

上海地区土壤持水特性研究*

杨金楼 朱连龙 朱济成

(上海市农业科学院土壤肥料研究所)

土壤水的研究,从 Henri Darcy (1856) 提出达西定律算起,已有一百多年历史。经历了由经验到理论、由静态到动态、由定性到定量、由宏观到微观逐步深入发展的过程^[1]。1877年 Briggs L. J. 提出毛管假说,将土壤孔隙组成的孔道看成是一些大小不同的毛细管,认为表面张力是土壤保持水分的主要原因。1907年 Buckingham 提出毛管势概念,给土壤水的研究开辟了用能量观点研究土壤水分的新途径。1931年 Richards 发明了张力计,能直接测定毛管势。达西定律被应用到非饱和土壤后,大大推动了土壤水的动态研究。五十年代以来,势值概念已被广泛应用。六十年代以来,土壤水分的热力学函数表达形式,愈来愈受人们注意^[2]。多偏重于以能量观点对土壤水分进行动态研究,并力求建立较完善的数学模型,进行定量分析,因此在理论研究和生产实践上都取得了较快进展。

一般认为,土壤持水量,低吸力下(0—1巴)主要决定于毛细管作用和孔径分布,也就是强烈地受土壤结构的影响;高吸力范围保持的水,主要受质地和土壤比表面的影响^[7]。据 Gardner (1968) 得出在吸力15巴时含水量与土壤比表面积有相当好的相关^[7]。

我国过去偏重于形态研究,六十年代以来,方正三^[1,2]、陈志雄^[3,5]等在研制负压计,并从能量概念进行土壤持水、运动的研究,在我国土壤水分、农田水利等研究工作中受到了重视,并逐步应用于生产实践。

本文力图在0—15巴有效水范围内,应用电子计算机技术和数学相关分析的方法,从土壤水分有效性角度详细论证低吸力及高吸力下土壤保持水分、土壤孔径分布、土壤水容量、土壤蒸发强度、土壤水分吸力上升快慢等的影响因子及其作用大小。探讨不同因子对水分有效性的影响以及土壤持水能力与土壤有机质含量的相关性。

一、试验方法

1979—1981年应用重量法(0—1巴)和压力膜法(1—15巴)就上海地区沙夹黄、黄夹沙、黄泥头、沟干泥、青黄泥、青紫泥、青泥土等7种耕层土壤,分属轻壤、中壤、重壤三种质地(表1),进行土壤持水特性研究。

采集的土样,经风干碾碎过1毫米筛孔,称取绝对干土6斤,装入已称重的小盆钵中,

* 柯福源同志参与部分相关计算。1—15巴土壤持水量由中国科学院南京土壤研究所汪仁真同志协助测定,特此致谢。

1) 李恩羊,1979: 土壤水分运动。武汉水利电力学院农田水利教研室编,第1—10页。

表 1 上海地区主要土壤颗粒组成 (1978 年底测定, 单位: %)

Table 1 Mechanical composition of main soil types in Shanghai area (Tested in the end of 1978)

土壤名称 Soil type	颗粒组成 (粒径: mm) Particle distribution							质地名称 Texture
	1—0.25	0.25—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001 粘粒 Clay	<0.01 物理性粘粒 Physical clay	
沙夹黄 Percolating paddy soil	0.41	15.92	59.30	7.96	9.87	6.54	24.37	轻壤 Light loam
黄夹沙 Percolating paddy soil	0.41	5.66	49.89	8.92	19.97	15.15	44.04	中壤 Medium loam
黄泥头 Permeable paddy soil	0.41	3.26	45.27	11.52	20.01	19.53	51.06	重壤 Heavy loam
沟干泥 Permeable paddy soil	0.41	1.61	42.70	19.03	18.53	17.73	55.28	重壤 Heavy loam
青黄泥 Permeable paddy soil	0.31	4.64	52.26	11.55	13.62	17.62	42.79	中壤 Medium loam
青紫泥 Waterlogged paddy soil	0.15	3.08	51.04	11.51	15.86	18.36	45.73	重壤 Heavy loam
青泥土 Waterlogged paddy soil	0.30	3.67	36.54	12.57	21.27	25.67	59.49	重壤 Heavy loam

表 2 上海地区主要土壤部分物理性质

Table 2 Some physical properties of main soils in Shanghai area

土壤名称 Soil type	有机质 (%) O.M.	容重 (g/cm ³) Bulk density	比重 Specific gravity	孔隙状况 (%) Porosity			<0.01mm 物理性粘粒 (%) <0.01mm physical clay	比表面** (m ² /mg soil) Specific surface
				总孔隙 Total porosity	毛管孔隙* Capillary porosity	非毛管孔隙 Non-capillary porosity		
沙夹黄 Percolating paddy soil	1.74	1.25	2.69	53.6	47.5	6.1	24.4	0.45
黄夹沙 Percolating paddy soil	2.27	1.20	2.66	54.7	47.3	7.4	44.0	0.92
黄泥头 Permeable paddy soil	3.17	1.15	2.67	57.1	46.2	10.9	51.1	1.12
沟干泥 Permeable paddy soil	2.54	1.19	2.68	55.5	46.2	9.3	55.3	1.05
青黄泥 Permeable paddy soil	3.74	1.15	2.66	56.6	47.5	9.1	42.8	0.99
青紫泥 Waterlogged paddy soil	4.19	1.12	2.66	57.8	49.5	8.3	45.7	1.04
青泥土 Waterlogged paddy soil	5.03	1.11	2.60	57.2	49.7	7.5	59.5	1.41

* 毛管孔隙度是在 60 cm 水柱吸力下测定。

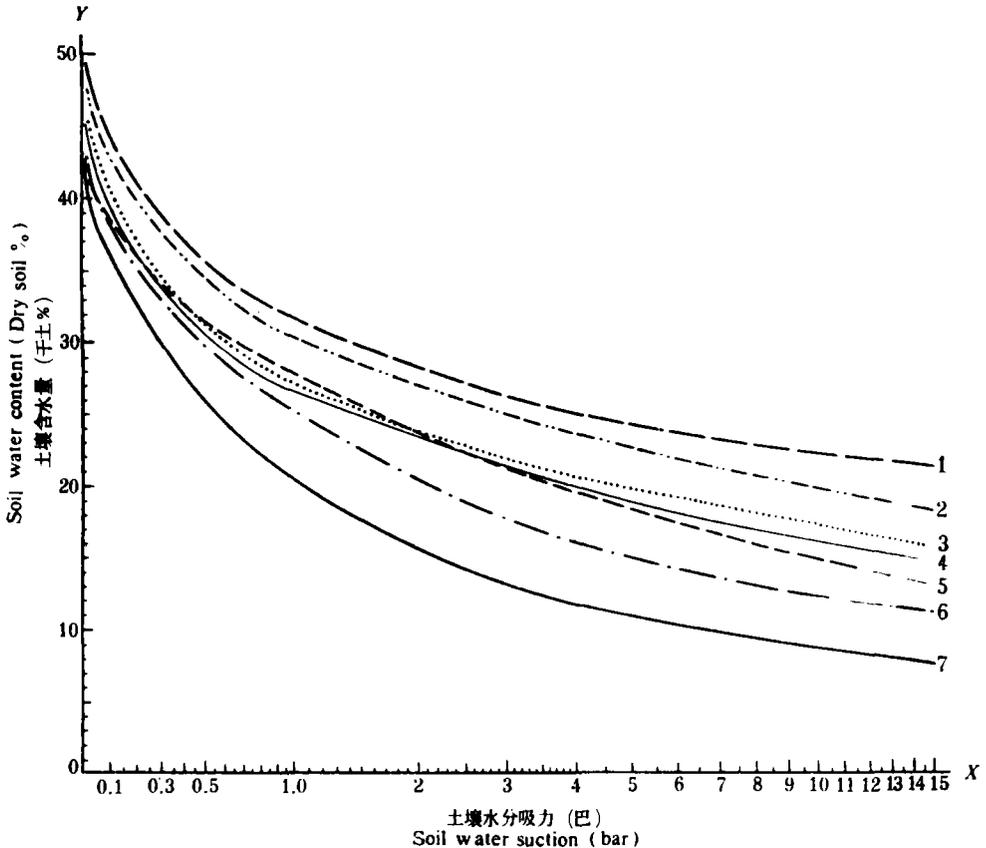
** 土壤比表面是由机械组成求得各级平均粒径, 假定为圆粒, 经公式:

$$a_m = n_1 \cdot \frac{2.3}{d_1} + n_2 \cdot \frac{2.3}{d_2} + \dots + n_n \cdot \frac{2.3}{d_n} \text{ 求得, 式中: } n_n \text{——某级颗粒组成 \%}, \bar{d}_n \text{——某级平均粒径 (mm)}.$$

埋入一支深 11 厘米左右的负压计，指示土壤水分吸力，盆处插入一支玻璃管，以利加水，将土压紧到容重 1.10—1.25 克/厘米³，置于室内，二个重复。由玻璃管加水，从底部向上浸润至饱和为止，土壤吸力趋于零位，这时让其自行蒸发，每天上午 8 时称重，并观测土壤吸力，直至 700 毫米汞柱为止，由此得出 1 巴内土壤吸力与含水量关系的脱水过程持水曲线；尔后每天加水 20—30 毫升平衡 12—24 小时，每天上午 8 时称重，并观测土壤吸力，直至饱和为止，得出 1 巴内土壤吸水过程的持水曲线。1—15 巴土壤脱水过程持水曲线由压力膜装置测定。并测定 7 种土壤的有机质、容重、比重、孔隙状况，计算土壤比表面（表 2）。

二、结果分析

1. 不同土壤持水特性及其吸水利用分类 我们知道，土壤持水性是指土壤吸持水



1. 青泥土土壤	Waterlogged paddy soil	2. 青紫泥土壤	Waterlogged paddy soil
3. 青黄泥土壤	Permeable paddy soil	4. 黄泥头土壤	Permeable paddy soil
5. 沟干泥土壤	Permeable paddy soil	6. 黄夹沙土壤	Percolating paddy soil
7. 沙夹黄土壤	Percolating paddy soil		

图 1 上海地区主要土壤持水曲线

Fig.1 Moisture retention curves of main soils in Shanghai area

分的能力。土壤吸水机制是由于土壤颗粒与表面水分子产生的分子引力和土壤孔隙水—气界面上产生的表面张力(毛细引力)以及土壤胶体的亲水性和电性引起^[4]。土壤持水曲线由于存在滞后现象,在同样吸力下,土壤脱水过程比吸水过程的含水量高得多^[7],南方以排为主,实践中我们一般以脱水过程表示土壤的持水性(图 1)。

根据上海地区主要土壤的持水曲线,应用 Z-2H 电子计算机分别计算出土壤吸力 (X) 与含水量 (Y) 的关系式为:

沙夹黄土壤: $Y = 42.0350 + 3.6885X - 22.7251X^{\frac{1}{2}}$

黄夹沙土壤: $Y = 43.890 + 3.197X - 20.515X^{\frac{1}{2}}$

黄泥头土壤: $Y = 45.404 + 3.205X - 19.821X^{\frac{1}{2}}$

沟干泥土壤: $Y = 43.570 + 2.485X - 17.239X^{\frac{1}{2}}$

青黄泥土壤: $Y = 45.744 + 3.127X - 19.393X^{\frac{1}{2}}$

青紫泥土壤: $Y = 48.363 + 2.979X - 18.841X^{\frac{1}{2}}$

青泥土土壤: $Y = 48.983 + 3.056X - 18.532X^{\frac{1}{2}}$

当土壤容重在 1.1—1.25 克/厘米³范围内就可以把在田间测得的土壤吸力(或含水量)换算成土壤含水量(或吸力),用以指导合理排灌。有了土壤持水曲线,还可以从作物对水的吸收量大小、难易和有效程度等进行土壤水分分类。从土壤水分吸力计算得 pF 值,就得到了不同土壤水分的分类界限和水分常数的保持力^[6]。从表 3 看出,不同土壤同一水分常数所保持的土壤水分含量是不同的,质地愈粘,含水量愈高。但从土壤水分对作

表 3 上海地区主要土壤几种水分的含量 (单位: 干土%)

Table 3 Water content of main soils in Shanghai area (Dry soil %)

土壤名称 Soil type	重力流出水 Gravitational water		有效水 (毛管水) Available water (Capillary water)				无效水 Unavailable water (>15 bar)
	(<60 mbar)	(0—60 mbar)	全有效水 Total available water (0.06—15 bar)	正常生育有效水 Available water for normal growth (0.06—1 bar)	速效性有效水 Rapidly available water (0.06—6 bar)	迟效性有效水 Slowly available water (6—15 bar)	
沙夹黄 Percolating paddy soil	>38.0	4.9	30.4	17.7	27.5	2.9	<7.6
黄夹沙 Percolating paddy soil	>39.4	6.0	28.2	14.4	25.2	3.0	<11.2
黄泥头 Permeable paddy soil	>40.2	9.5	25.3	13.8	22.0	3.3	<14.9
沟干泥 Permeable paddy soil	>38.8	7.8	25.8	10.9	21.3	4.5	<13.0
青黄泥 Permeable paddy soil	>41.3	7.9	25.7	14.4	22.1	3.6	<15.6
青紫泥 Waterlogged paddy soil	>44.2	7.4	25.8	14.1	22.1	3.7	<18.4
青泥土 Waterlogged paddy soil	>44.8	6.7	23.3	13.6	21.0	2.3	<21.5

物的有效性来说,砂质土壤可利用的有效水量明显高于粘质土壤,而所保蓄的无效水却很少。

影响土壤持水的因素,我们用同一吸力不同土壤的含水量分别与土壤有机质、毛管孔隙、 <0.01 毫米物理性粘粒、比表面等,应用 TQ-21 型以及 Z-2H 型电子计算机进行相关分析(表 4)得出:

土壤有机质含量与土壤持水能力在 0—15 巴范围内呈极密切正相关,相关系数高达 $0.924^{**} \pm 0.047$ 。说明土壤有机质愈多,土壤中吸持水分能力较强的有机胶体愈多,故土壤持水量愈高。因此,土壤持水量的大小强烈受土壤有机质的影响。

土壤质地与土壤持水量有密切关系。经相关分析得出,土壤持水量与 <0.01 毫米物理性粘粒和比表面的相关系数分别为 $0.768^* \pm 0.134$ 和 $0.872^* \pm 0.090$ 。表现为土壤质地愈粘重,土壤持水量愈高,同时曲线的坡度也愈缓和。

表 4 上海地区主要土壤持水量与某些物理性质的相关性 (r)

Table 4 Correlation between moisture capacity and some physical properties of main soils in Shanghai area

土壤水分吸力(巴) Soil water suction (bar)	有机质与含水量 O. M. and water content	毛管孔隙与含水量 Capillary pore space and water content	<0.01 mm 物理粘粒与含水量 <0.01 mm physical clay and water content	比表面与含水量 Specific surface area and water content
0.01	0.980**	0.818*	0.567	0.771*
0.10	0.953**	0.870*	0.504	0.671
0.20	0.951**	0.828*	0.574	0.731
0.30	0.993**	0.727	0.698	0.817*
0.40	0.924**	0.624	0.798*	0.884**
0.50	0.908**	0.579	0.852*	0.925**
0.60	0.894**	0.554	0.875**	0.942**
0.70	0.883**	0.544	0.883**	0.948**
0.80	0.860*	0.519	0.897**	0.952**
0.90	0.840*	0.491	0.906**	0.953**
1.00	0.876**	0.538	0.860*	0.916**
3.00	0.933**	0.557	0.820*	0.917**
6.00	0.958**	0.603	0.778*	0.894**
15.00	0.984**	0.680	0.749	0.893**
\bar{r}	0.924**	0.638	0.768*	0.872*
$S_{\bar{r}}$	± 0.049	± 0.126	± 0.134	± 0.090

注: $n = N - 2 = 5$, $r_{0.01} = 0.875$, $r_{0.05} = 0.755$, $r_{0.1} = 0.669$ 。

土壤毛管孔隙数量多少与土壤持水量也有一定正相关,相关系数为 0.638 ± 0.126 。特别在低吸力下 (<0.2 巴) 相关系数较高,达 $0.839^* \pm 0.028$ 。说明低吸力下土壤持水一定程度上取决于毛管孔隙的毛细管作用和土壤结构。

由此可见,土壤持水能力主要决定于土壤有机质含量和土壤质地,其次是毛管孔隙数量。在低吸力下,主要决定于土壤有机胶体吸附作用以及土壤结构的影响。随着吸力升高土壤持水量除强烈受有机胶体吸附作用的影响外,还与土壤质地即粘粒含量和土壤比表面积分子引力吸水有极为密切关系。

表 5 上海地区主要土壤水分有效含量与物理性质的相关性 (r)

Table 5 Correlation between available water content and physical properties of main soils in Shanghai area

处 理 Treatment	重力水 Gravitational water		有效水 (毛管水) Available water (Capacity water)				无效水 Unavailable water (>15 bar)
	(<60 mbar)	(0—60 mbar)	全有效水 Total available water (0.06—15 bar)	正常生育有效水 Available water for normal growth (0.06—1.00 bar)	速效性有效水 Rapidly available water (0.06—6 bar)	迟效性有效水 Slowly available water (6—15 bar)	
有机质与不同有效水含量相关性 Correlation between organic matter and different available water content	0.6423	0.3553	-0.8573*	-0.3019	-0.7426	-0.1287	0.9843**
<0.01mm 颗粒含量与不同有效水含量相关性 Correlation between <0.01 mm physical clay contents and different available water content	-0.0722	0.6138	-0.9024**	-0.8656*	-0.8980**	-0.1082	0.7461
比表面与不同有效水含量相关性 Correlation between soil specific surface and different available water content	0.7150	0.5857	-0.9626**	-0.7023	-0.8967**	-0.0935	0.8911**
平均 Average			-0.9074 0.0528	-0.6233 0.2900	-0.8458 0.0893	-0.1101 0.0177	0.8738 0.1200

注: $n = 5$; $r_{0.1} = 0.6694$, $r_{0.05} = 0.7545$, $r_{0.01} = 0.8329$, $r_{0.001} = 0.8745$ 。

对土壤水分的有效含量而言,土壤有机质、 <0.01 毫米物理性粘粒、比表面积均与可利用的全有效水(0.06—15 巴吸力范围)、速效性有效水(0.06—6 巴吸力范围)、正常生育有效水(0.06—1 巴吸力范围)含量呈负相关,而与 >15 巴的无效水含量呈密切正相关($\bar{r} = 0.8738^{**} \pm 0.1200$) (表 5)。其相关程度,全有效水($\bar{r} = -0.9074^{**} \pm 0.0528$) $>$ 速效性有效水($\bar{r} = -0.8458^* \pm 0.893$) $>$ 正常生育有效水($\bar{r} = -0.6233 \pm 0.2900$)。而与迟效性有效水(6—15 巴吸力范围)则不相关($\bar{r} = -0.1101 \pm 0.0177$)。不同影响因子的相关程度,以 <0.01 毫米物理性粘粒含量为最高($r = -0.8887^{**} \pm 0.0201$)、土壤比表面次之($r = -0.8539^* \pm 0.1353$),而有机质含量的影响相对略低($r = -0.6339 \pm 0.2932$)。

2. 土壤有效孔径分布及其影响因素 土壤有效孔径分布在不收缩的土壤上,可由土壤水分特征曲线求得各级不同大小孔隙的容积^[7]。对于了解土壤通气和透水、土壤水分吸持、移动以及水分吸收的难易有重要意义。

从表 6 看出,在 0.06—15 巴全有效水范围内,特别在 0.06—3 巴内,砂质土壤形成的有效水孔隙明显较多,而形成的细小无效水孔隙(<0.0002 毫米)则相对较少;反之,粘质土壤形成的有效水孔隙比砂质土壤少得多,而无效水孔隙则相对增多。经相关分析得出:

表 6 上海地区主要土壤有效孔径分布情况 (单位: %)

Table 6 The distribution of available pore space of main soils in Shanghai area

土壤名称 Soil type	水分吸力(巴) Water suction (bar)								
	≤ 0.015	0.015— 0.06	0.06— 0.3	0.3— 0.6	0.6— 3.0	3.0— 6.0	6.0— 15.0	0.06— 15.0	>15
	孔 径 (mm) Diameter of pore space								
	>0.2	0.2— 0.05	0.05— 0.01	0.01— 0.005	0.005— 0.001	0.001— 0.0005	0.0005— 0.0002	0.05— 0.0002	<0.0002
沙 夹 黄 Percolating paddy soil	3.4	2.8	10.0	6.7	14.4	3.1	3.7	37.9	9.5
黄 夹 沙 Percolating paddy soil	4.6	2.7	9.3	3.4	12.4	4.3	4.0	33.5	14.0
黄 泥 头 Permeable paddy soil	7.8	3.3	7.9	3.4	7.4	4.5	4.3	27.4	18.6
沟 干 泥 Permeable paddy soil	6.6	2.6	6.0	3.4	10.5	4.5	5.6	30.0	16.3
青 黄 泥 Permeable paddy soil	6.2	2.7	8.2	4.6	7.5	3.4	4.5	28.2	19.5
青 紫 泥 Waterlogged paddy soil	6.2	1.9	7.5	5.2	5.3	4.1	4.7	26.8	22.9
青 泥 土 Waterlogged paddy soil	4.8	2.5	7.3	4.1	4.9	3.9	2.8	23.0	26.9

注: 孔径 >0.2 的孔隙性能是水分移动快, 通气良好; 0.2—0.05 孔径为水分可为根系吸收, 易移动; 0.05—0.005 的为水分可为根系利用, 移动迟缓, 毛管作用强; 0.005—0.0005 的为水分难为根系利用, 细菌也难发育; 0.0005—0.0002 的为水分难为根系利用, 迟效水; 0.05—0.0002 为有效水孔隙; <0.0002 为无效水孔隙。

0.06—15 巴吸力范围的 0.05—0.0002 毫米直径的全有效水孔隙与 >15 巴的 <0.0002 毫米直径的无效水孔隙数量呈极密切的负相关,相关系数为 -0.972** (图 2)。<0.0002 毫米直径的无效水孔隙数量并与 0.05—0.0005 毫米速效有效水孔隙呈极密切负相关 ($r = -0.934^{**}$) 故大小孔隙互为消长。相关分析说明,无效水孔隙与 0.2—0.05 毫米通气孔隙以及 0.0005—0.0002 毫米迟效有效水孔隙没有相关关系。

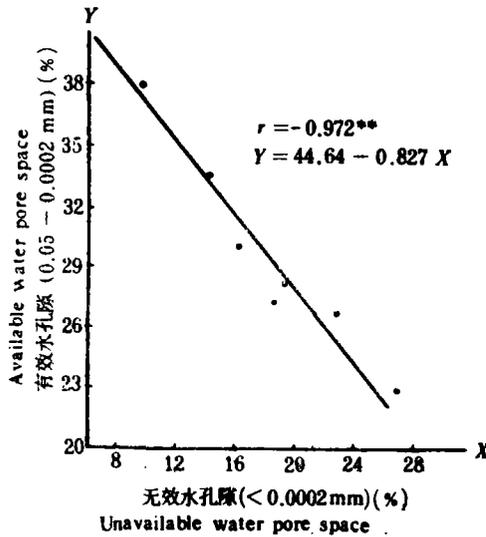


图 2 有效水孔隙和无效水孔隙相关性

Fig.2 Correlation between available water pore space and unavailable water pore space

关于不同因子对各级有效孔隙形成的影响程度,我们分别与土壤有机质、<0.01 毫米物理性粘粒、<0.001 毫米粘粒、土粒比表面等进行了相关分析得出,>0.05 毫米的易于通气的孔隙以及 0.0005—0.0002 毫米的迟效有效水孔隙受上述因子的影响较小。而速效性有效水孔隙 (0.05—0.0005 毫米) 及全有效水孔隙 (0.05—0.0002 毫米) 分别与土壤有机质、<0.01 毫米物理性粘粒、<0.001 毫米粘粒、土粒比表面均呈负相关,其相关系数分别为 $-0.905^{**} \pm 0.038$ 、 $-0.846^* \pm 0.013$ 、 $-0.951^{**} \pm 0.016$ 、 $-0.943^{**} \pm 0.013$ 。而无效水孔隙分别为 0.984^{**} 、 0.749 ($p = 0.1$)、 0.921^{**} 、 0.893^{**} 。这表明,土壤有机质愈多,质地愈粘,土壤形成的有效水孔隙愈少,细小的无效水孔隙愈多。

3. 土壤水容量及其影响因素 土壤吸持水分对植物的有效性,不在于含水量的高低,而在于土壤水分吸力的大小。同样的水分吸力表明作物根系吸水不论在什么土壤上所耗费的能量是相同的,故作物长势较为一致。一般以土壤持水曲线的斜率 $\frac{d\theta}{ds}$ (θ 为含水量, s 为土壤吸力),即水容量 (也叫容水度) 表示吸力变化所释出或吸入的水量^[7]。因土壤持水曲线是非线性的,故各吸力范围的水容量也不相等。同样的吸力差,低吸力时土壤释出水量较多,作物吸水耗能少;高吸力时土壤释出水量减少,作物吸收同样的水量将耗费成倍的能量。对于不同质地的土壤来说,砂质土壤因颗粒较粗,形成的大孔隙较多,因此持水曲线的坡度较陡,水容量较大;而粘质土壤因吸持水分较多,且孔径分布均匀,特

表 7 上海地区主要土壤的水容量及蒸发强度

Table 7 Water capacity and evaporation intensity of main soils in Shanghai area

土壤名称 Soil type	土壤水容量 (毫升/巴·克) Soil water capacity (ml/bar·g)				蒸发强度 (毫米/天) Evaporation intensity (mm/day)
	0.015—0.06 巴 (易移动, 重力水) Move easily gravitational water	0.06—1.00 巴 正常生育有效水 (田持→生长阻碍点) Available water for normal growth (field capacity-retarding point for growth)	0.06—6.00 巴 速效性有效水 (田持—早凋点) Rapidly available water (field capa- city-temporarily wilting point)	6.0—15.0 巴 迟效性有效水 (早凋—永凋点) Slowly available water (temporarily wilting point-per- manent wilting point)	
沙夹黄 Percolating paddy soil	0.489	0.188	0.046	0.003	1.77
黄夹沙 Percolating paddy soil	0.511	0.153	0.042	0.004	1.83
黄泥头 Permeable paddy soil	0.622	0.147	0.037	0.004	1.94
沟干泥 Permeable paddy soil	0.489	0.116	0.036	0.005	1.87
青黄泥 Permeable paddy soil	0.533	0.153	0.037	0.004	1.97
青紫泥 Waterlogged paddy soil	0.378	0.150	0.037	0.004	1.96
青泥土 Waterlogged paddy soil	0.489	0.145	0.035	0.003	2.05

别是细小孔隙较多, 因此持水曲线的坡度平缓, 故水容量相对较小 (表 7)。

同一吸力范围的水容量是指全部充满同样吸力范围当量孔隙的水分容积。故某级吸力下当量孔隙是水容量的体积百分数, 二者可以相互推求¹⁾, 且呈极密切正相关, 相关系数为 $0.974^{**} \pm 0.029$ 。

土壤水容量还与土壤有机质及土壤质地有一定关系。特别是 0.06—1.0 巴吸力下的正常生育水容量以及 0.06—6.0 巴吸力下速效水水容量与土壤有机质、<0.01 毫米物理性粘粒、<0.001 毫米粘粒、比表面的相关系数分别为 -0.535 ± 0.337 、 $-0.880^{**} \pm 0.025$ 、 $-0.786^* \pm 0.177$ 、 $-0.803^* \pm 0.149$ 。从相关程度来看, 土壤质地对孔隙分级起直接的影响, 因此相关程度相对较高, 而有机质的影响则相对小一些。但有机质、土壤质地对较大孔隙内的重力水水容量以及迟效水水容量没有明显的相关性 (表 8)。

4. 土壤蒸发强度以及影响因素 土壤蒸发是在太阳辐射热等气象因素的作用下, 通过水汽扩散到大气中去的物理过程。土壤蒸发强度除与气象条件有关外, 还与土壤性质、土壤的含水量高低、吸出释出的水容量、孔径分布、有机质、质地等均有密切关系。

当土壤含水量不同时, 土壤蒸发强度随着土壤含水量的降低而迅速降低, 二者的相关系数高达 0.968^{**} ($n = 18$) (图 3)。因此, 土壤蒸发模系数 (= 土壤蒸发量/水面蒸发量) 亦随着土壤含水量的降低从 0.8 到 0.1, 与土壤含水量相关系数亦高达 0.969^{**} ($n = 18$)

1) 某级吸力范围的水容量 = $\frac{\text{某吸力范围 } d_{i+1} - d_i \text{ 级孔隙率}}{\text{土壤容重} \times \text{土壤吸力差(巴)}}$ 。

表 8 上海地区主要土壤含水量与某些物理性质相关性 (r)

Table 8 Correlation between water capacity and some physical properties in Shanghai area

处 理 Treatment	有机质 (%) O.M.	<0.01mm 物理性粘粒(%) <0.01mm physical clay	<0.001mm 粘粒 (%) <0.001mm clay	比表面 (m ² /mg soil) Specific surface area
0.015—0.06 巴吸力下不同土壤含水量 (重力水) At 0.015—0.06 bar suction soil water capacity (gravitational water)	-0.227	0.105	0.058	0.077
0.06—1.0 巴吸力下水容量(正常生育水) At 0.06—1.0 bar suction water capacity (normal growth water)	-0.297	-0.862*	-0.660	-0.697
0.06—6.0 巴吸力下水容量(速效水) At 0.06—6.0 bar suction water capacity (rapidly available water)	-0.773*	-0.897**	-0.911**	-0.908**
6—15 巴吸力下水容量(迟效水) At 6—15 bar suction water capacity (slowly available water)	-0.207	0.372	0.116	0.157

注: n = 5, r_{0.01} = 0.8745, r_{0.05} = 0.7545, r_{0.1} = 0.6694。

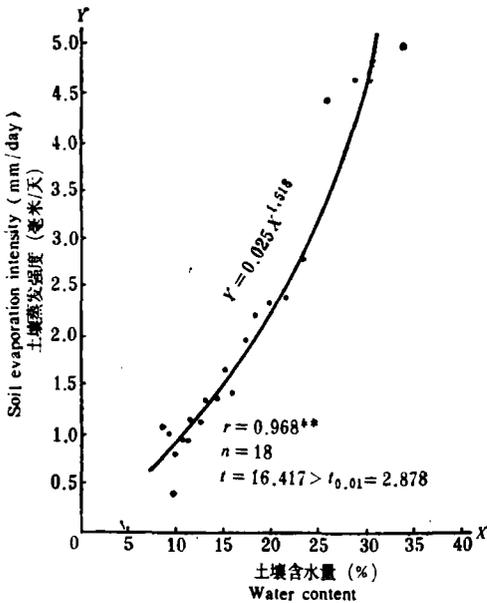


图 3 土壤蒸发强度和土壤含水量关系

Fig. 3 Relationship between the evaporation intensity of soil and its water content

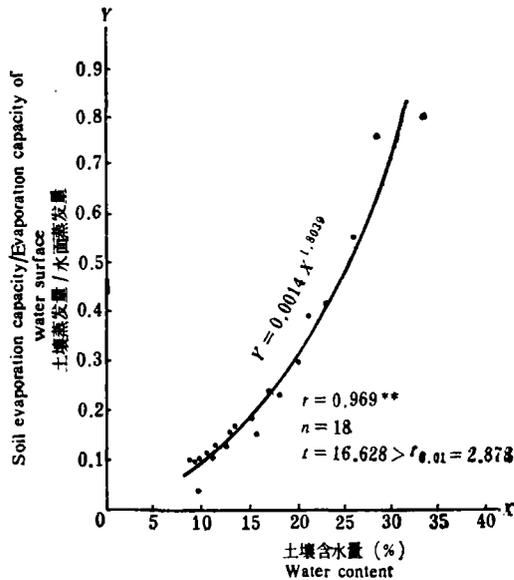


图 4 土壤蒸发量/水面蒸发量与土壤含水量关系

Fig. 4 Relationship between the ratio of soil evaporation capacity and evaporation capacity of water surface and soil water content

(沙夹黄等 7 种土壤平均, 1979 年 7 月 23—8 月 10 日连续晴天室外测定)

测定条件: 日照 11.4 ± 2.0 小时, 相对湿度 81.1 ± 1.9%, 风速 3.9 ± 1.3 米/秒, 水面蒸发 8.0 ± 1.2 mm/天。

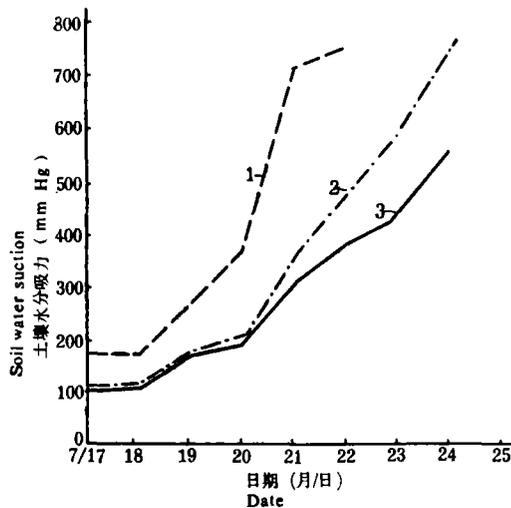
(The average of 7 soils, tested in the field from July 23 to August 10 of 1979. Tested condition: Sunshine 11.4 ± 2.0 hours; relative humidity 81.1 ± 1.9%; wind speed 3.9 ± 1.3m/sec, evaporation capacity of water surface: 8.0 ± 1.2mm/day)

(图 4)。

7 种土壤的蒸发强度列入表 7。土壤蒸发强度与孔径分布有极为密切的关系, 经相关分析, 其表现为与较大的有效水孔隙 (0.05—0.003, 0.05—0.0005 和 0.05—0.0002 毫米) 呈极密切负相关 ($r = -0.900^{**} \pm 0.095$), 而与土壤持水的细小孔隙 (<0.003 , <0.001 , <0.0005 和 <0.0002 毫米) 呈密切至极密切正相关 ($r = 0.936^{**} \pm 0.045$), 并随着孔径的变小, 即从 <0.003 到 <0.0002 毫米, 其相关性逐渐增高, 其 r 从 0.872^* 增至 0.973^{**} 。这说明砂质土壤的孔径分布, 大孔隙多, 小孔隙相对较少。故毛细管作用较弱, 因此蒸发强度相对较低; 粘质土壤形成的细小孔隙多, 毛细管作用较强, 有利于提高非饱和水的传导度, 因此蒸发强度相对较高。

土壤蒸发强度与不同吸力时水容量的关系是不一样的。相关分析表明, 土壤蒸发强度与吸力为 0.015—0.06、0.06—1.0、0.06—6 和 0.06—15 巴时水容量的相关系数分别为 -0.023 、 -0.408 、 -0.857^{**} 和 -0.936^{**} 。这说明土壤蒸发强度与土壤有效水水容量呈负相关。土壤有效水水容量大, 亦表明土壤较大孔隙多, 故蒸发强度较低。

土壤蒸发强度与土壤质地和有机质亦有密切的关系。相关分析说明, 土壤蒸发强度与 <0.01 毫米物理性粘粒、 <0.001 毫米粘粒、比表面均呈正相关, 相关系数分别为 0.717 ($p = 0.1$)、 0.911^{**} 、 0.878^{**} 。这说明土壤质地愈细, 形成的较多细小孔隙的毛管张力象无数只小水泵将土壤水经毛细管传导至表层汽化散失。土壤蒸发强度与土壤有机质的相关分析亦呈极密切正相关, 相关系数高达 0.972^{**} 。这是因为供应蒸发的净能量还受表土的反射性能、放射性能、热传导性能等的影响。土壤中有机质愈多, 土壤颜色愈深, 则土



1. 重壤: <0.01 mm 物理性粘粒 57.4%(55.3—59.5%)
Heavy loam: <0.01 mm physical clay-57.4%
2. 中—重壤: <0.01 mm 物理性粘粒 45.9%(44.0—45.9%)
Medium-heavy loam: <0.01 mm physical clay-45.9%
3. 轻壤: <0.01 mm 物理性粘粒 24.4%
Light loam: <0.01 mm physical clay-24.4%

图 5 土壤不同质地水分吸力上升情况

Fig. 5 Water suction curves of the soils with different textures

壤吸收热能的效率提高,这就相对增加了土壤水分汽化的热量,故蒸发强度亦相应增高。

5. 影响土壤水分吸力上升的因素 土壤水分吸力上升快慢与土壤质地有一定关系。根据分析,与 <0.01 毫米物理性粘粒、 <0.001 毫米粘粒、比表面大小均呈正相关。相关系数分别为0.672, 0.390, 0.440。这是由于质地愈细,土壤毛细管作用愈强,蒸发量相对增多,故土壤水分吸力上升较快(图5)。

土壤水分吸力上升快慢与同吸力范围的有效孔径及土壤水容量均呈负相关,相关系数分别为 -0.575 和 -0.877^{**} ,即同吸力范围土壤有效孔隙愈多,土壤水容量愈大,则表明土壤释出的水量较多。因此,水分吸力上升愈慢。粘质土壤由于土壤分子引力和毛管张力作用强烈,故虽能保持较多水分,但土壤水容量较小,而且蒸发强度又相对较大,故土壤水分吸力上升很快,因此作物吸水比在砂质土壤将耗费更多能量,而更易缺水,抗旱尤为迫切,必须引起注意。

三、结 论

1. 土壤水分吸力与含水量呈负相关。土壤持水量,低吸力下主要决定于有机质含量及其有机胶体吸附作用及土壤结构的影响。高吸力下除与有机胶体吸附作用外,还与土壤质地即粘粒含量多少和比表面积大小的分子引力有密切关系。

2. 土壤有效孔径分布,砂质土壤形成较大的有效水孔隙多,而细小的无效水孔隙少。粘质土壤则相反。土壤有机质、粘粒含量、颗粒比表面均与土壤有效水孔隙呈负相关。而与无效水孔隙呈正相关。土壤中有效水孔隙与无效水孔隙互为消长。土壤有机质愈多,土壤质地愈粘重,则形成的细小无效孔隙愈多,而有效孔隙较少。

3. 土壤水容量可从土壤持水曲线的斜率求得。土壤水容量呈非线性变化,一般低吸力下释出水量较多,高吸力下较少。且砂质土有效水容量明显高于粘质土壤。土壤水容量主要受土壤质地的影响。

4. 土壤蒸发强度随含水量的降低而迅速降低。土壤蒸发强度与较大孔隙呈负相关($r = -0.900^{**} \pm 0.095$),而与细小孔隙呈正相关($r = 0.936^{**} \pm 0.045$)。砂质土壤形成的较大孔隙多,较小孔隙少,故蒸发强度低;反之,粘质土壤则较高。土壤有机质多易吸热,故蒸发强度亦相应增高。

5. 土壤水分吸力上升快慢主要与土壤的质地和水容量有关。质地愈粘重,土壤水容量愈小,蒸发强度亦高,土壤吸力上升较快。故粘质土壤更易缺水,抗旱尤为迫切。

参 考 文 献

- [1] 方正三等,1963: 负压计的原理构造设计及其应用。科学仪器,第1卷3期,333—343页。
- [2] 方正三,1964: 非饱和土壤水分的能量关系,可利用性及其运动。科学通报,第4期,306—315页。
- [3] 中国科学院南京土壤研究所水分组,1976: 土壤湿度计的原理及其应用。土壤,第4期,228—233页。
- [4] 朱祖祥,1979: 土壤水分的能量概念及其意义。土壤学进展,第1期,1—18页。
- [5] 陈志雄、汪仁真,1979: 中国几种主要土壤的持水性质。土壤学报,第16卷3期,277—281页。
- [6] 日本土壤物理性测定委员会编,(翁德衡译,1979): 《土壤物理性测定法》。156—157页。科学技术文献出版社重庆分社。
- [7] D. 希勒尔著(华孟、叶和才译,1981),1971: 《土壤和水》。66—69页,农业出版社。

STUDIES ON THE CHARACTERISTICS OF MOISTURE RETENTION OF MAIN SOILS IN SHANGHAI AREA

Yang Jin-lou, Zhu Lian-long and Zhu Ji-cheng

(Institute of Soil and Fertilizer, Shanghai Academy of Agricultural Science)

Summary

The characteristics of moisture retention of main soils in Shanghai area have been studied by tension plate method (0-1 bars) and pressure membrane method (1-15 bars). Results showed that: In general, soil water suction was conversely correlated with soil water content. Under the low water suction, the soil water-holding capacity was dependent mainly on the content of organic matter, the adsorption of organic colloids and the influence of soil structure; while under the high water suction, it was closely related to the soil texture (i.e. the content of clay) and the molecular attractive force of specific surface area as well as the adsorption of organic colloids.

The soil water content was decreased with the increase of soil water suction. However the evaporation intensity of soil was decreased with the decrease of soil water content. Soil water content, evaporation intensity and soil water suction were closely related to soil texture. The heavier the soil texture, the more small pores were formed; the higher the evaporation intensity, the faster the water suction rised. For the same amount of water absorbed by crop, more energy were consumed by crops on the clayey soil than that on the sandy soil. Therefore, the crops on the clayed soil is liable to suffer from drought, and adequate irrigation is even more urgently needed for the crops on this soil.