

甘肃省典型土壤持水特性及影响因素研究

刘小宁^{1,2}, 隆瑞红^{1,3}, 罗珠珠^{1,2}, 蔡立群^{1,2,4}, 董 博¹

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 宕昌县财政局, 甘肃 陇南 748500; 4. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 研究了甘肃省 14 个类型区 12 种典型土壤的物理性质, 并测得不同水势下的土壤重量含水量, 利用 Gardner 经验方程拟合出其土壤水分特征曲线, 对不同土壤的持水性及其影响因素作了研究。结果表明: 甘肃省典型土壤持水能力差异明显, 整体而言, 甘南高原类型区土壤持水和供水能力较好, 区内典型土壤拟合参数 *A* 值均在 20 以上, 且较为稳定; 陇南山地丘陵类型区土壤供水能力最佳, 持水能力较好, 区内典型土壤拟合参数 *A* 值均在 24 以上, 但稳定性较弱; 黄土高原类型区内土壤持水性适中, 供水能力较弱, 稳定性最佳; 河西干旱半干旱类型区的土壤持水、供水能力及稳定性均较差, 区内典型土壤除潮土外拟合参数 *A* 值均在 17 以下; 土壤质地 (<0.002 mm 粘粒含量)、总孔隙度对甘肃省土壤的持水性影响最为显著, 其次为土壤毛管孔隙度、密度和容重。

关键词: 甘肃省典型土壤; 土壤水分特征曲线; 比水容量; 土壤物理性质; 影响因素

中图分类号: S152.7⁺1 **文献标志码:** A

Research on water-holding capacity and related factors
in typical soils of Gansu province

LIU Xiao-ning^{1,2}, LONG Rui-hong^{1,3}, LUO Zhu-zhu^{1,2}, CAI Li-qun^{1,2,4}, Dong Bo¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China;
3. Tanchang County Finance Bureau, Longnan, Gansu 7485003, China;
4. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-saving, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The soil water-holding capacity is evidence to measure the absorption and holding abilities of soil. This research studied twelve soil physical properties in four soil areas from Gansu, and measured the gravity moisture content in different soil suctions, utilized the Gardner experience equation to plot a soil water characteristic curve, and investigated the typical soil water-holding capacity and the influencing factors. The results show that there are significant variations for typical soil water-holding capacities in Gansu. In general, the soil water-holding capacity and water supply lability in the Gannan plateau are superior and stable, and the parameter *A* of typical soil in this region all exceeded 20. The best soil water supply ability belongs to the mountainous and hilly region in Longnan, with parameter *A* value of typical soil reaching 24. Its water-holding capacity is good, but the stability is weak. The soil in the Loess Plateau has moderate water-holding ability and feeble water supply, as well as the best stability, compared with the other research areas. Both soil water-holding capacity, water supply capacity and the stability in the Hexiarid and semi-arid regions are poor, the parameter *A* of this typical soil was all lower than 17, except for the fluvo-aquic soil. In addition, soil texture (<0.002 mm clay content) and total porosity affect the soil water-hold capacity obviously, followed by capillary porosity, density and volume weight.

Keywords: typical soil of Gansu province; soil water characteristic curve; specific water capacity; soil physical properties; influencing factors

收稿日期: 2016-01-22
基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (145RJZA106)
作者简介: 刘小宁 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学、恢复生态学方面研究。E-mail: liuxiaoning36@sina.com。
通信作者: 蔡立群 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事恢复生态学、耕作学方面的研究。E-mail: cailq@gsau.edu.cn。

土壤水指土壤颗粒依靠土粒表面的分子吸附作用而保持在土壤孔隙间的水分,它影响着土壤的理化性质和肥力,提高土壤持水能力可以改善土壤抗旱性,促进农业增产增收^[1]。

甘肃省位于中国西部地区,农业产业发挥着重要作用。由于甘肃绝大部分地区处在我国干旱半干旱区,降水少,降水变率大,蒸发量高,土壤中水分含量少,农业发展受阻。因此,探明土壤持水性及影响因素,为合理的水分管理措施提供科学依据,对于甘肃省农业产业的可持续发展具有重要意义。

纵观甘肃省土壤持水性的研究,主要偏重于以不同处理对单一土壤持水性的影响或局部地区部分土壤持水性的评价。杨治等^[2]对甘肃黄绵土、黑垆土、褐土等几种旱地土壤低吸力段持水性能进行了初步研究,结果表明黑垆土、黄绵土的供水能力大于褐土和红土。李小刚等^[3-4]对甘肃省中东部地区土壤的颗粒组成、土壤最大吸湿量和凋萎湿度及它们之间的关系进行了研究,发现土壤最大吸湿水含量与凋萎湿度受颗粒组成影响很大,与物理性粘粒含量均呈显著直线正相关。李成有等^[5]通过对甘肃定西地区黄绵土持水性及其影响因素的研究发现土壤容重与土壤持水性呈负相关关系,但土壤孔隙度愈大,土壤持水能力反而越弱。但是甘肃省土地辽阔,地域差异极大,土壤类型复杂多样,共分 37 个土类 100 个亚类,171 个土属,285 个土种^[6],以单一的土壤或局部地区土壤作为研究对象难以对甘肃省土壤持水性做出全面的评价。纵观甘肃省土壤持水性的

研究,将研究区域定位到全省范围的研究十分少见。故本研究结合甘肃省气候与地形特征,将全省按照河西干旱半干旱类型区、黄土高原类型区、甘南高原类型区、陇南山地丘陵类型区四个类型区的标准划分,并筛选出各类型区内的典型土壤。研究各典型土壤的物理性质,并测得土壤的水分特征曲线及土壤比水容量,探明甘肃省土壤的持水特性及影响因素,旨在为制定合理的土壤水分管理及土壤改良措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤采集

依据河西干旱半干旱类型区、黄土高原类型区、甘南高原类型区、陇南山地丘陵类型区分区进行采样。结合甘肃省土种志^[6],统计出每个分区中包含的土壤类型及分布面积,选取分区中面积最大的三种土壤作为各土壤分区中的典型土壤,并在典型土壤集中分布的区域设置采样点。具体采样区的划分、土壤类型及采样点分布见表 1、图 1。采样过程中选取未经扰动的区域,分别在 0~5,5~10,10~15,15~20 cm 四个层次的土壤剖面上采集混合土样。同时用环刀($D=50.46\text{ mm}$, $H=50\text{ mm}$, $V=100\text{ cm}^3$)采取各土壤剖面的原状土样,每层土壤剖面上取 3 个重复,用作容重的测定以及孔隙度的计算;另用环刀采取 5~10 cm 剖面的原状土壤,用于土壤水分特征曲线的测定。采样基本情况见表 1。

表 1 采样点基本情况
Table 1 Basic information of sampling sites

采样分区 Sampling zone	土壤编号 Soil number	典型土壤 Typical soil	采样点 Sampling point
河西干旱半干旱类型区 Hexi arid and semi-arid regions	1	栗钙土 Chestnut	武威市天祝县华藏寺镇 Hua Temple Town, Tianzhu County, Wuwei
	2	灰棕漠土 Gray-brown desert soil	武威市凉州区黄羊镇 Huangyang Town, Liangzhou District, Wuwei
	3	潮土 Fluvo-aquic soil	张掖市甘州区上秦镇 Shangqin Town, Ganzhou District, Zhangye
黄土高原类型区 The Loess Plateau	4	黄绵土 Loessal soil	定西市安定区李家堡镇 Lijiapu Town, Anding District, Dingxi
	5	黑垆土 Dark loessial soil	天水市秦安县兴国镇 Xingguo Town, Qinan County, Tianshui
	6	灰钙土 Sierozems	白银市白银区水川镇 Shuichuan Town, Baiyin District, Baiyin
甘南高原类型区 Gannan plateau	7	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	甘南州夏河县拉卜楞镇 Labuleng Town, Xiahe County, Gannan
	8	高山草甸土 Alpine meadow soil	甘南州玛曲县尼玛镇 Nima Town, Quma County, Gannan
	9	灰褐土 Grey-cinnamon soil	甘南州合作市佐盖多玛乡 Gaiduoma Town, Hezuo City, Gannan
陇南山地丘陵类型区 The mountainous and hilly region in Longnan	10	黄棕壤 Yellow-brown earth	陇南市康县阳坝镇 Yangba Town, Kang County, Longnan
	11	淋溶褐土 Cinnamon soil	陇南市宕昌县南阳镇 Nanyang Town, Tanchang County, Longnan
	12	黑土 Black soil	陇南市宕昌县理川镇 Lichuan Town, Tanchang County, Longnan

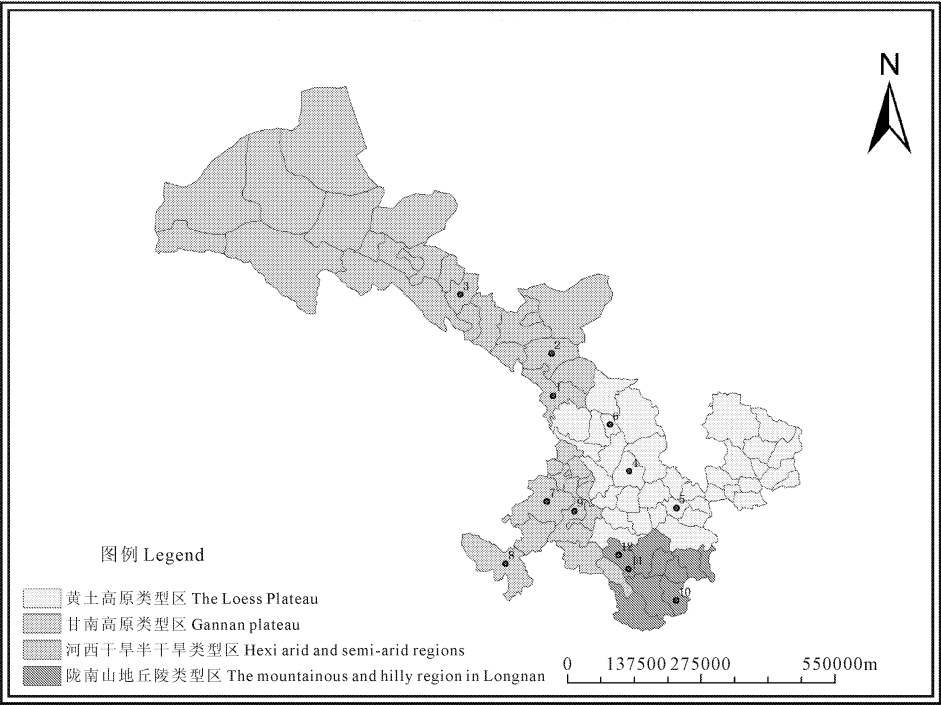


图 1 土壤采样分区及采样点分布
Fig.1 The soil regionalization and sampling points

1.2 测定项目及方法

1.2.1 土壤物理性质的测定 本研究主要测定对土壤持水特性有较大影响的土壤物理性质,包括土壤密度、土壤容重、土壤孔隙度、土壤颗粒组成。这些物理性质的测定参照《土壤物理性质的测定法》^[7],土壤密度的测定方法为比重瓶法,土壤容重和孔隙度采用环刀法测量,土壤颗粒组成的测定采用比重计法。

1.2.2 土壤水分特征曲线的测定 土壤水分特征曲线是土壤水分基模势与含水量之间的关系曲线,它反映了土壤的持水能力和土壤水分的基本特征,是土壤水分研究中重要的工具。通常土壤水分特征曲线包括吸水曲线和脱水曲线,即分别在土壤吸水过程和失水过程中所得到土壤水分特征曲线^[8]。由于脱水曲线的获取更有利于简化研究步骤,减小试验误差,故本研究采用脱水曲线来讨论土壤持水性问题。研究中土壤水分特征曲线是采用美国土壤水分公司(Soil moisture equipment corp)生产的 1500 型 15Bar 压力膜仪分别测定 0.5、1、3、5、10、15 Bar 六个水平下的土壤水分重量含水量后,结合国内外研究经验,利用 Gardner 模型拟合而成。

Gardner 模型表示水分特征曲线的表达式如下:
$$\theta = AS^{-B} \tag{1}$$
式中, θ 为重量含水量(%); S 为土壤水吸力(Bar);

A 和 B 为非线性回归系数。
1.2.3 比水容量的测定 土壤水分特征曲线斜率即单位基质势的变化引起含水量变化,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,可反映土壤可释出的供给植物吸收水量的程度,是评价土壤持水性强弱的关键参数^[9-12],记为 C_θ 。比水容量的获取公式为:

$$C_\theta = -d\theta/dS \tag{2}$$

式中, θ 为重量含水量(%); S 为土壤水吸力(Bar)。
对土壤特征水分曲线的斜率求导可得:

$$C_\theta = A \times B \times S^{-(B+1)} \tag{3}$$

其中, A 、 B 为土壤持水曲线拟合参数。

1.3 数据处理方法

采用 Microsoft Excel 绘制图表以及土壤水分特征曲线,运用 SPSS 软件对数据进行统计分析,Pearson 相关分析法分析土壤持水性与土壤物理性质的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤持水特征评价

2.1.1 土壤水分特征曲线 根据 Gardner 模型的幂函数经验公式,将实验测得的数据进行拟合,供试土壤参数拟合结果见表 2,拟合曲线结果见图 2~图 5。

表 2 供试土壤的水分特征曲线的拟合方程及拟合参数

Table 2 Soil moisture characteristic curve fitting equations and the relevant coefficients of the selected soils

土壤编号 Soil number	土壤亚类 Subtype of soil	拟合方程 Equation	统计分析 Statistics				
			A	B	R ²	A × B	B + 1
1	栗钙土 Chestnut	$\theta = 16.136S^{-0.183}$	16.136	0.183	0.9921	2.953	1.183
2	灰棕漠土 Gray-brown desert soil	$\theta = 13.569S^{-0.197}$	13.569	0.197	0.9885	2.673	1.197
3	潮土 Fluvo-aquic soil	$\theta = 21.796S^{-0.171}$	21.796	0.171	0.9481	3.727	1.171
4	黄绵土 Loessal soil	$\theta = 19.286S^{-0.136}$	19.286	0.136	0.9944	2.623	1.136
5	黑垆土 Dark loessial soil	$\theta = 21.809S^{-0.133}$	21.809	0.133	0.9820	2.901	1.133
6	灰钙土 Sierozems	$\theta = 20.636S^{-0.181}$	20.636	0.181	0.9884	3.735	1.181
7	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	$\theta = 25.232S^{-0.195}$	25.232	0.195	0.9703	4.920	1.195
8	高山草甸土 Alpine meadow soil	$\theta = 24.459S^{-0.134}$	24.459	0.134	0.9293	3.278	1.134
9	灰褐土 Grey-cinnamon soil	$\theta = 20.462S^{-0.175}$	20.462	0.175	0.9784	3.581	1.175
10	黄棕壤 Yellow-brown earth	$\theta = 19.577S^{-0.232}$	19.577	0.232	0.9803	4.542	1.232
11	淋溶褐土 Cinnamon soil	$\theta = 21.120S^{-0.215}$	21.12	0.215	0.9430	4.541	1.215
12	黑土 Black soil	$\theta = 23.324S^{-0.190}$	23.324	0.190	0.9686	4.432	1.190

注: θ 为重量含水量 (%); S 为土壤水吸力 (Bar); A 和 B 为 Gardner 模型 $\theta = A \times S^{-B}$ 的非线性回归系数。
Note: θ , soil water content (%); S , soil water suction (Bar); A and B , the nonlinear estimate of parameters in Gardner's model $\theta = A \times S^{-B}$.

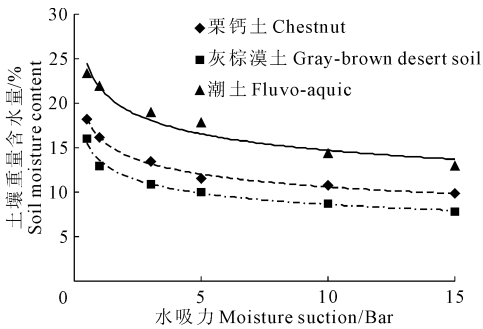


图 2 河西干旱半干旱类型区土壤水分特征曲线
Fig.2 Water characteristic curves of soil collected Hexi arid and semi-arid region

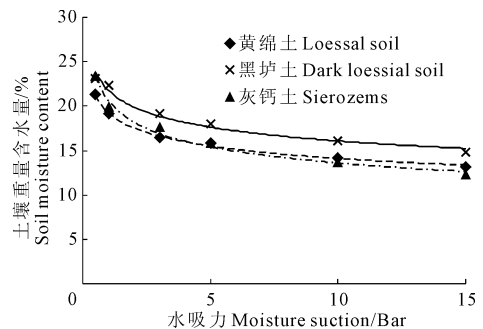


图 3 黄土高原类型区土壤水分特征曲线
Fig.3 Water characteristic curves of soil collected from the Loess Plateau

从拟合结果表 2 可以看出,实测数据所得曲线与利用 Gardner 模型拟合的土壤水分特征曲线间的相关系数 r^2 均在 0.90 以上,拟合相关性较好。根据 Gardner 模型的经验方程,参数 A 表征曲线的高

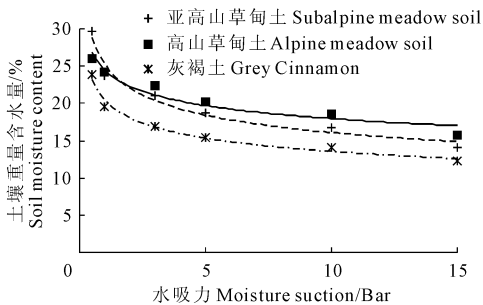


图 4 甘南高原类型区土壤水分特征曲线
Fig.4 Water characteristic curves of soil collected from typical Gannan plateau

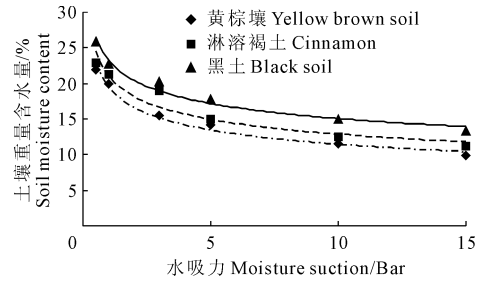


图 5 陇南山地丘陵类型区土壤水分特征曲线
Fig.5 Water characteristic curves of soil collected from Longnan mountain and hilly area

低,亦即持水能力的大小, A 值越大,持水能力相对越强。参数 B 表征曲线的走向,当 A 值不变时, B 值越大 ($0 \leq B \leq 1$),则曲线越靠近水势轴,说明参数 B 可表示 A 值一定时水分特征曲线与水势轴的贴近程度,反映了表示土壤含水量随吸力变化的快慢程度^[13-15]。根据甘肃省各类型区内典型土壤 A 值

可以看出,甘肃省典型土壤除栗钙土、灰棕漠土、黄绵土外,其他典型土壤 A 值均在 20~26 之间。各类型区土壤 A 值的均值从大到小排列为甘南高原类型区>黄土高原类型区>河西干旱半干旱类型区>陇南山地丘陵类型区。供试土壤 A 值从大到小排列为亚高山草甸土、高山草甸土、黑土、黑垆土、潮土、淋溶褐土、灰钙土、灰褐土、黄棕壤、黄绵土、栗钙土、灰棕漠土。以参数 B 为评价参数,各类型区土壤 B 值的均值从大到小排列为陇南山地丘陵类型区>河西干旱半干旱类型区>甘南高原类型区>黄土高原类型区。供试土壤含水量随吸力增加而减少的快慢程度为黄棕壤>淋溶褐土>灰棕漠土>亚高山草甸土>黑土>栗钙土>灰钙土>灰褐土>潮土>黄绵土>高山草甸土>黑垆土。参数 $A \times B, B + 1$ 与比水容量有关,下文中均有分析。

从图 2~图 5 可以看出,供试土壤在总体上表现为随着水吸力的增加,土壤的重量含水量均呈现逐渐下降的趋势,在一定的水吸力范围内,土壤的持水曲线下降趋势明显,斜率很大;到一定的吸力后,土壤持水曲线趋于平缓。其中,0~5 Bar 范围内曲线下降幅度最大,可能原因是,低吸力时,土壤所能保持或释放出来的水量主要取决于大孔隙的数量及其分布状态,大孔隙中的水很容易就会排出,施加较小压力时即可,所以土壤持水曲线的下降趋势整体比较明显;随着吸力的增加,大孔隙中的水随之排尽,保持在中小孔隙中的水分才缓慢释出,所以此时特征曲线逐渐趋于平缓;另外,随着土壤水吸力的不断增大,土壤大孔隙中的液态水逐渐排出,土壤颗粒表面水化膜也随着逐渐变薄,在此过程中土壤水分的形态开始发生变化,故高吸力段时,即使提高土壤吸力,残余的水分由于能态的变化也很难再排出,持水曲线变化趋势不明显。总体上看,各种供试土壤在 10 Bar 以后就开始趋于平缓。

对于不同的土壤而言,由于土壤类型、耕地耕作管理措施、农作物生理需水情况等一系列影响,土壤水分特征曲线的变化程度有很大差别。在河西干旱半干旱类型区,潮土的土壤水分特征曲线远高于灰棕漠土。灰棕漠土和栗钙土的水分特征曲线高度较低,走向趋于一致,下降趋势明显。黄土高原类型区内各典型土壤的水分特征曲线高度适中,下降趋势平缓,三条水分特征曲线之间的高度和下降趋势相差不大,高吸力段三条曲线趋于重合。甘南高原类型区中,亚高山草甸土、高山草甸土的曲线较高,随着吸力的增加,亚高山草甸土、灰褐土曲线的下降趋势增大,而高山草甸土的曲线下降趋势相对平缓。

陇南山地丘陵类型区中各典型土壤水分特征曲线走势趋于一致,曲线高度黑土略高于淋溶褐土,黄棕壤的土壤水分特征曲线高度最低。

结合甘肃各类型区的土壤水分特征曲线和拟合参数可以发现,甘南高原类型区的土壤持水性最高,但是土壤基质势发生变化时,土壤持水性稳定性并非最佳。黄土高原类型区的土壤持水性最为稳定,不会因为土壤基质势的改变而发生较大的变化,且持水性能适中。河西干旱半干旱类型区中,除了潮土持水性较好以外,其他土壤的持水性相对较低,在土壤基质势改变时土壤重量含水量的变化幅度很大。陇南山地丘陵类型区内土壤持水性较好,稳定性较弱。对于单个土壤而言,甘肃省高山草甸土、亚高山草甸土的持水特性较好,栗钙土、灰棕漠土的持水性最差。

2.1.2 比水容量 为了正确评价土壤持水能力,人们试图以水分特征曲线为依据,寻找一些合理参数来全面反映水分随土壤吸力变化的动态过程,其中有以水分特征曲线斜率即比水容量为指标来评价土壤供水能力及抗旱力^[16-17]。由于比水容量是反映土壤可释出的供给植物吸收水量多少的指标,是一个强度指标,并以 1 Bar 含水量作为土壤“毛管联系破裂湿度”,以此来划分土壤供水的难易。研究表明比水容量越大土壤供水能力及抗旱力越强,但有效水供给能力愈差^[18]。当比水容量达到 10^{-1} 数量级时,标志着土壤含水量已处于凋萎湿度区间,当比水容量达到 10^{-2} 数量级时,水分的运动和有效性也显著降低,植物正常生长已受影响^[19]。从表 3 可以看出,甘肃省典型土壤在各吸力段中的比水容量绝大部分大于 10^{-1} 。整体而言,随着水吸力的增大,各典型土壤的比水容量均表现出逐渐减小的趋势,且无限趋近于零。就同一类型的土壤而言,土壤比水容量随水势增加而减小的程度无明显规律。当水吸力为 1 Bar 时的土壤比水容量可表示为 A 与 B 的乘积,记作 $A \times B$ 。 $A \times B$ 值越大的土壤,供水能力相对越强。而 $B + 1$ 可表示土壤比水容量随水吸力的变化的快慢程度。根据表 2 中的参数数值,以 $A \times B$ 作为评价参数,甘肃省典型土壤供水能力强弱为:亚高山草甸土>黄棕壤>淋溶褐土>黑土>灰钙土>潮土>灰褐土>高山草甸土>栗钙土>黑垆土>灰棕漠土>黄绵土。以 $B + 1$ 为评价参数,可得供试土壤比水容量随水吸力的变化快慢程度为,黄棕壤>淋溶褐土>灰棕漠土>亚高山草甸土>黑土>栗钙土>灰钙土>灰褐土>潮土>黄绵土>高山草甸土>黑垆土。在各吸力段陇南山地丘陵类型

区土壤比水容重的均值远高于其他三个类型区。在剩下三个土壤类型区当中,甘南高原类型区 B 值略高于河西干旱半干旱类型区和黄土高原类型区。河西干旱半干旱类型区和黄土高原类型区之间 B 值差距不大。而各类型区由土壤 $B + 1$ 均值由大到小排列为:陇南山地丘陵类型区 > 河西干旱半干旱类型区 > 甘南高原类型区 > 黄土高原类型区。由此可以得出在甘肃省域内陇南山地丘陵类型区土壤供水能力及抗旱能力最强,但稳定性最弱。甘南高原类

型区次之,稳定性适中。河西干旱半干旱类型区与黄土高原类型区的土壤供水能力最弱,但黄土高原类型区的土壤供水能力稳定性较强。

2.2 土壤物理性质

2.2.1 土壤质地 土壤质地是根据土壤的颗粒组成划分的土壤类型,是影响土壤持水性能的重要因素。国际上土壤质地划分标准有很多,本研究采用国际制土壤质地分级系统,具体甘肃省典型土壤的质地分类见表 4。

表 3 不同水吸力下土壤的比水容量 (C_θ)

		不同水吸力下土壤的比水容量 (C_θ)					
土壤编号 Soil number	土壤亚类 Subtype of soil	Specific water capacity in different soil water suctions					
		0.5 Bar	1 Bar	3 Bar	5 Bar	10 Bar	15 Bar
1	栗钙土 Chestnut	6.70	2.95	0.81	0.44	0.19	0.12
2	灰棕漠土 Gray-brown desert soil	6.13	2.67	0.72	0.39	0.17	0.10
3	潮土 Fluvo-aquic soil	8.39	3.73	1.03	0.57	0.25	0.16
4	黄绵土 Loessal soil	5.76	2.62	0.75	0.42	0.19	0.12
5	黑垆土 Dark loessial soil	6.36	2.90	0.84	0.47	0.21	0.13
6	灰钙土 Sierozems	8.47	3.74	1.02	0.56	0.25	0.15
7	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	11.26	4.92	1.32	0.72	0.31	0.19
8	高山草甸土 Alpine meadow soil	7.19	3.28	0.94	0.53	0.24	0.15
9	灰褐土 Grey-cinnamon soil	8.09	3.58	0.98	0.54	0.24	0.15
10	黄棕壤 Yellow-brown earth	10.67	4.54	1.17	0.63	0.27	0.16
11	淋溶褐土 Cinnamon soil	10.54	4.54	1.20	0.64	0.28	0.17
12	黑土 Black soil	10.11	4.43	1.20	0.65	0.29	0.18

表 4 土壤质地

Table 4 Soil mechanical composition

土壤编号 Soil number	土壤类型 Soil type	颗粒组成 Mechanical composition/%			质地 Texture
		砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay	
		2 ~ 0.02 mm	0.02 ~ 0.002 mm	< 0.002 mm	
1	栗钙土 Chestnut	62.65	43.98	13.37	砂壤土 Sandy loam
2	灰棕漠土 Gray-brown desert soil	75.06	15.11	9.83	砂壤土 Sandy loam
3	潮土 Fluvo-aquic soil	46.02	35.31	18.67	粘壤土 Clay loam
4	黄绵土 Loessal soil	26.82	59.25	13.93	粉壤土 Silt loam
5	黑垆土 Dark loessial soil	32.37	54.18	14.45	粉壤土 Silt loam
6	灰钙土 Sierozems	55.75	32.71	11.54	砂壤土 Sandy loam
7	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	53.17	19.00	27.83	粘土 Clay
8	高山草甸土 Alpine meadow soil	57.08	26.25	16.67	砂粘壤土 Silty clay loam
9	灰褐土 Grey-cinnamon soil	51.54	28.49	19.97	粘壤土 Clay loam
10	黄棕壤 Yellow-brown earth	60.87	24.31	14.82	砂壤土 Sandy loam
11	淋溶褐土 Cinnamon soil	44.81	30.03	25.16	粘土 Clay
12	黑土 Black soil	40.02	24.82	27.32	粘土 Clay

由表 4 可见,甘肃省典型土壤中绝大多数以壤土为主(栗钙土、灰棕漠土、灰钙土、黄棕壤为砂壤土,潮土、黑垆土、灰褐土为粘壤土,黄绵土为粉壤

土,高山草甸土为砂粘壤土),只有少数土壤为粘土(亚高山草甸土、淋溶褐土、黑土)。由此可见甘肃省土壤砂粒在土壤颗粒组成中所占比例较大,除黑垆

土、黄绵土砂粒含量为 32.37%、26.82% 以外,其他典型土壤的砂粒含量均超过 40%。典型土壤中粘粒含量则相对较小,大部分土壤的粘粒含量处在 15% ~ 25% 之间。根据土壤中粘粒含量所占比例由大到小排列为亚高山草甸土 > 黑土 > 淋溶褐土 > 灰褐土 > 潮土 > 高山草甸土 > 黄棕壤 > 黑垆土 > 黄绵土 > 栗钙土 > 灰钙土 > 灰棕漠土。总体而言,甘肃省河西干旱半干旱区土壤质地最粗,区内典型土壤砂砾含量均值最高。黄土高原类型区粉粒含量较高,土壤质地多为粉壤土。甘南高原类型区和陇南山地丘陵类型区土壤粘粒含量较高,粘土、粘壤土在该区域分布最广。

2.2.2 土壤容重 土壤容重即土壤在田间自然状态下,单位容积土体(包括土粒和孔隙)的质量或重量($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。土壤容重的大小能反映土壤的紧实状况和孔隙状况,是衡量土壤肥力高低的重要指标之一,也是影响土壤持水性的重要因素。本研究对甘肃省典型土壤容重分为 0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 15、15 ~ 20 cm 四个层次进行了测量。

由表 5 可以看出各种典型土壤容重在不同深度上的分布情况,随着土层深度的增加,各分区土壤容

重大致表现出下降的趋势。根据各典型土壤容重的平均值,十二种供试土壤容重存在差异,变化幅度为 $1.08 \sim 1.44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,其中容重小于 $1.15 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的为黄绵土和高山草甸土, $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上的包括灰棕漠土和潮土,其余八种土壤容重均在 $1.1 \sim 1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间。十二种供试土壤容重大小排序为:栗钙土 > 灰棕漠土 > 潮土 > 黑土 > 黑垆土 > 灰褐土 > 黄棕壤 > 灰钙土 > 淋溶褐土 > 亚高山草甸土 > 高山草甸土 > 黄绵土,其中河西干旱半干旱区典型土壤容重的均值变化范围为 $1.38 \sim 1.44 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,黄土高原类型区为 $1.08 \sim 1.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,甘南高原类型区为 $1.12 \sim 1.34 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,陇南山地丘陵类型区为 $1.31 \sim 1.39 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,根据甘肃省各土壤类型区中土壤容重均值的大小排列为:河西干旱半干旱类型区 > 陇南山地丘陵类型区 > 黄土高原类型区 > 甘南高原类型区。甘肃省域中河西干旱半干旱类型区内土壤容重最大,土层最为紧实;陇南山地丘陵类型区仅次于河西地区,这与该区主要分布的土壤质地较细有关;甘南高原类型区的土壤容重最小,土壤松弛,结构良好。黄土高原类型区内土壤容重适中,松紧度适宜,有利于耕作。

表 5 土壤容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Table 5 Soil bulk density

土壤编号 Soil number	采样分区 Zone of sampling	土壤亚类 Subtype of soil	0 ~ 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 15 cm	15 ~ 20 cm	均值 Average
1	河西干旱半干旱类型区 Hexi arid and semi-arid regions	栗钙土 Chestnut	1.31	1.35	1.39	1.47	1.38
2		灰棕漠土 Gray-brown desert soil	1.36	1.41	1.45	1.54	1.44
3		潮土 Fluvo-aquic soil	1.35	1.37	1.43	1.49	1.41
4	黄土高原类型区 The Loess Plateau	黄绵土 Loessal soil	1.02	1.05	1.11	1.14	1.08
5		黑垆土 Dark loessial soil	1.28	1.32	1.39	1.37	1.34
6		灰钙土 Sierozems	1.27	1.30	1.33	1.38	1.32
7	甘南高原类型区 Gannan plateau	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	1.17	1.21	1.29	1.34	1.25
8		高山草甸土 Alpine meadow soil	1.05	1.09	1.15	1.19	1.12
9		灰褐土 Grey-cinnamon soil	1.25	1.27	1.36	1.48	1.34
10	陇南山地丘陵类型区 The mountainous and hilly region in Longnan	黄棕壤 Yellow-brown earth	1.23	1.27	1.39	1.43	1.33
11		淋溶褐土 Cinnamon soil	1.22	1.25	1.33	1.44	1.31
12		黑土 Black soil	1.32	1.36	1.41	1.47	1.39

2.2.3 土壤密度及土壤孔隙度 土壤密度及土壤孔隙度作为土壤的基本物理性质参数,对土壤持水性的研究有着重要意义。具体测定结果见表 6,甘肃省典型土壤总孔隙度变化范围在 43.02% ~ 59.44% 之间,各分区中黄土高原类型区和甘南高原类型区内土壤总孔隙度较高,这两个区域内高山草甸土、亚高山草甸土、黄绵土、黑垆土的总孔隙度均超过 50%。而河西干旱半干旱类型区与陇南山地

丘陵类型区内土壤总孔隙度相对较低。土壤孔隙分为毛管孔隙和通气孔隙,由于通气孔隙度对土壤持水性的影响较小,本研究仅对土壤毛管孔隙度进行了测量。甘肃省典型土壤中黄绵土的毛管孔隙度最低,为 10.15%,亚高山草甸土的毛管孔隙度最高,为 27.40%,绝大部分的土壤毛管孔隙度在 15% ~ 24% 之间。土壤毛管孔隙度由大到小排列分别为亚高山草甸土、黄棕壤、灰褐土、高山草甸土、灰钙土、

栗钙土、潮土、黑垆土、淋溶褐土、黑土、灰棕漠土、黄绵土。土壤密度的测定结果变动范围不大,绝大部分土壤密度在 $2.65 \sim 2.75 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间,数值略有差异。各分区中的土壤毛管孔隙度和土壤密度无明显规律。

表 6 土壤密度及其孔隙度
Table 6 Soil density and soil porosity

土壤编号 Soil number	采样分区 Zone of sampling	土壤亚类 Subtype of soil	土壤密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) Soil density	毛管孔隙度/% Capillary porosity	总孔隙度/% Total porosity
1	河西干旱半干旱类型区 Hexi arid and semi-arid regions	栗钙土 Chestnut	2.64	19.84	48.49
2		灰棕漠土 Gray-brown desert soil	2.72	15.10	43.02
3		潮土 Fluvo-aquic soil	2.65	18.57	45.98
4	黄土高原类型区 The Loess Plateau	黄绵土 Loessal soil	2.72	10.15	56.70
5		黑垆土 Dark loessial soil	2.57	16.51	51.66
6		灰钙土 Sierozems	2.70	20.11	48.66
7	甘南高原类型区 Gannan plateau	亚高山草甸土 Subalpine meadow soil	2.70	27.40	54.34
8		高山草甸土 Alpine meadow soil	2.57	20.16	59.44
9		灰褐土 Grey-cinnamon soil	2.69	22.90	49.34
10	陇南山地丘陵类型区 The mountainous and hilly region in Longnan	黄棕壤 Yellow-brown earth	2.74	23.61	49.06
11		淋溶褐土 Cinnamon soil	2.63	16.25	45.79
12		黑土 Black soil	2.66	15.68	43.96

2.3 土壤持水性的影响因素及其相关性分析

如表 7 所示,土壤中 $<0.02 \text{ mm}$ 粘粒含量与土壤持水性在 $0 \sim 15 \text{ Bar}$ 整个水吸力范围内均存在正相关关系且相关性较高,当水吸力为 $1,3 \text{ Bar}$ 时,相关关系均达到显著水平。当土壤水吸力为 0.5 Bar 时,显著性达到极显著,相关系数为 0.745 。可见,土壤质地对土壤的持水性有很大程度的影响,土壤中粘粒含量的增加有助于土壤持水性能的提升。土壤总孔隙度与含水量间存在正相关关系,当吸力水平在 15 Bar 时,相关关系达到显著水平,吸力水平在 10 Bar 时两者相关关系达到极显著,显然土壤总孔

隙度也是影响甘肃土壤持水性的重要因素。毛管孔隙度与土壤持水性之间为正相关关系,但是随着水吸力的增加,两者的相关系数呈现下降的趋势。随着水吸力的增加,毛管孔隙度对土壤持水性的影响作用逐渐减小,在高吸力段毛管孔隙度对土壤持水性的影响十分微弱。土壤容重、土壤密度与土壤持水性之间存在负相关关系,在 $0 \sim 15 \text{ Bar}$ 整个水吸力范围内均没有显著相关性。总体来说,甘肃省土壤持水性主要取决于土壤的质地($<0.002 \text{ mm}$ 粘粒含量)、总孔隙度,其次为土壤毛管孔隙度、密度和容重。

表 7 不同水吸力下土壤含水量与土壤物理性质的相关系数

土壤水吸力 Moisture suction /Bar	密度 Soil density	容重 Soil bulk density	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	$<0.002 \text{ mm}$ 粘粒含量 The composition of clay
0.5	-0.210	-0.345	0.416	0.507	0.745**
1	-0.473	-0.391	0.448	0.290	0.600*
3	-0.529	-0.428	0.462	0.230	0.615*
5	-0.478	-0.471	0.550	0.196	0.480
10	-0.532	-0.572	0.684**	0.206	0.432
15	-0.523	-0.525	0.641*	0.145	0.429

注: * 代表 0.05 水平的显著性, ** 代表 0.01 水平的显著性,下同。
Note: * stands for significance of 0.05, ** stands for significance of 0.01, and hereinafter.

3 结 论

1) 本研究测定了甘肃省不同土壤的基本物理性质,并利用压力膜仪测得不同吸力水平下的土壤重量含水量,运用 Gardner 模型的经验方程 $\theta = A \times S^{-B}$ 拟合得出不同土壤的水分特征曲线。甘肃省土壤水分特征曲线整体表现为随着土壤基质势(水吸力)的增加,持水曲线呈现逐渐下降的趋势,具体变化趋势为在低吸力时,变化幅度明显,斜率较大,到一定的吸力后,土壤持水曲线趋于平缓。

2) 通过不同拟合参数来分析甘肃省典型土壤的持水能力,可知当评价参数不同时,最终所得到的供试土壤持水能力排序也有差异。整体而言,甘南高原类型区土壤持水和供水能力较好,且较为稳定。陇南山地丘陵类型区土壤供水能力最佳,持水能力较好,但稳定性较弱。黄土高原类型区内土壤持水性适中,供水能力较弱,稳定性最佳。河西干旱半干旱类型区的土壤持水、供水能力及稳定性均较差。以单个土壤进行评价,甘肃省高山草甸土土壤持水、供水性能良好。亚高山草甸土、黑土虽然有较高的土壤持水性,但稳定性较弱。栗钙土与灰棕漠土的土壤持水性和供水能力较差。

3) 土壤物理性质方面,甘肃省典型土壤质地绝大多数以壤土为主,粘土较少,土壤中颗粒较粗,土壤容重有所差异,整体而言全省各区大多数典型土壤容重适中,总孔隙度变化范围在 43.02% ~ 59.44% 之间,整体土壤结构良好,土壤密度差距不大。河西干旱半干旱类型区土壤容重较高,砂砾含量大,这是造成该地区土壤持水性弱的主要原因。黄土高原类型区内土壤质地粉粒含量最多,土壤孔隙度和容重适中,该区土壤粘粒含量不高导致没有过高的持水性能,但稳定性最佳,土壤结构良好,易于耕作。甘南高原类型区土壤中粘粒含量高,土壤容重最小,孔隙度适中,土壤持水性和保水性最佳。陇南山地丘陵类型区土壤虽然粘粒含量较高,但土壤容重大,孔隙度相对较小,该区土壤虽然具有较高的持水性,但稳定差,加之特殊地形的影响,容易发生水土流失。将土壤持水性与土壤基本物理性质进行相关分析,可以发现影响甘肃省土壤持水性的主

要因素为 <0.002 mm 粘粒含量和总孔隙度,其次为土壤毛管孔隙度、密度和容重。

参 考 文 献:

- [1] 苏 杨,朱 健,王 平,等.土壤持水力研究进展[J].中国农学通报,2013,29(14):140-145.
- [2] 杨 治,李小刚,谢恩波,等.甘肃几种旱地土壤低吸力段持水性能的初步研究[J].土壤通报,1994,2(4):155-157.
- [3] 李小刚.甘肃几种旱地土壤颗粒组成及其对土壤水分常数的影响[J].甘肃农业大学学报,1993,28(4):376-379.
- [4] 李小刚.影响土壤水分特征曲线的因素[J].甘肃农业大学学报,1994,9(3):273-278.
- [5] 李成有.不同耕作措施下土壤持水特性及其影响因素[D].兰州:甘肃农业大学,2009.
- [6] 甘肃省土壤普查办公室.甘肃省土种志[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.
- [7] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室.土壤物理性质测定法[M].北京:科学出版社,1978.
- [8] 邵明安,黄全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006:67-71.
- [9] 陈 尧,袁有波,丁福章.贵州植烟土壤水分特性分析[J].贵州农业科学,2010,38(5):42-45.
- [10] Allaire-Letmg E, Gupta C, Moncrief J E. Water and solute movement in soil as influenced by macropore characteristics 2. Macropore tortuosity[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000,41(5):307-313.
- [11] Diiwu J Y, Rudra R P, Dickinson W T, et al. Tillage and heterogeneity effects on the performance of soil water characteristic models [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998,71(3):307-313.
- [12] 杨金楼,朱连龙,朱济成.上海地区土壤持水特性研究[J].土壤学报,1982,19(4):331-342.
- [13] 卢小遮,柳云龙,施振香,等.上海城郊低吸力段土壤持水供水特性的研究[J].水土保持学报,2010,24(6):231-235.
- [14] 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):104-109.
- [15] 窦建德,王绪芳,熊 伟,等.宁夏六盘山北侧 5 种典型植被的土壤持水性能研究[J].林业科学研究,2006,19(3):301-306.
- [16] 庄季屏,王 伟.土壤低吸力段持水性能及其与早期干旱的关系研究[J].土壤学报,1986,23(4):306-313.
- [17] 赵渭生,孟锡福,沈建国.浙江省金华地区六种红壤持水性能的初步研究[J].浙江农业大学学报,1989,12(4):377-382.
- [18] 刘恩斌,董水丽.黄土高原主要土壤持水性能及抗旱性的评价[J].水土保持通报,1997,17(7):21-26.
- [19] 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.