

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

宁 婷^{1,2}, 郭忠升^{1,3}, 李耀林^{1,2}

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探索黄土丘陵区不同深度土壤的持水和供水特性, 选择典型多年撂荒坡地, 分层取 0—400 cm 纵剖面原状土样测其主要土壤理化指标和土壤水分特征曲线, 分析其土壤水分特征曲线及主要水分常数的垂直变化规律。结果表明: 研究区各土层土壤水分特征曲线可用 Gardner 幂函数方程进行很好地拟合。方程中的参数 a 、 b 均表现出先减少后增加的垂直变化规律, 极小值分别出现在 160 cm 和 120 cm 土深处; 由方程推得的各水分常数的垂直变化规律与之相似, 极小值也位于 160 cm 土深处。土壤的持水和供水能力以 0—40 cm 和 240—400 cm 土层较强, 中间土层较弱。土壤物理性粘粒含量、有机质含量、粘粒含量以及容重是影响上述垂直变异性的主要因子。本区土壤水资源利用限度等于 0—290 cm 范围内各土层土壤含水量降至凋萎系数时的土壤水资源残留量, 为 222.84 mm。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤水分特征曲线; 土壤水分常数; 垂直变异; 土壤干层; 土壤水资源利用限度
中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2014)03-0166-05
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2014.03.031

Soil Water Characteristic Curves and Soil Water Constants at Different Depths in the Abandoned Sloping Field of Loess Hilly Region

NING Ting^{1,2}, GUO Zhong-sheng^{1,3}, LI Yao-lin^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling,

Shannxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100)

Abstract: To study soil water-holding capacity and water-supplying capacity at different soil depths (0—400 cm) in Loess Hilly Region, a typical sloping field which abandoned for many years was selected and undisturbed soil at different depths were taken. Then the soil water characteristic curves (SWCC) as well as important physical and chemical indicators were measured, and the vertical variations were analyzed. The results showed that SWCC at different soil depths could be well described by Gardner power function. Both parameter a and parameter b in the function decreased at first and then began to rise, and the minimal values respectively appeared at the depth of 160 cm and 120 cm. Soil water constants calculated from the model showed a same vertical changing trend with the above mentioned parameters, and the minimal values was also located in 160 cm. Soil water-holding capacity and water-supplying capacity of 80—200 cm layer were weak compared to that of 0—40 cm layer and 240—400 cm layer. Factors affecting these trends mainly included soil physical clay content, organic matter content, clay content, and bulk density. Besides, soil water resources use limit (SWRUL) in this region was 222.84 mm, which was estimated when each soil water content in 0—290 cm layer was less than the corresponding wilting coefficient.

Key words: Loess Hilly region; soil water characteristic curve; soil water constant; vertical variation; dried soil layer; soil water resources use limit

土壤水的能量和数量之间存在某种对应关系, 在一定的温度条件下, 这种关系仅与土壤本身的特性有关^[1]。土壤水分特征曲线 (SWCC) 即表征土壤水势与土壤含水量之间定量关系的曲线, 是土壤最重要的水力特性之一。据此, 可了解给定土壤的一些基本水分常数和水动力学参数, 反映土壤的持水和供水能力, 对于研究土壤水分的补给、贮存、蒸散以及土壤—植物—大气连续体中水流的运动等有着重要意义^[2]。

收稿日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵半干旱区人工林草地土壤水资源利用限度”(41271539)

作者简介: 宁婷(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: ting05392007@126.com

通讯作者: 郭忠升(1963—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤水分与植物生长、森林水文与水土保持等研究。E-mail: zhongshenguo@sohu.com

黄土丘陵区大部分地区水资源紧缺,土壤水分成为植物生长和植被恢复的主要限制因子,本区土地植被承载力实质上是土壤水分植被承载力^[3-5]。为治理水土流失,该区近年来大面积实施退耕还林还草工程。但由于群落密度过大和生产力过高等原因,致使人工林草地深层土壤严重干燥化^[3,6]。在人工植被恢复过程中,应根据土壤水资源状况,适时适量地调控植物水(植物生长与土壤水分)关系,而不是等到土壤干层形成、植被衰败后再试图恢复土壤水分。植物水关系调控的理论依据,对于成林而言,是土壤水分植被承载力^[7],对于幼林则为土壤水资源利用限度^[8]。为此,本研究选取典型多年撂荒地,集中对其0—400 cm垂直剖面上各土层土壤水分特征曲线进行定量研究,旨在反映土壤基本理化特征与水分特征之间的联系,获得不同深度土壤主要水分特征常数,并探讨研究区土壤干层的划分标准以及土壤水资源利用限度的计算方法,以期为该区土壤水资源可持续利用和植被恢复工作的顺利开展提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏固原上黄生态试验站,地处宁南半干旱黄土丘陵区 35°59′—36°02′N,106°26′—106°30′E 范围内。区内沟沿线以下坡度>25°,海拔高度1 534~1 824 m。研究区降雨年际变化大,年降雨量为259.9~634.7 mm,平均为414.9 mm;年内降水分配不均,主要集中在6—9月,期间降雨量可占到年降雨量的70%以上,无霜期152 d。土壤类型为黄绵土,植被类型为森林草原向典型草原过渡。撂荒地植被以多年生丛生低矮禾草为主,伴以少量旱生灌木、半灌木,代表植被有长茅草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、芨芨(*Artemisia giraldii*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等,覆盖度约为60%,存在土壤结皮现象。

1.2 试验设计

在对研究区进行多次踏查基础上,于2002年选定1块典型多年撂荒地,建立面积为100 m²(20 m长×5 m宽)的径流小区。在小区中心地带水平安置2根长度为400 cm的中子仪铝合金套管,用CNC503A(DR)型智能中子水分仪进行剖面土壤水分的长期定位观测,观测周期为15 d。2012年9月在小区附近挖1个400 cm深的土壤剖面,采用环刀(容积100 cm³)分层取原状土样,每层重复3次。具体取土深度为5,20,40,80,120,160,200,240,320,400 cm,所代表的土层范围分别对应于0—10 cm,10—30 cm,30—60 cm,60—100 cm,100—140 cm,140—180 cm,180—220 cm,220—280 cm,280—360 cm及360—400 cm。将所取10个土层的30个样品带回黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室。同时,每层取扰动土100 g用于颗粒组成、有机质含量等指标测定。

1.3 测定项目与方法

土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙度、饱和含水量采用环刀法测定,非毛管孔隙度等于总孔隙度与毛管孔隙度之差。有机质含量采用重铬酸钾容量法测定。颗粒组成采用Master sizer2000激光粒度仪测定,并按照美国制标准进行粒径分级。土壤水分特征曲线则采用离心机法测定,离心机型号为日本HITACHI公司所生产的CR21型高速恒温冷冻离心机。试验时,于20℃恒温下分别设定吸力值为0.01,0.02,0.04,0.06,0.10,0.40,0.60,0.80,1.00 MPa时的相应转速后,将土样离心至平衡时间,记录设定吸力下的土壤质量含水量。同时,由于黄绵土在释水时有一定的收缩性,试验过程中需用游标卡尺记录每次离心后土样的收缩量,以计算不同吸力下供试土壤的容积含水量。采用Gardner幂函数方程对土壤水分特征曲线进行模拟: $\theta = aS^{-b}$

式中: θ 为土壤容积含水量(cm³/cm³); S 为土壤水吸力(MPa); a, b 为参数。

比水容量由Gardner方程求得: $C(\theta) = d\theta/d\psi = -d\theta/dS = abS^{-(b+1)}$

式中: θ, S, a, b 的含义同上; ψ 为土壤基质势(MPa), $\psi = -S$ 。

土壤田间持水量和凋萎系数由土壤水分特征曲线推得,分别对应水吸力为0.033 MPa和1.5 MPa时的土壤容积含水量,二者之差即土壤最大有效含水量。

采用SPSS 18.0软件进行数据统计、相关性分析以及土壤水分特征曲线表达式的拟合,用Excel 2007软件进行回归分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤主要理化指标的垂直变异

由表1可知,黄绵土剖面0—400 cm的土壤容重介于1.191~1.266 g/cm³之间,平均值为1.25 g/cm³;有机质含量介于2.50~6.86 g/kg之间,平均值为2.80 g/kg。随着土层深度的增加,土壤容重整体上呈现递增

趋势,在重力的挤压下,底层土壤土粒排列更为紧密。有机质含量的变化趋势与容重相反,在表土层 5 cm 处有机质聚集,含量较高,为 6.86 g/kg;20 cm 处陡降至 3.69 g/kg;120 cm 土深以下,其含量始终在一个较低的水平上波动。这一变化趋势与撂荒地植被根系的自然分布规律基本吻合。从颗粒组成来看,黄绵土中粉粒的相对含量最高,砂粒次之,粘粒最少。土壤粘粒含量在纵深剖面上先减少后有所增加,砂粒含量的变化趋势反之,粉粒含量波动性相对较大。土壤物理性粘粒含量的平均值为 21.63%,其垂直变化规律与粘粒含量相一致。坡地撂荒多年后,自然恢复对土壤物理性质的改良深度及程度都较有限。

土壤孔隙度也是反映土体结构状况和衡量土壤肥力的重要指标。本研究中,各土层土壤总孔隙度由容重和比重计算得到。因此,该项指标的垂直变化规律与土壤容重恰好相反,即随土层深度的增加而递减,最小值为 52.23%。5 cm 和 20 cm 土层的土壤总孔隙度明显高于其他土层,表明其物理通透性较好。毛管孔隙度在纵深剖面上也表现出“下降—上升”的变化趋势,非毛管孔隙度则始终呈现下降趋势。一般认为,土壤非毛管孔隙度在 20%~40% 之间时,对植被生长较为有利^[9]。而研究区除了近地表 5 cm 和 20 cm 土层非毛管孔隙度稍高外,其他土层均较低,并不十分适宜于植物根系的生长发育。这可能也是当地植被自然演替进程缓慢的原因之一。

表 1 不同深度土壤主要理化指标

土层深度/ cm	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	有机质含量/ ($g \cdot kg^{-1}$)	颗粒组成/%			物理性粘粒 含量/%	总孔隙 度/%	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%
			粘粒	粉粒	砂粒				
5	1.191	6.86	13.76	65.68	20.56	24.92	55.06	35.01	20.05
20	1.214	3.69	13.19	68.67	18.14	23.17	54.19	33.89	20.30
40	1.225	3.10	10.99	71.63	17.38	21.55	53.77	34.21	19.56
80	1.234	3.00	11.94	70.39	17.67	20.99	53.43	34.07	19.36
120	1.246	2.62	11.42	68.00	20.58	21.58	52.98	33.43	19.55
160	1.244	2.56	10.75	67.73	21.52	20.05	53.06	33.92	19.14
200	1.252	2.52	11.60	71.20	17.20	20.28	52.75	33.89	18.86
280	1.264	2.61	11.28	72.34	16.38	22.29	52.30	34.24	18.06
320	1.266	2.50	12.47	70.93	16.60	22.73	52.23	34.22	18.01
400	1.263	2.58	12.57	71.51	15.92	22.50	52.34	35.04	17.30

2.2 土壤水分特征曲线的垂直变异

以土壤水吸力为横坐标,不同水吸力下 3 次重复的土壤容积含水量的平均值为纵坐标,作各土层的土壤水分特征曲线,如图 1。从图中可以看出,随着土壤水吸力的增加,研究区各土层土壤含水量均表现出“快速下降—缓慢下降—基本平稳”的变化趋势,曲线形态较为接近。但在同一吸力条件下,各土层所保持土壤水分的量有所不同,反映在图上即曲线高低各不相同。在整个剖面上,以 5 cm 土层土壤在各吸力下的含水量最高,160 cm 土层最低。5—160 cm 土层土壤水分特征曲线高度渐低,160—400 cm 土层曲线高度则呈现回升态势。其中,80—200 cm 土层相互之间差异较小,曲线近似重合。240—400 cm 土层的曲线回升幅度也较 0—40 cm 土层的下降幅度小一些。

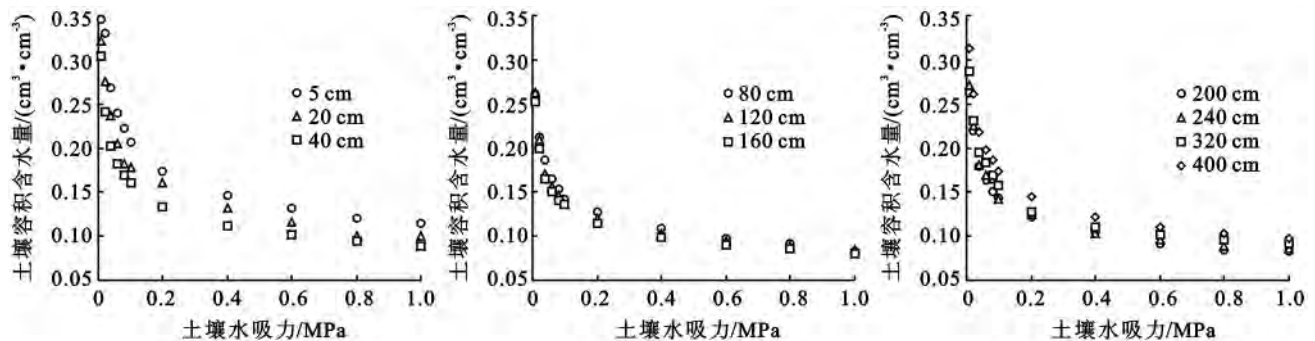


图 1 不同深度土壤水分特征曲线

为定量研究之便,采用 Gardner 幂函数方程对试验数据进行拟合,得到研究区不同深度的土壤水分特征曲线的表达式,如表 2。从表中可以看出,方程拟合系数 R^2 在 0.961 0~0.988 5 之间,拟合效果较佳。方程中参数 a 决定曲线高低,表示持水能力大小, a 值越大则持水能力越强;参数 b 决定曲线的走向,其物理意义为土壤含水量随基质势降低而递减的快慢, b 值越大则曲线弧度越大、变化越剧烈^[10]。本研究结果显示,参数 a 、 b 均呈现先减少后增加的垂直变化规律,极小值分别位于 160 cm 和 120 cm 土层。整个研究剖面上, a 、 b 的变异系数分别为 12.99% 和 2.64%,处于中等变异和弱变异水平。这也再次验证了图 1 中各土层土壤水分特征曲线

高低各不相同,但曲线弧度却较为一致。具体来看,0—40 cm 和 240—400 cm 土层持水能力较强,中间土层的持水能力相对较差。另外,回归分析结果还表明,参数 a 、 b 之间的关系可用 $b=0.554a+0.200(R^2=0.9142)$ 来表示。据此,可建立研究区土壤水分特征曲线的单变量数学模型: $\theta=aS^{(-0.554a-0.200)}$ 。土壤水分特征曲线的斜率称为比水容量,表示单位吸力变化时单位质量土壤可释放或吸收的水量^[11]。它反映了不同吸力下土壤水分的有效量,其数值大小在一定程度上表示土壤的释水性和供水能力,是评价土壤水分有效性、供水性和耐旱性的重要指标^[12]。如表 2 所示,研究区各土层比水容量的表达式与土壤水分特征曲线表达式形式相同。因此,随着土壤水吸力的增加,不仅各土层土壤含水量会逐渐降低,其比水容量也将呈现递减趋势。

通常认为,土壤水吸力为 0.1 MPa 时的比水容量值可很好地表征土壤供水能力^[13]。由图 2 可知,该指标随土层深度的增加呈现先减少后增加的变化规律,这是由于其数值大小主要受表达式中参数 $a \cdot b$ 值大小的影响, $a \cdot b$ 值越大,土壤的供水或释水性能往往也就越好。在整个土壤剖面上,表层土壤的供水能力要优于深层土壤,这是因为表层土壤有机质含量较高,土壤团粒结构性好,吸持水量也较其他土层高得多。进一步比较可知,中间土层供水能力最差。此外,当土壤水吸力增加至 0.4 MPa,即土壤含水量在 10%~15% 时,各土层的比水容量值已低至 10^{-2} 数量级。虽然此时土壤含水量尚在凋萎系数之上,但由于土壤水分的运动性和有效性均较低,已可能对供给植物生长耗水产生不利影响。

2.3 土壤水分常数的垂直变异

土壤水分常数主要包括反映土壤水分的物理特征及其对植物有效程度的各种特征值,可用来评价土壤中水分的保持和运动的状况、湿润程度和等级,也可以用来评价被植物吸收和利用的程度^[14]。由表 3 可知,研究区饱和含水量的平均值为 49.13%,田间持水量与凋萎系数的平均值分别为 20.10% 和 7.82%,最大有效水范围相对较宽,平均达 12.23%。这一水分性质说明该区土壤具有较大的有效水库容,水源涵养能力较强,理论上可很好地调控对植物的供水。整体来看,各土壤水分常数均呈现先减少后增加的垂直变化规律,在 160 cm 土层附近出现极小值。80—200 cm 土层范围内各水分常数都处于较低水平,表明其蓄水、持水以及供水能力均较弱。总体而言,不同土层之间土壤水分常数有较大差异,四者的变异系数分别为 10.70%,15.63%,12.67% 和 17.52%,属中等变异强度。

2.4 土壤理化特征与水分特征的相关性

毛细管理论认为,土壤水分特征曲线实际上反映了土壤孔隙状况和含水量之间的关系。因此,一切影响土壤孔隙状况和水分特性的因素都会对其产生影响^[15]。选择研究区各土层土壤的主要理化特征指标与对应的水分特征指标进行相关性分析,统计其相关系数,如表 4。由于参数 a 和参数 b 之间具有良好的正线性相关关系,其影响因子也大致相同。由表 4 可知,二者与容重之间呈极显著负相关($P<0.01$),与物理性粘粒含量、有机质含量以及粘粒含量之间呈极显著正相关($P<0.01$)。另外,参数 a 与毛管孔隙度之间的正相关关系也达到了显著水平($P<0.05$)。由土壤水分特征曲线推得的田间持水量、凋萎系数和最大有效含水量的影响因子与参数 a 大体一致。而与之相比,由环刀法测得的饱和含水量与容重的负相关关系以及与毛管孔隙度的正相关关系均未达到显著水平;与物理性粘粒含量、有机质含量和粘粒含量虽然也达到了极显著相关水平,但其 Person 相关系数较其他 3 种水分常数略低。综上所述,影响土壤水分特征曲线及各主要水分常数的因子首先

表 2 不同深度土壤水分特征曲线及比水容量表达式

土层深度/cm	土壤水分特征曲线表达式	拟合系数 R^2	比水容量表达式
5	$\theta=0.115S^{-0.262}$	0.9822	$\theta=0.0301S^{-1.262}$
20	$\theta=0.100S^{-0.257}$	0.9804	$\theta=0.0257S^{-1.257}$
40	$\theta=0.089S^{-0.252}$	0.9860	$\theta=0.0224S^{-1.252}$
80	$\theta=0.081S^{-0.246}$	0.9756	$\theta=0.0199S^{-1.246}$
120	$\theta=0.081S^{-0.242}$	0.9788	$\theta=0.0196S^{-1.242}$
160	$\theta=0.078S^{-0.243}$	0.9885	$\theta=0.0190S^{-1.243}$
200	$\theta=0.082S^{-0.245}$	0.9610	$\theta=0.0201S^{-1.245}$
240	$\theta=0.084S^{-0.244}$	0.9775	$\theta=0.0205S^{-1.244}$
320	$\theta=0.089S^{-0.247}$	0.9873	$\theta=0.0220S^{-1.247}$
400	$\theta=0.093S^{-0.250}$	0.9780	$\theta=0.0233S^{-1.250}$

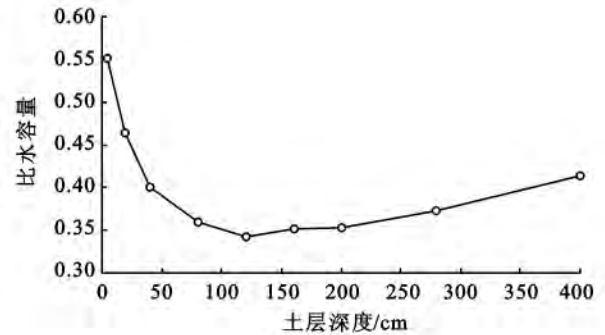


图 2 0.1 MPa 土壤水吸力下不同深度土壤比水容量

表 3 不同深度土壤主要水分常数

土层深度/cm	饱和含水量/%	田间持水量/%	凋萎系数/%	最大有效含水量/%
5	58.09	28.11	10.34	17.77
20	56.42	24.03	9.01	15.02
40	52.04	21.02	8.04	12.99
80	46.98	18.75	7.33	11.42
120	44.12	18.49	7.34	11.15
160	42.88	17.87	7.07	10.80
200	47.10	18.91	7.42	11.49
240	46.50	19.31	7.61	11.70
320	52.26	20.67	8.05	12.62
400	54.20	21.82	8.40	13.42

是土壤质地,其次是土壤有机质含量以及容重。而与粘粒含量相比,物理性粘粒含量更能体现土壤质地特性,可用作研究区土壤质地划分的依据。究其原因,土壤物理性粘粒含量越高,其比表面越大,对水的吸持能力也就越强。上述分析为研究区土壤水分特征曲线的预测提供了可能。

表 4 土壤理化特征指标与水分特征指标的 Pearson 相关系数

土壤指标	参数 a	参数 b	饱和含水量	田间持水量	凋萎系数	最大有效含水量
容重	-0.698**	-0.797**	-0.525	-0.723*	-0.696*	-0.736*
有机质含量	0.880**	0.844**	0.810**	0.887**	0.879**	0.890**
粘粒含量	0.871**	0.799**	0.727*	0.864**	0.871**	0.860**
砂粒含量	0.402	0.264	0.279	0.308	0.298	0.312
物理性粘粒含量	0.916**	0.802**	0.747**	0.903**	0.918**	0.895**
毛管孔隙度	0.659*	0.593	0.426	0.650*	0.660*	0.645*
非毛管孔隙度	0.325	0.453	0.570	0.354	0.322	0.369

注: * 表示在双尾检验达 0.01 显著水平, * 表示双尾检验达 0.05 显著水平。

3 结论与讨论

(1) 研究区撂荒地黄绵土平均容重为 1.25 g/cm^3 , 平均有机质含量仅为 2.80 g/kg 。随着土层深度的增加,前者呈整体递增趋势,后者呈幂函数减少趋势。土壤颗粒组成以粉粒居多,砂粒次之,粘粒最少。总孔隙度的垂直变化规律与容重相反,粘粒含量、物理性粘粒含量、毛管孔隙度的垂直变化规律为先减少后有所增加,非毛管孔隙度则持续减少。

(2) 研究区各土层土壤水分特征曲线可用 Gardner 幂函数方程进行很好地拟合,方程中参数 a 、 b 以及由该方程推得的主要水分常数均呈现先减少后增加的垂直变化规律。土壤的持水和供水能力以 $0-40 \text{ cm}$ 和 $240-400 \text{ cm}$ 较强,中间土层较弱。造成这一垂直变异性的因子主要包括土壤物理性粘粒含量、有机质含量、粘粒含量以及容重等。

(3) 土壤干层的量化指标目前尚未统一。凋萎系数是植物可利用的土壤有效含水量的下限,可作为研究区土壤干层的判别依据。凋萎系数的垂直变异性,致使不同深度土壤干层的划分界限各异。另外,土壤干层还有临时干层和永久干层之分。降水最大入渗深度范围内的土壤干层在丰水年可能得到恢复,最大入渗深度以下则会因得不到有效补给而演化成永久干层。消除和避免永久干层的出现,是控制植物对土壤水分利用程度的重要依据。郭忠升^[8]将土壤水资源利用限度(SWRUL)定义为降水最大入渗深度范围内土层全部为干层时的土壤水资源残留量。多年土壤水分定位观测数据表明,研究区最大降水入渗深度为 290 cm ,出现在特大丰水年过后的第 2 年^[16]。因此,本区土壤水资源利用限度在数值上等于 $0-290 \text{ cm}$ 范围内各土层土壤含水量降至凋萎系数时的土壤储水量,为 222.84 mm 。换言之,当研究区 $0-290 \text{ cm}$ 范围内的土壤储水量接近或达到 222.84 mm 时,就需采取有效措施,如降低植被密度或生产力等,来减少土壤水分消耗量,从而实现土壤水资源的可持续利用和林草植被的可持续经营。

参考文献:

- [1] 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版,2006.
- [2] 孙迪,夏静芳,关新德,等. 长白山阔叶红松林不同深度土壤水分特征曲线[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1405-1409.
- [3] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林[J]. 自然资源学报,2001,16(5):433-438.
- [4] 徐炳成,山仑,陈云明. 黄土高原半干旱区植被建设的土壤水分效应及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2003,1(4):32-35.
- [5] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林草地土壤旱化与土壤水分植被承载力[J]. 生态学报,2003,23(8):1640-1647.
- [6] Chen H S, Shao M A, Li Y S. Soil desiccation in the Loess Plateau of China[J]. Geoderma,2008,143:91-100.
- [7] Guo Z S, Shao M A. Impact of afforestation density on soil and water conservation of the semiarid Loess Plateau, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2013,68(5):401-410.
- [8] 郭忠升. 黄土丘陵半干旱区土壤水资源利用限度[J]. 应用生态学报,2010,21(12):3029-3035.
- [9] 吴长文,王礼先. 林地土壤孔隙的贮水性能分析[J]. 水土保持研究,1995,2(1):77-79.
- [10] 谢静,关文彬,崔国发. 锡林郭勒草原不同植被类型的土壤水分特性[J]. 东北林业大学学报,2009,37(1):45-49.
- [11] 雷志栋,杨诗秀. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1980.
- [12] 王孟本,柴宝峰,李洪建,等. 黄土区人工林的土壤持水力与有效水状况[J]. 林业科学,1999,35(2):7-14.
- [13] 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.
- [14] 张景略,苗付山. 黄泛平原不同质地土壤的物理性粘粒含量与几个土壤水分常数的关系[J]. 土壤通报,1984(5):207-209.
- [15] 马昌臣,王飞,穆兴民,等. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):105-109.
- [16] 郭忠升,邵明安. 半干旱区人工林地土壤入渗过程分析[J]. 土壤学报,2009,46(5):953-958.