

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.022

柳金昊, 信忠保, 沈晗悦, 等. 河北坝上地区不同植被类型土壤持水性能研究. 土壤, 2021, 53(4): 833–840.

河北坝上地区不同植被类型土壤持水性能研究^①

柳金昊¹, 信忠保^{1*}, 沈晗悦¹, 刘山宝¹, 闫腾飞²

(1 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2 河北省张家口市张北县林业局, 河北张北 076450)

摘要: 以河北坝上地区不同植被类型土壤为研究对象, 使用离心机法测定不同土层深度不同吸力下的土壤含水率, 利用 Van Genuchten 模型拟合土壤水分特征曲线, 分析土壤水文特征。研究表明: ①研究区土壤为砂土, 土壤容重为 1.59 g/cm³, 土壤水分特征曲线呈现“迅速下降-缓慢下降-稳定”的形态, 不同植被类型土壤水分特征曲线相似; ②农地的持释水能力最强, 杨树样地的持水能力最差, 柠条样地的释水能力最差, 研究区内非农地的土壤凋萎系数平均为 8.69%, 随着土层深度的增加, 土壤的持水能力、释水能力和凋萎系数都逐渐减小($P < 0.05$)。③坝上地区应逐步减少高耗水乔木, 建立起可持续发展的乔灌草防护体系。本研究可以确定张北地区土壤凋萎系数和土壤干层, 并合理选择种植植被提供理论依据。

关键词: 河北坝上; 植被类型; 土壤水分特征曲线; Van Genuchten 模型; 持水能力

中图分类号: S152.7 **文献标志码:** A

Water Holding Capacities Under Different Vegetation Types in Bashang Area of Hebei Province

LIU Jinhao¹, XIN Zhongbao^{1*}, SHEN Hanyue¹, LIU Shanbao¹, YAN Tengfei²

(1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Forestry Bureau of Zhangbei County, Zhangbei, Hebei 076450, China)

Abstract: In this paper, different vegetation types in Bashang area were selected, soil moisture under different suction in different soil layers were measured by a high-speed centrifuge, and water characteristic curves fitted using Van Gennuchten model in order to analysis water retention characteristics. The results showed that soils in the study area are sandy with the bulk density of 1.59 g/cm³. Soil water characteristic curves were similar under different vegetation types, all in the shape of "rapid decline - slow decline - stability". Farmland has the strongest water holding supply capacities. Water holding capacity was the lowest under *Populus*, and water supply capacity was the lowest under *Caragana korshinskii*. Average soil wilting coefficient of non-farm land was 8.69%. As depth increased, soil water holding and supply capacities and wilting coefficient decreased. In Bashang area, high water consumption trees should be gradually reduced and sustainable system of trees, shrubs and grasses should be established. The above results can provide theoretical basis for determining soil wilting coefficient and soil dry layer and selecting vegetation reasonably in Zhangbei area.

Key words: Bashang; Vegetation types; Soil water retention curve; Van Gennuchten; Water holding capacity

自 20 世纪 60 年代以来,我国在河北西北部坝上地区先后营造了大量防护林,这些防护林在防风固沙、涵养水源、提高农业生产环境、保障京津冀生态安全等方面发挥重要作用^[1]。近年来该地区防护林出现了明显的衰退现象,林分防护功能显著下降^[2]。土壤水分是防护林生存的关键限制性因子,土壤缺水也是近年来防护林退化的重要原因。土壤水分特征曲线

是表示土壤水吸力和土壤含水率之间关系的曲线,即表征土壤水的能量和数量之间的关系曲线^[3]。土壤水分特征曲线是研究土壤中水分的运移与滞留、土壤-植物体系的重要工具,是研究土壤水分过程的基础性工具^[4]。

国内学者针对枯落物和土壤表层的水分效应展开了很多研究^[5-8],但不同植被类型土壤水文特征研

①基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017ZY02)资助。

* 通讯作者(xinzhongbao@126.com)

作者简介: 柳金昊(1998—),男,山东淄博人,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail: hawkey_liu@126.com

究还很少。防护林长期作用可以改变土壤的结构,造成土壤水分动态的差异,而土壤水分动态的改变又会影响防护林的生长^[9-10]。因此,在坝上地区研究不同植被利用类型下土壤水分特征曲线的差异,可为此区域探究土壤水分动态过程、机制和模型模拟提供关键参数,对防护林的营造和恢复具有重要意义。本试验利用土壤水分特征曲线的 Van Genuchten 模型对河北坝上地区典型植被利用类型的土壤水分特征曲线进行拟合,分析不同土壤利用类型土壤水分特征曲线的差异,探讨坝上地区不同利用类型土壤的持水性能以及土壤水分的差异,为进一步研究坝上地区防护林退化机制研究提供关键土壤水文参数。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及数据来源

河北省西北部坝上张北县位于内蒙古高原南缘,地处农牧交错带,海拔 1 369~1 427 m,属于温带大陆性季风气候,全年干燥少雨且降水多集中在夏季。多年平均气温 3.2 °C,最低气温 -34.8 °C,最高气温

33.4 °C。多年平均降水量 392 mm。研究区内自 20 世纪六七十年代就营造了大量防风固沙、农田防护用途的乔木和灌木。主要的乔木树种有杨树(*Populus*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* L.)和榆树(*Ulmus pumila* L.),灌木主要有柠条(*Caragana korshinskii*)、丁香(*Syringa oblata* L.)等。草本植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、黄花蒿(*Artemisia annua*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、独行菜(*Lepidium apetalum*)等。

试验选取杨树、樟子松、柠条和草地 4 种典型植被类型,每种植被类型下选择两个样地,并以农田为对照(图 1)。使用离心机配套的环刀取样,用来测量绘制土壤水分特征曲线。取样深度为 7.5、22.5、37.5 和 52.5 cm,对应土壤层次为 0~15、15~30、30~45 和 45~60 cm。在取样深度用 100 cm³ 环刀取土并用塑封袋取一袋扰动土,环刀土用来测容重,扰动土用于测土壤质地。利用烘干法测定土壤容重。采用 Mastersize 2000 激光粒度仪对取回的扰动土粒径组成进行测定。

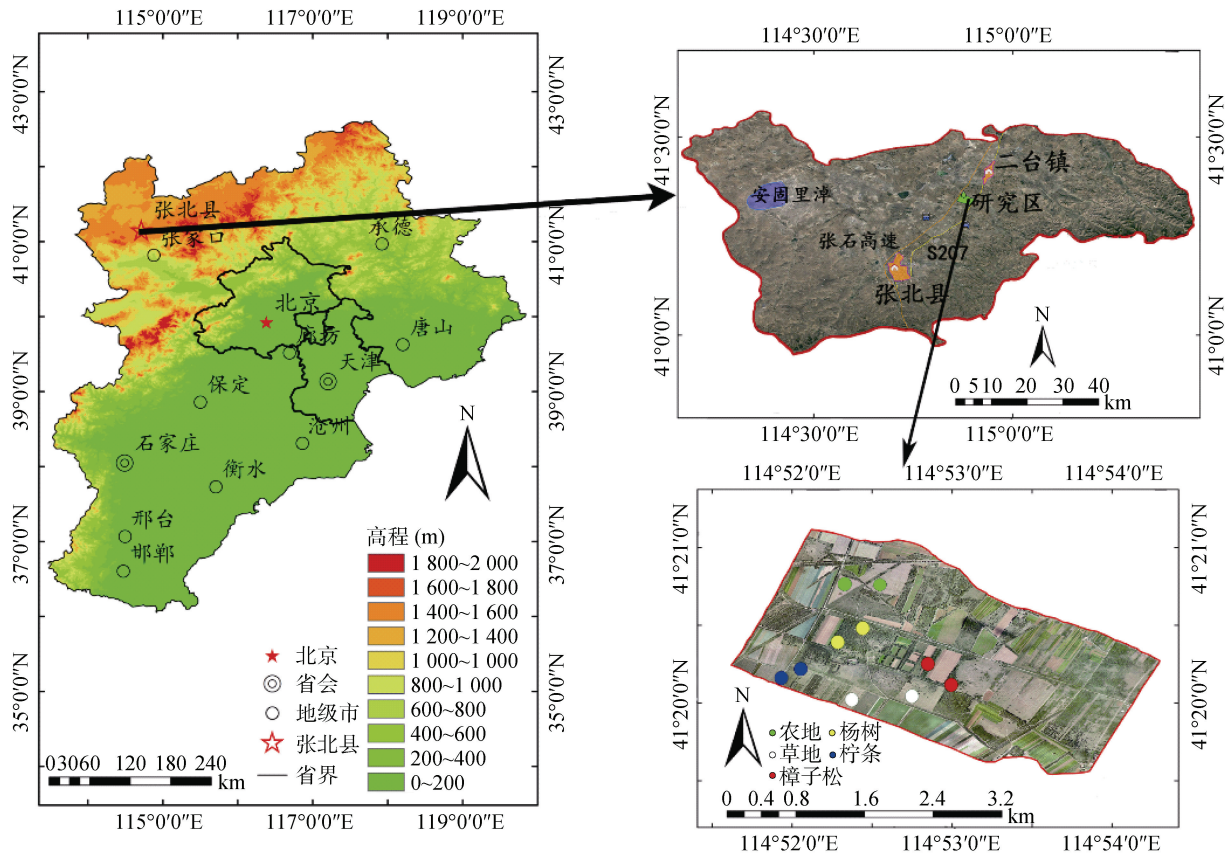


图 1 研究区及采样点分布
Fig. 1 Studied area and sampling sites

1.2 土壤水分特征曲线的测定

将离心机配套的环刀带回实验室浸泡 48 h,确

保环刀内样达到饱和状态。然后将环刀放到 H-1400PF 土壤离心机的转子中,设置转速分别为

500、1 000、1 500、2 000、2 500、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000 r/min，离心 120 min。所有转速离心结束后，将土样放入烘箱中烘干至恒重称重。采用 Van Genuchten 模型对土壤水分特征曲线进行拟合^[11]，公式为：

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1)$$

式中： θ 为体积含水率(cm^3/cm^3)； θ_r 为残留含水率(cm^3/cm^3)； θ_s 为饱和含水率(cm^3/cm^3)； h 为土壤水吸力(Pa)； α 为土壤进气值的倒数； n 、 m 为与土壤水分特征曲线的形状有关的参数，其中， $m = 1 - 1/n$ 。

1.3 比水容重

比水容重是土壤水分特征曲线的斜率，即单位水吸力变化引起含水量的变化值。比水容重是衡量土壤供水性能的重要指标^[12]。由 Van Genuchten 模型可得，比水容重的公式为：

$$C(h) = \frac{\alpha m n (\theta_s - \theta_r) (\alpha * h)}{[1 + (\alpha * h)^n]^{m+1}} \quad (2)$$

式中各指标意义同公式(1)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件用于数据处理分析，Origin 2017 用于绘制土壤水分特征曲线。

2 结果与分析

2.1 土壤性质

研究区不同植被类型下土壤均属于砂土，主要由砂粒和粉粒组成，砂粒最多，占比 80.84%，黏粒很少，最大占比仅为 1.76%(表 1)。从不同植被类型来看，农地中的砂粒含量最少，在 75% 左右，柠条、草地、杨树样地的砂粒含量依次增加，樟子松样地的砂粒含量最多，最高达到 92.04%，黏粒含量则正好相反。从不同土层来看，砂粒含量随着土层深度的增加而不断增加，黏粒含量随土层深度增加而减少。研究区土壤容重较大，平均为 1.59 g/cm^3 。随着土层深度增加，土壤容重小幅上升。在所有土地利用类型中，农地因农业耕作土壤容重最低(1.41 g/cm^3)，柠条样地土壤板结较严重，土壤容重较大(1.67 g/cm^3)。

表 1 不同植被类型土壤粒径组成
Table 1 Soil particle size compositions under different vegetation types

植被类型	土层(cm)	土壤性质				质地名称	容重(g/cm^3)
		黏粒 <2 μm (%)	粉粒 2 ~ 50 μm (%)	砂粒 50 ~ 2 000 μm (%)			
杨树	0 ~ 15	1.53 ± 0.12 aC	20.30 ± 0.87 bB	78.16 ± 1.00 cB		砂土	1.56
	15 ~ 30	0.76 ± 0.09 bB	13.60 ± 0.63 cC	85.63 ± 0.71 bB		砂土	1.60
	30 ~ 45	1.54 ± 0.03 aB	26.64 ± 0.44 aA	71.82 ± 0.44 dD		砂土	1.73
	45 ~ 60	0.71 ± 0.07 cB	13.03 ± 0.69 cC	86.25 ± 0.77 aB		砂土	1.68
柠条	0 ~ 15	1.16 ± 0.05 bD	19.20 ± 0.35 aB	79.66 ± 0.40 bB		砂土	1.61
	15 ~ 30	1.43 ± 0.10 aA	19.32 ± 1.12 aB	79.25 ± 1.22 bC		砂土	1.67
	30 ~ 45	0.82 ± 0.01 cC	15.94 ± 0.26 cB	83.24 ± 0.25 aB		砂土	1.68
	45 ~ 60	1.19 ± 0.02 bB	18.39 ± 0.08 bB	80.42 ± 0.07 bC		砂土	1.71
农地	0 ~ 15	1.76 ± 0.12 aA	26.59 ± 1.39 aA	71.64 ± 1.50 cD		砂土	1.32
	15 ~ 30	1.43 ± 0.37 bA	22.78 ± 0.33 bA	75.78 ± 0.36 bD		砂土	1.45
	30 ~ 45	1.74 ± 0.07 aA	26.81 ± 1.27 aA	71.45 ± 1.22 dD		砂土	1.38
	45 ~ 60	1.37 ± 0.07 cB	19.95 ± 0.80 cB	78.68 ± 0.86 aC		砂土	1.50
樟子松	0 ~ 15	1.68 ± 0.06 aB	22.62 ± 0.42 aB	75.69 ± 0.48 cC		砂土	1.63
	15 ~ 30	0.21 ± 0.05 bC	7.76 ± 0.46 bD	92.04 ± 0.53 aA		砂土	1.62
	30 ~ 45	0.23 ± 0.05 bD	8.34 ± 0.46 bD	91.43 ± 0.51 bA		砂土	1.72
	45 ~ 60	0.27 ± 0.10 bC	9.32 ± 1.55 bD	90.41 ± 1.65 bA		砂土	1.68
草地	0 ~ 15	0.56 ± 0.43 bE	11.71 ± 3.97 cC	87.72 ± 4.40 aA		砂土	1.51
	15 ~ 30	0.76 ± 0.07 bB	14.56 ± 0.85 bC	84.68 ± 0.92 aB		砂土	1.61
	30 ~ 45	1.47 ± 0.27 aB	22.27 ± 1.80 aC	76.26 ± 2.05 cC		砂土	1.63
	45 ~ 60	1.60 ± 0.07 aA	22.30 ± 0.57 aA	76.54 ± 0.64 bD		砂土	1.59

注：表中大小写字母不同表示同一植被类型不同土层深度之间差异显著($P < 0.05$)，大写字母不同表示同一土层深度不同植被类型之间差异显著($P < 0.05$)，数值为平均值 ± 标准差。

2.2 土壤水分特征曲线

为了更好地定量分析土壤水分特征曲线,利用 Van Genuchten 模型来拟合各植被类型 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 45、45 ~ 60 cm 土层的土壤水分特征曲线,得出 Van Genuchten 模型的各项参数(表 2)。结果表明:所有的土壤水分特征曲线拟合效果均很好, R^2 均在 0.97 以上。

从土壤水分特征曲线可以看出,不同土壤类型下土壤的水分特征曲线形态较为接近,随着土壤吸水力的增加,各土层的土壤含水量均表现出先迅速下降,再缓慢下降,最后稳定的变化过程。在含水量迅速变化阶段,草地、杨树样地的土壤水分特征曲线较为陡峭,农地的土壤水分特征曲线较为平缓。在稳定阶段不同土地利用类型土壤水分特征曲线的高低则反映土壤的持释水能力。

2.3 土壤持水能力

土壤持水能力体现了土壤蓄积和保持水分的能力,是土壤水分动态过程的重要指标之一^[13]。土壤水分特征曲线在图中的高低反映的是相同土壤水压力时各土层的持水能力(图 2)。0 ~ 100 Kpa 压力时,不同植被类型的土壤水分特征曲线差别不大,都随着压力增大持水量迅速下降。100 Kpa 压力后,不同植被类型的土壤水分特征曲线逐渐分离且稳定,不同植被覆

盖类型的水分特征曲线存在明显差异。农地的土壤水分特征曲线均高于其他植被类型,而杨树土壤水分特征曲线均低于其他植被类型。柠条、樟子松、草地的土壤水分特征曲线的高低关系则随土壤层次的变化产生变化。在相同水压力下,农地样地土壤的持水能力最大,杨树样地土壤的持水能力最小,柠条、樟子松、草地土壤持水能力的相对大小与土壤深度有关。

从不同植被类型来看,随着土壤深度增加,土壤持水能力呈下降趋势(图 3)。0 ~ 15 cm 土层土壤在各吸力下的持水能力最大,45 ~ 60 cm 土层最低,15 ~ 45 cm 土层持水能力各植被类型间存在差别。柠条、草地、杨树的各不同土层的持水能力差异不大,农地和樟子松不同土层的持水能力差异大。农地因农耕作业改善了表层土壤结构,持水能力也发生了较大变化。研究区内樟子松样地表层 15 cm 堆积了大量的枯枝落叶,使表层的土壤结构得到改良,持水能力大大提高。

2.4 比水容重

不同植被类型的土壤比水容重随着土壤水压力增加而呈显著下降趋势,范围为 $10^{-7} \sim 10^{-1}$ (表 3)。随着土层深度的增加,土壤的比水容重也逐渐减小。土壤水压力达 1 500 Kpa 后,比水容重的数值已经达到 10^{-5} 以下,植物很难从土壤中吸收水分。

表 2 土壤水分特征曲线 Van Genuchten 模型拟合参数
Table 2 Van Genuchten model fitting parameters of soil moisture characteristic curves

植被类型	深度(cm)	θ_s	θ_r	α	n	m	R^2
杨树	0 ~ 15	0.21	0.02	0.006 0	1.31	0.24	0.997
	15 ~ 30	0.21	0.08	0.000 3	1.87	0.47	0.998
	30 ~ 45	0.20	0.02	0.000 4	3.30	0.70	0.988
	45 ~ 60	0.19	0.04	0.002 6	1.71	0.42	0.975
柠条	0 ~ 15	0.32	0.09	0.001 9	1.69	0.41	0.996
	15 ~ 30	0.31	0.12	0.000 4	2.59	0.61	0.993
	30 ~ 45	0.23	0.09	0.000 4	2.74	0.64	0.997
	45 ~ 60	0.21	0.08	0.000 8	2.23	0.55	0.996
农地	0 ~ 15	0.39	0.18	0.001 2	1.28	0.22	0.995
	15 ~ 30	0.32	0.13	0.000 4	2.59	0.61	0.992
	30 ~ 45	0.24	0.09	0.000 4	2.74	0.64	0.991
	45 ~ 60	0.25	0.12	0.000 5	1.43	0.30	0.998
樟子松	0 ~ 15	0.25	0.06	0.003 0	1.51	0.34	0.999
	15 ~ 30	0.32	0.10	0.000 4	3.01	0.67	0.991
	30 ~ 45	0.27	0.05	0.001 6	1.63	0.39	0.992
	45 ~ 60	0.19	0.05	0.001 8	1.78	0.44	0.994
草地	0 ~ 15	0.40	0.10	0.003 1	1.64	0.39	0.995
	15 ~ 30	0.59	0.09	0.009 7	1.63	0.39	0.998
	30 ~ 45	0.32	0.09	0.001 8	1.77	0.44	0.997
	45 ~ 60	0.30	0.11	0.006 6	1.71	0.42	0.999

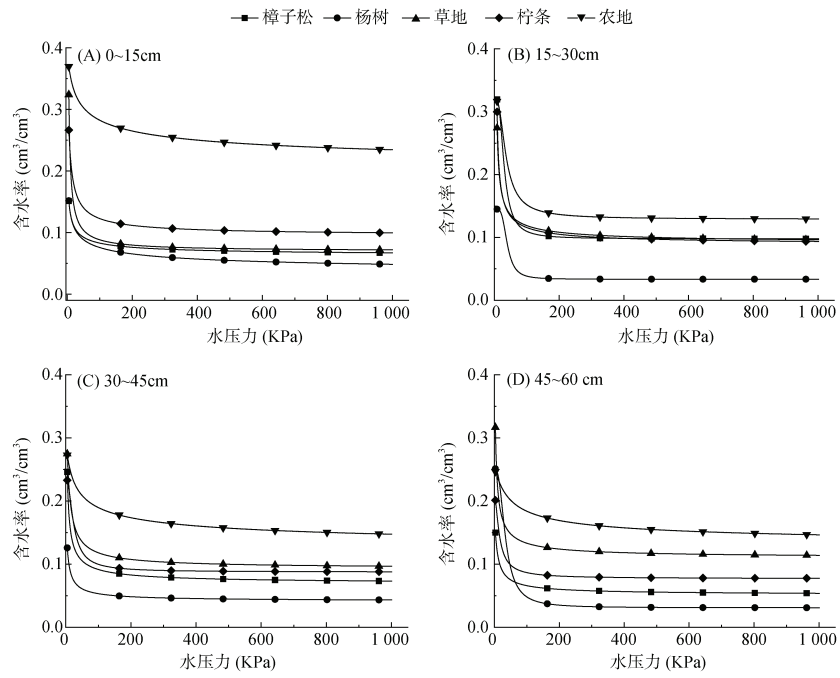


图 2 不同植被覆盖类型的土壤水分特征曲线
Fig. 2 Soil moisture characteristic curves under different vegetation types

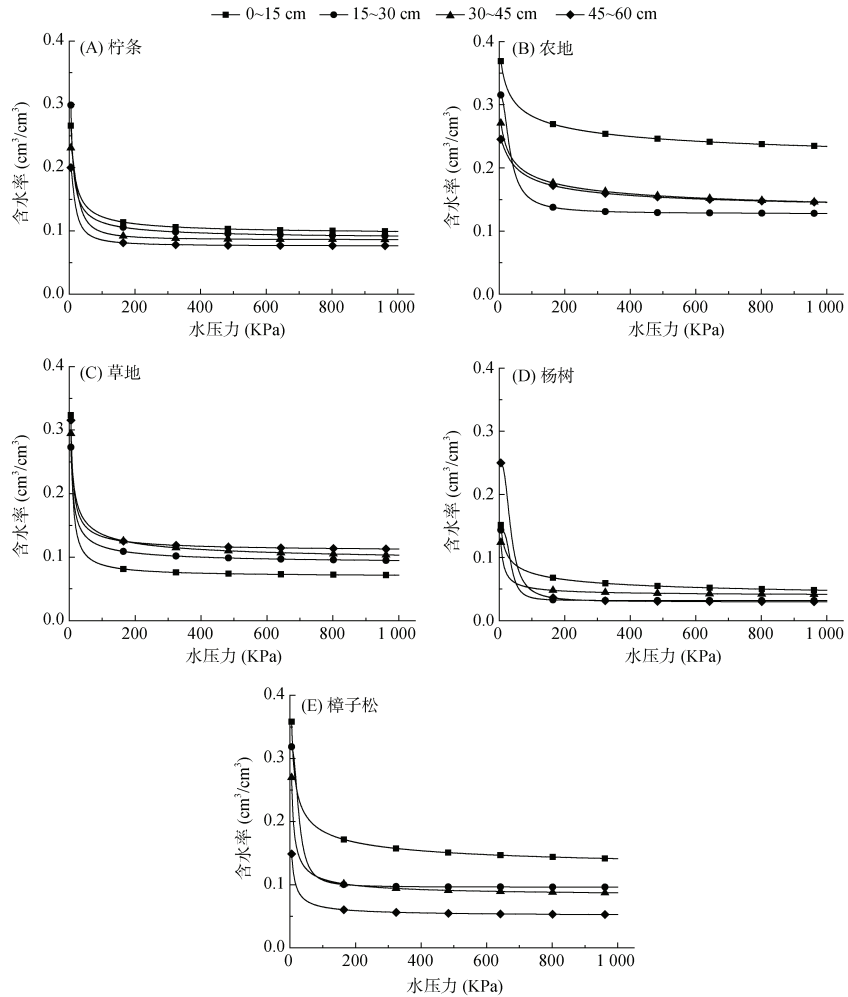


图 3 不同土层深度的土壤水分特征曲线
Fig. 3 Soil moisture characteristic curves at different depths

表 3 不同植被覆盖类型的土壤比水容量
Table 3 Soil specific water capacities under different vegetation types

植被类型	深度(cm)	水压力 (KPa)								
		1	10	100	337	500	750	1 000	1 250	1 500
杨树	0~15	1.24×10^{-2}	1.03×10^{-2}	2.76×10^{-3}	1.30×10^{-3}	1.02×10^{-3}	7.95×10^{-4}	6.65×10^{-4}	5.79×10^{-4}	5.17×10^{-4}
	15~30	6.25×10^{-5}	5.41×10^{-4}	2.59×10^{-4}	3.66×10^{-5}	1.86×10^{-5}	9.23×10^{-6}	5.60×10^{-6}	3.80×10^{-6}	2.77×10^{-6}
	30~45	3.68×10^{-4}	3.40×10^{-3}	1.54×10^{-5}	5.85×10^{-8}	9.53×10^{-9}	1.48×10^{-9}	3.93×10^{-10}	1.41×10^{-10}	6.09×10^{-11}
	45~60	4.69×10^{-3}	4.43×10^{-3}	2.19×10^{-4}	3.92×10^{-5}	2.24×10^{-5}	1.26×10^{-5}	8.38×10^{-6}	6.10×10^{-6}	4.71×10^{-6}
柠条	0~15	5.27×10^{-3}	8.25×10^{-3}	5.13×10^{-4}	9.68×10^{-5}	5.62×10^{-5}	3.21×10^{-5}	2.16×10^{-5}	1.59×10^{-5}	1.23×10^{-5}
	15~30	4.83×10^{-4}	4.19×10^{-3}	1.41×10^{-4}	3.08×10^{-6}	8.80×10^{-7}	2.43×10^{-7}	9.72×10^{-8}	4.78×10^{-8}	2.68×10^{-8}
	30~45	3.90×10^{-4}	3.43×10^{-3}	7.55×10^{-5}	1.14×10^{-6}	2.89×10^{-7}	7.05×10^{-8}	2.59×10^{-8}	1.19×10^{-8}	6.32×10^{-9}
	45~60	1.02×10^{-3}	4.90×10^{-3}	7.57×10^{-5}	3.86×10^{-6}	1.46×10^{-6}	5.40×10^{-7}	2.66×10^{-7}	1.54×10^{-7}	9.82×10^{-8}
农地	0~15	7.83×10^{-4}	3.13×10^{-3}	1.67×10^{-3}	8.79×10^{-4}	7.08×10^{-4}	5.66×10^{-4}	4.82×10^{-4}	4.26×10^{-4}	3.85×10^{-4}
	15~30	4.83×10^{-4}	4.19×10^{-3}	1.41×10^{-4}	3.08×10^{-6}	8.80×10^{-7}	2.43×10^{-7}	9.72×10^{-8}	4.78×10^{-8}	2.68×10^{-8}
	30~45	4.17×10^{-4}	3.68×10^{-3}	8.09×10^{-5}	1.22×10^{-6}	3.10×10^{-7}	7.56×10^{-8}	2.78×10^{-8}	1.28×10^{-8}	6.77×10^{-9}
	45~60	1.37×10^{-4}	9.27×10^{-4}	6.19×10^{-4}	2.41×10^{-4}	1.73×10^{-4}	1.23×10^{-4}	9.62×10^{-5}	7.95×10^{-5}	6.80×10^{-5}
樟子松	0~15	4.25×10^{-3}	4.69×10^{-3}	5.67×10^{-4}	1.65×10^{-4}	1.11×10^{-4}	7.32×10^{-5}	5.46×10^{-5}	4.35×10^{-5}	3.61×10^{-5}
	15~30	7.07×10^{-4}	6.39×10^{-3}	6.55×10^{-5}	5.08×10^{-7}	1.04×10^{-7}	2.04×10^{-8}	6.42×10^{-9}	2.62×10^{-9}	1.26×10^{-9}
	30~45	3.31×10^{-3}	7.22×10^{-3}	6.64×10^{-4}	1.46×10^{-4}	8.86×10^{-5}	5.32×10^{-5}	3.70×10^{-5}	2.80×10^{-5}	2.22×10^{-5}
	45~60	2.84×10^{-3}	4.37×10^{-3}	1.84×10^{-4}	2.78×10^{-5}	1.51×10^{-5}	8.00×10^{-6}	5.11×10^{-6}	3.61×10^{-6}	2.71×10^{-6}
草地	0~15	1.44×10^{-2}	1.14×10^{-2}	7.37×10^{-4}	1.56×10^{-4}	9.44×10^{-5}	5.62×10^{-5}	3.89×10^{-5}	2.92×10^{-5}	2.31×10^{-5}
	15~30	1.15×10^{-1}	1.69×10^{-2}	9.63×10^{-4}	2.09×10^{-4}	1.27×10^{-4}	7.61×10^{-5}	5.30×10^{-5}	4.00×10^{-5}	3.18×10^{-5}
	30~45	5.36×10^{-3}	8.35×10^{-3}	3.69×10^{-4}	5.72×10^{-5}	3.12×10^{-5}	1.67×10^{-5}	1.07×10^{-5}	7.60×10^{-6}	5.74×10^{-6}
	45~60	3.28×10^{-2}	5.81×10^{-3}	2.33×10^{-4}	4.16×10^{-5}	2.38×10^{-5}	1.34×10^{-5}	8.88×10^{-6}	6.47×10^{-6}	4.99×10^{-6}

土壤比水容重能够说明土壤水的有效性和释水能力的强弱,是土壤的耐旱性指标,也是反映土壤供给地表植被生长和发育所需水分的重要指标^[14]。100 Kpa 时杨树、农地、樟子松和草地样地的比水容重数量级为 10^{-3} , 柠条的比水容重数量级为 10^{-4} 。杨树样地和农地样地的释水能力最好,其次是樟子松样地和草地样地,最差的是柠条样地。随着土层深度的增加,释水能力也逐渐减小。0~15 cm 土层的土壤释水能力最好,45~60 cm 土层的土壤释水能力最

差,中间土层的释水能力大小与样地类型有关。

2.5 凋萎系数

萎焉系数为土壤有效水的下限,土壤含水量小于萎焉系数时,植被难以从土壤中获得水分,致使植被萎焉。通常把土壤水分特征曲线中 1 500 Kpa 压力时对应的含水量作为凋萎系数^[15]。不同植被类型凋萎系数平均为 10.56%(表 4)。杨树凋萎系数最低,只有 4.74%,除农地外,其他植被类型凋萎系数在 10% 上下。整体来看,随着土壤深度增加,凋萎系数呈下降趋势($P < 0.05$)。

表 4 不同植被利用类型的凋萎系数
Table 4 Wilting coefficients under different vegetation types

土层 (cm)	凋萎系数(%)					
	杨树	柠条	农地	樟子松	草地	AVE
0~15	5.25	12.37	25.64	15.21	8.69	13.43
15~30	4.54	10.40	13.37	10.15	10.38	9.69
30~45	5.00	9.01	17.19	8.88	10.03	10.02
45~60	4.15	8.04	16.04	5.53	11.43	9.12
AVE	4.74	9.95	18.06	9.94	10.13	10.56

3 讨论

3.1 土壤性质对土壤水分特征曲线的影响

研究区不同植被类型下土壤均为砂土,砂粒含量

高,土壤容重大。已有研究表明,土壤性质对水分特征曲线形状有显著的影响^[16]。一般情况下,容重越小,砂粒含量越高,土壤的大孔隙就越多,其比表面就越小,对水的吸持能力也就越弱^[17]。当水吸力比

较小时,土壤主要利用大孔隙储水排水。随着水吸力的升高,水分可以比较容易地从土壤的大孔隙中排除,土壤水分快速下降,所以此时的土壤水分特征曲线比较陡直。随着水吸力的增加,大孔隙的水逐渐被排空,只有很小孔隙可以保留水分,小孔隙保持水分的能力强,水分不易被排除。因此随着水吸力的上升,土壤水分特征曲线趋于平缓^[18]。研究区内草地、杨树样地的土壤水分特征曲线较为陡峭的原因是因为该地区的土壤结构松散,保持水分的能力极差,水分极容易排走,当水吸力增加时,孔隙中的水分又会很快排空,土壤的含水量会急剧地下降使曲线变得陡直。而农地的曲线形态较为平缓则反映了农民追求经济利益对土壤的改良作用。

3.2 不同植被类型对土壤持水能力和释水能力的影响

研究区砂土土质通常颗粒较粗,加上坝上地区降水稀少、风沙活动频繁,土壤结构发育不佳,导致其持水能力和释水能力较差^[19]。人工植被的长期作用可以改变土壤物理性质,可以影响土壤的持水能力和释水能力^[20-21]。农民为了获得最大经济效益,逐步改良农地的土壤结构,使得农地的持水能力和释水能力都好于其他样地^[22]。杨树对水分和养分的需求更大,土壤中的水分不能满足杨树的生长发育,养分的消耗也大于累积,使得土壤养分含量逐渐减少,土壤颗粒变粗,土壤结构变差,土壤的大孔隙变得更多,更有利于排水而不利于持水,使得杨树土壤的持水能力变差,释水能力变得更强。

3.3 土壤持释水能力的深度传递和土壤干层的确定

整体而言,随着土层深度的增加,土壤的持水能力和释水能力都逐渐减小。0~15 cm 土层,土壤因枯枝落叶和根系输入而含有较为丰富的腐殖质,黏粒含量高,土壤结构较好,因此持水能力和释水能力都比较好^[23];随着土层深度的增加,砂粒的比例逐渐增加,容重增加,有机质的含量减少,土壤结构越来越差,持水能力和释水能力都降低。

研究区凋萎系数的平均值为 10.56%,标准差为 5.19%,考虑到农地受人为影响比较大,假如排除农地以后,研究区内的凋萎系数的平均值为 8.69%,标准差为 2.19%,除草地以外,随着深度的增加,凋萎系数越来越小。通常把凋萎系数作为土壤干层评判的关键参数^[24]。本研究采用离心机法取得不同植被各土层凋萎系数,可为下一步开展季节性干层对防护林胁迫提供基础理论数据支持。

3.4 防护林的规划调整和研究展望

坝上地区在进行防护林建设时,由于经验不足等原因,出现了种植密度大、管理不当等问题^[25]。同时张北坝上地区土壤质地差、持释水能力差,土壤中持有的水不能满足过密防护林的生理需求是防护林衰退的重要原因之一^[26]。也有研究当种植乔木过密时,树冠遮阴作用和乔木耗水影响地表植物和土壤微生物的生长发育,进一步加剧土壤结构的恶化^[27]。因此,在坝上地区防护林营造时,应减少杨树等耗水量高的高大乔木树种,增加需水量低灌木或者草本,构建乔灌草立体防护生态体系,以达到防护林建设的可持续发展。

同时在试验过程中发现,使用离心机法测定土壤水分特征曲线时会使得被测土柱压缩,破坏原状土壤结构,产生误差。测定土壤水分特征曲线还有压力膜法、张力计法等方法^[28-29]。在本研究中,受试验条件和时间的限制,离心机法测得的结果没有和其他测定方法测得的结果进行比较。未来的研究中可以进一步比较几种方法的准确性和差异性。同时在今后可以尝试建立张北地区土壤质地、容重、深度等和土壤水分特征曲线参数的传递关系,寻找一种更简单的获得深层土壤水分特征曲线的方法,寻找张北地区干层位置变化规律,为进一步解释防护林衰退提供基础理论依据。

4 结论

1)研究区内为砂土,容重为 1.59 g/cm³,随着土层深度的增加,砂粒含量增加,容重变大。不同土地利用类型的土壤水分特征曲线形态相似。

2)农地的持水能力和释水能力最强,杨树样地的持水能力最差,柠条样地的释水能力最差。非农地的土壤凋萎系数平均为 8.69%。随着土壤深度的增加,不同植被类型下土壤持水能力、释水能力以及凋萎系数都呈下降趋势。

3)在张北地区应逐步调整减少杨树等耗水量高的高大乔木树种,增加需水量低灌木或者草本,构建可持续发展的乔灌草立体防护生态体系。

参考文献:

- [1] 董蕾,李吉跃.植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理[J].生态学报,2013,33(18):5477-5483.
- [2] 魏强,凌雷,张广忠,等.甘肃兴隆山主要森林类型凋落物累积量及持水特性[J].应用生态学报,2011,22(10):2589-2598.

- [3] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 18-24.
- [4] 汪怡珂, 罗昔联, 花东文, 等. 毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 167-173.
- [5] Antinoro C, Bagarello V, Ferro V, et al. A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the Arya-Paris model[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 226-234.
- [6] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土耕层孔隙分布和水分特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 114-120.
- [7] 李银霞, 虞敏, 曹广超. 祁连山南坡不同土地利用类型土壤物理特性及其持水能力研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 191-197.
- [8] 赵军, 任皓晨, 赵传燕, 等. 黑河流域土壤含水量遥感反演及不同地类土壤水分效应分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 139-144.
- [9] 李航, 严方晨, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3889-3898.
- [10] 李京京, 刘文, 任天宝, 等. 不同土壤质地和含水率对氨基肥料氮素矿化的影响[J]. 土壤, 2020, 52(1): 40-46.
- [11] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [12] 李开元, 李玉山. 土壤水分特征曲线的意义及其应用[J]. 陕西农业科学, 1991, 37(4): 47-48.
- [13] 徐绍辉, 张佳宝, 刘建立, 等. 表征土壤水分持留曲线的几种模型的适应性研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 498-504.
- [14] 庄季屏, 王伟. 土壤低吸力段持水性能及其与早期土壤干旱的关系研究[J]. 土壤学报, 1986, 23(4): 306-313.
- [15] 邵明安. 土壤物理与生态环境建设研究文集[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000: 145-148.
- [16] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(4): 611-620.
- [17] 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 基于联合多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 51-56.
- [18] 吴文强, 李吉跃, 张志明, 等. 北京西山地区人工林土壤水分特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 51-55.
- [19] 洪成, 尹殿胜, 陈俊英, 等. 容重对黏壤土土壤水分特征曲线的影响[J]. 节水灌溉, 2018(10): 5-8.
- [20] 鞠忻倪, 贾玉华, 甘森, 等. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1098-1107.
- [21] 伍海兵, 方海兰, 李爱平. 几种常用绿地改良材料对土壤水分特征的影响[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1229-1236.
- [22] 王燕, 蒙仲举, 斯庆毕力格, 等. 基于多重分形的半干旱区农田表层土壤粒径分布特征研究[J]. 土壤, 2018, 50(4): 826-831.
- [23] 王文焰, 王全九, 张建丰, 等. 甘肃秦王川地区土壤水分运动参数及相关性[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 110-113.
- [24] Luo Y, Chen H Y H. Climate change-associated tree mortality increases without decreasing water availability[J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(11): 1207-1215.
- [25] 姜凤岐, 曾德慧, 于占源. 从恢复生态学视角透析防护林衰退及其防治对策: 以章古台地区樟子松林为例[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2229-2235.
- [26] Anderegg W R L, Flint A, Huang C Y, et al. Tree mortality predicted from drought-induced vascular damage[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(5): 367-371.
- [27] Cao S X, Lu C X, Yue H. Optimal tree canopy cover during ecological restoration: A case study of possible ecological thresholds in Changting, China[J]. *BioScience*, 2017, 67(3): 221-232.
- [28] 来剑斌, 王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(1): 137-140.
- [29] 宁婷, 郭忠升, 李耀林. 黄土丘陵区撂荒坡地土壤水分特征曲线及水分常数的垂直变异[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 166-170.