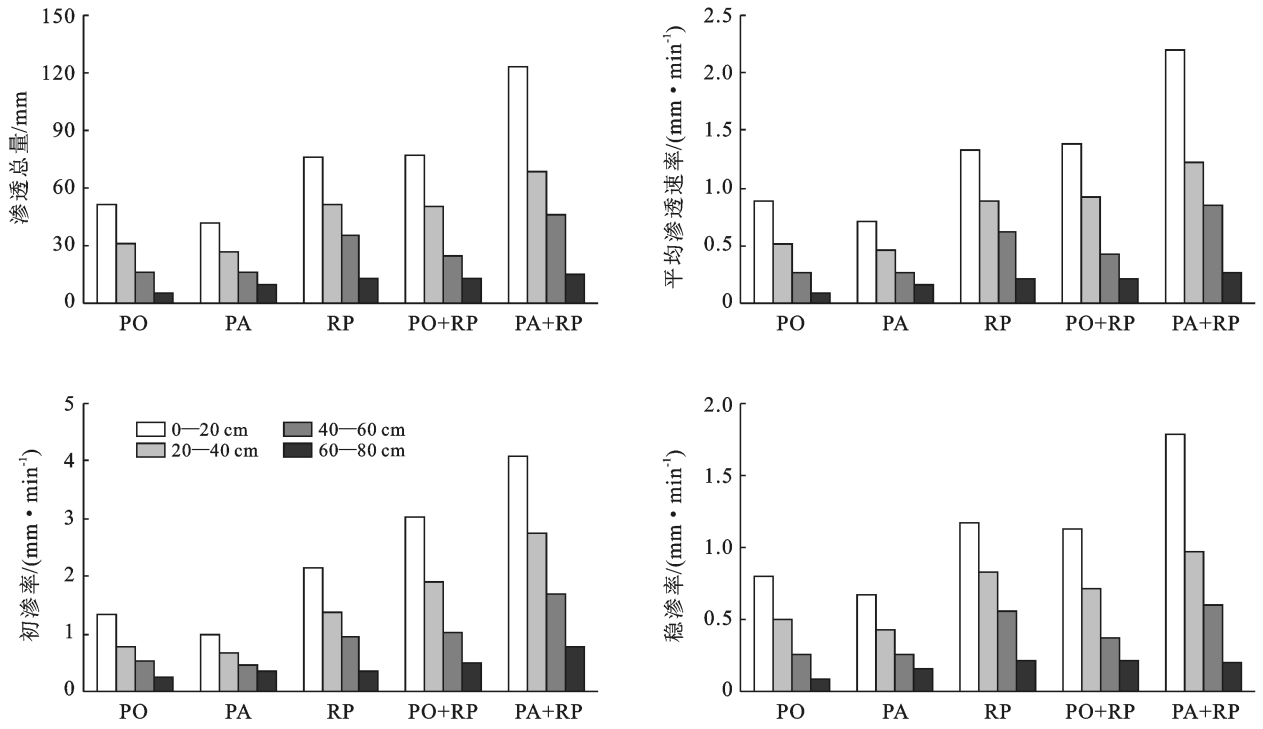
水分的入渗过程是一个复杂的水文过程,土壤的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量是评价土壤水分入渗的重要指标。在林地中,土壤水分入渗的快慢与林分类型、凋落物累积量、根系分布等因素有密切的关系[17-18]。

从图 1 可以看出,土壤初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量在不同林分类型之间均有较大的差异,初渗速率在 0.26～4.07 mm/min 之间,稳渗速率在 0.08～1.78 mm/min 之间,平均渗透速率在 0.09～2.20 mm/min 之间,渗透总量在 5.55～123.43 mm 之间。0—80 cm 土层,4 个土壤渗透参数均表现为新疆杨+刺槐混交林>侧柏+刺槐混交林>刺槐林>侧柏林>新疆杨林,新疆杨+刺槐混交林的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量依此为2.32,0.89,1.14 mm/min 及 63.05 mm,分别是新疆杨林的 3.80,2.34,2.85,2.69 倍。4 个土壤渗透参数在土层之间差异显著,随着土层深度的增加均呈现降低的趋势,0—20 cm 土壤层的初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量分别是 60—80 cm 的 5.11,6.53,6.84,6.65 倍。

为了综合评价不同林分类型土壤渗透性能的差异,以土壤初渗速率、稳渗速率、平均渗透速率和渗透总量为指标进行主成分分析发现(表 2),第 1 主成分的方差累计贡献率达 98.08%,几乎解释了整个总方差,信息损失量很少。因子负荷量表明,第 1 主成分所有变量的正荷载相差不大,以渗透总量和平均渗透速率最高,分别为 0.998 5,0.999 3,可以解释为对土壤渗透能力总的量度,第一主成分方程为 $\alpha=0.504\ 1\alpha_1+0.504\ 5\alpha_2+0.492\ 3\alpha_3+0.498\ 9\alpha_4$($\alpha_1,\alpha_2,\alpha_3,\alpha_4$ 为渗透总量、平均渗透速率、初渗速率、稳渗速率经过 Z 标准化的值)。

表 2　土壤渗透性主成分分析

参数	主成分		
	P_1	P_2	P_3
渗透总量	0.998 5	−0.050 8	−0.017 8
平均渗透速率	0.999 3	−0.016 8	−0.032 3
初渗速率	0.975 2	0.220 9	0.016 6
稳渗速率	0.988 1	−0.149 7	0.034 2
特征值	3.923 0	0.074 0	0.003 0
贡献率	98.077 0	1.852 0	0.070 0
累积贡献率	98.077 0	99.929 0	99.999 0



注:PO 为侧柏林; RP 为刺槐林; PA 为新疆杨林。下同。

图 1 兰州市南北两山 5 种不同林分类型各层土壤渗透性

根据第一主成分方程,计算兰州市南北两山 5 种林分不同土壤层的土壤渗透性能得分,并根据得分进行排名(表 3)。由表 3 可知,不同林分类型的土壤渗透性能随着土层深度的增加而降低,各林分不同土壤层的土壤渗透性排序略有不同,但均表现为新疆杨+刺槐混交林的最好。从平均得分来看,新疆杨+刺槐混交林的土壤渗透性最佳,侧柏+刺槐混交林次之,侧柏林最小。

表 3 兰州市南北两山 5 种不同类型林分林地土壤渗透性评价

林分类型	不同土层深度土壤渗透性								平均得分	排序
	0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm		60—80 cm			
	得分	排序	得分	排序	得分	排序	得分	排序		
PO	−1.458 0	4	−1.705 1	4	−1.781 4	4	−2.807 6	5	−1.938 0	5
PA	−2.061 4	5	−2.163 4	5	−1.819 1	5	−0.687 1	4	−1.682 8	4
RP	0.069 6	3	0.526 7	3	1.071 8	2	0.541 5	3	0.552 4	3
PO+RP	0.413 8	2	0.635 4	2	−0.235 7	3	0.903 1	2	0.429 1	2
PA+RP	3.036 0	1	2.706 5	1	2.764 4	1	2.050 1	1	2.639 3	1

2.2 不同林分土壤水分入渗过程模拟

采用 Kostiakov 方程,Horton 方程,Philip 方程和通用经验方程 4 种模型对 5 种林分不同土壤层水分的入渗过程进行拟合,结果发现,4 个回归模型的相关性均达到显著水平,但模型的拟合优度存在差异(表 4)。Kostiakov 方程拟合优度在 0.611～0.995 之间,平均值为 0.898;Horton 方程拟合优度在 0.951～0.996 之间,平均值为 0.981;Philip 方程拟合优度在 0.785～0.996 之间,平均值为 0.949;通用经验方程拟合优度在 0.888～0.997 之间,平均值为 0.977。从拟合优度(R^2)考虑,Horton 方程拟合效果最好,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 0.183 4,Horton 方程为 0.334 0,Philip 方程为 0.343,Kostiakov 方程为 0.420,结合残差和 R^2 选出 29 个土壤水分入渗最优模型,其中通用经验方程和 Horton 方程各 13 个,各占总数的 44.83%,Philip 方程 3 个,Kostiakov 方程 0 个。以上研究表明,通用经验方程比较适合于描述本研究区 5 种人工林的土壤水分入渗过程。

表 4　不同林分不同土层土壤入渗模型

林分	土层/cm	Kostiakov 模型		Horton 模型		Philip 模型		通用经验模型	
		方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2	方程	R^2
PO	0—20	$y=1.293\ t^{-0.129}$	0.982	$y=0.807+0.534\ e^{-0.137t}$	0.963	$y=0.719+0.633\ t^{-1/2}$	0.976	$y=0.537+0.783\ t^{-0.286}$	0.992
PA	0—20	$y=0.941\ t^{-0.096}$	0.945	$y=0.669+0.349\ e^{-0.188t}$	0.985	$y=0.609+0.374\ t^{-1/2}$	0.985	$y=0.586+0.392\ t^{-0.427}$	0.990
RP	0—20	$y=2.078\ t^{-0.155}$	0.983	$y=1.191+1.029\ e^{-0.164t}$	0.968	$y=1.015+1.165\ t^{-1/2}$	0.989	$y=0.821+1.318\ t^{-0.347}$	0.996
PO+RP	0—20	$y=2.987\ t^{-0.272}$	0.986	$y=1.140+2.228\ e^{-0.200t}$	0.988	$y=0.762+2.345\ t^{-1/2}$	0.988	$y=0.539+2.516\ t^{-0.398}$	0.992
PA+RP	0—20	$y=3.996\ t^{-0.212}$	0.993	$y=1.839+2.304\ e^{-0.141t}$	0.951	$y=1.449+2.731\ t^{-1/2}$	0.981	$y=0.690+3.360\ t^{-0.290}$	0.995
PO	20—40	$y=0.725\ t^{-0.104}$	0.785	$y=0.508+0.416\ e^{-0.387t}$	0.987	$y=0.448+0.323\ t^{-1/2}$	0.929	$y=0.492+0.303\ t^{-0.866}$	0.960
PA	20—40	$y=0.627\ t^{-0.106}$	0.940	$y=0.431+0.261\ e^{-0.211t}$	0.976	$y=0.387+0.271\ t^{-1/2}$	0.990	$y=0.382+0.274\ t^{-0.476}$	0.990
RP	20—40	$y=1.289\ t^{-0.126}$	0.910	$y=0.831+0.669\ e^{-0.257t}$	0.992	$y=0.720+0.639\ t^{-1/2}$	0.983	$y=0.751+0.620\ t^{-0.578}$	0.985
PO+RP	20—40	$y=1.881\ t^{-0.256}$	0.995	$y=0.747+1.271\ e^{-0.168t}$	0.964	$y=0.527+1.433\ t^{-1/2}$	0.990	$y=0.285+1.626\ t^{-0.345}$	0.998
PA+RP	20—40	$y=2.664\ t^{-0.273}$	0.989	$y=1.022+1.989\ e^{-0.206t}$	0.971	$y=0.677+2.097\ t^{-1/2}$	0.996	$y=0.590+2.160\ t^{-0.449}$	0.997
PO	40—60	$y=0.443\ t^{-0.182}$	0.832	$y=0.239+0.364\ e^{-0.384t}$	0.991	$y=0.186+0.284\ t^{-1/2}$	0.934	$y=0.227+0.267\ t^{-0.880}$	0.974
PA	40—60	$y=0.492\ t^{-0.139}$	0.906	$y=0.305+0.291\ e^{-0.299t}$	0.987	$y=0.258+0.262\ t^{-1/2}$	0.987	$y=0.279+0.249\ t^{-0.651}$	0.994
RP	40—60	$y=0.900\ t^{-0.129}$	0.921	$y=0.574+0.472\ e^{-0.255t}$	0.990	$y=0.496+0.452\ t^{-1/2}$	0.979	$y=0.506+0.445\ t^{-0.531}$	0.979
PO+RP	40—60	$y=0.991\ t^{-0.266}$	0.929	$y=0.398+0.833\ e^{-0.273t}$	0.995	$y=0.263+0.770\ t^{-1/2}$	0.969	$y=0.315+0.738\ t^{-0.618}$	0.974
PA+RP	40—60	$y=1.783\ t^{-0.271}$	0.97	$y=0.586+1.146\ e^{-0.092t}$	0.993	$y=0.452+1.401\ t^{-1/2}$	0.917	$y=-3.886+5.602\ t^{-0.058}$	0.988
PO	60—80	$y=0.228\ t^{-0.297}$	0.784	$y=0.087+0.286\ e^{-0.513t}$	0.984	$y=0.051+0.184\ t^{-1/2}$	0.870	$y=0.083+0.176\ t^{-1.13}$	0.958
PA	60—80	$y=0.302\ t^{-0.190}$	0.797	$y=0.160+0.277\ e^{-0.441t}$	0.990	$y=0.122+0.200\ t^{-1/2}$	0.916	$y=0.153+0.188\ t^{-0.973}$	0.972
RP	60—80	$y=0.310\ t^{-0.120}$	0.611	$y=0.206+0.252\ e^{-0.515t}$	0.971	$y=0.176+0.158\ t^{-1/2}$	0.785	$y=0.204+0.153\ t^{-1.196}$	0.888
PO+RP	60—80	$y=0.435\ t^{-0.232}$	0.732	$y=0.202+0.497\ e^{-0.515t}$	0.971	$y=0.140+0.319\ t^{-1/2}$	0.853	$y=0.197+0.306\ t^{-1.172}$	0.951
PA+RP	60—80	$y=0.804\ t^{-0.378}$	0.976	$y=0.197+0.699\ e^{-0.188t}$	0.996	$y=0.081+0.742\ t^{-1/2}$	0.972	$y=0.007+0.799\ t^{-0.349}$	0.976
R^2 均值			0.898 3		0.980 65		0.949 45		0.977 45

2.3　土壤理化性质对土壤渗透性能的影响

土壤的渗透性能与土壤的理化性质存在相关性(表 5)。土壤的渗透性与土壤初始含水率、总孔隙度、有机质含量、全氮、无机氮呈极显著正相关,与毛管孔隙度、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。

表 5　土壤理化性质与渗透性相关关系矩阵

土壤渗透性参数	土壤容重	土壤初始含水率	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	pH 值	有机质含量	全氮	无机氮	全磷	速效磷	全钾	速效钾
初渗透速率	−0.760**	0.950**	0.762**	0.673**	0.585*	−0.377	0.911**	0.960**	0.979**	0.544*	0.110	−0.304	−0.322
稳渗速率	−0.726**	0.819**	0.733**	0.571*	0.650**	−0.111	0.798**	0.915**	0.856**	0.369	0.211	−0.077	−0.328
平均渗透速率	−0.741**	0.870**	0.746**	0.619*	0.618*	−0.209	0.848**	0.943**	0.918**	0.433	0.212	−0.143	−0.310
总渗透量	−0.735**	0.855**	0.741**	0.605*	0.625*	−0.179	0.833**	0.936**	0.903**	0.411	0.220	−0.118	−0.309

注:* 为差异性显著($p<0.05$);* * 为差异性极显著($p<0.01$)。

根据相关性分析的结果,选择与土壤渗透性极显著或显著相关的 8 个因子进行主成分分析(表 6),第 1 主成分贡献率为 94.07%,负荷量在 0.954 0 以上,其中土壤孔隙度、土壤容重和土壤有机质在第 1 组分量分负荷度较大,表明与土壤渗透性显著相关的土壤理化性质的第 1 主成分表达了绝大多数信息,其方程为 $\beta=-0.361\ 9\beta_1+0.359\ 5\beta_2+0.362\ 6\beta_3+0.347\ 8\beta_4+0.321\ 9\beta_5+0.359\ 2\beta_6+0.355\ 3\beta_7+0.358\ 5\beta_8$。

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得分为因变量,以为土壤理化性质参数 β 为自变量进行过回归分析,得到他们之间的回归方程(表 7)。

表 6　8 个土壤理化性质参数主成分分析

参数	主成分			
	P_1	P_2	P_3	P_4
土壤容重(β_1)	−0.992 8	0.024 6	0.117 5	0.001 2
土壤初始含水率(β_2)	0.986 1	0.049 3	0.042 0	−0.153 1
总孔隙度(β_3)	0.994 8	−0.061 7	−0.078 7	0.020 3
毛管孔隙度(β_4)	0.954 0	0.285 8	−0.087 7	0.023 5
非毛管孔隙度(β_5)	0.883 0	−0.466 0	−0.053 9	0.015 8
有机质含量(β_6)	0.985 4	0.170 4	−0.004 1	0.003 6
全氮(β_7)	0.974 8	−0.115 6	0.190 6	0.011 4
无机氮(β_8)	0.983 4	0.122 8	0.104 8	0.082 3
特征值	7.526	0.363	0.080	0.032
贡献率	94.071	4.539	0.995	0.395
累计贡献率	94.071	98.610	99.605	100.000

表 7 β 与土壤渗透参数及 α 的回归模型

参 数	回归方程	R^2	P
渗透总量	$y=39.57+4.820\beta$	0.802	0.000 1
平均渗透速率	$y=0.694+0.091\beta$	0.820	0.000 1
初渗速率	$y=1.292+0.229\beta$	0.944	0.000 1
稳渗速率	$y=0.598+0.061\beta$	0.746	0.000 1
综合参数 α	$\alpha=-0.021+0.613\beta$	0.842	0.000 1

3 讨 论

(1) 通过对 5 种人工林林分土壤渗透特性研究表明,随着土层深度的增加(0—80 cm),土壤渗透性能呈现降低趋势。不同林分渗透能力不尽相同,表现为:新疆杨+刺槐混交林>侧柏+刺槐混交林>刺槐林>侧柏林>新疆杨林,混交林土壤的渗透性优于纯林。产生上述结果的原因之一可能是混交林深根系与浅根系互补分布于土壤中,通过根系的生长、凋亡,在土壤中形成了比较多的孔隙所致,因兰州市南北两山的刺槐绝大多数根系集中于 0—120 cm 层[19]、新疆杨 80%以上的根系分布于 0—40 cm 层[20]和侧柏根系主要分布在 0—50 cm 土层[21];原因之二可能是与林分凋落物累积量有关,相关研究发现[22],这种林分中,混交林枯落物累积量为 35.15~47.01 t/hm^2,而纯林的累积量为 13.5~26.34 t/hm^2,较多的枯落物经分解形成比较多的有机质(10.14~11.67 g/kg),而土壤有机质含量和土壤渗透性存在极显著正相关关系[23],其在降低土壤容重、增加孔隙度方面具有良好的作用[24];原因之三可能与林分的郁闭程度和冠层厚度有关,混交林由于不同树种树冠层次不同,所构成的林分冠层比纯林的厚,郁闭度也比较高,比纯林能有效降低林内光照,增加林地湿度,增加土壤生物[25-26]。但本研究也发现,尽管侧柏林地的郁闭度为 0.85,在 5 种林分中属最高,但是其土壤自然含水量低,这可能与其树种类型有关,在相同郁闭度的情况下,侧柏林分要比其他林分具有更高的冠层叶表面积,对降雨的截留也会更高,导致降落到林地的降雨量减少[27]。

(2) 本研究通过对涉及土壤理化性质的 13 个因子进行相关性分析表明,土壤初始含水率、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤容重与土壤的渗透性存在极显著或显著的相关关系,这与李建兴等[28]、闫东锋等[29]的研究结果一致,随土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度的增加,降低土壤容重,土壤变得疏松多孔,提高了土壤中水分的纵向和横向渗透,缩短了渗透时间,最终提高了土壤的渗透能力。

4 结 论

(1) 不同林分类型土壤渗透性随土层深度(0—80 cm)的增加而降低。

(2) 不同林分类型土壤渗透性均表现为:新疆杨+刺槐混交林>侧柏+刺槐混交林>刺槐林>侧柏林>新疆杨林,混交林均大于纯林。

(3) 通用经验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 5 种人工林土壤水分入渗过程。

(4) 筛选出能表征该区域土壤渗透性的主要土壤理化性质参数依次为:总孔隙度、容重、初始含水率、有机质、无机氮、全氮、毛管孔隙度和非毛管孔隙度。

[参 考 文 献]

[1] 王勤,张宗应,徐小牛.安徽大别山库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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Ampoorter E, van Nevel L, De Vos B, 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(10):1664-1676.

[7] 李禄军,蒋志荣,李正平,等.3 树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J].水土保持研究,2006,13(6):253-259.

[8] 蒋志荣,梁旭婷,朱恭,等.4 树种主要生理指标对模拟水分胁迫的响应[J].中国沙漠,2009,29(3):485-492.

[9] 周资行,李毅,焦健.兰州市南北两山不同生境红砂种群数量动态研究[J].自然资源学报,2011,26(10):1726-1737.

[10] 钟芳,赵瑾,孙荣高,等.兰州南北两山 5 类乔灌木林草地土壤养分与土壤微生物空间分布研究[J].草业学报,2010,19(3):94-101.

[11] 陈小红,段争虎,宋耀选,等.兰州市南北两山人工灌木林地土壤水分动态[J].中国沙漠,2006,26(4):532-535.

[12] 马维伟,王辉,张莉萍.兰州北山人工侧柏林地土壤渗透性研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(2):186-190.

[13] 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,2015,12(16):40-42.

[14] 张万儒,许本彤.森林土壤定位研究法[M].北京:中国林业出版社,1986:30-36.

[15] 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.

[16] 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(1/2/3/4):1-20.

[17] 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.

[18] 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(3):1-7.

[19] 薛文鹏,赵忠,李鹏,等.王东沟不同坡向刺槐细根分布特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(6):227-232.

[20] 张毓涛,胡莎莎,李吉玫,等.新疆 3 种主要森林类型根系生物量变化特征研究[J].干旱区地理,2013,36(2):77-84.

[21] 钟芳,王红赤,李俊年,等.兰州市南北两山水热条件对侧柏根系分布的影响[J].中国沙漠,2006,26(4):559-563.

[22] 刘小娥,苏世平.兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能[J].应用生态学报,2020,31(8):2574-2582.

[23] 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.

[24] 吴发启,赵西宁,佘雕.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.

[25] Alphei J, Bonkowski M, Scheu S. Protozoa, Nematoda and Lumbricidae in the rhizosphere of *Hordelymus europeaus* (Poaceae): Faunal interactions, response of microorganisms and effects on plant growth [J]. Oecologia, 1996,106:111-126.

[26] 靳士科,王娟娟,朱莎,等.上海市不同类型城市森林中小型土壤动物群落结构特征[J].应用生态学报,2016,27(7):2363-2371.

[27] 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.

[28] 李建兴,何丙辉,徐小军.生物埂护坡下不同土地利用方式对土壤渗透性的影响[J].水土保持学报,2012,26(6):243-248,253.

[29] 闫东锋,杨喜田.豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):43-50.

(上接第 68 页)

[8] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].生态学杂志,2014,25(3):657-663.

[9] 王旭东,张霞,王彦丽,等.不同耕作方式对黄土高原黑垆土有机碳库组成的影响[J].农业机械学报,2017,48(11):229-237.

[10] 宋霄君,吴会军,武雪萍,等.长期保护性耕作可提高表层土壤碳氮含量和根际土壤酶活性[J].植物营养与肥料学报,2018,24(6):1588-1597.

[11] Doerr S H, Llewellyn C T, Douglas P, et al. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different Origin [J]. Soil Research, 2005,43(3):225-237.

[12] 吴珺华,林辉,刘嘉铭,等.十八胺化学改性下壤土的斥水性与入渗性能研究[J].农业工程学报,2019,35(13):122-128.

[13] Dekker L W, Ritsema C J. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils [J]. Journal of Hydrology, 2000,231:148-164.

[14] 刘畅,陈俊英,张智韬,等.砂土斥水性与含水率关系的试验研究及理想模型分析[J].节水灌溉,2017,(8):13-16,20.

[15] 闫加亮,赵文智,刘继亮,等.绿洲农田土壤斥水性及其影响因素[J].中国沙漠,2019,39(5):174-181.

[16] Mikha M M, Vigil M F, Liebig M A, et al. Cropping system influences on soil chemical properties and soil quality in the Great Plains [J]. Renewable Agriculture and Food Systems, 2006,21(1):26-35.

[17] 毕利东,马春平,陈丹,等.土壤斥水性在土壤团聚体内的空间分异研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2014,36(6):54-57.

[18] Mirbabaei S M, Shahrestani M S, Zolfaghari A, et al. Relationship between soil water repellency and some of soil properties in northern Iran [J]. Catena, 2013,108:26-34.

[19] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance [J]. Earth-Science Reviews, 2000,51(1/2/3/4):33-65.

[20] Dekker L W, Ritsema C J. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils [J]. Catena, 1996,28(1/2):89-105.