

黄土高原 4 种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响

吴江琪, 马维伟, 李广, 陈国鹏

(甘肃农业大学林学院, 兰州 730070)

摘要: 以黄土高原丘陵沟壑区李家堡乡的荒草地、文冠果林地、沙棘林地和柠条灌丛为研究对象, 采用野外采样与室内分析相结合的方法, 研究了 4 种植被类型土壤的物理特征及其渗透特征。结果表明: 随土层深度的增加, 土壤容重大体呈增加趋势, 而土壤各孔隙度和通气度呈下降趋势。4 种植被类型中荒草地的土壤容重最大, 孔隙度及通气度最小, 而柠条灌丛的土壤容重最小, 孔隙度及通气度最大。土壤水分物理特征值为柠条灌丛最大, 文冠果林和沙棘林次之, 荒草地最小; 柠条灌丛 0—40 cm 土层土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量、最大蓄水量、排水能力比荒草地分别高出了 23.00%, 22.51%, 15.02%, 12.76%, 61.28%, 且方差分析表明差异显著。4 种植被类型的土壤水分入渗过程符合对数曲线, 各土层土壤的渗透性系数 R^2 为 0.937 9~0.986 9, 且 F 检验均达到极显著水平 ($P < 0.001$)。与荒草地相比, 柠条灌丛的入渗速率和水源涵养功能显著高于荒草地, 能更好地改变土壤物理特征, 应该增加柠条灌丛林的营造。

关键词: 植被类型; 黄土丘陵沟壑区; 土壤物理特征; 渗透特征

中图分类号: S714.7; S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0133-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.021

Effects of Four Vegetation Types on Soil Physical Characteristics and Permeability in Loess Plateau

WU Jiangqi, MA Weiwei, LI Guang, CHEN Guopeng

(College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070)

Abstract: Taking the grassland, the *Xanthoceras sorbifolia*, the *Hippophae rhamnoides* and the *Caragana korshinskii* shrub in Lijiabao, the hilly-gully region in the Loess Plateau, as the research objects, the field sampling and the indoor analysis were used to study the soil physical characteristics and infiltration characteristics under four vegetation types. The results showed that with the increase of soil depth, soil bulk density increased generally, while soil porosity and aeration decreased. In the four vegetation types, the soil bulk density of grassland was the largest, with the smallest porosity and aeration, while the soil bulk density of *Caragana korshinskii* shrub soil was the smallest, with the highest porosity and aeration. The physical characteristics of soil water were the largest in *Caragana korshinskii*, the following was in *Xanthoceras sorbifolia* and *Hippophae rhamnoides*, and the lowest in grassland. The maximum water holding capacity, capillary holding capacity, minimum water holding capacity, maximum water storage capacity and drainage capacity of 0—40 cm soil layers in *Caragana korshinskii* shrub were 23.00%, 22.51%, 15.02%, 12.76% and 61.28% respectively higher than those in grassland, and the variance analysis showed significant difference. The logarithmic relationships were found for the soil moisture infiltration processed under the four vegetation types, the R^2 of soil permeability coefficient were between 0.937 9 and 0.986 9, and the F test reached the extremely significant level ($P < 0.001$). The infiltration rate and water conservation capacity of *Caragana korshinskii* shrub were significantly higher than those of grassland, which could improve soil physical characteristics and increase the construction of *Caragana korshinskii* forest.

Keywords: vegetation type; the hilly-gully region in the Loess Plateau; soil physical characteristics; permeability characteristics

土壤是构成生态系统的要素,既是植物生长发育所需水分、养分及热量的载体,也是反映土壤结构和水文状况及评价土壤质量的重要指标^[1]。土壤物理性状主要包括土壤紧密度、土壤孔隙度、通气度以及团粒结构等,不仅决定了土壤的蓄水保肥能力,还影响着地表径流、降雨入渗等水文过程^[2-3]。而土壤渗透性作为描述土壤入渗快慢的参数之一,受到降雨和土壤水分物理性质及植被类型等因素的影响,研究^[4]表明植被类型不同土壤渗透性能也不尽相同,因此土壤渗透性能够在一定程度上反映土壤的抗侵蚀能力^[5-6]。

黄土高原位于我国干旱半干旱区,光热、矿产资源丰富,是我国重要的能源—化工基地,由于人口的急剧增长和严重的毁林开荒、乱砍滥伐以及不合理的耕作制度,导致黄土高原出现了严重的水土流失等生态环境问题。严重的土壤侵蚀导致了土壤和养分的大量流失,土壤物理性质严重退化^[7-8]。该区是森林地带向草原地带过渡的中间地带,环境复杂多变,是目前在林草植被建设中存在较多问题的区域^[9],为了有效防治水土流失,实现生态系统良性循环,黄土区各地区先后实施了退耕还林还草工程,使得土地进入了一个人为扰动较少的土壤、植被恢复演替过程。关于黄土区的研究主要集中在恢复演替规律^[10-13]、表层(0—20 cm)土壤理化性质^[14-16]及植被恢复建设^[17-18]等方面,已做了大量有意义的研究,但由于黄土区气候干燥,灾害频发,“适地适树(草)”仍然存在很大的争议。研究^[19]表明,由于造林树种的不同,林下植物的种类、个体数目、分布状况及结构特征差别较大,造成了不同植被类型植物多样性具有很大的差异,进而影响了森林生态群落的稳定性和植被对土壤水文物理特征的改良作用。因此,本文以荒草地为对照,选择定西市安家沟流域的 3 种典型植被(文冠果林地、沙棘林地,柠条灌丛),通过分析各种植被土壤的容重、孔隙度、渗透性及蓄水性能的变化,旨在为黄土沟壑区植被恢复对小流域水文过程的科学研究和水文生态效益评价提供科学依据。

1 研究区概况

定西市安定区李家堡乡位于甘肃省境内,西靠工业重镇兰州,东临古都西安,区内属黄土高原丘陵沟壑区,是古“丝绸之路”要塞。该区平均海拔 2 000 m,属于大陆性气候,是典型的温带干旱、半干旱地区,年均太阳辐射 141.6×1.48 kJ/cm²,年日照时间 2 476.6 h,年均气温 6.4℃,≥0℃积温 2 933.5℃,10℃积温 2 239.1℃,无霜期约 140 d。多年平均降

水量 390.99 mm,降水季节分配不均,主要集中在 7—9 月,降水量低而不稳,年际变异很大(变异系数为 18.5%),气候多变,干旱、霜冻、冰雹等自然灾害频繁,几乎年年有灾,俗有“十年九旱”之说。该区土壤为典型的黄绵土,土质绵软,抗侵蚀能力较弱。

2 研究方法

2.1 样地设置与采样

2017 年 3 月全面收集定西安定区安家坡李家堡乡的气候、植被、土壤、社会经济等相关文献资料,通过实地考察,参照收集到的往年数据,选择定西市水土保持科学研究所位于李家堡乡的试验区。在试验区域内,以荒草地(35°34′54″N,104°37′57″E)为对照组,选择文冠果林地(35°35′10″N,104°37′07″E)、沙棘林地(35°34′45″N,104°39′01″E)和柠条灌丛(35°34′55″N,104°38′01″E)作为不同的 3 种典型植被样地。2017 年 9 月在 4 种不同植被的样地上随机挖取 5 个土壤剖面,各剖面间空间距离均>5 m,相同样地用环刀分层(0—10,10—20,20—40 cm)取原状土壤样品 30 个,共计 120 个土壤样品,带回实验室后,相同样地的原状土壤 1/2 用于土壤容重、孔隙度、蓄水性能的测定,另 1/2 用于土壤渗透性的测定。

2.2 测定方法与数据分析

土壤容重、孔隙度、通气度采用环刀法(环刀容积为 100 cm³)测定,具体方法见《森林土壤定位研究方法》^[20],土壤通气度(%)=总孔隙度(%)—体积含水量(g/L)×0.1。

土壤蓄水能力的计算公式为:土壤最大蓄水量(t/hm²)=土壤总孔隙度×10000×土层深度;土壤非毛管孔隙蓄水量(t/hm²)=土壤非毛管孔隙度×10000×土层深度^[21];而土壤渗透性采用双环(环刀容积为 100 cm³)渗透法测定不同植被类型下土壤渗透速度。

数据处理、分析及图表生成采用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 软件完成。

3 结果与分析

3.1 植被类型对土壤容重、孔隙及通气度的影响

土壤容重是反映土壤物理结构的重要指标,其大小受土壤质地、结构状况及有机质含量等因素的影响^[4],土壤容重小意味着土壤较为疏松,透气性能较好,根系延展时受到的阻力较小,相反则土壤较为紧实,透气性能较差。由表 1 可知,柠条灌丛 0—40 cm 土层的土壤容重显著低于其他 3 种植被类型($P < 0.05$),但不同植被类型在各土层的变化程度有所差别。4 种植被类型 0—40 cm 层土壤容重最大值出现在荒草地,荒草地 0—40 cm 层土壤容重分别比文冠

果林地、沙棘林地、柠条灌丛0—40 cm层土壤容重高4.43%,3.10%,10.74%。相对于荒草地,文冠果林地、沙棘林地、柠条灌丛0—10 cm处土壤容重分别下降了1.27%,1.91%,10.83%;在10—20 cm处分别下降了7.83%,2.41%,6.63%;在20—40 cm处分别下降了3.49%,4.07%,11.63%。0—40 cm层沙棘林地土壤非毛管孔隙度分别比荒草地、文冠果林地、柠条灌丛高28.45%,10.78%,13.31%,且方差分析表明差异显著($P<0.05$);而0—40 cm层土壤毛管孔隙度和总孔隙度均表现为柠条灌丛>文冠果林地>沙棘林地>荒草地,且差异显著。其中荒草地、文冠果林地土壤非毛管孔隙度随土层深度的增加

呈倒“V”形变化,土壤毛管孔隙度和总孔隙度随土层深度的增加逐渐降低;而沙棘林地、柠条灌丛土壤非毛管孔隙度随土层深度的增加逐渐增大,土壤毛管孔隙度和总孔隙度随土层深度的增加呈“V”形变化。0—40 cm层土壤通气度表现为柠条灌丛通气度最好,荒草地最差,柠条灌丛土壤通气度比荒草地、文冠果林地、沙棘林地分别高出了41.48%,26.37%,13.52%,且差异显著($P<0.05$),而文冠果林地土壤通气度与荒草地和沙棘林地土壤通气度差异不显著($P>0.05$)。这主要是因为荒草地的枯落物分解慢,土壤得不到改善,使得有机质降低,容重增大,导致荒草地土壤孔隙度较小,通气度较差。

表1 不同植被类型下土壤容重、孔隙度及通气度的变化

植被类型	土层深度/cm	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	非毛管 孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	总孔隙 度/%	土壤 通气度/%
荒草地	0—10	1.57±0.00	2.36±0.17	66.00±1.20	68.36±1.03	24.80±0.10
	10—20	1.66±0.01	2.41±0.13	59.18±1.34	61.59±1.47	21.16±0.13
	20—40	1.72±0.02	2.18±0.05	51.33±2.00	53.51±2.05	16.49±1.20
	均值	1.65±0.01A	2.32±0.03C	58.84±0.18B	61.15±0.15C	20.82±0.39C
文冠果林地	0—10	1.55±0.02	2.70±0.31	70.69±3.05	73.39±3.16	24.31±3.18
	10—20	1.53±0.03	2.93±0.44	58.45±0.14	61.38±0.30	25.57±0.88
	20—40	1.66±0.02	2.45±0.31	53.72±0.89	56.17±1.10	20.04±1.52
	均值	1.58±0.02B	2.69±0.16B	60.95±1.21B	63.65±1.35B	23.32±1.78BC
沙棘林地	0—10	1.54±0.04	2.74±0.12	60.11±0.46	62.85±0.34	26.72±0.66
	10—20	1.62±0.01	2.84±0.20	59.75±0.56	62.59±0.75	24.10±0.22
	20—40	1.65±0.06	3.35±0.05	63.06±1.60	66.41±1.65	25.36±0.91
	均值	1.60±0.03AB	2.98±0.04A	60.08±0.36B	62.89±0.30BC	25.96±0.27B
柠条灌丛	0—10	1.40±0.04	1.81±0.06	68.56±8.43	71.06±2.24	32.31±1.38
	10—20	1.55±0.01	2.38±0.01	62.01±0.08	63.80±0.24	27.76±0.31
	20—40	1.52±0.06	3.72±0.09	62.15±0.98	66.18±0.88	28.34±1.85
	均值	1.49±0.01C	2.63±0.00B	64.24±0.30A	67.01±0.37A	29.47±0.26A

注:不同大写字母表示0—40 cm层各植被类型间差异显著($P<0.05$)。下同。

3.2 植被类型对土壤涵养水源的影响

土壤蓄水量是评价植被涵养水源功能的重要指标之一,它是通过各种孔隙度结合土层厚度来表征的^[22]。由表2可知,4种植被类型的土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量、最大蓄水量、非毛管蓄水量以及排水能力之间存在显著差异($P<0.05$)。其中柠条灌丛0—40 cm土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量、最大蓄水量、排水能力分别比荒草地高23.00%,22.51%,15.02%,12.76%,61.28%,比文冠果林地高10.99%,11.06%,10.56%,8.14%,7.87%,比沙棘林地高16.90%,17.35%,16.18%,3.69%,7.95%;而0—40 cm土壤非毛管蓄水量表现为荒草地(30.43 t/hm²)<文冠果林地(35.12 t/hm²)<柠条灌丛(38.72 t/hm²)<沙棘林地(40.03 t/hm²),但沙棘林地和柠条灌丛土壤非毛管蓄水量差异不显著($P>0.05$)。随着土层

深度的增加,荒草地和文冠果林地土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量逐渐降低,最大蓄水量呈“V”形变化,而土壤非毛管蓄水量逐渐增大;沙棘林地土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量及最大蓄水量随土层的增加逐渐增大,土壤非毛管蓄水量和排水能力随土层的加深呈现“V”形变化;而柠条灌丛土壤水分特征均随土层加深呈“V”形变化。荒草地土壤的排水能力显著低于其他3种植被类型($P<0.05$),而文冠果林地和沙棘林地以及柠条灌丛之间土壤的排水能力无显著差异($P>0.05$)。因为柠条灌丛样地的植物种类较多,枯落物分解较快,植物种的多样性造就了在土壤不同层次上根系分布广、数量多,在柠条生长过程中根系的穿插使得土壤变得疏松,改善了土壤的孔隙状况,增大了柠条灌丛样地土壤的通气度,使其土壤的涵养水源功能增强。

表 2 植被类型对土壤涵养水源的影响

植被类型	土层深度/cm	最大持水量/ (g·kg ⁻¹)	毛管持水量/ (g·kg ⁻¹)	最小持水量/ (g·kg ⁻¹)	最大蓄水量/ (t·hm ⁻²)	非毛管蓄水量/ (t·hm ⁻²)	排水能力/ mm
荒草地	0—10	598.52±12.15	577.88±13.51	526.07±13.49	683.59±10.35	23.60±1.67	8.28±0.19
	10—20	490.40±13.32	471.21±12.20	442.21±22.51	615.88±14.71	24.10±1.33	8.08±0.01
	20—40	396.82±23.79	380.67±23.09	356.40±22.39	1070.26±41.00	43.60±0.92	10.92±0.14
	均值	495.25±0.56D	476.59±0.87D	441.56±4.54BC	789.91±5.32D	30.43±0.42C	9.09±0.12B
文冠果林地	0—10	690.49±28.57	665.05±27.14	601.24±41.69	733.92±31.55	27.00±3.12	9.51±2.10
	10—20	524.26±17.20	499.10±13.92	416.85±19.77	613.76±2.99	29.30±4.40	12.61±1.28
	20—40	431.91±13.33	412.99±11.03	360.06±5.19	1123.45±21.98	49.07±6.11	18.65±1.95
	均值	548.89±4.18B	525.71±0.60B	459.38±5.43B	823.71±1.47C	35.12±0.36B	13.59±0.24A
沙棘林地	0—10	509.73±21.99	487.51±20.52	411.81±19.52	619.21±9.87	26.93±1.30	11.82±1.81
	10—20	518.63±15.41	497.07±15.90	445.45±18.40	629.90±8.53	26.27±2.90	8.88±1.12
	20—40	535.05±0.56	508.08±0.25	454.22±1.24	1328.10±33.05	66.90±0.98	20.03±0.08
	均值	521.14±2.33C	497.55±1.57C	437.16±9.12C	859.07±14.76B	40.03±1.04A	13.58±0.94A
柠条灌丛	0—10	708.53±58.15	683.02±52.29	586.21±36.99	710.57±22.43	20.00±1.73	12.10±1.52
	10—20	535.68±6.78	520.54±3.95	450.76±4.57	638.00±2.39	17.07±3.32	10.11±0.17
	20—40	583.35±34.83	548.00±34.00	486.65±24.03	1323.64±17.68	79.10±0.98	21.78±1.44
	均值	609.19±5.51A	583.86±4.78A	507.88±2.80A	890.73±0.78A	38.72±0.34A	14.66±0.03A

3.3 植被类型对土壤渗透性的影响

土壤水分入渗受到很多因素的影响,如林分类型、土壤密度、孔隙度、含水量和有机质等^[23]。由图 1 可知,4 种植被类型土壤的初渗率和稳渗率(除沙棘林地 20—40 cm 层的稳渗率)均随土层深度的增加逐渐降低,10—20,20—40 cm 分别比 0—10 cm 下降 30.59%~75.86%和 46.32%~82.07%;稳渗率在 10—

20,20—40 cm 分别比 0—10 cm 下降 23.76%~77.78%和 49.50%~85.33%,而沙棘林地 20—40 cm 层土壤稳渗率比 10—20 cm 高出了 10%,但无显著性差异。整体 0—40 cm 层土壤初渗率为柠条灌丛>文冠果林地>沙棘林地>荒草地,表明柠条灌丛在生长的过程中提高了土壤的渗透性能,有利于减少地表径流,防止暴雨对地表的冲刷,增强了土壤的抗侵蚀能力。

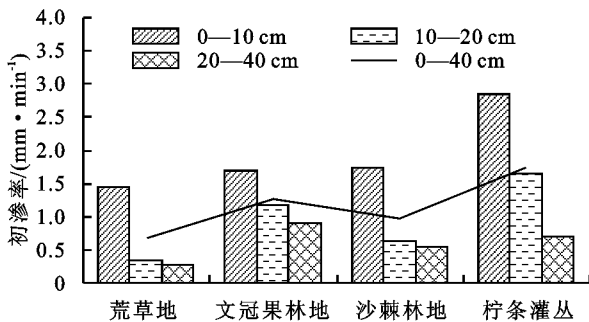
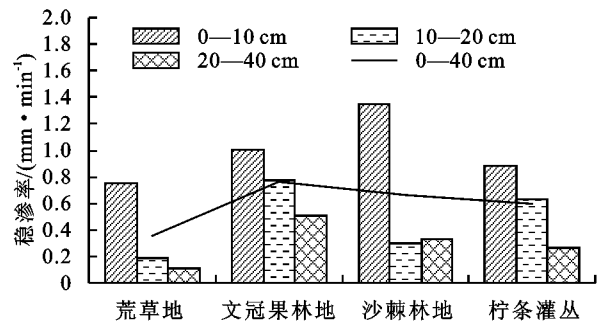


图 1 植被类型对各土层土壤初渗率和稳渗率的影响



3.4 不同植被类型的土壤渗透曲线和模型模拟分析

不同植被类型的土壤入渗初期渗透速度都较快,随着时间的增加,渗透速度逐渐减小,当进行到某一时刻时,渗透速率开始下降,此后下降幅度逐渐减小,最后趋向一个恒定的值(图 2)。

4 种植被类型 0—10 cm 土壤的渗透性均显著强于 10—20,20—40 cm,各土层土壤的渗透性系数 R^2 为 0.937 9~0.986 9(表 3),且 F 检验均达到极显著水平($P<0.001$),说明黄土高原区由于其本身独有的土壤特征,使得 4 种植被类型土壤的渗透都比较符

合对数曲线: $f = A + B \ln t$ 。式中: f 为渗透速率 (mm/min); t 为入渗时间 (min)。

3.5 土壤物理性质与土壤渗透性的相关关系

土壤物理性质对土壤的渗透性能有重要影响,由表 4 可以看出,土壤渗透性与土壤容重呈极显著负相关,与最大持水量、毛管持水量呈极显著正相关;土壤渗透性与毛管孔隙度、总孔隙度呈显著正相关;土壤渗透性与非毛管孔隙度和排水能力呈负相关,并无显著性差异,说明影响土壤渗透性能的土壤物理性质主要是容重和毛管孔隙度。

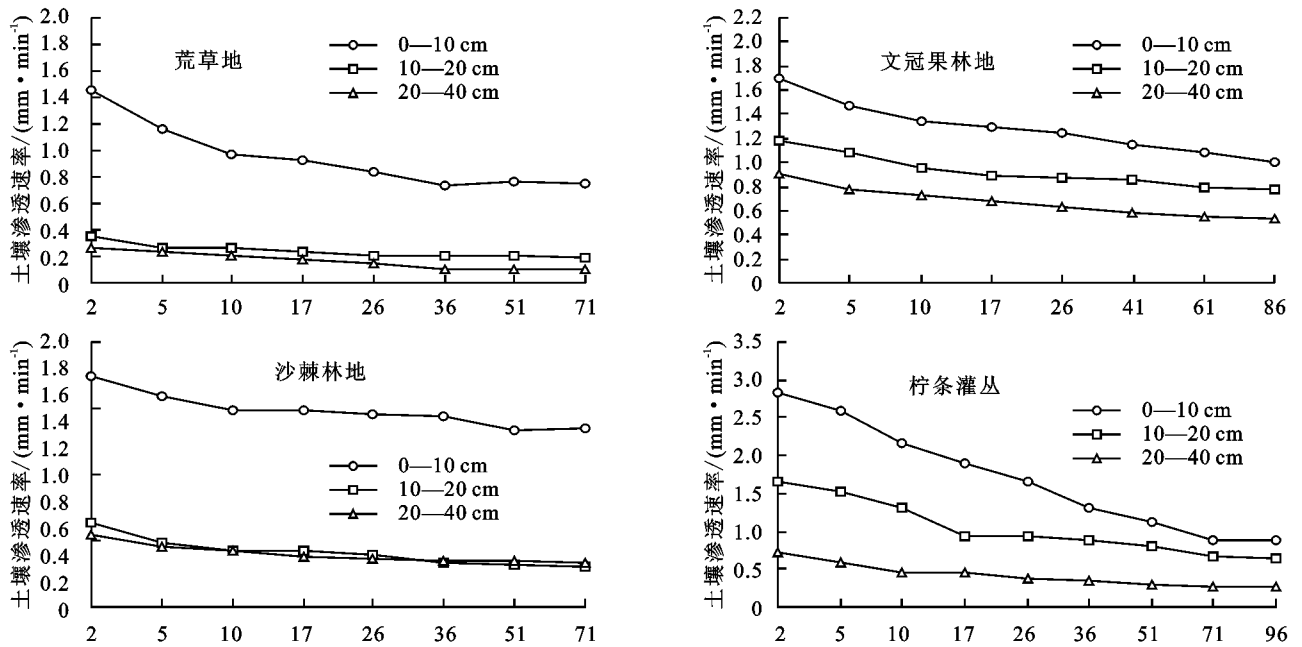


图 2 4 种植被类型下各土层土壤渗透速率的变化

表 3 不同植被类型的土壤渗透模拟方程

植被类型	0—10 cm		10—20 cm		20—40 cm		限制 区间/min
	渗透方程	R ²	渗透方程	R ²	渗透方程	R ²	
荒草地	$f=1.5048-0.197\ln t$	0.9379	$f=0.3617-0.043\ln t$	0.9371	$f=0.3044-0.049\ln t$	0.9612	$0 < t < 75$
文冠果林地	$f=1.7660-0.170\ln t$	0.9819	$f=1.2412-0.109\ln t$	0.9720	$f=0.9564-0.100\ln t$	0.9869	$0 < t < 90$
沙棘林地	$f=1.7776-0.104\ln t$	0.9435	$f=0.5559-0.056\ln t$	0.9573	$f=0.6672-0.089\ln t$	0.9466	$0 < t < 75$
柠条灌丛	$f=1.8902-0.284\ln t$	0.9640	$f=4.3843-0.559\ln t$	0.9804	$f=0.7770-0.120\ln t$	0.9763	$0 < t < 100$

表 4 土壤物理性质与渗透性的相关系数

渗透系数	容重	最大持水量	毛管持水量	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	排水能力
初渗率	-0.862**	0.731**	0.748**	0.658*	-0.444	0.620*	-0.219
稳渗率	-0.627**	0.486**	0.498**	0.489*	-0.191	0.465*	-0.223

注: * 表示显著相关($P < 0.05$); ** 表示极显著相关($P < 0.01$)。

4 结论

(1)通过对不同植被类型土壤容重、孔隙及通气度的分析表明,随土层深度的增加,土壤容重大体呈增加趋势,而土壤各孔隙度和通气度大体呈下降趋势。4种植被类型土壤的容重为柠条灌丛<文冠果林地<沙棘林地<荒草地,而土壤总孔隙度为柠条灌丛>文冠果林地>沙棘林地>荒草地,可见柠条灌丛对土壤物理性质的改良具有明显优势。

(2)柠条灌丛涵养水源的能力最强,文冠果林和沙棘林次之,而荒草地则最差。柠条灌丛 0—40 cm 层土壤最大持水量、毛管持水量、最小持水量、最大蓄水量、排水能力比荒草地高 23.00%,22.51%,15.02%,12.76%,61.28%,方差分析表明差异显著。

(3)4种植被类型的土壤入渗过程模拟试验表明,土壤水分入渗过程符合对数曲线,各土层土壤的渗透性系数 R^2 为 0.937 9~0.986 9,且 F 检验均达到极显著水平($P < 0.001$)。

(4)土壤渗透性与容重呈极显著负相关,与最大持水量、毛管持水量呈极显著正相关,与非毛管孔隙度和排水能力呈负相关,并无显著性差异,说明影响土壤渗透性能的土壤物理性质主要是毛管孔隙度。

参考文献:

[1] Gairola S U, Soni P. Role of soil physical properties in ecological succession of restored mine land: A case study[J]. International Journal of Environmental Sciences, 2010,1(4):475-480.

[2] 杨磊,卫伟,莫保儒,等.半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J].生态学报,2011,31(11):3060-3068.

[3] 王高敏,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林 20 年后典型林地的持水能力[J].北京林业大学学报,2015,37(5):88-95.

[4] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等.宁夏六盘山地区不同森林类型土壤的蓄水和渗透能力比较[J].水土保持学报,2007,21(1):95-98.

- [5] 杨海龙,朱金兆,毕利东. 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.
- [6] 刘道平,陈三雄,张金池,等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493-498.
- [7] 安韶山,黄懿梅,李壁成,等. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 45-50.
- [8] 郑芳,张建军. 晋西黄土区不同植被覆盖流域的水文响应[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5475-5484.
- [9] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 邹厚远,程积民,周麟. 黄土高原草原植被的自然恢复演替及调节[J]. 水土保持研究, 1998, 5(1): 126-138.
- [11] 王国梁,刘国彬,刘芳,等. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [12] 杜峰,山仑,梁宗锁. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究[J]. 草地学报, 2005, 13(4): 328-333.
- [13] 白文娟,焦菊英,马祥华,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序[J]. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1317-1322.
- [14] 李志,刘文兆,王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [15] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695.
- [16] 包志刚. 大青山不同植被类型下土壤物理特性和水分动态研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [17] 侯扶江,肖金玉,南志标. 黄土高原退耕地的生态恢复[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 923-929.
- [18] 许明祥,刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 40-46.
- [19] 张笑培. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复生态效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [20] 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.
- [21] 马维伟,王辉,王修华,等. 甘南尕斯湖不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 194-198, 220.
- [22] 李民义. 晋西黄土区不同植被类型植物多样性及土壤水文物理特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [23] 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.
- (上接第 132 页)
- [7] 杨秀英,杜太生,潘英华,等. 沙漠绿洲区不同灌水方式条件下玉米灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 22-23.
- [8] 李艳茹. 不同灌溉方式下矿区排土场边坡植被恢复的灌溉制度与水分运移模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [9] 张琼瑛,李绍才,龙凤,等. 公路岩质边坡绿化灌溉需水量研究[J]. 节水灌溉, 2013(2): 10-13, 16.
- [10] González C, Cervera L, Moret-Fernández D. Basin irrigation design with longitudinal slope[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10): 1516-1522.
- [11] 陈学敏. 由平地喷头水量分布向坡地转化的数学模型[J]. 喷灌技术, 1991(3): 44-48.
- [12] 崔天怀. 地面坡度对喷灌均匀度的影响[J]. 灌溉排水学报, 1993, 12(1): 52-55.
- [13] 向清江,陈超,魏洋洋. 球形接头调角度应用于坡地喷灌[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 69-71, 78.
- [14] 黄修桥,仵峰,范永申. 喷头仰角调节机构的研制及其对喷头性能的影响[J]. 排灌机械, 2006, 24(5): 29-32.
- [15] 向清江,陈超,魏洋洋. 变射程喷头在坡地喷灌中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 115-119.
- [16] 孙璐. 北京常用园林地被植物蒸散与节水灌溉研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 9-10.
- [17] 余根坚,高占义,赵元忠. 干旱风沙区喷灌蒸发漂移损失试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(11): 67-69.
- [18] 秋华,王文焰. 喷灌系统不同工作条件下的蒸发及漂移损失[J]. 喷灌技术, 1985(3): 46.
- [19] 朱磊,尤今,陈泓泓. 裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 95-100.