

文章编号: 1001-1498(2006)03-0301-06

宁夏六盘山北侧 5种典型植被的土壤持水性能研究

窦建德¹, 王绪芳², 熊伟^{3*}, 王彦辉³, 于澎涛³, 郭浩³

(1. 宁夏回族自治区固原市原州区林业局, 宁夏 固原 756000 2. 宁夏回族自治区固原市六盘山国营林业局, 宁夏 泾源 756401
3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要: 通过对土壤水分特征曲线和物理性质的测定, 分析了宁夏六盘山北侧 5种典型植被类型土壤的持水性能和供水性能。结果表明: 用 Gardner等在 1970年提出的幂函数方程可以较好地反映土壤含水量与土壤吸力之间的数量关系; 不同植被类型土壤各层的土壤密度的大小排序为弃耕地 > 山桃人工林 > 天然长芒草 > 华北落叶松人工林 > 天然沙棘林, 总孔隙度恰恰相反; 在土壤水的中吸力阶段 (0.1~1.5 MPa), 华北落叶松人工林地、天然长芒草地、天然沙棘林地、山桃人工林地和弃耕地土壤各层的含水量分别为 169.7~239.3, 160.3~236.1, 140.9~224.5, 119.9~198.1, 113.5~176.4 $g \cdot kg^{-1}$, 说明各种植被类型土壤的持水性能依次减弱; 不同植被类型土壤的供水性能随着土壤吸力的增加而呈递减趋势, 说明通过植树种草可改善土壤结构、降低土壤密度和增加土壤总孔隙度等物理性质而对其持水性能和供水性能产生积极作用。

关键词: 宁夏六盘山; 土壤水分特征曲线; 土壤持水性; 土壤物理特性

中图分类号: S152.7 文献标识码: A

Study on Soil Capacities of Water-retention on Typical Vegetations in the North Side of Liupan Mountains in Ningxia

DOU Jian-de¹, WANG Xu-fang², XIONG Wei^{3*}, WANG Yan-hui³, YU Peng-tao³, GUO Hao³

(1. The Forestry Administration of Yuanzhou District, Guyuan 756000 Ningxia China

2. Liupan Mountain Forestry Bureau of Guyuan City in Ningxia Autonomous Region, Jingyuan 756401, Ningxia China

3. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract The capacity of water-retention and -supply for plants of the soils on five typical vegetations were analyzed by measuring the soil water characteristic curves and physical properties in the north side of Liupan Mountains, Ningxia. The results showed that the relationship between soil moisture and soil suction could be successfully expressed by the power function proposed by Gardner et al. (1970). The soil density in different layers on five vegetations were ranged from high to low values as follow: abandoned land, *Prunus davidiana* plantation, *Stipa bungeana* community, *Larix principirupprechtii* plantation and *Hippophae rhamnoides* community. However, the order of total soil capillary porosity of the five vegetations was just contrary. From 0.1 to 1.5 MPa in soil suction, soil water content of *Larix principirupprechtii* plantation, *Stipa bungeana* community, *Hippophae rhamnoides* community, *Prunus davidiana* plantation and abandoned land were ranged in 169.7~239.3 $g \cdot kg^{-1}$, 160.3~236.1 $g \cdot kg^{-1}$, 140.9~224.5 $g \cdot kg^{-1}$, 119.9~198.1 $g \cdot kg^{-1}$ and 113.5~176.4 $g \cdot kg^{-1}$ respectively. It meant that the soil capacity of water-retention of the five vegetations decreased in order. The order of soil capacity of water-supply for the five vegetation types was the same as soil capacity of water-retention, and it de-

收稿日期: 2005-11-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2002CB111501)、国家自然科学基金重点项目 (30230290)、国家林业局引进国际先进技术项目 (2003-4-43)和国家林业局森林生态环境重点实验室共同资助

作者简介: 窦建德 (1966—), 男, 宁夏固原人, 林业工程师。

* 通讯作者: 博士, 助研, E-mail: xwca@163.com

creased with increasing of soil suction. The results could be explained by the positive effect of soil physical properties (i. e. soil density and total capillary porosity et al) caused by planting trees and grass on the soil capacities of water-retention and -supply.

Key words Liupan Mountains of Ningxia soil water characteristic curve soil water retention soil physical characters

土壤水分是决定黄土高原地区植被恢复与重建的关键生态因子,因此土壤水分研究历来受到重视。土壤水分特征曲线是表述土壤水分特征的基本方法,它表示了土壤水分能量和水分数量之间的基本关系,常用于研究土壤水分的保持和运动^[1]。目前国内已有大量的天然或人工植被下土壤水分特征的研究^[2-6],但对具有相同气候条件的某一地域内共存的不同植被类型下土壤水分特征的研究相对较少。本文从土壤水分特征曲线等物理性质的测定入手,在居于半湿润半干旱过渡带的六盘山北侧,测定分析了 5 种典型植被下的土壤持水性能和供水性能,以便为揭示该区不同植被类型条件的土壤水文效应提供数量依据。

1 试验地自然概况

六盘山位于我国黄土高原的西部地区,行政上属于宁夏回族自治区南部的固原市境内。本试验区位于六盘山北侧固原市原州区 (106°09' ~ 106°30'E, 35°15' ~ 35°41'N) 林业局的赵千户林场,属典型温带大陆性气候。年平均气温 6~7℃,年日照时数 2 534 h,年降水量 428 mm,且多集中于 7—9 月份,≥ 10℃ 积温 2 100 ~ 3 200℃。赵千户林场地处黄土高原土石山区,

海拔 1 800~ 2 200 m,土壤类型为山地灰褐土,土层平均厚度为 80~ 100 cm。

该林场从 20 世纪 80 年代进行了大面积的植树种草,随着我国西部生态环境建设和退耕还林还草工程的实施,不仅加大了造林工作的力度,而且加强了管护,实行了封山育林,目前林分生长良好,郁闭度较高,境内主要人工植被有华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) 林和山桃 (*Prunus davidiana* Franch) 林;天然植被有斑块状分布的沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.)、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana* Decne) 等天然灌丛;草地以天然长芒草 (*Stipa bungeana* Trin.)、铁杆蒿 (*Artemisia vestita* Ledeb var *incana* Matf) 和凤毛菊 (*Saussurea amara* (L.) DC) 等为优势种组成的草甸植被群落为主。

2 研究方法

2.1 标准地设置

2002 年 9 月选择生长良好的华北落叶松人工林、山桃人工林、天然沙棘林、天然长芒草群落和弃耕地进行研究,设置 5 块标准地,乔木林标准地面积为 20 m × 20 m,灌木、草本和弃耕地面积为 5 m × 5 m,植被生长情况见表 1。

表 1 5 种典型植被的生长情况

植被类型	坡向	坡位	年龄 /a	平均高 /m	胸径(地径) /cm	密度 / (株 · hm ⁻²)	郁闭度(盖度)
华北落叶松人工林	北偏东 15°	中上部	18	5.8	7.4	2 800	0.6
山桃人工林	南偏西 55°	中下部	8	1.6	11.6	2 500	0.5
天然沙棘林	北偏东 35°	中上部	18	2.2	(4.5)	3 000	0.8
天然长芒草群落	南偏西 75°	近坡顶	4	0.45	—	—	(0.8)
弃耕地	南偏西 75°	近坡顶	3	—	—	—	—

2.2 土壤物理性质及特征曲线测定

在 5 个标准地内各挖 1 个土壤剖面,根据土壤发育状况、颜色和质地等判断土壤发生层,进行自然分层(表 2),每层用 100 cm³ 环刀取原状土样,土壤密度用环刀法测定,3 个重复,比重用比重瓶法测定,土壤水分特征曲线用离心机法测定^[7]。

土壤水分特征曲线采用 Gardner 等在 1970 提出的方程 (1) 模拟。

$$\theta = aS^{-b} \quad (1)$$

式 (1) 中: θ 为土壤含水量, S 为土壤吸力, a 和 b 均为参数。

比水容量 (C_0) 由土壤水分特征曲线方程 (1) 求

一阶导数计算, 即

$$C_0 = \frac{d\theta}{d\Psi} = - \frac{d\theta}{dS} = abS^{-(b+1)} \quad (2)$$

式(2)中: θ 为土壤含水量, Ψ 为土壤基质势, S 为土壤吸力, a 和 b 均为参数。

3 结果与分析

3.1 土壤水分物理性质

从表 2 可知, 同一植被类型的土壤密度由上至下依次增加, 而总孔隙度和毛管孔隙度基本上依次

减小; 不同植被类型相应层次土壤密度由大到小的顺序大致表现为弃耕地 > 山桃人工林 > 天然长芒草 > 华北落叶松人工林 > 天然沙棘林, 而总孔隙度恰恰相反; 对毛管孔隙度和非毛管孔隙度来说, 虽然天然长芒草、华北落叶松人工林和天然沙棘林等 3 种植被类型的土壤没有一致的排序规律, 但对应值却显然大于弃耕地和山桃人工林地, 说明天然沙棘林地、华北落叶松人工林地和天然长芒草地的土壤结构相对较好, 山桃人工林和弃耕地较差。

表 2 5 种植被类型不同土层深度的土壤水分物理性质

植被类型	土层深度 / cm	土壤密度 / ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤孔隙度 / %		
			总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
天然长芒草地	0~20	1.084	55.90	40.35	15.55
	20~40	1.134	53.87	51.70	2.17
	40~90	1.259	49.75	26.88	22.87
华北落叶松 人工林地	0~30	1.024	58.56	42.62	15.93
	30~60	1.137	54.66	39.39	15.27
	60~90	1.237	51.00	36.77	14.24
天然沙棘林地	0~40	1.048	53.86	52.73	1.13
	40~90	0.967	60.41	33.81	26.61
	90~120	1.318	47.38	36.77	10.61
山桃人工林地	0~30	1.138	54.10	45.00	9.10
	30~70	1.334	45.32	36.77	8.56
	70~90	1.369	44.18	35.71	8.47
弃耕地	0~20	1.282	47.68	45.16	2.52
	20~60	1.498	40.40	29.87	10.53
	60~100	1.529	39.30	30.67	8.63

3.2 土壤水分特征曲线与持水性能

土壤水分特征曲线反映了土壤水吸力与土壤含水量之间的关系, 通过它可以了解土壤的持水性能和供水性能, 对于研究土壤水分的贮存、保持、运动、供应及土壤—植物—大气连续体中水流等的机理和状况都有重要意义^[8]。为定量研究土壤的水分特征曲线, 前人提出了很多的模拟方程^[9~11]。姚其华等^[8]认为与其它模型相比, Gardner 的幂函数方程具有待定参数较少的优点, 在实际应用中更为方便。本研究采用 Gardner 的方程 (1) 来描述土壤水吸力与土壤含水量之间的关系, 方程中 a 值决定曲线高低, 表示持水能力大小, a 值越大说明土壤持水力能力越强; b 值决定曲线走向, 表示土壤含水量随基质势降低而递减的快慢^[11]。

表 3 列出了各种植被类型下的土壤水分特征方程及拟合参数, 其变化走势见图 1。由表 3 看出, 各方程决定系数极高, 说明上述模型较好的描述了 5 种土壤水分的特征关系。参数 a 值也随着植被类型的不同, 呈现出有规律的变化, 其中华北落叶松人工林、天然长芒草、天然沙棘林、山桃人工林和弃耕地土壤表层的 a 值分别为 29.562、26.705、23.638、22.926 和 20.201, 说明各植被类型土壤表层的持水力依次减弱; 虽然各类型植被中、下层土壤的 a 值无明显地排序, 但可看出林、灌、草地的 a 值显然高于弃耕地, 说明植被对于土壤持水性能的改善具有显著作用。对同一植被类型的土壤来说, 土壤表层的 a 值均大于土壤中、下层, 说明土壤表层的持水能力要优于中、下层土壤。

表 3 5种植被类型的土壤水分特征方程

植被类型	土层深度 /cm	a	b	回归方程	决定系数 (R ²)
华北落叶松	0~30	29 562	0.127 3	$\theta = 29.562 S^{-0.1273}$	0.993 1
	30~60	21 850	0.129 0	$\theta = 21.850 S^{-0.1290}$	0.987 2
人工林地	60~90	20 028	0.088 7	$\theta = 20.028 S^{-0.0887}$	0.986 9
天然长芒草地	0~20	26 705	0.137 3	$\theta = 26.705 S^{-0.1373}$	0.993 3
	20~40	20 135	0.100 1	$\theta = 20.135 S^{-0.1001}$	0.977 1
	40~90	23 638	0.140 3	$\theta = 23.638 S^{-0.1403}$	0.985 8
天然沙棘林地	0~40	23 638	0.140 3	$\theta = 23.638 S^{-0.1403}$	0.985 8
	40~90	19 028	0.140 5	$\theta = 19.028 S^{-0.1405}$	0.989 4
	90~120	21 331	0.152 1	$\theta = 21.331 S^{-0.1521}$	0.991 4
山桃人工林地	0~30	22 926	0.144 6	$\theta = 22.926 S^{-0.1446}$	0.986 1
	30~70	16 719	0.197 7	$\theta = 16.719 S^{-0.1977}$	0.987 6
弃耕地	0~20	20 201	0.139 1	$\theta = 20.201 S^{-0.1391}$	0.993 5
	20~60	15 127	0.161 4	$\theta = 15.127 S^{-0.1614}$	0.991 1

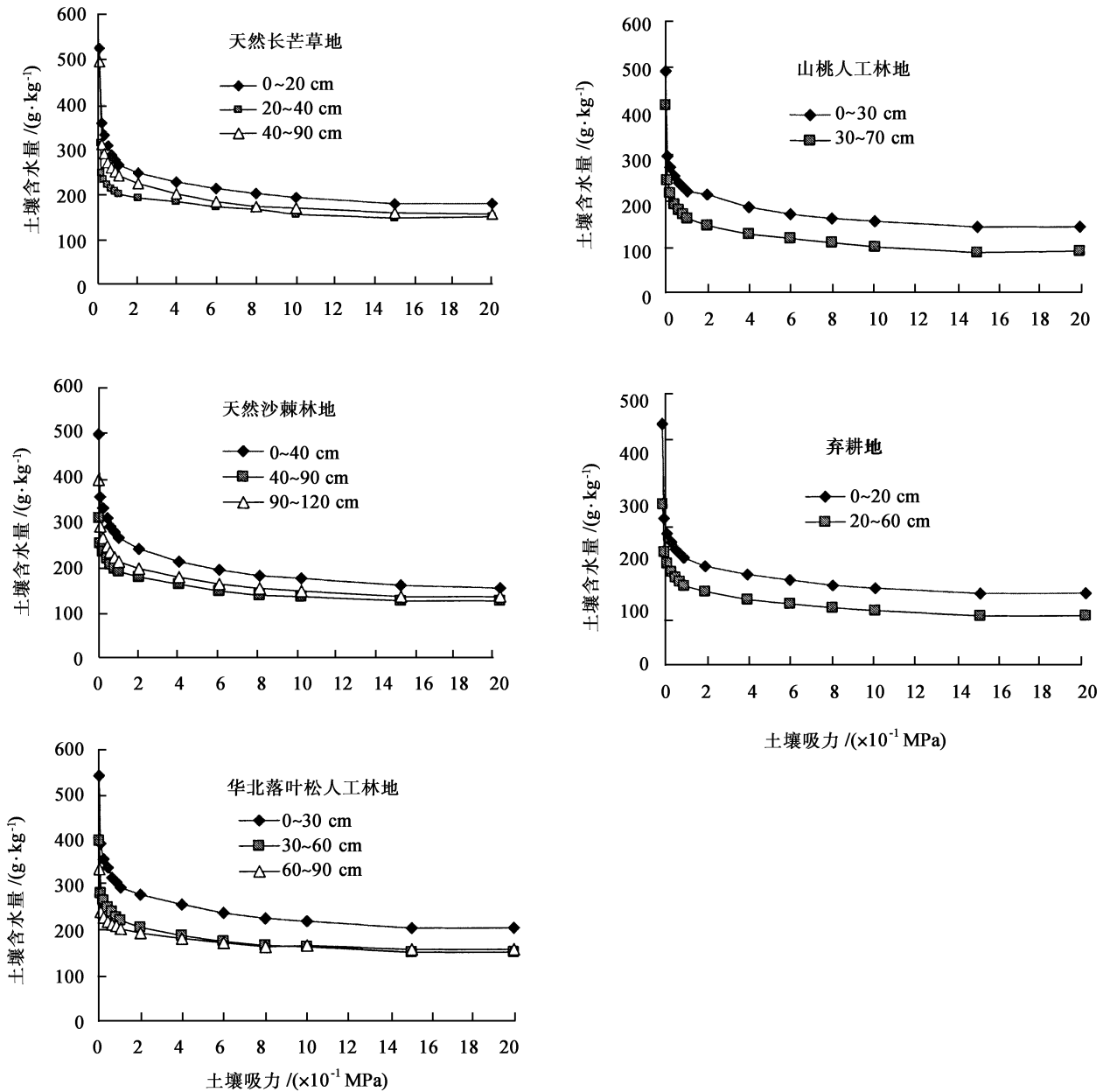


图 1 5种植被类型土壤的水分特征曲线

为进一步了解各种植被土壤的持水性能, 列出了土壤不同吸力段的土壤含水量(表 4)。在低吸力阶段(0.01~0.06 MPa), 天然长芒草地、天然沙棘林地和华北落叶松人工林地土壤的含水量差别不明显, 山桃人工林略低, 其值为 218.1~283.0 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 弃耕地最小, 其值为 192.0~244.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在中吸力阶段(0.1~1.5 MPa), 华北落叶松人工林地的土壤含水量最高(169.7~239.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 天

然长芒草地次之(160.3~236.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 天然沙棘林地再次(140.9~224.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 山桃人工林地较低(119.9~198.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 弃耕地最低(113.5~176.4 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。总体上, 不同植被类型土壤持水性能由高到低的次序为: 华北落叶松人工林地、天然长芒草地、天然沙棘林地、山桃人工林地和弃耕地。

表 4 在不同吸力段 5 种植被类型的土壤含水量

 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

植被类型	低吸力段 / MPa				中吸力段 / MPa					
	0.01	0.03	0.04	0.06	0.1	0.2	0.4	0.6	1.0	1.5
天然长芒草地	305.6	285.7	267.5	252.4	236.1	221.0	203.4	189.3	172.0	160.3
天然沙棘林地	301.2	278.8	259.3	244.6	224.5	205.7	185.3	169.8	153.7	140.9
华北落叶松人工林地	304.0	283.2	268.5	255.8	239.3	225.0	207.6	194.0	180.4	169.7
山桃人工林地	283.0	254.0	232.9	218.1	198.1	185.7	162.4	150.5	132.4	119.9
弃耕地	244.4	220.1	204.0	192.0	176.4	163.5	148.2	138.3	123.5	113.5

3.3 土壤比水容量与其供水性能

土壤水分特征曲线的斜率称为比水容量, 它表示单位吸力变化时单位质量土壤可释放或储存的水量, 是评价土壤水分有效性、供水性和耐旱性的重要指标。由于在同一吸力下, 土壤比水容量主要随 ab 值而增大, 所以 ab 值越大, 说明其释水或供水性能越好^[12, 13]。

从表 5 看出: 随着土壤水吸力的增加, 不同植被类型土壤的比水容量逐渐降低, 说明土壤的供水性能随着土壤吸力的增加而呈递减趋势。在不同土壤吸力阶段, C_0 值的变化幅度不同, 在 0.01~0.4 MPa 内, 比水容量减小的幅度较大, 其数量级从 10^{-1} ~ 10^{-2} ~ 10^{-3} 发生变化, 说明土壤释出的水量比较多, 土壤的供水性能较好; 而在 0.4~1.5 MPa 时, 土壤水吸力的数值保持在 10^{-3} 数量级范围内, 说明随着土壤水吸力的增大, 土壤释出的水量比较少, 土壤的供水性能相应减弱。几种植被类型的土壤表层 C_0 值虽无明显排列顺序, 但华北落叶松人工林地、天然长芒草地和天然沙棘林地 C_0 值显然大于山桃人工林和弃耕地。

对 ab 值的大小比较表明, 各植被类型同一土壤层次 ab 值的大小顺序与 a 值排序相同, 说明各类植被土壤的供水性能为: 华北落叶松人工林 > 天然长芒草 > 天然沙棘林 > 山桃人工林 > 弃耕地。同一植

被类型的土壤 ab 值表层均大于下层, 说明土壤表层供水能力大于下层。

4 结论

(1) 不同植被类型各层次土壤密度的大小排序为弃耕地 > 山桃人工林 > 天然长芒草 > 华北落叶松人工林 > 天然沙棘林, 总孔隙度恰恰相反, 说明天然长芒草、华北落叶松人工林和天然沙棘林的土壤水分物理性质要好于其它 2 种类型。

(2) 不同植被类型土壤表层的持水力大小顺序为华北落叶松人工林 > 天然长芒草 > 天然沙棘林 > 山桃人工林 > 弃耕地; 同一植被类型土壤的持水力随土层深度的加深而减小。

(3) 各种植被类型土壤的供水性能随着土壤吸力的增加而呈递减趋势; 不同植被类型土壤的供水性能排序为: 华北落叶松人工林 > 天然长芒草 > 天然沙棘林 > 山桃人工林 > 弃耕地; 同一植被类型土壤表层的供水性能比下层的好。

(4) 华北落叶松人工林、天然长芒草和天然沙棘林的土壤持水性能和供水性能均明显优于弃耕地, 土壤总孔隙度均比弃耕地的大, 而土壤密度却均比弃耕地的小, 这说明通过植树种草可改善土壤结构、降低土壤密度和增加土壤总孔隙度等物理性质而对其持水供水性能可产生积极作用。

表 5 不同植被类型不同吸力条件的土壤比水容量 (C_{θ}) $\text{mL} \cdot 10^{-1} \text{MPa}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

植被类型	土层深度 / cm	$a \cdot b$ 值	土壤水吸力 / MPa					
			0.01	0.03	0.04	0.06	0.1	0.2
天然长芒草地	0~20	3.667	5.030×10^{-1}	1.442×10^{-1}	1.040×10^{-1}	6.555×10^{-2}	3.667×10^{-2}	1.667×10^{-2}
	20~40	2.016	2.538×10^{-1}	7.579×10^{-2}	5.523×10^{-2}	3.535×10^{-2}	2.016×10^{-2}	9.402×10^{-3}
	40~90	3.316	4.581×10^{-1}	1.309×10^{-1}	9.428×10^{-2}	5.938×10^{-2}	3.316×10^{-2}	1.505×10^{-2}
天然沙棘林地	0~40	3.316	4.581×10^{-1}	1.309×10^{-1}	9.428×10^{-2}	5.938×10^{-2}	3.316×10^{-2}	1.505×10^{-2}
	40~90	2.673	3.695×10^{-1}	1.055×10^{-1}	7.602×10^{-2}	4.787×10^{-2}	2.673×10^{-2}	1.213×10^{-2}
	90~120	3.244	4.605×10^{-1}	1.299×10^{-1}	9.324×10^{-2}	5.844×10^{-2}	3.244×10^{-2}	1.460×10^{-2}
华北落叶松 人工林地	0~30	3.763	5.045×10^{-1}	1.462×10^{-1}	1.057×10^{-1}	6.693×10^{-2}	3.763×10^{-2}	1.723×10^{-2}
	30~60	2.819	3.794×10^{-1}	1.097×10^{-1}	7.931×10^{-2}	5.018×10^{-2}	2.819×10^{-2}	1.289×10^{-2}
	60~90	1.776	2.179×10^{-1}	6.589×10^{-2}	4.817×10^{-2}	3.098×10^{-2}	1.776×10^{-2}	1.353×10^{-2}
山桃人工林地	0~30	3.315	4.625×10^{-1}	1.315×10^{-1}	9.462×10^{-2}	5.949×10^{-2}	3.315×10^{-2}	1.499×10^{-2}
	30~70	3.305	5.211×10^{-1}	1.398×10^{-1}	9.904×10^{-2}	6.094×10^{-2}	3.305×10^{-2}	1.441×10^{-2}
弃耕地	0~20	2.810	3.871×10^{-1}	1.107×10^{-1}	7.980×10^{-2}	5.028×10^{-2}	2.810×10^{-2}	1.276×10^{-2}
	20~60	2.441	3.540×10^{-1}	9.884×10^{-2}	7.077×10^{-2}	4.419×10^{-2}	2.441×10^{-2}	1.092×10^{-2}

植被类型	土层深度 / cm	$a \cdot b$ 值	土壤水吸力 / MPa				
			0.4	0.6	1.0	1.5	2.0
天然长芒草地	0~20	3.667	7.578×10^{-3}	4.778×10^{-3}	2.673×10^{-3}	1.685×10^{-3}	1.215×10^{-3}
	20~40	2.016	4.386×10^{-3}	2.808×10^{-3}	1.601×10^{-3}	1.025×10^{-3}	7.467×10^{-4}
	40~90	3.316	6.826×10^{-3}	4.299×10^{-3}	2.401×10^{-3}	1.512×10^{-3}	1.089×10^{-3}
天然沙棘林地	0~40	3.316	6.826×10^{-3}	4.299×10^{-3}	2.401×10^{-3}	1.512×10^{-3}	1.089×10^{-3}
	40~90	2.673	5.501×10^{-3}	3.464×10^{-3}	1.935×10^{-3}	1.218×10^{-3}	8.775×10^{-4}
	90~120	3.244	6.569×10^{-3}	4.117×10^{-3}	2.286×10^{-3}	1.433×10^{-3}	1.029×10^{-3}
华北落叶松 人工林地	0~30	3.763	7.886×10^{-3}	4.993×10^{-3}	2.807×10^{-3}	1.777×10^{-3}	1.285×10^{-3}
	30~60	2.819	5.893×10^{-3}	3.728×10^{-3}	2.094×10^{-3}	1.325×10^{-3}	9.576×10^{-4}
	60~90	1.776	3.927×10^{-3}	2.526×10^{-3}	1.448×10^{-3}	9.314×10^{-4}	6.810×10^{-4}
山桃人工林地	0~30	3.315	6.782×10^{-3}	4.264×10^{-3}	2.376×10^{-3}	1.494×10^{-3}	1.075×10^{-3}
	30~70	3.305	6.282×10^{-3}	3.866×10^{-3}	2.097×10^{-3}	1.290×10^{-3}	9.141×10^{-4}
弃耕地	0~20	2.810	5.793×10^{-3}	3.650×10^{-3}	2.040×10^{-3}	1.285×10^{-3}	9.262×10^{-4}
	20~60	2.441	4.880×10^{-3}	3.047×10^{-3}	1.684×10^{-3}	1.051×10^{-3}	7.527×10^{-4}

农业学报, 1999, 8(6): 44~47

参考文献:

- [1] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [2] 张小泉, 张清华, 毕树峰, 等. 太行山北部中山幼林地土壤水分的研究 [J]. 林业科学, 1994, 30(3): 193~200
- [3] 周泽福, 李昌哲. 北京九龙山不同植被土壤水分特征的研究 [J]. 林业科学研究, 1994, 7(1): 48~53
- [4] 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
- [5] 赵世伟, 周印东, 吴金水. 子午岭北部不同植被类型土壤水分特征研究 [J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 119~122
- [6] 孙中峰, 张学培, 刘卉芳, 等. 晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究 [J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 343~347
- [7] 史竹叶, 赵世伟. 黄土高原土壤持水曲线的计算方法 [J]. 西北农业学报, 1999, 8(6): 44~47
- [8] 姚其华, 邓银霞. 土壤水分特征曲线模型及其预测方法的研究进展 [J]. 土壤通报, 1992, 23(3): 142~144
- [9] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of water I. Redistribution [J]. Water Resources, 1970, 6: 851~861
- [10] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil Sci, 1974, 117: 311~314
- [11] van Genuchten R. Predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892~898
- [12] 沈思源, 席承藩. 淮北主要土壤持水性能及其与颗粒组成的关系 [J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 34~43
- [13] 王孟本, 李洪建. 黄土高原人工林水分生态研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2001