

# 母质的两层性对土壤持水性能的影响

赵沛伦

## 提 要

层次性土壤在自然界有广泛的分布。本文采用土柱法研究了两层性土壤的持水性能。实验结果表明,细粒土壤下垫有粗粒土壤时,上部细粒土壤的持水能力有明显的提高,可以超过最小持水量而得到若干补充水量。两层土壤孔隙的大小相差愈大,此种补充水量愈多。如重壤土被中砂垫底,上部155厘米厚土层可增加97—196毫米水量;被轻壤垫底,只增加30毫米水量。如土层排列相反,粗粒土壤被细粒土壤垫底时,则各自保持自身固有的持水能力。实验还表明,空气—土质界面对提高土体持水能力的作用相当于地下水位所起的作用。在邻近空气—土质界面之上,水分处于饱和,整个土柱剖面水分分布类似地下水位之上的毛管上升带一样。

关于土壤持水性能的研究已有大量的资料。但研究对象多是质地比较均匀一致的土壤。至于质地变化很大的层次性土壤的持水性能,迄今还研究的极少。

正如很多研究者所指出的,层次性土壤在自然界有着广泛的分布。从对土壤持水性能的影响来看,其中最有意义的是细粒土层下垫有粗粒土层。因为,在这种排列情况下,可使上部细粒土层的持水能力显著地大于其单独存在情况下所固有的持水能力(相当于该土层的最小持水量),而得到某些补充水量。这种现象首先被А.Ф.Лебедев[1]所指出,并称如此方式所保持的水分为毛管悬着水。以后В.Я.Стапренс[2]研究过该种水分的性质。

应该强调指出,当细粒土层下垫有粗粒土层,而且二者的交界面在根系活动层的中部或下部时,该界面不仅使上部土层持水性能显著增高,并且由此对土层的透水性能、通气性能、蒸发性能、对植物的供水性能、养分的淋失以及对整个土壤生成发育过程,都会产生很大影响。若在灌区,确定灌溉定额也与此有所联系。此外,发育在上述层状母质上的盐渍土改良中的灌水洗盐和排水问题,也应考虑到两种土质交界面的作用和影响。从农业生产的要求来看,此种界面的存在,对于保水保肥,防止或减少其向深层渗漏亦必有一定的作用。

因此,深入研究母质两层性对土壤持水性能的影响以及该现象发生的实质,不论对于研究所在地区的土壤和土壤水分状况,或对于充分利用所在地区土壤水分资源以及提高作物的产量,都具有很重要的意义。

阐明所述现象的理论依据是拉普拉斯(Лаплас)公式:

$$p = p_0 \pm a \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$ ——毛细管弯液面曲率的主要半径;

$p_0$ ——标准表面压力 (即水平面的表面压力);

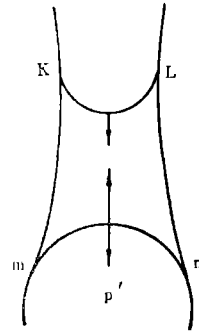
$p$ ——在该弯液面曲率下的表面压力;

$a$ ——该液体的表面张力。

根据拉普拉斯公式, 凸液面的表面压力 > 平液面的表面压力 > 凹液面的表面压力。对于凹液面而言, 曲率半径大的凹液面的表面压力大于曲率半径小者。由此可知, 粗毛细管中凹液面的表面压力必大于细毛细管中凹液面的表面压力 (对于同一液体而言)。

当细粒土层下为粗粒土层时, 上层细毛管孔隙与下层粗毛管孔隙必有一部分相衔接, 而使细毛管孔隙扩大。在该上下两土层被湿润至最小持水量之后, 并继续从上面给水 (降雨或者灌溉)。

待停止给水后, 土层中的水分达到平衡时, 在两土层交界面之上的细粒土层中所形成的毛管水线, 如右图所示 (示意图), 其上端细孔隙中弯液面  $KL$  的曲率半径小于下端两土层交界面处粗孔隙中弯液面  $mn$  的曲率半径。根据拉普拉斯公式, 弯液面  $mn$  所具有的方向向上的表面压力大于弯液面  $KL$  所具有的方向向下的表面压力。依赖于这两个表面压力的差值 (方向向上), 支持着交界面之上细粒土层中所形成的超过最小持水量之后的毛管悬着水 (或谓支持重力水, 其重量为  $p'$ ), 免于向下层渗漏。从而提高了上部细粒土层的持水量。因为这部分补充性的悬着水也是被所处



两土层交界面上毛管水线示意图

情况下上下两毛管力之差所支配的, 故我们称之为毛管支持悬着水。

与此相反, 当粗粒土层下为细粒土层时, 就无上述现象, 所形成的交界面对上下两土层各自所固有的持水性能均无影响。而其持水性能决定于各该土层本身的性质, 并相当其最小持水量。

为了研究母质两层性对土壤持水性能影响的实质以及所形成的毛管支持悬着水的特点, 我们所进行的实验室试验, 充分证实了上述几种情况。

## 一、研究方法

实验室试验是在内径为 3 厘米的有机玻璃管中进行的。管柱高度分别为 115、190、230 和 235 厘米。采用的土质有 0.25—0.50 毫米的中砂级石英砂, 以及通过 1 毫米筛孔的重壤质土和轻壤质土。其机械组成列于表 1。

为了研究层次性土壤的持水性能, 并和均一土质的持水性能进行比较, 我们布置了以下四种试验处理: I. 均一土质的持水性能; II. 在空气—土质界面作用下的均一土质的持水性能; III. 在细粒土层被粗粒土层垫底情况下的层次性土壤的持水性能; IV. 在粗粒土层被细粒土层垫底情况下的层次性土壤的持水性能。

表 1 重壤质土和轻壤质土的机械组成

土质	盐酸洗失物 的含量(%)	各 粒 级 含 量 % 数						
		1—0.25	0.25—0.05	0.05—0.01	0.01—0.005	0.005—0.001	<0.001	<0.01
重壤	15.53	0.10	2.97	35.45	12.45	12.94	36.14	61.53
轻壤	1.78	0.05	11.34	61.41	4.84	4.35	18.01	27.20

为了便于相互比较，各处理中同一质地土层的容重和孔隙度是彼此相近的。各管柱中土质的湿润方法相同，均系通过自动给水设备从管柱上端连续加水，并在维持固定的高 5 厘米水头的情况下，自上而下逐层湿润的。加水完后，用湿润的棉花加覆一层干棉花封塞管柱上端，或者上下两端，以防止物理蒸发引起土壤水分的丢失。放置一定的时间，待管柱中水分分布达到平衡后，每经 5 厘米取土样测定湿度。图中所示的土壤湿度用土壤含水量相当于土壤容积%数和土壤孔隙%数表示。

二、管柱试验结果及其分析讨论

试验 I：均一土质的持水性能

试验 I 是测定重壤质土和轻壤质土在单一存在情况下所固有的持水性能，亦即测定其最小持水量。重壤质土和轻壤质土管柱的处理情况如表 2 所示。

表 2 重壤质土管柱和轻壤质土管柱的处理情况

管 柱	高 度 (厘米)	容 重	孔 隙 度 (%)	加水之后达到平衡时所放置的时间 (昼夜)
重 壤 质 土	190	1.33	49.81	22
轻 壤 质 土	190	1.49	43.77	19

试验结果如图 1 所示。重壤质土管柱中有深约125厘米、均匀一致的湿度带，轻壤质土管柱中有深105厘米均匀一致的湿度带。这种稳定湿度即重壤土质的最小持水量为干土重的 28.9%，土壤容积的 38.4%，或相当于土壤孔隙的 77.0%；而轻壤质土的最小持水量为干土重的 19.2%，土壤容积的 28.6%，或相当土壤孔隙的 65.0%。稳定湿度带之下，为小于最小持水量的湿度递减带。该带之下为未被湿润的深度约15 厘米的风干土层。表层由于过于疏松，因而湿度显著偏高。根据试验 II 中砂管柱上部的稳定湿度带，可以确定中砂的最小持水量为干土重的

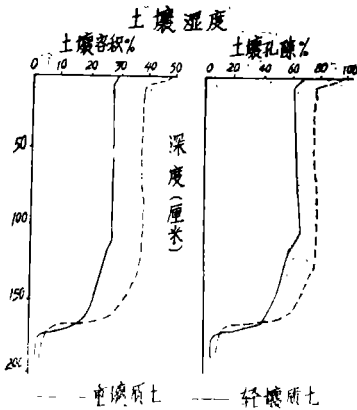


图 1 均一土质的持水性能

2.3%，为土壤容积的3.7%，或相当土壤孔隙的9.4%。

在最小持水量的情况下，重壤质土层和轻壤质土层中的水分主要被吸着力所保持，而毛管力的作用居于次要的地位。在最小持水量情况下，砂层中所形成的触点水被毛管力所保持。

试验Ⅰ：在空气—土质界面作用下，均一土质的持水性能

试验Ⅱ是研究空气—土质界面对于提高均一土质持水性能的作用。试验是这样进行的：通过自动给水设备分别给中砂管柱，轻壤质土管柱和重壤质土管柱上端连续加水，直至各管柱被充分湿透，并从下端流出相当数量的重力水之后方才停止加水。待管柱上端水面消失后，用湿润的棉花封塞管柱上端；待从管柱下端停止流出重力水之后，再封盖管柱下端。然后放置15—18昼夜，待管柱中的水分分布达到平衡时，测定土壤湿度。该试验各管柱的处理情况如表3所示。

表3 试验Ⅱ中各管柱的处理情况

管 柱	高 度 (厘米)	容 重	孔 隙 度 (%)	停止加水并从管柱下端停止流出 重力水之后，到平衡时所放置的 时间(昼夜)
中 砂	115	1.64	39.3	18
轻 壤 质 土	190	1.44	45.7	17
重 壤 质 土	190	1.33	49.8	15

达到平衡后，各管柱中土壤含水量的分布状况如图2所示。从图中可以看出，在空气—土质界面的作用下，各管柱中不同土质的持水性能都显著提高，并大大超过各自的最小持水量。

我们先从中砂管柱研究起。在该管柱中，湿度自下而上急剧减少，水分分布具有毛管曲线的性质，并可明显地区分为三个湿度带。带Ⅰ为管柱下端深约20厘米的高湿度带，土壤湿度高达38.0—38.7%，相当于土壤孔隙量的97—99%。实际上已达饱和状态。带Ⅰ之上的带Ⅱ其含水量随着高度的上升而急剧减少，其高约35厘米为湿度过渡带（或湿度递减带）。其中湿度从36.4%向上减小到4.02%。该带之上的带Ⅲ相当于中砂最小持水量的稳定湿度带。其湿度平均为3.73%。

中砂管柱下半部（带Ⅰ加上带Ⅱ）湿度的大小及水分的分布状况，类同处于自由水面之上的中砂的毛管活动层。这一点可以从А.Ф.Лебедев的试验得到证明。他根据

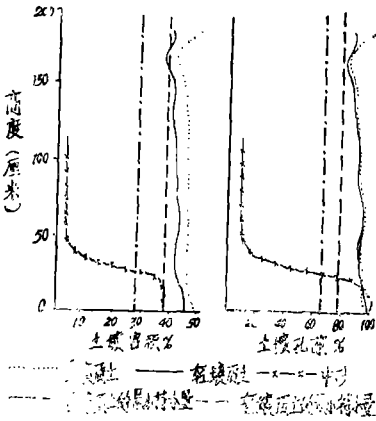


图2 在空气—土质界面作用下均一土质的持水性能

高型砂土管柱试验结果得出这样一个结论,即“不论是在水自下而上行的毛管上升情况下,或是水从上向下渗流的情况下,砂质土底部湿层的厚度及其湿度的大小是相同的”。据此,Лебедев写道:在后者的情况下“在高型砂土管柱下表面形成了水膜,该水膜的表面压力相当于自由水面的表面压力”。Стапренс也指出了这一现象,他认为,在毛管活动层中的毛管水线的静水压力下,管柱下表面所形成的各个毛管水线向下凸出的弯液面必然要彼此结合,并形成一个连续水膜,该水膜的表面压力等于自由水面的表面压力。

根据以上所述,可知砂质土管柱中,在空气—土质界面作用下,处于悬着状态的毛管水体,是被该水体上弯液面的表面压力和管柱下表面所形成的水膜所具有的标准表面压力(自由水面的表面压力)之间的差值(方向向上)所保持的,或者说是被纯粹的毛管力所保持的,并称之为毛管悬着水。在所研究的中砂管柱中,在毛管悬着水的存在情况下,55厘米深的毛管活动层的储水量(为129毫米),比该层在最小持水量情况下所具有的储水量(20.5毫米)多108.5毫米,即大6倍多。

现在我们来研究一下轻壤质土管柱和重壤质土管柱中所形成的毛管悬着水及其分布状况。从图4中可以看出,如同在中砂管柱中的一样,两个壤质土管柱下端也存在着一个深约15厘米左右近于饱和的高湿度带。其中的湿度在轻壤质土管柱中为44.1—45.7%,在重壤质土管柱中为47.4—48.6%;分别为其土壤孔隙量的96.5—100%和95.0—97.5%。该带之上为湿度高于最小持水量的湿度递减带。由于管柱高度不足,而未能得到相当于最小持水量的稳定湿度带。所得到的毛管活动层的湿度,在重壤质土管柱中比其最小持水量(38.4%)高3.0—10.2%,而在轻壤质土中比其最小持水量(28.6%)高8.5—17.0%。除去上部15厘米由于过于疏松,而湿度偏高外,175厘米毛管活动层中的储水量在轻壤质土管柱中为719毫米,在重壤质土管柱中为793毫米。这比该土层在最小持水量情况下所具有的持水量分别多出219和121毫米。

如同在上述中砂管柱中一样,在空气—土质界面作用下,轻壤质土管柱和重壤质土管柱中所形成的毛管悬着水,被同一起来源和同一性质的力所保持。不过,由于中砂土层中的孔隙显著地大于壤质土层中的孔隙,因而保持毛管悬着水的上下两表面压力的差值在壤质土中显著地比砂质土中大(根据拉普拉斯公式)。这就造成了毛管悬着水在二者中的分布状况有很大的差别:第一,壤质土中毛管活动层的高度远比砂土中大。如在中砂中毛管活动层只有55厘米高,而在两个壤土中,管柱高度虽达190厘米,尚未能得到一个完整的毛管活动层(根据很多研究者的资料,壤质土中毛管活动层的高度可以达到3—4米)。第二,壤质土中毛管活动层的湿度随高度极缓慢地降低着,而在中砂中其降低速度极剧烈。此外,湿度递减带同一高度处的含水量在壤质土中远比砂土中大。

试验Ⅱ表明,空气—土质界面对于提高土壤持水性能的作用极其显著,并相当于自由水面或者地下水对于提高毛管活动层的持水性能所起的作用。该作用的大小与决定土壤孔隙状况的土壤机械组成,结构状态及紧实度有关。在壤质土中和粘壤质土中所起的作用比砂土和粉砂土中大得多。若在过于疏松或者团粒结构极其良好的土壤中,空气



土壤孔隙量的百分数,在前二者中是相当吻合的,并都大于后者。

试验Ⅲ表明,在细粒土层被粗粒土层垫底的情况下,两种土质的交界面对于提高土壤持水性能作用的大小,决定于上下两土层孔隙大小的差别。该差别愈大时,界面上部土层中所形成的毛管支持悬着水线上下两弯液面之间的表面压力差亦愈大,则界面的持水能力就愈强。反之,则弱。由于上土层的厚度不足,因而其中未能出现相当于最小持水量的稳定湿度带,所形成的毛管支持悬着水线尚未能达到可能达到的最大高度。换句话说,交界面还未能发挥出最大的持水性能。根据Стапренс的观点,毛管支持悬着水土层的最大高度等于上下两土层所特有的完整毛管活动层的高度差。

图4表明,当重壤质土层和轻壤质土层之下为中砂时,其中所形成的毛管支持悬着水的分布曲线,与试验Ⅱ中在空气—土质界面作用下同一质地土层中所形成的毛管悬着水的分布曲线相似,而且除上部0—40厘米土层的湿度曲线彼此有偏离外,绝大部分是相互吻合的。这说明重壤质土—中砂界面和轻壤质土—中砂界面对于提高该两种壤质土层持水性能的作用,略小于或者基本上接近于空气—土质界面、自由水面和地下水对于提高该两种壤质土层持水性能的作用。

从图4中还可以明显地看出,位于界面以下的粗粒土层的湿度突然显著的小于上部细粒土层的湿度,并相当于各该粗粒土层

的最小持水量(在重壤质土—轻壤质土管柱端,由于加水量不足,交界面以下的轻壤质土层仅在上部5厘米左右达到了最小持水量,其下均小于最小持水量)。这说明在细粒土层被粗粒土层垫底的情况下,所形成的土质的两层性和交界面并不影响下部粗粒土层的持水性能,其持水性能的大小只决定于该粗粒土层本身的性质,并仍然相当于它所固有的最小持水量。至于这两个管柱中砂土层下部的湿度高于其最小持水量的原因在于,上部土层中多余的重力水下渗至管柱下端,由于空气—土质界面的作用,形成了一些毛管悬着水。这与土质的两层性和上述两种土质交界面的作用毫无联系。

#### 试验Ⅳ:在粗粒土层被细粒土层垫底的情况下,该层次性土壤的持水性能

试验Ⅳ中各管柱的处理情况如表5所示。

在达到平衡之后,各管柱中的水分分布状况如图5所示。该图表明,当粗粒土层被细粒土层垫底时,所形成土质的两层性和两种土质的交界面对上下两土层的持水性能均无任何影响,而各土层的持水性能决定于它本身的性质,并仍然相当于其固有的最小持水量。在轻壤质土—重壤质土管柱中,上部轻壤质土层的湿度不够均匀一致,而是自上

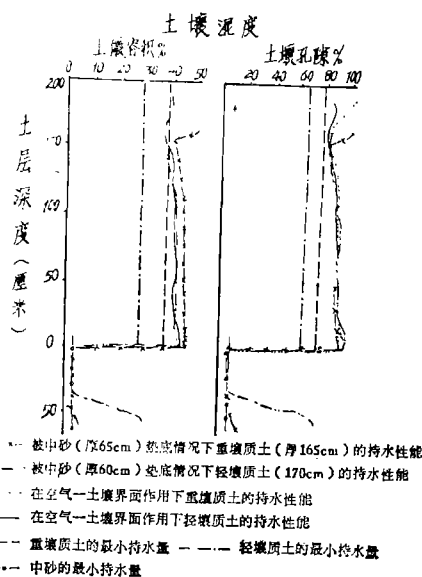


图4 在中砂垫底情况下和在空气—土质界面作用下重壤质土和轻壤土的持水性能的比较

表 5

试验Ⅳ中各管柱的处理情况

处 理	中 砂		中 砂		轻 壤	
	重 壤		轻 壤		重 壤	
土 质	中 砂	重 壤	中 砂	轻 壤	轻 壤	重 壤
土层厚度 (厘米)	85	150	85	150	95	140
容 重	1.63	1.38	1.62	1.48	1.49	1.38
孔 隙 度 (%)	39.3	47.9	40.0	44.2	43.8	47.9
加水后达到平衡时所放置的时间 (昼夜)	27		17		22	

而下逐次稍有增加，并略高于其最小持水量；此外，下部重壤质土层上端的湿度也略高于其最小持水量。这是由于加水后放置时间不够长，因而上部土层中的重力水尚未来得及全部渗入下层，即水分分布尚未达到平衡。

在试验Ⅳ中，水分这种分布状况是完全可以理解的。由于与上部粗粒土层相应的粗孔隙中弯液面的表面压力（方向向下）大于与下部细粒土层相应的细孔隙中弯液面的表面压力（方向向上），在这种情况下，上部粗粒土层中超过其最小持水量的重力水，必然渗入下部的细粒土层中去。所以在这种排列情况下，上部粗粒土层的持水可能性不能超过其最小持水量。至于下部细粒土层，由于其中的孔隙比上部粗粒土层中的平均孔隙要小得多，因而细粒土层的持水性能是不会受到粗粒土层的任何影响的。总之，在粗粒土层被细粒土层垫底的情况下，土质的两层性对该层次性土壤的持水性能没有影响，不能提高它的持水性能。

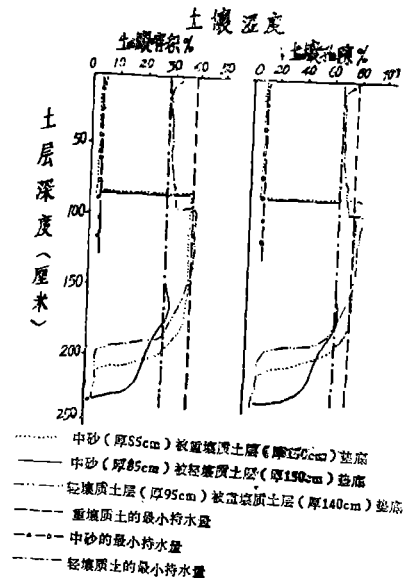


图 5 粗粒土层被细粒土层垫底时该层次性土壤的持水性能

### 三、结 论

发育在层次性沉积物上的土壤在自然界有着广泛的分布。其中使我们感兴趣的是细粒土层之下垫有粗粒土层，因在这种情况下，母质的两层性能明显地提高上部细粒土层的持水性能，使该土层湿润到最小持水量之后而得到某些补充性的水量，形成所谓毛管支持悬着水。实验室的试验表明，在该种情况下，若上下两土层土壤孔隙大小的差别愈大时，则上土层在湿润到最小持水量之后所得到的补充水量也就愈多。例如，分别被中砂垫底的厚155厘米的重壤质土层中和轻壤质土层中这种补充性水分的最大数量 高达97和196毫米，而在为轻壤质土垫底的厚155厘米的重壤质土层中，这种补充性水分的最大数



量仅达30毫米。

在上述土层排列情况下,土质的两层性并不影响下部粗粒土层的持水性能,而其持水性能仍然相当于该土层的最小持水量。

若与上述土层排列情况相反,当粗粒土层为细粒土层垫底时,土质的两层性不影响上下两土层的持水性能,其持水性能仍然相当于各自所固有的最小持水量。

在重壤质土层和轻壤质土层分别为中砂垫底的情况下,土质的两层性对于提高该壤质土层持水性能的作用,略小于或相近于在自由水面或者地下水作用下,由各该壤质土所形成的毛管活动层所具有的持水性能。

### 参 考 文 献

- [1] Лебедев А.Ф.; Поцвенные и грунтовые воды, Изд. АН СССР, 4-е, М.-Л., 1936.
- [2] Стапрене В.Я.: Митраця капиллярно-связанной влаги в зоне аэрации, Рига, 1954.

## The Effect of Double-layer of Parent Material on Water-holding Capacity of Soils

Zhao Peilun

### ABSTRACT

Layered soils has been an extensive distribution in the nature. The water-holding capacity of soils with double-layer is studied using column method in this paper. Experimental results show that fine texture soil layer overlying coarse texture soil layer can markedly increase water-holding capacity and get some supplement of water after reaching field capacity. The greater the difference in pore size between the upward and downward layers, the more the supplement of water in the upward fine soil layer. For instance, heavy loam soil can increase the supplement of water of 97—196mm overlying sandy layer and only 30mm overlying light loam layer.

If coarse texture soil is overlying fine texture soil each soil is to remain their inherent water-holding capacity without any supplement of water.

Experiment also shows that the function of the interface of air-soil is similar to that of ground water table in raising water-holding capacity in soil profile. Above the interface of air-soil water distribution profile in entire soil column is similar to the capillary rising blet above ground water table.